

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Leugim Corteze Romio

**APERFEIÇOAMENTO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA
ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO**

Santa Maria, RS
2019

Leugim Corteze Romio

**APERFEIÇOAMENTO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA ESTIMATIVA DE
PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Concentração em Áreas Clássicas da Fenomenologia e suas Aplicações, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Física**.

Orientadora: Prof^a Dr^a Débora Regina Roberti

Santa Maria, RS
2019

Romio, Leugim Corteze
Aperfeiçoamento de Modelos Numéricos para Estimativa
de Propriedades Térmicas do Solo / Leugim Corteze Romio.
2019.
95 p.; 30 cm

Orientador: Débora Regina Roberti
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Física, RS, 2019

1. Condutividade Térmica do Solo 2. Difusividade
Térmica do Solo 3. Fluxo de Calor no Solo 4. Conteúdo de
Água no Solo 5. Modelagem Numérica I. Roberti, Débora
Regina II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2019

Todos os direitos autorais reservados a Leugim Corteze Romio. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

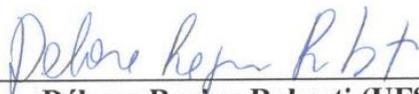
E-mail: leugimcr@bol.com.br

Leugim Corteze Romio

**APERFEIÇOAMENTO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA ESTIMATIVA DE
PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Concentração em Áreas Clássicas da Fenomenologia e suas Aplicações, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Física**.

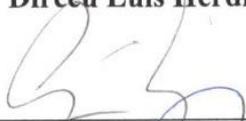
Aprovado em 02 de setembro de 2019:



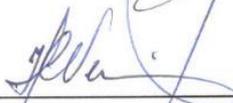
**Débora Regina Roberti (UFSM)
(Presidente/Orientador)**



Dirceu Luis Herdies (INPE)



Gervasio Annes Degrazia (UFSM)



Haroldo Fraga de Campos Velho (INPE)



Lidiane Buligon (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

Agradecimentos

A Deus, ser Supremo, ao qual devo a vida.

A minha esposa Arlita, pela compreensão nos momentos de anseio e ausência, e pelas palavras de incentivo.

Aos demais familiares, pelo incentivo e carinho.

Aos amigos, que de alguma maneira me ajudaram a passar pelos momentos difíceis, com conversas e descontração.

A minha orientadora, prof. Debora, pelos valiosos ensinamentos e conselhos, pela paciência e dedicação que sempre dedicou a mim.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação, pelos ensinamentos e amizade.

Aos colegas de turma, em especial, da sala "s/n", pela amizade e companheirismo em todos os momentos.

Ao PPG Física e à UFSM, pela estrutura oferecida.

RESUMO

APERFEIÇOAMENTO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO

AUTOR Leugim Corteze Romio
ORIENTADORA: Débora Regina Roberti

A compreensão das propriedades térmicas do solo, difusividade (k), capacidade volumétrica (c_v) e condutividade (λ), é importante em aplicações de diversas áreas do conhecimento relacionadas, principalmente, a interação solo-planta-atmosfera. Estudos para compreender o que afeta o valor destas propriedades estão relacionados, frequentemente, ao fechamento do balanço de energia na superfície, onde estas propriedades são essenciais para determinação do fluxo de calor na superfície do solo. Além disso, o conhecimento das propriedades térmicas do solo é fundamental para estimativas da temperatura do solo, variável importante em estudos de germinação e crescimento de plantas, além de estudos nas engenharias. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo estimar as propriedades térmicas do solo, por meio de uma abordagem alternativa auxiliada por modelagem numérica com dados experimentais coletados em dois sítios experimentais pertencentes a região do bioma Pampa no período de um ano. Foi sugerido o acréscimo de um parâmetro empírico ao método gradiente de solução da Lei de Fourier da condução de calor, de modo a melhor representar os dados experimentais observados. A proposição dos modelos levou em consideração a análise do comportamento observado nos dados experimentais. Comparou-se os modelos propostos com modelos descritos na literatura mostrando-se melhores resultados com os modelos propostos. Ainda, realizou-se uma análise nas médias diárias a fim de verificar a existência de relação entre as propriedades térmicas do solo e o conteúdo de água no solo. Os resultados obtidos nesta tese indicaram que os modelos propostos representaram melhor os dados experimentais, em comparação a modelos presentes na literatura. Além disso, estes resultados contribuirão para estudos de trocas de energia em superfície, uma vez que a metodologia proposta melhorou a estimativa das propriedades térmicas do solo e, conseqüentemente, o fluxo de calor do solo, um componente essencial para estudos sobre fechamento do balanço energético da superfície.

Palavras-Chave: Condutividade Térmica do Solo. Difusividade Térmica do Solo. Fluxo de Calor no Solo. Conteúdo de Água no Solo. Modelagem Numérica. Bioma Pampa.

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF NUMERICAL MODELS TO ESTIMATE SOIL THERMAL PROPERTIES

AUTHOR Leugim Corteze Romio
ADVISOR: Débora Regina Roberti

Understanding the soil thermal properties, in particular, diffusivity (k), volumetric capacity (c_v) and conductivity (λ) is important in applications of several related areas, mainly soil-plant-atmosphere interaction. Studies to understand what affects the value of these properties are often related to the closure of the surface energy balance, where these properties are fundamental for determining the heat flux on the surface of the soil. In addition, knowledge of soil thermal properties is critical for soil temperature estimates, an important variable in plant germination and growth studies, as well as engineering studies. In this sense, this work aims to estimate the thermal properties of the soil, using an alternative approach aided by numerical modeling with experimental data collected at two experimental sites in the Pampa biome region over a one year period. The addition of an empirical parameter to the gradient method of solution of Fourier Law of heat conduction was suggested, in order to better represent the observed experimental data. The proposition of the models took into consideration the analysis of the behavior observed in the experimental data. The proposed models were compared with models described in the literature showing better results with the proposed model. In addition, an analysis of daily averages was performed to verify the existence of a relationship between soil thermal properties and soil water content. The results obtained in this thesis indicated that the proposed models better represented the experimental data, compared to models present in the literature. In addition, these results will contribute to surface energy exchange studies, since the proposed methodology improved the estimation of the thermal properties of the soil, consequently the heat flux of the soil, an essential component for surface energy balance closure studies.

Keywords: Soil Thermal Conductivity. Soil Thermal Diffusivity. Soil Heat Flux. Soil Water Content. Numerical Modeling. Pampa Biome.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Representação do espaço relativo ao bioma Pampa no estado do Rio Grande do Sul	20
Figura 1.2 - Imagem da Torre Experimental Instalada no Município de Pedras Altas-RS ..	24
Figura 1.3 - Instalação Sensores Município de Pedras Altas-RS	25
Figura 1.4 - Imagem da Torre Experimental Instalada no Município de Aceguá-RS	26
Figura 1.5 - Instalação Sensores Município de Aceguá-RS	27
Figura 1.6 - Sensor de Temperatura - T108	28
Figura 1.7 - Sensor de Fluxo de Calor no Solo - HFP01	29
Figura 1.8 - Sensor de Conteúdo de Água no Solo - CS616	30

ARTIGO 1

Figura 1 - Relação entre G_z a $z = -0,10 m$ e a taxa de variação da temperatura do solo em relação a profundidade ($\Delta T/\Delta z$) com $z_1 = -0,05 m$ e $z_2 = -0,15 m$	36
Figura 2 - Exemplos de ciclos diurnos de G_{exp} (Wm^{-2}) a $-0,10 m$ e T_{soil} ($^{\circ}C$) a $-0,05 m$ e $-0,15 m$ para os Dias do Ano (DOY) com diferentes características	37
Figura 3 - Fluxo de calor no solo diário (G_z) a $-0,10m$, conteúdo de água no solo (θ_{soil}) a $-0,10 m$ e temperatura do solo (T_{soil}) a $-0,05 m$ e $-0,15 m$ de profundidade	38
Figura 4 - Diagramas de dispersão entre os valores de G_{exp} (experimental) e os valores estimados obtidos pelos diferentes métodos utilizando dados de validação	42
Figura 5 - Ciclo diário médio anual para o fluxo de calor no solo a $-0.10 m$, experimental (G_{exp}) e estimado pelos métodos $M4$ e $M5$	43
Figura 6 - Relações entre a condutividade térmica do solo (obtidas pelas Equações 2 e 3) e o conteúdo de água no solo	45

ARTIGO 2

Figura 1 - Configuração das posições dos sensores de solo instalados no sítio experimental de Aceguá-RS	55
Figura 2 - Medidas de meia-hora da Temperatura do Solo ($-0,05m$, $-0,15m$ e $-0,25m$) e Conteúdo de Água no Solo ($-0,05m$, $-0,10m$ e $-0,30m$)	65
Figura 3 - Medidas de meia-hora do Fluxo de Calor no Solo ($-0,10m$ e $-0,20m$)	65
Figura 4 - Gráfico de dispersão referente a Eq. 12 (para as profundidade $-0,10m$ e $-0,20m$) utilizando λ obtido por MR	67
Figura 5 - Condutividade Térmica do Solo Diária ($0.10m$ e $0.20m$) estimados pelos métodos MG e MR	68
Figura 6 - Difusividade Térmica Diária do Solo estimada por três diferentes métodos: MA , MPS e MN_{γ}	69
Figura 7 - Valores diários de γ obtidos por MN_{γ}	70
Figura 8 - Condutividade Térmica do Solo Diária a $-0.10m$ e a $-0.20m$ agrupada por Conteúdo de Água no Solo Diário a $-0.05m$ com, respectivas, média e desvio-padrão. Bem como, funções ajustadas de Tong et al. e Zimmer et al	71
Figura 9 - Difusividade térmica diária agrupada em função do conteúdo de água no solo e, respectivos, modelos de Tikhonravova e Khitrov e Arkhangel'skaya	73
Figura 10 - Difusividade térmica diária agrupada em função do conteúdo de água no solo e, respectivos, modelos Função Polinomial de Grau 3 e de Tikhonravova e Khitrov	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Variáveis medidas, altura de instalação e modelo dos sensores instalados na torre de fluxo do sítio de Pedras Altas-RS	24
Tabela 1.2 - Variáveis medidas, altura de instalação e modelo dos sensores instalados na torre de fluxo do sítio de Aceguá-RS	26
ARTIGO 1	
Tabela 1 - Valores de λ e ε , obtidos pelos diferentes métodos e, respectivas, análises estatísticas	41
Tabela 2 - Parâmetros originais e calibrados do modelo de Tong et al. (2016), além dos índices R^2 e RMSE	46
ARTIGO 2	
Tabela 1 - Valores Estimados de λ e ε (quando disponível) para diferentes métodos e diferentes níveis de amostragem	66
Tabela 2 - Valores Estimados de k (m^2s^{-1}) e γ (ms^{-1}) para diferentes métodos e diferentes intervalos de amostragem	68
Tabela 3 - Parâmetros Estimados dos modelos de Tong et al. (2016) e Zimmer et al. (2019) para as profundidades $-0,10$ m e $-0,20$ m	72
Tabela 4 - Resultados estatísticos dos modelos de Tong et al. (2016) e Zimmer et al. (2019) para as diferentes profundidades	72
Tabela 5 - Parâmetros estimados dos modelos de Tikhonravova e Khitrov e Arkhangel'skaya	73
Tabela 6 - Resultados estatísticos dos modelos de Arkhangel'skaya e Tikhonravova e Khitrov	74
Tabela 7 - Parâmetros estimados dos modelos de Tikhonravova e Khitrov e Função Cúbica	74

LISTA DE ABREVIATURAS

α	Proporção do Saldo de Radiação
ε	Parâmetro Empírico a ser Estimado
λ	Condutividade Térmica do Solo
λ_{dry}	Condutividade Térmica de uma Amostra de Solo Seca
λ_{sat}	Condutividade Térmica de uma Amostra de Solo Saturada
ρ	Densidade
ρ_s	Densidade do Solo
τ	Porosidade do Solo
θ	Conteúdo de Água no Solo
θ_{FC}	Capacidade de Campo
θ_s	Conteúdo de Água de uma Amostra de Solo Saturada
θ_{WP}	Ponto de Murcho Permanente
ω	Frequência Radial
c	Massa Específica de Calor
c_g	Capacidade Térmica Volumétrica do Solo
c_r	Capacidade Térmica Volumétrica do Sistema Fluido-Rocha
c_v	Capacidade Térmica Volumétrica
c_w	Capacidade Térmica Volumétrica da Água
G_0	Fluxo de Calor na Superfície do Solo
G_z	Fluxo de Calor no Solo a uma profundidade z
H	Fluxo de Calor Sensível
H_L	Fluxo de Calor Latente
k	Difusividade Térmica do Solo
K_e	Número de Kersten
P	Período do Ciclo Fundamental
R_n	Saldo de Radiação
T	Temperatura (em K)
T_0	Amplitude da Onda de Temperatura da Superfície
t	Tempo (em h)
u	Taxa Volumétrica de Fluxo
w	Taxa de Infiltração de Líquido
z	Profundidade (em m)

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO	12
1.1 REFERENCIAL TEÓRICO	13
1.2 OBJETIVOS	18
1.3 MATERIAIS E MÉTODOS	19
1.3.1 Bioma Pampa	19
1.3.2 Solo e suas Propriedades	21
1.3.2.1 Solo	21
1.3.2.2 Condutividade Térmica do Solo	22
1.3.2.3 Capacidade Térmica Volumétrica	22
1.3.2.4 Difusividade Térmica do Solo	22
1.3.2.5 Conteúdo de Água no Solo	23
1.3.3 Sítios Experimentais	23
1.3.3.1 Pedras Altas-RS	23
1.3.3.2 Aceguá-RS	25
1.3.4 Sensores	27
1.3.4.1 Sensor de Temperatura	27
1.3.4.2 Sensor de Fluxo de Calor	28
1.3.4.3 Sensor de Conteúdo de Água no Solo	29
2 ARTIGO 1 - MODELO NUMÉRICO PARA ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO SOLO UTILIZANDO DADOS EXPERIMENTAIS DE CAMPO	31
Resumo	31
1 Introdução	31
2 Material e Métodos	34
2.1 Sítio Experimental	34
2.2 Modelo Proposto	35
2.2.1 Ajuste de Dados: Aproximação por Mínimos Quadrados	36
2.3 Calibração a Validação dos Modelos Numéricos	39
3 Resultados e Discussões	40
4 Conclusões	46
Apêndice A	47
Referências	48
3 ARTIGO 2 - MODELAGEM NUMÉRICA DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO A PARTIR DE DADOS EXPERIMENTAIS DE FLUXO DE CALOR E TEMPERATURA DO SOLO	52
Resumo	52
1 Introdução	53
2 Material e Métodos	54
2.1 Descrição do Sítio Experimental	54
2.2 Propriedades Térmicas do Solo	56
2.2.1 Solução Analítica: Métodos de Amplitude e Mudança de Fase	58
2.2.2 Solução Numérica	59
2.3 Propriedades Térmicas do Solo em Função do Conteúdo de Água no Solo	61
2.3.1 Condutividade Térmica do Solo em Função do Conteúdo de Água no Solo	61

2.3.2	Difusividade Térmica do Solo em Função do Conteúdo de Água no Solo	62
2.4	Calibração e Análise dos Modelos	63
3	Resultados e Discussões	64
3.1	Variáveis do Solo	64
3.2	Propriedades do Solo	65
3.2.1	Condutividade Térmica do Solo	65
3.2.1.1	Varição Diária da Condutividade Térmica do Solo	67
3.2.2	Difusividade Térmica do Solo	68
3.2.2.1	Varição Diária da Difusividade Térmica do Solo	69
3.3	Análise das Propriedades Térmicas do Solo em Função do Conteúdo de Água no Solo	70
3.3.1	Condutividade Térmica do Solo em Função do Conteúdo de Água no Solo	71
3.3.2	Difusividade Térmica do Solo em Função do Conteúdo de Água no Solo	72
4	Conclusões	75
	Referências	77
4	DISCUSSÕES	81
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	ANEXO A - MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS - MMQ	92
	ANEXO B - MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	94

1 APRESENTAÇÃO

O estudo das propriedades térmicas do solo, em especial, difusividade térmica (k) e condutividade térmica (λ) é importante em aplicações de diversas áreas do conhecimento relacionadas, principalmente, a interação solo-planta-atmosfera (EVETT et al., 2012). Pesquisas para compreender o que afeta o valor destas propriedades estão relacionadas, frequentemente, ao fechamento do balanço de energia na superfície, onde são fundamentais para determinação do fluxo de calor na superfície do solo (G_0) e temperatura do solo (OCHSNER; HORTON; REN, 2001; ALKHAIER et al., 2012; VENEGAS et al., 2013; WANG et al., 2012).

As propriedades térmicas do solo dependem de um grande número de fatores tais como, textura, composição mineralógica, presença de sal, conteúdo de água no solo, entre outros (AN et al., 2016a; CAMPBELL, 1985; de VRIES, 1956; WANG et al., 2005; ARKHANGEL'SKAYA, 2009; LU et al., 2014; TONG et al., 2016), o que pode tornar suas estimativas difíceis. Para controlar estes fatores, em geral, os modelos são estimados utilizando-se dados de experimentos realizados em laboratório obtidos por técnicas de medição que incluem desde métodos de estado-estacionário tais como o “método de placa aquecida protegida” (PRATT, 1969) a métodos transientes incluindo fonte de calor simples linear (de VRIES; PECK, 1958; MONDAL et al., 2015) e dupla prova por pulso de calor (BRISTOW et al., 1994; KLUITENBERG et al., 1995; WELCH et al., 1996). Um desafio tem sido obter estimativas destas propriedades térmicas do solo *in situ* (ou seja, em experimentos de campo) em que as propriedades do solo não são bem caracterizadas como um resultado das limitações técnicas (OCHSNER et al., 2006; PENG et al., 2015) e/ou climáticas.

O estudo e a compreensão das propriedades térmicas estão, também, relacionados as trocas de calor na superfície do solo. Pois, a transferência de calor influencia o regime de temperatura próximo a superfície (de VRIES apud FAROUKI, 1981). Os modelos utilizados para a estimativa do fluxo de calor no solo utilizam a teoria da condução de calor em sólidos. Nesta teoria, assume-se que o solo é equivalente a um sólido homogêneo isotrópico para o qual, em uma dimensão (vertical), o fluxo de calor pode ser estimado com auxílio da solução de uma equação diferencial parcial, denominada “Lei de Condução de Calor”. Esta equação relaciona o fluxo de calor no solo a variação da temperatura em relação a profundidade e a condutividade térmica do solo. E, a variação vertical deste fluxo de calor está relacionada a difusividade térmica do solo e a variação temporal da temperatura do solo. Entretanto, as

soluções destas equações, com frequência, não levam em consideração os possíveis efeitos não-lineares (JACKSON; KIRKHAM, 1958).

1.1 REFERENCIAL TEÓRICO

Os primeiros estudos registrados, sobre propriedades térmicas do solo, são datados do séc. XIX, um dos trabalhos é o de Forbes (1846) em que são realizados alguns experimentos iniciais de medição de temperatura em diferentes profundidades e diferentes tipos de solo.

Um século depois, Jackson e Kirkhan (1958) realizaram um estudo referente a difusividade térmica do solo considerando a teoria matemática da condução de calor em sólidos em que se assume que o solo é um sólido isotrópico para o qual, em uma dimensão, relaciona-se a difusividade térmica do solo a derivada segunda da temperatura em relação a profundidade e a derivada primeira da temperatura em relação ao tempo. Os testes foram realizados em laboratório. Os autores concluíram que o método apesar de demorado pode ser considerado satisfatório para determinação da difusividade real, porém, não para todo tipo de solo. Ainda, o uso do método trouxe à tona o fato de que os valores medidos de difusividades, mesmo que em pequenos gradientes de temperatura, podem ser aparentes e não reais.

Em relação a soluções matemáticas, Horton, Wierenga e Nielsen (1983) a partir de experimentos de laboratório e de campo avaliaram diferentes métodos de estimativa da difusividade térmica do solo, utilizando modelos que consistiam em soluções para a equação de condução de calor unidimensional para um meio isotrópico considerando diferentes condições de contorno. Por fim, o trabalho destacou a qualidade das estimativas de difusividade térmica em relação aos dados de entrada necessários.

Neste caminho, Gao et al. (2003) estudaram a solução de uma equação de condução-convecção térmica do solo (denominado método CCM) aplicando os métodos harmônico e transformada de Laplace para sua solução. O método sugere a existência de processos condutivos e convectivos, independentes entre si, cujas equações podem ser resolvidas separadamente e, posteriormente, serem associadas.

Gao et al. (2008) utilizaram dois algoritmos de transferência térmica para investigar a variação de temperatura diurna vertical em um caso de difusividade térmica heterogênea vertical e o considerável fluxo de água existente no solo quando a evaporação superficial é grande. Um algoritmo assume que o solo é verticalmente homogêneo e leva em conta somente a condução térmica enquanto o outro considera a heterogeneidade vertical da difusividade térmica no solo acoplando os processos condutivo e convectivo. Os autores identificaram que

o segundo algoritmo estima de forma mais realística a temperatura do solo enquanto que o primeiro, na média, superestima.

Com o objetivo de reduzir o número de informações necessárias as estimativas, Wang e Bou-Zeid (2012) propuseram e testaram um novo esquema, o qual não requer informações adicionais relativas a temperatura, para complementar as medições das placas calorimétricas. O método proposto é baseado na solução fundamental da equação do calor unidimensional e no princípio de *Duhamel*¹ para incorporar as condições de contorno não-homogêneas. Por ser completamente independente da temperatura do solo, a abordagem evita uma fonte potencial de erros nas medições e no cálculo do armazenamento. O método possui, como única propriedade térmica envolvida a difusividade térmica do solo, a qual, segundo eles, é uma função fraca em relação a quantidade de água no solo e pode ser aproximada como constante. Os resultados da comparação realçaram que a nova abordagem é robusta e capaz de preservar a boa acurácia da abordagem convencional com informações de entrada reduzidas.

Em geral, a análise das propriedades térmicas do solo requer o uso de sensores. Um dos primeiros trabalhos a mencionar o uso destes instrumentos é o de Philip (1961), o qual desenvolveu uma teoria simples de medição de fluxos de calor em referência a uma solução exata conhecida na teoria potencial de meios compostos. Sugerida para ser implementada em sensores de medição de fluxo de calor a fim de minimizar os erros de medição.

Ao estudar sensores de pulso de calor *dual-probe*, Bristow (1998) demonstrou sua capacidade de obter medições das propriedades térmicas do solo e do conteúdo de água no solo feitos em solo arenoso submetido a ciclos de secagem e umedecimento. Por meio da comparação entre os dados coletados pelos sensores e as medidas obtidas de estimativas independentes realizadas utilizando procedimentos físicos baseados na densidade do solo, fração de calor e volume dos constituintes do solo. Verificando, deste modo, a capacidade dos sensores de fornecer medições confiáveis das propriedades do solo como função do conteúdo de água no solo.

No trabalho de Cobos e Baker (2003), os autores explicam o processo utilizado para obtenção de valores de fluxo de calor no solo, bem como, os possíveis problemas no sistema. Descrevendo o desenho básico de uma placa de fluxo de calor e o processo de cálculo para obtenção dos valores de fluxo, além de explicar possíveis problemas que podem ocorrer para sua coleta.

¹ Em matemática, na solução de equações diferenciais parciais, o princípio de *Duhamel* consiste em um método para obtenção de soluções para equações não homogêneas que evoluem linearmente. (FRITZ, 1982)

A condutividade e a difusividade térmicas do solo foram, também, analisadas em relação ao conteúdo de água no solo. Johansen (1977) propôs o conceito de condutividade térmica normalizada e estabeleceu uma relação entre a condutividade térmica do solo (λ) e o *número de Kersten* (K_e)² o qual está vinculado ao conteúdo normalizado de água no solo. Além disso, o modelo está associado as condutividades térmicas nos estados seco (λ_{dry}) e saturado (λ_{sat}). Salientando que, o modelo foi inicialmente proposto para solos não saturados.

Posteriormente, Côté e Konrad (2005) propuseram um modelo generalizado para sua estimativa, tendo por base o conceito de condutividade térmica normalizada, a partir do modelo de Johansen (1977). A diferença básica entre o modelo deles e o de Johansen (1977) consiste na forma como é definido o *número de Kersten*, em que os autores propõem uma alternativa não-logarítmica. Os autores, também, sugerem uma nova forma de estimar a condutividade térmica do solo seco (λ_{dry}) por meio de uma função linear. O modelo integra efeitos de porosidade, grau de saturação, conteúdo mineral, entre outros.

Além dos modelos analíticos, Lu et al. (2014) propuseram um modelo empírico para estimativa da condutividade térmica do solo (λ) em função do conteúdo de água no solo (θ) - $\lambda(\theta)$ - contendo três parâmetros empíricos que podem ser calibrados em relação aos dados experimentais ou derivados da textura e densidade do solo. O modelo foi testado em 17 diferentes tipos de solos, apresentando, segundo os autores, bons resultados para os diferentes tipos. Além disso, os autores sugerem que o modelo pode facilmente ser incorporado em pacotes de *softwares* de simulação para estudos de processos acoplados de calor e água em solos.

Tong et al. (2016), a partir de modelos existentes na literatura, propuseram um modelo empírico para estimativa da condutividade térmica do solo em função do conteúdo de água no solo e da porosidade do solo para utilização em modelos de larga escala onde estão disponíveis somente estas duas informações. Ainda, avaliaram o modelo em comparação a outros existentes na literatura e, por fim, realizaram alguns testes incorporando-o ao modelo *SiB2* (*Simple Biosphere Model* – v2). Os resultados indicaram que o modelo consegue descrever a condutividade térmica do solo sobre todo o intervalo de conteúdo de água no solo para diferentes porosidades, obtendo resultados semelhantes a modelos “mais complexos” (que requerem um número maior de propriedades físicas do solo) presentes na literatura.

² O número de Kersten (K_e) é um parâmetro a ser estimado em algumas equações empíricas que relacionam a condutividade térmica do solo ao conteúdo de água no solo. O nome é devido ao primeiro pesquisador a supor esta relação (JOHANSEN, 1977).

A difusividade térmica do solo (k) relacionada ao conteúdo de água no solo (θ) foi estudada por Arkhangel'skaya (2009), a qual propôs um modelo para estimativa da difusividade térmica em função do conteúdo de água no solo. O modelo tem por base uma função de distribuição do tipo Log-Normal. O modelo sugerido pode ser calibrado para a região de duas formas, conhecendo-se as propriedades físicas do solo, ou ajustando-se os parâmetros para os dados experimentais. Os resultados obtidos indicaram que, para as regiões em estudo, o modelo proposto representou melhor os dados experimentais em comparação a funções de potência ou polinomiais existentes na literatura.

Recentemente, Liu et al. (2019) realizaram uma pesquisa para determinar a difusividade térmica do solo através das variações de temperatura *in situ*. O método foi estabelecido de modo a quantificar o fluxo vertical de água com as difusividades térmicas do solo obtidas pelos métodos de amplitude e mudança de fase, a fim de investigar as implicações dos movimentos de água na estimativa da difusividade térmica do solo.

Além dos estudos relacionados a modelos analíticos e empíricos, foram realizados diferentes trabalhos envolvendo modelagem numérica. Um dos primeiros a mencionar modelos numéricos é o de Shiozawa e Campbell (1990) o qual descreveu uma metodologia para estimativa numérica da condutividade térmica do solo que incorpora alguns efeitos não lineares relativos ao tempo de resfriamento que ocorre em sensores de medição de condutividade térmica, utilizados em experimentos tanto laboratoriais quanto de campo.

Posteriormente, Chen e Kling (1996) propuseram uma modelagem numérica para estimativa da difusividade térmica aparente do solo, utilizando a equação de variação da temperatura, para um meio isotrópico, em uma dimensão, supondo algumas simplificações. Em seguida, sugerindo uma opção numérica para a solução da difusividade térmica aparente. Os autores identificaram que o desempenho do modelo é enfraquecido se for usado um valor muito pequeno de difusividade, em vez de um valor muito grande.

Na mesma época, Welch et al. (1996) desenvolveram uma teoria para estimativa numérica das propriedades térmicas do solo aplicável a sensores de pulso de calor. A ideia consiste em substituir um parâmetro multidimensional por uma otimização univariada, sem a necessidade de se calcular derivadas para estimativas pontuais.

Diferentes trabalhos envolvendo desde análise de modelos propostos, relação entre estas propriedades e o fechamento do balanço de energia na superfície, bem como análise destas propriedades para regiões específicas têm sido realizados. Liebethal e Foken (2007), por exemplo, avaliaram seis abordagens de parametrização do fluxo de calor no solo, identificando que, dentre as abordagens analisadas, as que melhor estimaram o fluxo de calor

no solo foram a “simple measurement” (medição simplificada) e o método *Force-Restore* os quais aproximaram-se significativamente dos dados medidos. Uma das abordagens para estimar o fluxo de calor no solo a partir do saldo de radiação e da amplitude diurna da superfície do solo também se mostrou satisfatória durante os períodos diurnos. O trabalho enfatizou que a parametrização do fluxo de calor no solo tem o potencial de produzir resultados significativos, desde que sejam levadas em consideração todas as condições e restrições relativas a cada método/modelo utilizado.

Variações sazonais e transitórias foram estudadas por Otunla e Oladiran (2013) em uma investigação destes efeitos sobre a difusividade térmica do solo em função da variação da umidade do solo, do ponto de vista que permita estabelecer uma relação empírica entre estes dois parâmetros. Além disso, os pesquisadores avaliaram seis algoritmos para estimativa da difusividade térmica com a intenção de determinar o mais apropriado para o cálculo da difusividade térmica do solo em dois sítios equatoriais. O estudo mostrou que os valores da difusividade térmica sofrem variação em relação ao conteúdo de água no solo, em outras palavras, com o aumento do conteúdo de água no solo também aumenta a difusividade térmica do solo. A pesquisa indicou ainda que a acurácia dos modelos era afetada com as chuvas.

Li et al. (2017) utilizaram dados observados para analisar as diferenças no regime dos solos de duas regiões (árida e semiúmida). Os resultados indicaram que as amplitudes tanto das temperaturas do solo quanto a gradiente de temperatura são maiores na região árida e o fluxo de calor no solo e a condutividade térmica do solo são menores nesta região em comparação a região semiúmida. A relação entre a condutividade térmica do solo e a umidade do solo, nas duas regiões, foi fortemente correlacionada (99%). Ainda, o coeficiente de correlação entre o gradiente de temperatura do solo e, ambos, saldo de radiação e fluxo de calor no solo foi de 99% de significância.

Estimativas horárias foram realizadas por Venegas et al. (2013) para o fluxo de calor no solo a nível de superfície utilizando três modelos e dois métodos. Os resultados mostraram que os picos de G_0 ocorreram próximos a 1 p.m. Segundo os autores, o modelo que apresentou o melhor desempenho foi o de “Santanello e Friedl” seguido dos modelos relação G_0/R_n e *Force-Restore*. Os autores indicaram, também, que a metodologia de placas calorimétricas mostrou comportamento semelhante a metodologia de referência “medição de temperatura em perfil de solo”.

Russel et al. (2015) analisaram os impactos dos métodos para o cálculo do fluxo de calor no solo no fechamento do balanço de energia na superfície. Utilizando dados medidos

em uma região de arbustos durante o verão, foram avaliados nove métodos que variavam desde calorimetria convencional de calor armazenado a métodos que derivavam diretamente da equação de transferência de calor. Com base nos resultados observados, foi possível recomendar, dentre os métodos analisados, o uso do método calorimétrico e do método baseando nas Funções de Green.

An et al. (2016a) realizaram a estimativa do fluxo de calor no solo para solo nu, utilizando os modelos *Force-Restore*, Condução-Convecção (CCM) e Harmônico e o método de placas calorimétricas. O método de referência utilizado foi o “gradiente calorimétrica” que consiste na estimativa do fluxo de calor no solo pelo método gradiente a uma dada profundidade (z) acrescido de uma quantidade de calor armazenada (ΔS), entre z e a superfície. Os resultados mostraram que o modelo Harmônico reproduz bem os valores da curva de G_0 para dias de céu claro. Entretanto, forneceu grandes erros em dias nublados e/ou chovendo. O modelo *Force-Restore* trabalhou bem sob condições de chuva, porém teve dificuldades em estimar G_0 em dias sem chuva. Contrariamente ao modelo Condução-Convecção que obteve valores considerados aceitáveis para dias sem chuva e apresentou erros em dias chuvosos. Ainda, o método de placas calorimétricas foi o que melhor reproduziu os valores do fluxo de calor no solo indiferente das condições climáticas, entretanto, este método é diretamente influenciado pela profundidade de instalação das placas.

Ainda, Zhang e Wang (2017) apresentaram uma revisão bibliográfica sobre condutividade térmica do solo e os principais fatores que a influenciam. Seguido dos principais modelos preditivos de condutividade térmica. Ao todo, 13 modelos foram analisados, incluindo modelos teóricos, empíricos e semi-empíricos. Os modelos foram avaliados para solo arenoso com diferentes condições de umidade por comparação entre as condutividades térmicas estimadas e os valores medidos obtidos da literatura.

1.2 OBJETIVOS

Considerando a importância das propriedades térmicas do solo, em especial, a condutividade e a difusividade, objetiva-se, com este trabalho, estimá-las por meio de modelagem numérica, utilizando-se dados experimentais de fluxo de calor no solo e temperatura do solo obtidos em duas localidades inseridas na região do bioma Pampa. Conjuntamente, também, será realizada a análise da relação existente entre essas propriedades térmicas e o conteúdo de água no solo. A apresentação dos resultados dar-se-á a partir de dois artigos brevemente descritos a seguir.

O primeiro artigo intitulado *Modelo Numérico para Estimativa da Condutividade Térmica do Solo utilizando Dados Experimentais de Campo* cujo objetivo é propor um modelo numérico para estimativa da condutividade térmica do solo a partir de medições experimentais de fluxo de calor no solo e temperatura do solo. O novo modelo numérico é baseado no método Gradiente, modificado pela adição de um parâmetro empírico ε . A condutividade térmica do solo é obtida por meio de um ajuste linear em relação aos dados experimentais pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), evitando indeterminações numéricas em situações cuja gradiente de temperatura do solo ou o fluxo de calor no solo estão muito próximos a zero. Por fim, foi analisada a relação entre a condutividade térmica do solo e o conteúdo de água no solo.

O segundo artigo intitulado *Modelagem Numérica de Propriedades Térmicas do Solo a partir de Dados Experimentais de Fluxo de Calor e Temperatura do Solo* tem por objetivo estimar a condutividade e a difusividade térmicas do solo utilizando modelagem numérica e analítica, através de medidas experimentais obtidas em campo no período de um ano no Sul do Brasil. Para tanto, a condutividade térmica do solo foi estimada utilizando dois métodos de solução numérica da Lei de Condução de Calor: Gradiente e Gradiente modificado e, a difusividade térmica do solo, foi estimada utilizando dois métodos analíticos: Amplitude e Mudança de Fase; e, dois métodos de solução numérica da equação geral que descreve a variação de temperatura em um sólido isotrópico unidimensional. Por fim, foi analisada a variação dessas propriedades em função do conteúdo de água no solo.

1.3 MATERIAIS E MÉTODOS

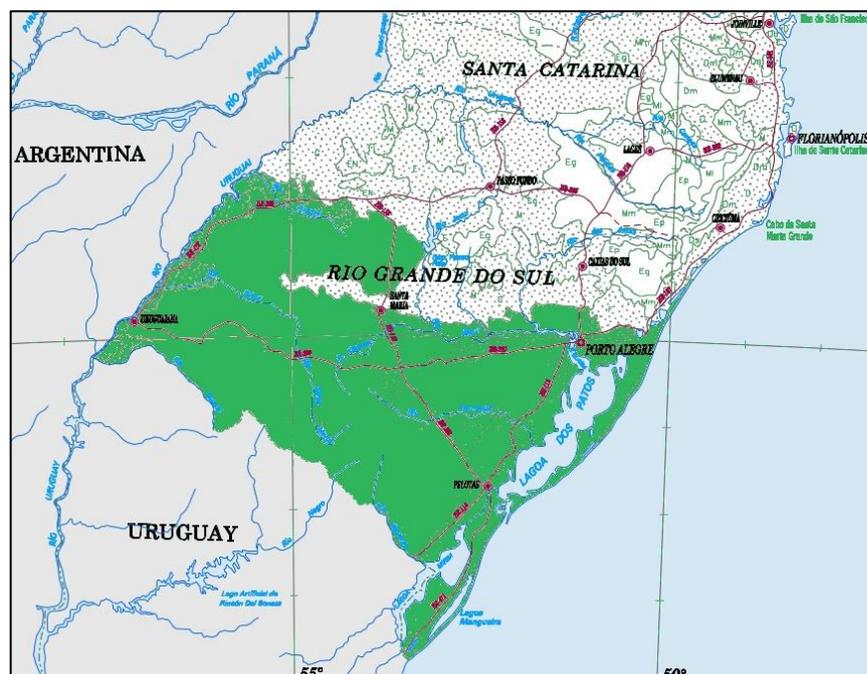
1.3.1 Bioma Pampa

O bioma Pampa (também chamado de Campos Sulinos) abrange regiões de três países da América do Sul: Argentina, Brasil e Uruguai. No Brasil encontra-se restrito ao estado do Rio Grande do Sul, ocupando, aproximadamente, 63% do território do Estado (176.496 km^2), delimitando-se com o bioma Mata Atlântica na metade norte do Estado (IBGE, 2004). Este bioma apresenta fauna e flora próprias além de grande biodiversidade, havendo aproximadamente 3000 espécies vegetais, 100 mamíferos e 500 aves (RUBERT, 2017). A Figura 1.1, traz a representação de ocupação do bioma Pampa no Estado do Rio Grande do Sul (em verde). Seu reconhecimento como bioma é recente, a partir de 2004 quando foi desmembrado do bioma Mata Atlântica (IBGE, 2004).

Esta região, como reserva de recursos naturais, tem papel extremamente importante, em especial, para a pecuária do estado do Rio Grande do Sul. Entretanto, as áreas de campos naturais têm sido utilizadas irregularmente, em particular, pelo excesso de animais nas pastagens (BOLDRINI, 2010).

Os campos sulinos possuem como característica marcante o predomínio de vegetação campestre com características de gramíneas (herbáceas rasteiras), além de vegetação arbustiva e regiões florestais (BOLDRINI, 2010).

Figura 1.1 - Representação do espaço relativo ao bioma Pampa no estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Adaptado de BRASIL (2004).

O bioma Pampa ainda é carente de estudos relacionados as propriedades físicas do solo, apenas recentemente têm sido realizadas pesquisas mais detalhadas relativas a estas propriedades, em diferentes regiões do bioma, a fim de identificar diferenças e/ou semelhanças dentro do mesmo bioma.

1.3.2 Solo e suas Propriedades

1.3.2.1 Solo

A crosta terrestre possui espessura variável, em geral não excedendo a 40 *km*. É a parte sólida da Terra, constituída de rochas e minerais (VIANELLO, 2000). Na camada mais superficial da crosta terrestre encontra-se o solo. Uma estrutura complexa composta de materiais minerais e orgânicos. O solo é, também, a camada de integração entre a crosta terrestre e a atmosfera. O conhecimento de suas propriedades é de suma importância para a vida no planeta, em especial, as propriedades térmicas, pois é a partir delas que se pode calcular, com maior acurácia, a temperatura do solo. Bem como, torna-se possível avaliar a influência das propriedades no balanço de energia na superfície.

As principais propriedades são condutividade térmica, a qual pode ser caracterizada como a medida da capacidade de conduzir calor (OKE, 1987), difusividade térmica, a qual pode ser descrita como a capacidade de difundir as influências térmicas (OKE, 1987) e capacidade calorífica volumétrica, que pode ser definida como a quantidade de calor necessária para aumentar uma unidade de volume (m^3) de uma substância através de uma variação de 1 grau (*K*) na temperatura (OKE, 1987). Estas propriedades, em geral, variam com a temperatura, e indiretamente, com a umidade do solo, a composição do solo, a estrutura física do solo e a cobertura de vegetação.

O Brasil possui em sistema de classificação de solos, cuja organização iniciou-se em meados dos anos 50, tendo por base os documentos do sistema americano de classificação. Desde seu princípio aos dias atuais, significativas modificações e análises de solo têm sido realizadas nas diferentes regiões do Brasil (EMBRAPA, 2006).

Segundo esta classificação a região experimental de Pedras Altas-RS possui dois tipos de solos (CUNHA et al., 2005):

- Cambissolo; e,
- Neossolo.

Os dois solos são classificados como de Horizonte Diagnóstico Subsuperficial. O Cambissolo é compreendido como solo formado por material mineral, com horizonte tipo B incipiente, ou seja, que sofreu alguma alteração seja física ou química em grau não muito elevado, mas suficiente para que ocorram alterações de cor ou de estrutura, e que mais da metade do volume dos sub-horizontes não consiste na estrutura de rocha original (EMBRAPA, 2006).

O Neossolo, também, constituído de material mineral, ou material orgânico, pouco evoluído e sem apresentar algum tipo de horizonte B diagnóstico (EMBRAPA, 2006).

A região experimental de Aceguá-RS possui o tipo de solo (BAGGIO, 2017):

- Vertissolo.

O Vertissolo é um tipo de solo constituído por material mineral com horizonte vértico entre 25 e 100 *cm* de profundidade e relação textural insuficiente para caracterizar um B textural (EMBRAPA, 2006).

1.3.2.2 Condutividade Térmica do Solo

A condutividade térmica do solo pode ser definida como a quantidade de calor que passa, em uma unidade de tempo, através de uma unidade de seção cruzada de área do solo sob uma unidade de gradiente de temperatura aplicada na direção deste fluxo de calor (FAROUKI, 1981). A utilização do termo condutividade está relacionada ao calor ser transferido, principalmente, por condução em circunstâncias normais.

A definição de condutividade térmica implica um estado em condição estável em que a temperatura em um certo ponto não varia com o tempo. Se, entretanto, a temperatura estiver variando com o tempo, significa que o próprio solo deve estar ganhando ou perdendo calor. Se a temperatura de um elemento de solo é aumentada com o tempo, então, algum fluxo de calor está sendo utilizado para tal fim, a quantidade dependerá da capacidade térmica do elemento (FAROUKI, 1981).

1.3.2.3 Capacidade Térmica Volumétrica

A capacidade térmica por unidade de volume do solo é a energia na forma de calor necessária para variar a temperatura desta unidade de volume em 1 °C. Ela é calculada como sendo o produto entre a massa específica de calor (c) e a densidade (ρ) (FAROUKI, 1981):

$$c_v = \rho \cdot c$$

1.3.2.4 Difusividade Térmica do Solo

A razão entre a condutividade térmica e a capacidade térmica volumétrica do solo é denominada de difusividade térmica do solo, a qual é um parâmetro governante para um dado

estado do solo, sua relação é dada pela razão entre a condutividade térmica e a capacidade térmica volumétrica do solo (FAROUKI, 1981):

$$k = \frac{\lambda}{c_v}$$

Valores altos de difusividade térmica implicam em uma capacidade de mudança de temperatura rápida e considerável.

1.3.2.5 Conteúdo de Água no Solo

O conteúdo de água no solo (também conhecido como teor de água no solo ou umidade do solo) é caracterizado como o volume de água contido em um determinado volume de amostra de solo (FAROUKI, 1981; EMBRAPA, 2006).

1.3.3 Sítios Experimentais

1.3.3.1 Pedras Altas-RS

O sítio experimental está localizado no município de Pedras Altas ($31^{\circ} 43' 56'' S$; $53^{\circ} 32' 36'' O$, 395 m) no interior do estado do Rio Grande do Sul (Brasil) - Figura 1.2.

O clima típico na região é classificado como subtropical húmido Cfa de acordo com Köppen (PEEL et al., 2007). A temperatura média anual é de $17^{\circ}C$, apresentando temperaturas negativas, durante a manhã, no inverno ($\sim -3^{\circ}C$) e temperaturas altas ($\sim 40^{\circ}C$) durante a tarde, no verão. O regime de precipitação é bem distribuído ao longo do ano.

Figura 1.2 - Imagem da Torre Experimental Instalada no Município de Pedras Altas-RS



Fonte: Zimmer T. - Laboratório de Micrometeorologia UFSM - L μ met

O solo é caracterizado como arenoso (sandy loam) com 59,30% de areia; 0,81% argila; 39,89% barro/lodo. Os valores médios das propriedades físicas do solo a 0,05m e a 0,15m de profundidade são: capacidade de campo $\theta_{FC} = 0,28 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$; ponto de murcho permanente $\theta_{WP} = 0,03 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$; porosidade do solo $\theta_s = 0,42 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$; e, densidade do solo $\rho_s = 440 \text{ kg m}^{-3}$. A vegetação predominante, na região de instalação da estação, é de pastagem.

A Tabela 1.1, apresenta as variáveis observadas no experimento de Pedras Altas-RS, bem como, as profundidades de instalação e os instrumentos utilizados.

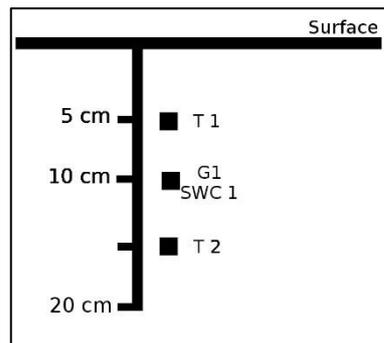
Tabela 1.1 - Variáveis medidas, altura de instalação e modelo dos sensores instalados na torre de fluxo do sítio de Pedras Altas-RS

Variável	Profundidade Medição ³	Instrumento(s)
Temperatura do Solo	-0,05m	T108 (Campbell Scientific)
	-0,15m	
Fluxo de Calor no Solo	-0,10m	HFP01 (Hukseflux)
Conteúdo de Água no Solo	-0,10m	CS616 (Campbell Scientific)

³ O sinal negativo (-) foi utilizado para indicar a instalação dos sensores abaixo da superfície do solo.

Os sensores utilizados para medição da temperatura foram instalados a $-0,05\text{ m}$ e a $-0,15\text{ m}$ abaixo da superfície de modo que o sensor de fluxo de calor no solo ficasse na posição média entre eles, ou seja, $-0,10\text{ m}$. Uma representação esquemática da instalação é ilustrada na Figura 1.3.

Figura 1.3 - Instalação Sensores Município de Pedras Altas-RS. *T* indica sensor de temperatura, *G* indica sensor de fluxo de calor no solo e, *SWC* sensor de conteúdo de água no solo



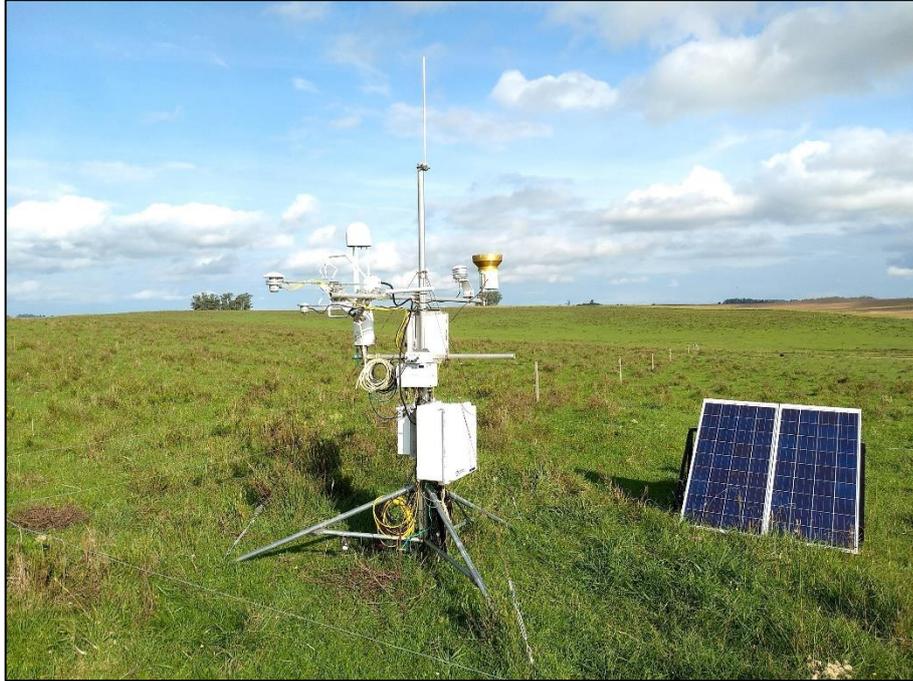
Fonte: Autoria Própria

A torre recebia os dados a cada intervalo de 1 minuto e calculava a média para um intervalo de 30 minutos. Em outras palavras, armazenava um dado que correspondia ao valor médio de um intervalo de meia-hora. Estes dados foram coletados durante o período de janeiro a dezembro do ano de 2015. Entretanto, o período de 17 de setembro de 2015 a 5 de novembro de 2015 não foi utilizado na análise devido a problemas, nos dados, relacionados a falhas na coleta. Ressalta-se que nenhuma técnica de preenchimento foi utilizada para estes casos.

1.3.3.2 Aceguá-RS

O sítio experimental está localizado no município de Aceguá ($31^{\circ} 39' 12''S$; $54^{\circ} 10' 30''O$, 170 m) no interior do estado do Rio Grande do Sul (Brasil) - Figura 1.4. A região possui solo classificado como Vertissolo (CUNHA et al., 2015) e a vegetação predominante, na região de instalação da estação, é de pastagem.

Figura 1.4 - Imagem da Torre Experimental Instalada no Município de Aceguá-RS



Fonte: Brem T. - Laboratório de Micrometeorologia UFSM - L μ met

O clima pertence a zona do franco Cfa, temperado úmido com verão quente, classificação de Köppen (NIMER, 1989), com temperaturas do ar que variam de mínimas negativas em torno de -1°C a máximas em torno dos 40°C e precipitação climática em torno de 1500 mm ao ano.

A Tabela 1.2, apresenta as variáveis observadas no experimento de Aceguá-RS, bem como as profundidades de instalação e os instrumentos utilizados.

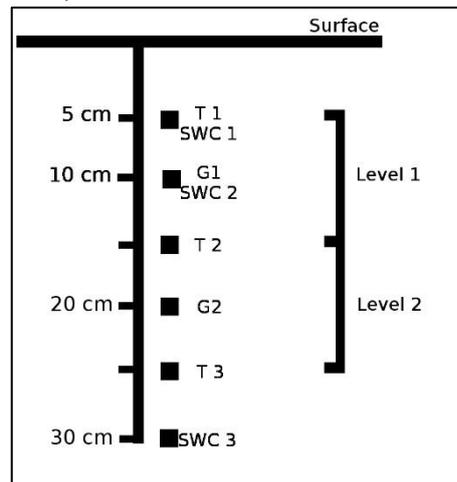
Tabela 1.2 - Variáveis medidas, altura de instalação e modelo dos sensores instalados na torre de fluxo do sítio de Aceguá-RS

Variável	Profundidade Medição	Instrumento(s)
Temperatura do Solo	$-0,05m$	T108 (Campbell Scientific)
	$-0,15m$	
	$-0,25m$	
Fluxo de Calor no Solo	$-0,10m$	HFP01 (Hukseflux)
	$-0,20m$	
Conteúdo de Água no Solo	$-0,05m$	CS616 (Campbell Scientific)
	$-0,10m$	

Os sensores utilizados para medição da temperatura foram posicionados a $-0,05m$, a $-0,15\text{ m}$ e a $-0,25\text{ m}$ abaixo da superfície, de modo que os sensores de fluxo de calor no

solo ficassem nas posições médias das temperaturas, ou seja, a $-0,10m$ e a $-0,20m$. Ainda, para o conteúdo de água no solo foram instalados sensores a $-0,05 m$ e a $-0,10 m$. Uma representação esquemática da instalação é ilustrada na Figura 1.5.

Figura 1.5 - Instalação Sensores Município de Aceguá-RS. *T* indica sensor de temperatura, *G* sensor de fluxo de calor no solo e, *SWC* sensor de conteúdo de água no solo



Fonte: Autoria Própria

A torre recebia os dados a cada intervalo de 1 minuto e calculava a média para um intervalo de 30 minutos. Em outras palavras, armazenava um dado que correspondia ao valor médio de um intervalo de meia-hora. Os dados foram coletados durante o período de janeiro (iniciando dia 18) a dezembro do ano de 2018. Falhas nas coletas são frequentes, devido a problemas de manutenção, elétricos, entre outros. Ressalta-se que nenhuma técnica de preenchimento foi utilizada para estes casos.

1.3.4 Sensores

1.3.4.1 Sensor de Temperatura

Este sensor utiliza um termistor (semicondutor sensível a temperatura) para realização de medições de temperatura no ar, solo ou água. Os sensores de temperatura utilizados em nossos experimentos foram fabricados pela empresa Campbell Scientific sendo identificados como T108 (Figura 1.6). Suas características envolvem intervalo confiável de medição entre -5°C e 95°C , com erro máximo de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$.

Figura 1.6 - Sensor de Temperatura - T108



Fonte: <https://www.campbellsci.com/108>

A instalação desse sensor no solo, em particular, requer alguns cuidados, a fim de minimizar a imprecisão dos dados coletados, tais como:

- Devido as características de medição do sensor, sugere-se que ele seja instalado de modo que a ponta de medição fique na horizontal em relação a superfície do solo;
- Em instalações rasas, próximas a superfície, recomenda-se que parte do cabo seja, também, enterrada para minimizar a atenuação do efeito de aquecimento solar do cabo acima do solo sobre a medição de temperatura; e,
- Para longas distâncias entre o sensor e o *datalogger* é importante que os cabos sejam colocados em conduítes.

Ressalta-se que estas recomendações são semelhantes para os diferentes sensores utilizados nos experimentos desta pesquisa.

1.3.4.2 Sensor de Fluxo de Calor

Este sensor é do tipo “thermopile”, o qual realiza a medição das diferenças de temperatura através de um objeto de composição cerâmico-plástica. O modelo utilizado em nossos experimentos foi fabricado pela empresa Hukseflux denominado HFP01 (Figura 1.7). Suas especificações incluem intervalo de medição de -2000 W/m^2 a 2000 W/m^2 , sensibilidade de $50 \text{ a } 70 \times 10^{-6} \text{ V/(W/m}^2)$, condição de não-estabilidade inferior a 1% ao ano e incerteza na calibração inferior a 3%.

Figura 1.7 - Sensor de Fluxo de Calor no Solo – HFP01



Fonte: <https://www.hukseflux.com/products/heat-flux-sensors/heat-flux-meters/hfp01-heat-flux-sensor>

Com a finalidade de minimizar as incertezas recomenda-se que o sensor seja instalado paralelo a superfície do solo. Além disso, a instalação deve ser tal que minimize as lacunas de ar entre o sensor e solo.

1.3.4.3 Sensor de Conteúdo de Água no Solo

O sensor de conteúdo de água no solo ou refletômetro de conteúdo de água consiste de duas hastes, de aço inoxidável, conectadas a uma placa de circuito impresso. A informação do conteúdo de água é obtida pela sensibilidade da sonda em relação a constante dielétrica do meio que envolve as hastes de prova. O modelo utilizado, para realização dos experimentos desta pesquisa, foi fabricado pela empresa Campbell Scientific sendo identificado como CS616 (Figura 1.8). Suas especificações incluem variabilidade de $\pm 0,5\%$ do conteúdo volumétrico de água em solo seco e de $\pm 1,5\%$ em solo tipicamente saturado, resolução superior a $0,1\%$ do conteúdo volumétrico de água.

Figura 1.8 - Sensor de Conteúdo de Água no Solo – CS616



Fonte: <https://www.campbellsci.com.br/cs616-reflectometer>

Importante mencionar que este sensor pode ser instalado vertical ou horizontalmente no solo dependendo do tipo de medição de conteúdo de água no solo que se pretende obter.

2 ARTIGO 1: MODELO NUMÉRICO PARA ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO SOLO UTILIZANDO DADOS EXPERIMENTAIS DE CAMPO⁴

Resumo: A condutividade térmica do solo é um importante parâmetro para a compreensão da transferência de calor no solo. É difícil realizar a medição desta propriedade *in situ* com os equipamentos disponíveis. Este trabalho tem por objetivo propor um modelo numérico para estimativa da condutividade térmica a partir de medições experimentais de fluxo de calor no solo e temperatura do solo. A Lei de Fourier foi modificada pela adição de um parâmetro empírico constante. O novo modelo numérico é baseado no método Gradiente. Numericamente, a condutividade térmica do solo é obtida por meio de um ajuste linear em relação aos dados experimental pelo Método dos Mínimos Quadrados (LSM). Este método evita indeterminações numéricas quando a gradiente de temperatura do solo ou o fluxo de calor no solo estão muito próximos a zero. O novo modelo foi testado em relação a diferentes metodologias numéricas para estimativa do fluxo de calor no solo e validade com dados experimentais de campo. Os resultados indicam que o modelo proposto representa satisfatoriamente os dados experimentais. Além disso, o trabalho mostra a influência das diferentes metodologias na avaliação da dependência da condutividade térmica em função do conteúdo de água no solo.

Palavras-Chave: Condutividade Térmica do Solo, Fluxo de Calor no Solo, Temperatura do Solo, Método Gradiente, Lei de Fourier, Conteúdo de Água no Solo.

1 Introdução

A condutividade térmica do solo é uma importante propriedade térmica que governa a transferência de calor no solo. A complexidade do solo faz com que sua condutividade térmica dependa das propriedades físicas ou químicas do solo, tais como o conteúdo de água no solo, porosidade, densidade, textura e composição mineral (Campbell, 1985). Diferentes modelos empíricos têm sido sugeridos para a estimativa da condutividade térmica do solo levando em conta essas propriedades (de Vries, 1963; Lu et al., 2014; An et al., 2016a; An et al., 2016b; Tong et al., 2016; Lu et al., 2019, Zhao et al., 2019). Em geral, estes modelos são

⁴ Artigo submetido para publicação na sua versão em Inglês.

estimados utilizando-se dados de experimentos controlados, em laboratório, por técnicas de medição que incluem métodos de estado-estacionário tais como o “método de placa aquecida protegida” (Pratt, 1969) e, métodos transientes incluindo fonte de calor simples linear (de Vries e Peck, 1958; Mondal, 2015) e dupla prova por pulso de calor (Bristow et al., 1994; Kluitenberg et al., 1995; Welch et al., 1996). Um desafio tem sido realizar estimativas da condutividade térmica do solo *in situ* (ou em experimentos de campo), em que as propriedades do solo não são bem caracterizadas como um resultado das limitações técnicas (Ochsner et al., 2006; Peng et al., 2015) e/ou condições climáticas.

Teoricamente, medições experimentais de fluxo de calor no solo e temperatura do solo *in situ* podem ser utilizadas para estimativa da condutividade térmica do solo pela Lei de Fourier da condução de calor, definida por (Carslaw e Jaeger, 1959):

$$G_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

onde G_z (Wm^{-2}) é o fluxo de calor no solo a uma dada profundidade z (m), T (K) é a temperatura do solo e λ ($Wm^{-1}K^{-1}$) é a condutividade térmica da camada de solo. Entretanto, por se tratar de dados discretos (medidos em intervalos de tempo), o gradiente de temperatura, $\frac{\partial T}{\partial z}$, pode ser obtido pela razão entre a variação de temperatura e a variação da profundidade, $\frac{\Delta T}{\Delta z} = \frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1}$. Esta metodologia é denominada de Método Gradiente (Carslaw e Jaeger, 1959; Liebenthal e Foken, 2007; Peng et al., 2015; An et al., 2016a; An et al., 2016b; Li et al., 2017). Portanto, conhecendo-se a medida do Fluxo de Calor no Solo a uma determinada profundidade z (G_z) e medidas de temperatura do solo em profundidades relativamente próximas a G_z , a Equação 1 pode ser escrita como:

$$G_z = -\lambda \left[\frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1} \right] \quad (2)$$

com $z_1 < z < z_2$ e, $T_1 = T(z_1)$ e $T_2 = T(z_2)$ representam as temperaturas nas profundidades z_1 e z_2 , respectivamente.

A estimativa experimental do fluxo de calor no solo em z é realizada, frequentemente, pelo método de placas de fluxo de calor (Ochsner, Sauer e Horton, 2006). Placas de fluxo de calor no solo são pequenos sensores em forma de discos, rígidos, de

propriedades térmicas conhecidas e constantes que são instalados horizontalmente no solo próximo a superfície. O fluxo de calor, através de uma placa calibrada, é utilizado para estimar G_z nas proximidades do solo a que a placa está inserida (Philip, 1961). Isto é, a Equação 2 é utilizada para estimar o fluxo de calor no solo em uma pequena camada do solo se o λ da placa é conhecido.

Os fabricantes de placas de fluxo de calor descrevem fatores importantes a serem considerados em um experimento para estimativa de G_z , especialmente, em um experimento de campo, no qual diversos procedimentos não são controlados, tais como a profundidade exata de instalação e a resistência de contato na interface placa-solo (Sauer, 2002; Mayocchi e Bristow, 1995; Fuchs e Hadas, 1973). Os sensores de fluxo de calor, por exemplo, são instalados, tipicamente, a profundidades que variam em um intervalo de $0.05m$ a $0.20m$ abaixo da superfície do solo. Sendo o intervalo considerado mecanicamente estável para garantir boas condições de medição além de não sofrer atrasos significativos que podem reduzir a acurácia das medições (Kimball et al., 1976; Kustas et al., 2000; Cobos e Baker, 2003). Ochsner et al. (2006) concluíram que as placas de fluxo de calor subestimam o fluxo de calor no solo devido a baixa condutividade térmica da placa, a resistência térmica de contato e aos efeitos de transferência de calor latente. Entretanto, este é o principal método para obtenção do fluxo experimental de calor no solo e, amplamente utilizado em estudos de fechamento de balanço de energia na superfície (Sauer et al., 2003; Heusinkveld et al., 2004; Sauer et al., 2007).

Utilizando medidas experimentais de fluxo de calor no solo e temperatura do solo, diversos autores estimam a condutividade térmica do solo isolando λ na Equação 2. No entanto, este procedimento pode acarretar em possíveis divergências numéricas como apresentado, por exemplo, por Li et al (2017) e Li et al (2019), que eliminam dados quando a gradiente das temperaturas do solo ou o fluxo de calor no solo estão muito próximos a zero para evitar estes problemas.

Neste trabalho, propomos um novo modelo numérico para estimar a condutividade térmica do solo a partir de medidas experimentais de fluxo de calor no solo e temperatura no solo. O modelo utiliza a Lei de Fourier da condução de calor modificada pelo acréscimo de um parâmetro empírico constante (ϵ). O modelo busca minimizar as incertezas, eventualmente, contidas nos dados experimentais. Numericamente, a solução do modelo tem por base o método Gradiente e será obtida por meio de um ajuste linear aos dados experimentais pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Esta metodologia tem por finalidade evitar indeterminações numéricas e possíveis descartes de dados. Os dados de solo

foram coletados em um experimento de campo em vegetação do bioma Pampa Brasileiro os quais serão utilizados para calibrar e validar o modelo proposto.

Este trabalho está dividido em três seções: Material e Métodos; Resultados e Discussões; e, Conclusões. A seção Material e Métodos apresenta a descrição do sítio experimental, o modelo proposto, a justificativa para a proposição do modelo e o método utilizado para estimar λ , além da sequência de análise. A seção Resultados e Discussões apresenta os resultados do modelo proposto em comparação aos diferentes modelos utilizados no artigo. Esta seção, também, apresenta a influência das diferentes metodologias na avaliação da dependência da condutividade térmica do solo em relação ao conteúdo de água no solo. Por fim, as Conclusões apresentam as reflexões pertinentes aos resultados obtidos.

2 Material e Métodos

2.1 Sítio Experimental

As medidas experimentais foram obtidas em uma área de vegetação nativa destinada a pecuária, no município de Pedras Altas, estado do Rio Grande do Sul, Brasil, na localização geográfica $31^{\circ}43'56''S$; $53^{\circ}43'36''W$, $395m$, inserida na região do bioma Pampa (a partir de agora denominada PAS). O solo, na área em estudo, é caracterizado como arenoso (sandy loam) com 59,30% de areia; 0,81% argila; 39,89% barro/lodo. Os valores médios das propriedades físicas do solo a $-0,05m$ e a $-0,15m$ de profundidade são: capacidade de campo $\theta_{FC} = 0,28 m^3 m^{-3}$; ponto de murcho permanente $\theta_{WP} = 0,03 m^3 m^{-3}$; porosidade do solo $\theta_s = 0,42 m^3 m^{-3}$; e, densidade do solo (soil bulk density) $\rho_s = 440 kg m^{-3}$. Informações detalhadas relativas a composição do solo e ao sítio experimental são descritas em Rubert et al. (2018).

O clima típico na região é classificado como subtropical úmido Cfa de acordo com Köppen (Peel et al., 2007). A temperatura média anual é de $17^{\circ}C$, apresentando temperaturas negativas, durante a manhã, no inverno ($\sim -3^{\circ}C$) e temperaturas altas ($\sim 40^{\circ}C$) durante a tarde, no verão. O regime de precipitação é bem distribuído ao longo do ano.

As temperaturas do solo foram medidas com sensores de temperatura T108 (Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) posicionados a $0,05m$ e a $0,15m$ abaixo da superfície, e o fluxo de calor no solo foi medido com sensor de fluxo de calor HFP01 (Hukseflux Thermal Sensor B.V., Delft, The Netherlands) posicionado a $0,10 m$ abaixo da

superfície do solo, de modo que ficasse na posição média entre os sensores de temperatura do solo. O conteúdo de água no solo (θ) foi medido com um reflectômetro de conteúdo de água CS616 (Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) instalado a $-0,10m$ abaixo da superfície. Os dados foram coletados durante o ano de 2015 a uma frequência de 1 minuto e então calculou-se a média a cada 30 minutos. Devido a problemas técnicos ocorreu coleta parcial de dados durante o período de 01 a 12 de janeiro (coletadas apenas temperaturas e conteúdo de água no solo) e não houve coleta dos dados de 17 de setembro a 05 de novembro. Ressalta-se que, se houve falha de medição em uma das variáveis, todas as demais foram, também, removidas do conjunto de dados.

2.2 Modelo Proposto

A relação entre G_z e $\frac{\Delta T}{\Delta z}$, representada pela Equação 2, é descrita por uma função linear das variáveis, com λ sendo a constante de proporcionalidade. Entretanto, experimentalmente, não se obtém uma relação definida por uma função linear descrita por $y = ax$; ao invés disso, obtém-se uma relação definida por uma função afim descrita por $y = ax + b$, como apresentado na Figura 1, independente do conteúdo de água no solo. Esta figura ilustra que a relação entre G_z , medido a $z = -0,10 m$, e o quociente das diferenças de temperatura em relação a profundidade $\left(\frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1}\right)$, com $z_1 = -0,05 m$ e $z_2 = -0,15 m$, não satisfaz a Equação 2; uma vez que, o gráfico de $G_z \times \frac{\Delta T}{\Delta z}$ não passa pela da origem, de modo que existirá uma subestimativa ou superestimativa de G_z em relação a $\left(\frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1}\right)$ para valores negativos ou positivos de G_z , respectivamente. Portanto, para estimar λ a partir dos dados experimentais de fluxo de calor no solo (G_{exp}) e das temperaturas do solo a diferentes profundidades, propõe-se incluir um parâmetro empírico (ε) a Equação 2. O novo modelo de G_z passa a ser expresso por:

$$G_z = -\lambda \left[\frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1} \right] + \varepsilon \quad (3)$$

onde ε é um parâmetro empírico constante a ser determinado, representando um fator de correção do fluxo de energia que não é contabilizado pelas medições experimentais de campo.

A adição de ε torna o modelo capaz de ajustar o comportamento observado nos dados experimentais (Figura 1).

Na solução analítica da Lei de Fourier, embora não explicitamente, esta correção está presente como, por exemplo, em Carslaw e Jaeger (1959), Verhoef et al. (1996) e Wang e Bou-Zeid (2012). Nestes casos, a estimativa desta correção é complexa, requerendo um grande número de parâmetros, em geral, obtidos de ajustes nos dados experimentais de fluxo de calor no solo e temperatura do solo.

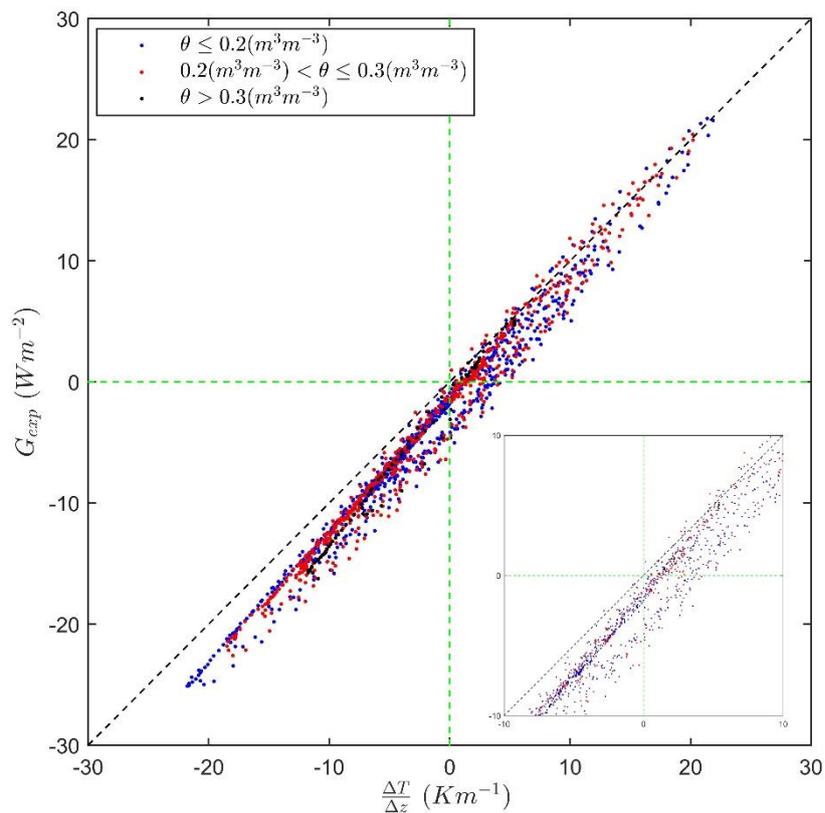


Figura 1 – Relação entre G_{exp} a $z = -0,10 m$ e a taxa de variação da temperatura do solo em relação a profundidade ($\Delta T / \Delta z$) com $z_1 = -0,05 m$ e $z_2 = -0,15 m$. Dados obtidos no sítio experimental de Pedras Altas-RS durante o período de 1º de julho a 31 de julho de 2015.

2.2.1 Ajuste de Dados: Aproximação por Mínimos Quadrados

A Figura 2 mostra o ciclo diário para o fluxo de calor no solo (G_z) a $z = -0,10 m$ e as temperaturas a $z_1 = -0,05 m$ e $z_2 = -0,15 m$ para quatro dias, em diferentes estações, (Verão DOY 21; Outono DOY 111; Inverno DOY 202; e Primavera, DOY 325). Havendo precipitação de $0.1 mm$ em DOY 325 a 01:00 AM (horário local). Estes dias foram escolhidos para destacar a variabilidade na amplitude de G_z e nos valores da temperatura do

solo e, os horários em que a gradiente de temperatura é zero ($T_{z_1} \approx T_{z_2}$), nas diferentes estações. É possível observar os horários em que as temperaturas do solo se aproximam uma a outra nas diferentes profundidades, o λ obtido da Equação 2, pela divisão de G_z por $\left(\frac{T_2-T_1}{z_2-z_1}\right)$, pode resultar em valor infinitos ou conduzir a divergências numéricas resultando, em ambos os casos, em soluções divergentes.

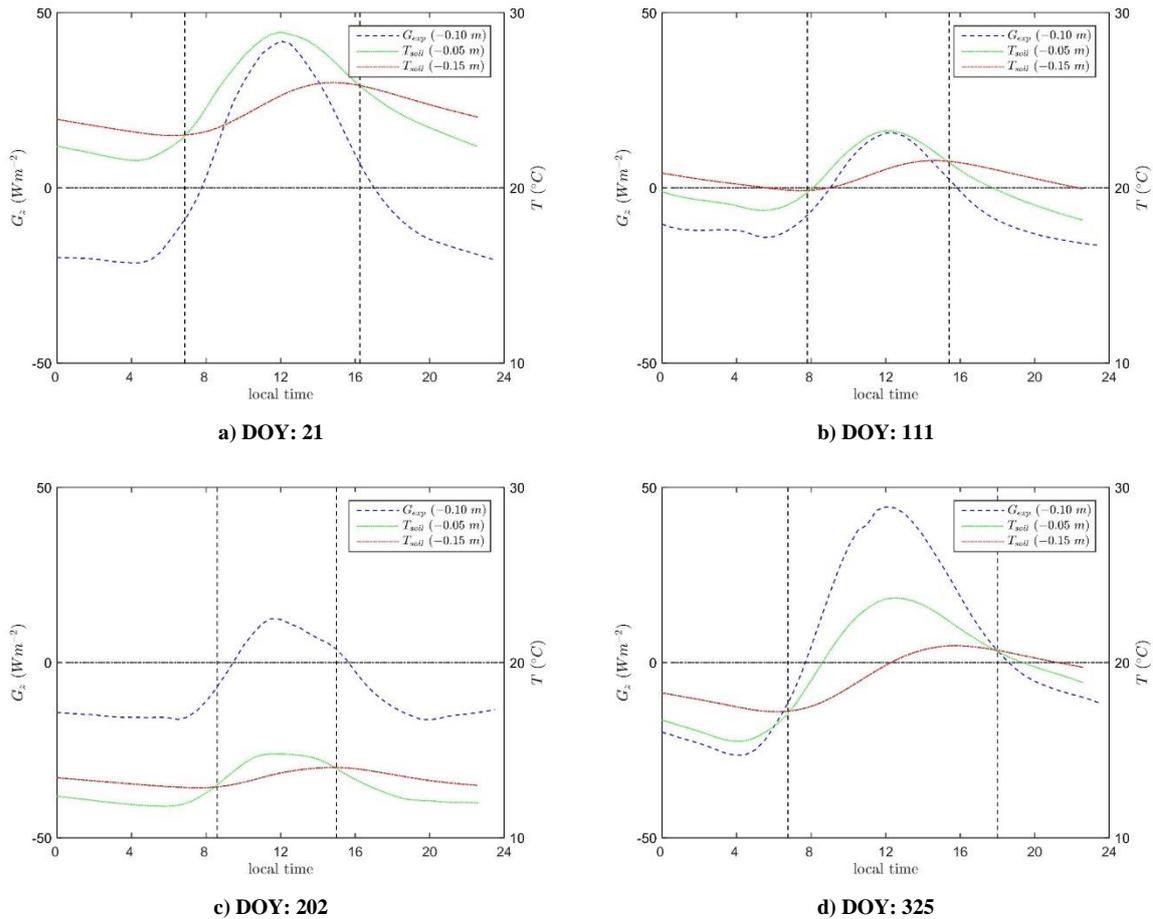


Figura 2 – Exemplos de ciclos diurnos de G_{exp} (Wm^{-2}) a $-0,10$ m e T_{soil} ($^{\circ}C$) a $-0,05$ m e $-0,15$ m para os Dias do Ano (DOY) com diferentes características. Obs.: Linhas verticais pontilhadas representam os horários locais em que ambas as temperaturas do solo possuem mesmo valor.

A média diária de G_{exp} e T_{soil} para as diferentes profundidades pode apresentar variabilidade ao longo do ano, como observado na Figura 3. A existência de dias que possuem baixa variabilidade de temperatura nas diferentes profundidades ou valores de G_{exp} próximos a zero, também, podem causar divergências numéricas, especialmente quando se isola λ na Equação 2 (Li et al., 2017; Li et al., 2019). Na Figura 3 é, também, apresentado o conteúdo

diário de água no solo (θ), apresentando alta variabilidade ao longo do ano, com valores pequenos nas estações verão e outono.

Para evitar possíveis divisões por zero utilizando a Equação 2, diferentes trabalhos, na literatura, estimam a condutividade térmica do solo usando, por exemplo, médias diárias (Liebethal e Foken, 2007; An et al., 2016a) ou horários específicos (Liebethal e Foken, 2007); alguns, inclusive, eliminam os dados em que as temperaturas se aproximam de zero (Li et al., 2017; Li et al., 2019), e outros eliminam dados de fluxo de calor no solo nas proximidades das mudanças de sinal (antes e depois) devido a estes valores serem relativamente pequenos e, conseqüentemente, conduzirem a maiores erros (Li et al., 2017; Li et al., 2019), conseqüentemente, gerando uma perda de informações. Em contraste a estas técnicas, neste trabalho, propomos o uso de Método dos Mínimos Quadrados Linear (MMQL) para obter o coeficiente de condutividade térmica do solo e o termo adicional (ε) descrito na Equação 3. Esta técnica permite a estimativa de λ sem inverter a Equação 2. Este procedimento evita a exclusão de dados, permitindo uma estimativa mais realística da condutividade térmica do solo.

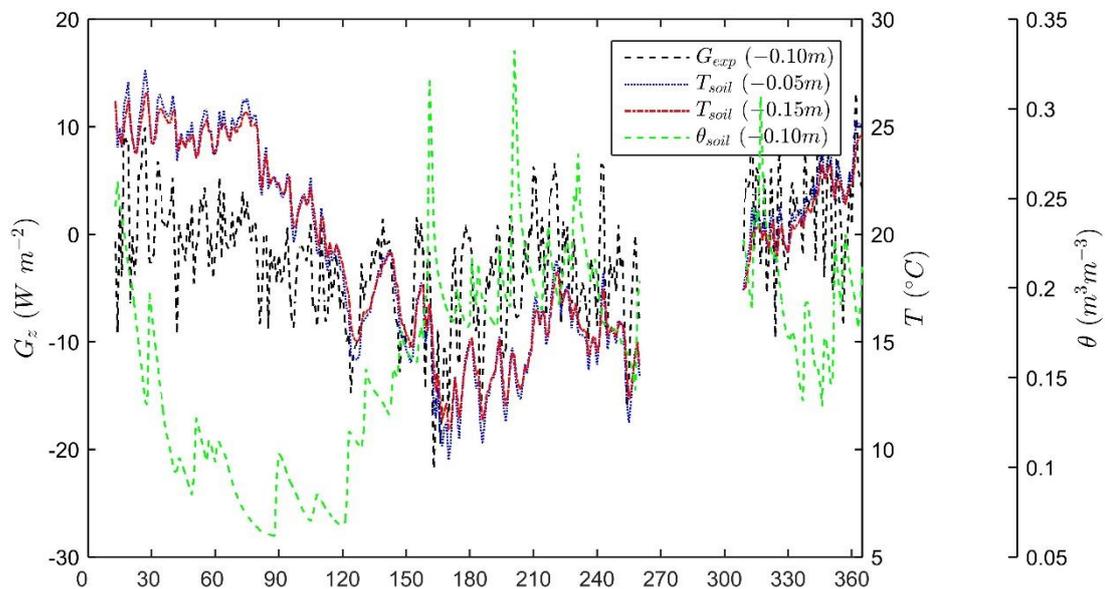


Figura 3 – Fluxo de calor no solo diário (G_z) a $-0,10m$, conteúdo de água no solo (θ_{soil}) a $-0,10m$ e temperatura do solo (T_{soil}) a $-0,05m$ e $-0,15m$ de profundidade. O eixo horizontal representa do dia do ano.

2.3 Calibração a Validação dos Modelos Numéricos

Dados de G_{exp} e T_{soil} (para as diferentes profundidades) foram selecionados de 3 dias aleatórios (dados de um dia inteiro) de cada mês do ano, totalizando 33 dias (devido a falta de dados no mês de Outubro), os quais foram utilizados para estimar λ pelos diferentes métodos. Os seguintes métodos foram utilizados:

- Método 1 ($M1$): Isolar λ na Equação 2 e calcular o valor médio de λ ;
- Método 2 ($M2$): Isolar λ na Equação 2 e calcular o valor médio de λ para os dados observados cuja variação de temperatura (ΔT) é igual ou superior a $|0,1|$;
- Método 3 ($M3$): Isolar λ na Equação 2 e calcular o valor médio de λ para os dados das 13hrs (hora local). Este horário foi escolhido devido a apresentar, em geral, a maior variação de temperatura em relação a profundidade em comparação a outros horários;
- Método 4 ($M4$): Método dos Mínimos Quadrados aplicado a Equação 2;
- Método 5 ($M5$): Método dos Mínimos Quadrados aplicado a Equação 3.

A validação dos métodos foi realizada utilizando-se o conjunto experimental de dados excluindo-se os dias utilizados para estimar λ (dados de validação). Foram realizadas análises considerando o período inteiro (dia e noite) e com separação de períodos diurno e noturno. Para isso, considerou-se como período diurno o intervalo compreendido entre as 06:00 e as 18:00 e noturno entre as 18:00 e as 06:00.

O valores de λ obtidos de cada ajuste foram inseridos nas respectivas equações de cada método com os valores experimentais de temperatura do solo, obtendo-se G_z estimados (G_{M1} , G_{M2} , ...). A validação de cada método, foi realizada utilizando-se estes valores de G_z com os valores obtidos experimentalmente (G_{exp}), através dos índices estatísticos RMSE e R^2 . Índices estes que foram calculados pelas seguintes equações:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Y_{exp} - Y_{est})^2}{n}}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_{exp} - Y_{est})^2}{\sum(Y_{exp} - \bar{Y})^2}$$

onde Y_{exp} representa os valores observados, Y_{est} representa os valores estimados, \bar{Y} representa a média das observações e n representa o número de observações.

3 Resultados e Discussões

A Tabela 1 apresenta a condutividade térmica do solo e o parâmetro empírico (ε) calibrados pelos diferentes métodos com os dados experimentais do sítio de Pedras Altas-RS. Os resultados de λ obtidos utilizando a Equação 2 pelos diferentes métodos ($M1$, $M2$, $M3$, e $M4$) apresentam uma variabilidade de quase 25%, com redução do RMSE de aproximadamente 40% entre $M1$ e $M4$ e aumento do R^2 de aproximadamente 12% quando analisado o período diário.

De todos os métodos e períodos analisados, $M1$ foi o que apresentou os piores índices estatísticos. Este resultado é devido, possivelmente, ao fato de que todos os dados foram utilizados na simulação, o que pode gerar divergências numéricas quando $|\Delta T| \approx 0$, conseqüentemente, na média, poderá superestimar λ . Para $M2$ eliminou-se os dados quando $|\Delta T| \leq 0,1$, o que representou 5% do total de dados, resultando em uma redução de 30% no RMSE comparado a $M1$ (Tabela 1). Porém, em períodos onde G está próximo de zero, esta metodologia poderá conduzir a valores não realistas de λ . O método $M3$, estimar o valor de λ para um certo horário de referência (13:00 – horário local), apresentou uma melhor de aproximadamente 15% no RMSE. Entretanto, nesta metodologia, também, poderão ocorrer valores de λ não realísticos. Um exemplo seria um dia de céu nublado ou de ocorrência de precipitação que dificultaria o aumento de radiação solar na superfície. Se, neste horário G está próximo a zero ou as temperaturas do solo em ambas as profundidades estão próximas, o mesmo problema descrito para os métodos $M1$ e $M2$ poderá ocorrer.

Os métodos $M3$ e $M4$ apresentaram resultados, tanto para λ como para os índices estatísticos, praticamente iguais, sugerindo que a escolha do horário que representa a maior diferença entre as temperaturas pode ser considerada uma boa alternativa para estimativa de λ . Entretanto, utilizando o método $M3$ não existirão informações sobre o ciclo diurno de λ , conforme mencionado por Li et al. (2019). Aqui não serão realizadas análises do ciclo diurno de λ para nenhum dos métodos.

O método $M5$ apresentou os melhores índices estatísticos para todos os períodos analisados, demonstrando ser o melhor método para estimativa de λ . No período diário, foi observado um decréscimo de 3.13 Wm^{-2} no RMSE entre $M1$ e $M5$. Os maiores erros foram

encontrados nos períodos diurnos para todos os métodos, uma vez que é nesse período que ocorrem as maiores variações de temperatura (Tabela 1). Os resultados de λ obtidos pelas Equações 2 e 3 por MMQ ($M4$ e $M5$, respectivamente) apresentam valores muito próximos. Entretanto, o RMSE do $M4$ é superior ao do $M5$, comprovando que $M5$ melhorou a estimativa de G_z . Ainda, o parâmetro ε representa quase 20% do valor médio anual de G_z que foi de $12,8 \text{ Wm}^{-2}$.

Tabela 1 – Valores de λ e ε , obtidos pelos diferentes métodos e, respectivas, análises estatísticas. Obs.: A coluna *Diário* representa a estatística para o período inteiro (Dia e Noite).

	Calibração		Validação					
	λ ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	ε (Wm^{-2})	$RMSE$ (Wm^{-2})			R^2		
			Diário	Dia	Noite	Diário	Dia	Noite
Método 1 ($M1$)	1,331	-	5,56	7,31	2,92	0,82	0,71	0,77
Método 2 ($M2$)	1,148	-	3,86	5,08	1,97	0,92	0,86	0,89
Método 3 ($M3$)	1,014	-	3,24	3,97	2,28	0,94	0,91	0,86
Método 4 ($M4$)	1,011	-	3,23	3,95	2,30	0,94	0,91	0,85
Método 5 ($M5$)	0,993	-2,216	2,43	3,06	1,58	0,97	0,95	0,93

A Figura 4 apresenta os diagramas de dispersão de G_z utilizando os valores de λ da Tabela 1 com os dados de validação. Em geral, os modelos $M1$ e $M2$ subestimam as observações quando estas são negativas e superestimam quando são positivas. Os modelos $M3$ e $M4$ mostram uma superestimativa dos valores para ambas as situações. Finalmente, $M5$ mostra um comportamento muito similar aos dados observados. Portanto, o método dos mínimos quadrados (MMQ) aplicado é adequado para esta estimativa.

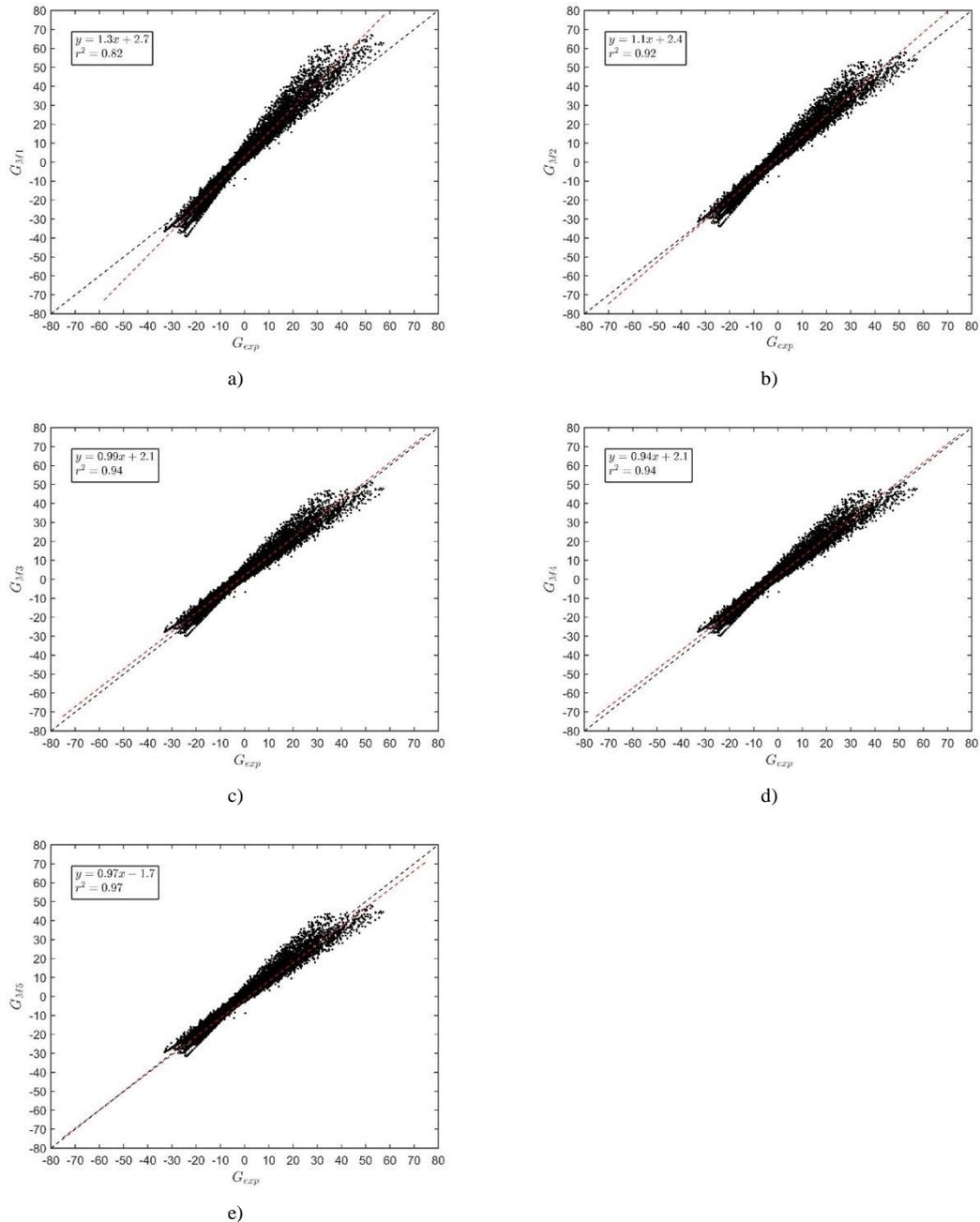


Figura 4 – Diagramas de dispersão entre os valores de G_{exp} (experimental) e os valores estimados obtidos pelos diferentes métodos utilizando dados de validação. Linha vermelha tracejada representa o ajuste linear dos dados. Para referência, a linha 1:1 é, também, apresentada (linha preta tracejada).

A Figura 5 apresenta o ciclo diário médio dos valores de G_{exp} obtidos pelos métodos $M4$ e $M5$, com os valores de λ da Tabela 1 utilizados para estes métodos. $M5$ representa o ciclo diário médio melhor que $M4$ para todas as horas, em especial, a noite. A maior diferença entre os dados experimentais e $M4$ e $M5$, durante o período noturno, ocorreu as 05:30 e foi de $2,4 \text{ Wm}^{-2}$ e $0,3 \text{ Wm}^{-2}$, respectivamente; e, durante o período diurno, ocorreu as 14:30 e foi de $3,1 \text{ Wm}^{-2}$ e $0,9 \text{ Wm}^{-2}$, respectivamente. O pico diurno de G_z foi melhor representado por

M5, cuja diferença foi de $0,4 \text{ Wm}^{-2}$ as 12:30, enquanto *M4* apresentou uma diferença de $2,5 \text{ Wm}^{-2}$ no mesmo horário.

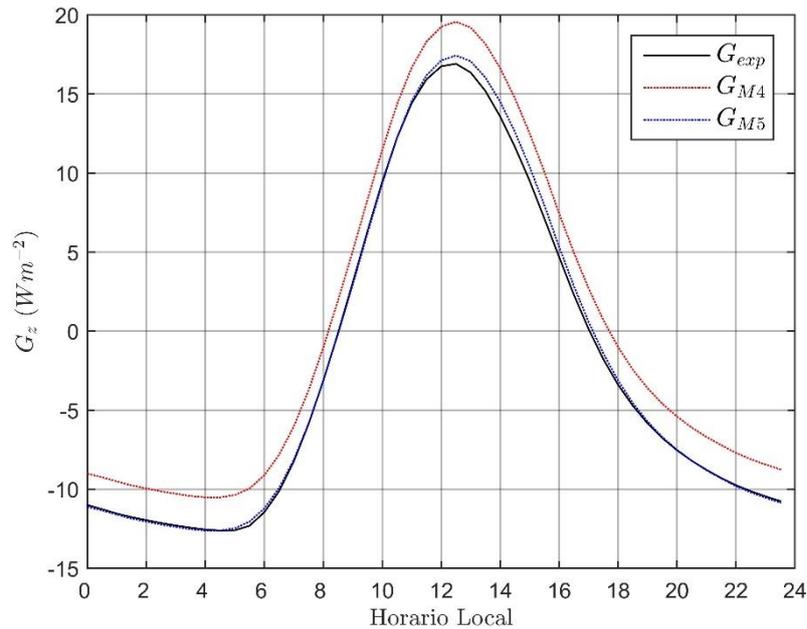


Figura 5 – Ciclo diário médio anual para o fluxo de calor no solo a -0.10 m , experimental (G_{exp}) e estimado pelos métodos *M4* e *M5*.

Os melhores resultados obtidos por *M5* provam que a adição de um parâmetro empírico (ε) inclui correções que interferem na estimativa do fluxo de calor no solo, isto é, G_z não é simplesmente proporcional ao gradiente de temperatura. Assim, a inclusão de ε também influencia na estimativa da condutividade térmica do solo embora o modelo ainda a considere constante em relação a profundidade.

Uma análise aprofundada da influência do conteúdo de água no solo na estimativa de λ é apresentada na Figura 6. Todos os dados observados foram utilizados para apresentar a relação entre a condutividade térmica do solo (λ) e o conteúdo de água no solo (θ). Neste caso, utilizou-se somente o MMQ para resolver as Equações 2 e 3, para cada dia, isto é, *M4* e *M5*, obtendo-se valores de λ diários. Após, estes valores foram agrupados por intervalos de 0,01 da média diária do conteúdo de água no solo. Com os dados agrupados, calculou-se o valor médio de λ e o respectivo desvio-padrão de cada agrupamento, conforme ilustrado na Figura 6a. Nota-se que o uso das diferentes equações resulta em diferentes comportamentos entre a condutividade térmica do solo e o conteúdo de água no solo. Em geral, *M4* apresentou maiores valores médios e desvio-padrão em relação a *M5*.

Utilizando-se outra abordagem, agrupou-se os dados observados de meia-hora dos dias que apresentaram médias diárias de conteúdo de água no solo semelhantes (intervalos de 0,01). Com os dados agrupados, um único valor de λ foi estimado para cada intervalo de conteúdo de água no solo, utilizando $M4$ e $M5$, conforme apresentado na Figura 6b. Tanto para baixos quanto para altos valores de conteúdo de água no solo existem poucos dados experimentais, no entanto, os modelos apresentam valores similares de λ nos intervalos de pouca umidade do solo e diferem consideravelmente para intervalos de altos valores de umidade do solo. Para o restante dos valores de umidade do solo, ambas as equações demonstraram comportamento similar.

Os resultados apresentados nas Figuras 6a e 6b mostram que para altos valores de umidade do solo, ambos métodos geram uma grande variabilidade no conjunto de dados de λ , concluindo que podem existir outras variáveis comandando os valores de λ quando o conteúdo de água no solo é alto, isto é, próximo a capacidade de campo.

Os valores de ε da Equação 3, utilizando esta última metodologia, são mostrados na Figura 6c. Observa-se uma variação não linear de ε em relação ao conteúdo de água no solo, tendo valores mínimos e máximos entre -3 Wm^{-2} e $-1,5 \text{ Wm}^{-2}$, com valor médio de $-2,124 \text{ Wm}^{-2}$.

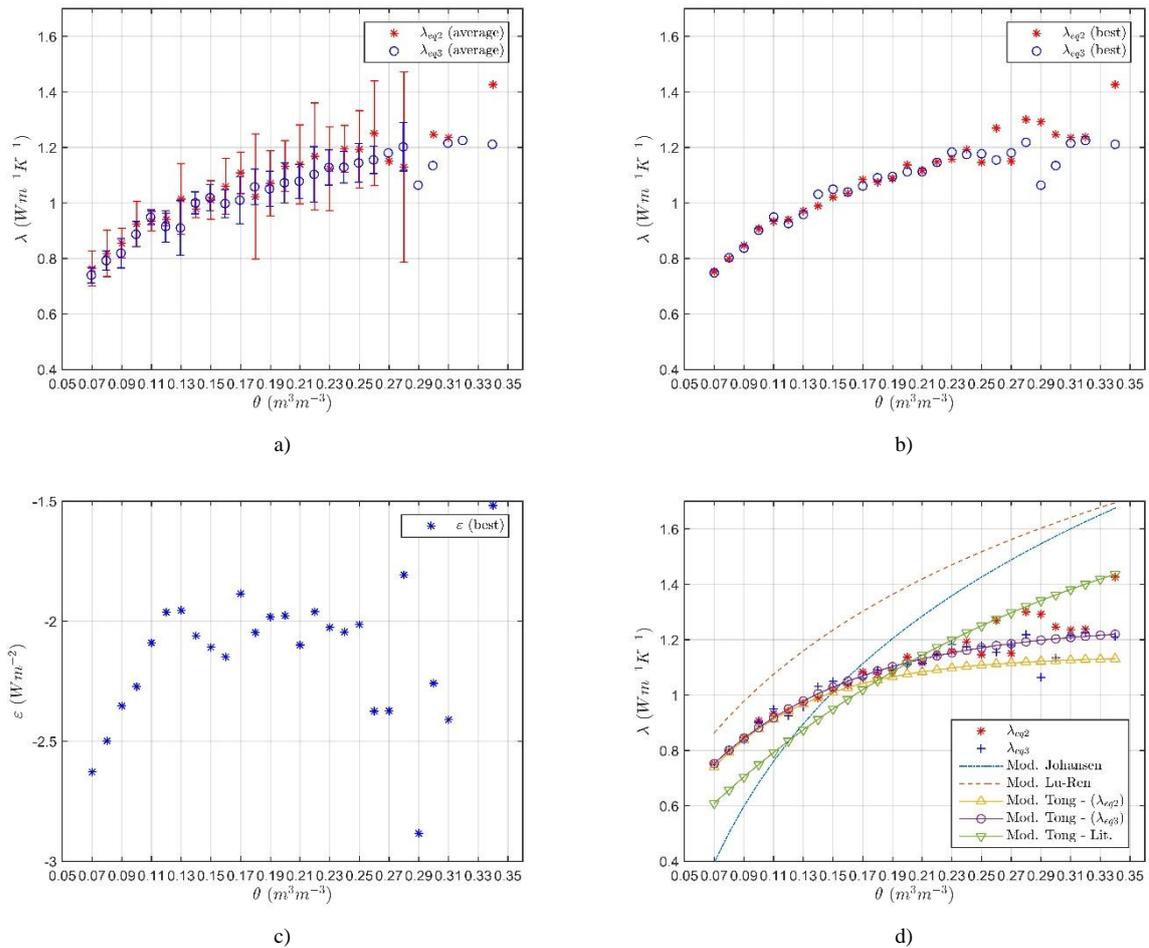


Figura 6 – Relações entre a condutividade térmica do solo (obtidas pelas Equações 2 e 3) e o conteúdo de água no solo: a) media e desvio-padrão dos valores de λ calibrados diariamente e agrupados por intervalos de conteúdo de água no solo (valores sem desvio-padrão representam um único dado no conjunto de dados); b) λ calibrados para os intervalos de conteúdo de água no solo; c) ε de M5 vs θ para o caso b); d) valores de λ como em b) e valores estimados de λ pelos modelos de Johansen, Lu-Ren e Tong.

A Figura 6d apresenta a relação entre a condutividade térmica do solo e o conteúdo de água no solo, $\lambda(\theta)$, obtida utilizando-se M4 e M5 (estimando λ para intervalos de conteúdo de água no solo) e os modelos de Johansen (JOHANSEN, 1977), Lu-Ren (LU et al, 2007) e Tong (TONG et al., 2016) (maiores detalhes sobre os modelos são descritos no Apêndice A). Para o modelo de Tong, os parâmetros empíricos foram calibrados utilizando $\lambda(\theta)$ para M4 e M5. Os valores destes parâmetros são apresentados na Tabela 2, juntamente com os valores originais (sugeridos por Tong et al. (2016)) para o tipo de solo arenoso (sandy loam). Os resultados indicam que a variação de $\lambda(\theta)$ depende do método aplicado, conseqüentemente, influenciando na estimativa dos parâmetros descritos por equações empíricas de $\lambda(\theta)$. O modelo calibrado de Tong, utilizando M5, apresentou melhores índices estatísticos (Tabela 2).

Tabela 2 – Parâmetros originais e calibrados do modelo de Tong et al. (2016), além dos índices R^2 e $RMSE$.

	Original - Tong et al. (2016)	$M4$	$M5$
a	1,88	1,14	1,25
b	1,67	1,07	1,01
c	3,90	14,06	10,02
R^2	0,65	0,66	0,88
$RMSE$	0,0953	0,0941	0,0545

4 Conclusões

Neste artigo, propõe-se um modelo numérico para estimar a condutividade térmica do solo a partir de medidas experimentais de fluxo de calor no solo e temperatura do solo em diferentes profundidades. A proposta baseia-se na Lei de Fourier modificada pelo acréscimo de um parâmetro empírico constante (ε). Este parâmetro representa uma correção na Lei de Fourier, tornando o modelo capaz de ajustar-se ao comportamento observado nos dados experimentais.

Diferentes técnicas numéricas de solução da Equação 2 foram utilizadas e comparadas ao método utilizado no modelo proposto (Equação 3). O estudo mostrou que a escolha por isolar λ na Equação 2 ($M1$, $M2$ e $M3$) pode afetar a acurácia da estimativa da condutividade térmica do solo. O uso do MMQ para estimar a condutividade térmica do solo ($M4$ e $M5$) apresentou melhores resultados em relação aos demais métodos, o que nos permite concluir que o MMQ é uma técnica adequada para esta estimativa. Além disso, $M5$ apresentou melhores resultados estatísticos, confirmando, assim, a hipótese de que a adição de um parâmetro empírico é necessária e influencia a acurácia das estimativas de fluxo de calor no solo.

Atualmente, muitos experimentos micrometeorológicos, de campo, realizam medições atmosféricas e de variáveis de solo para melhorar os modelos de clima e tempo. Para o solo, os dados são obtidos de forma semelhante ao desenho experimental utilizado neste trabalho. Neste sentido, acredita-se que os resultados aqui obtidos contribuirão para essa questão, uma vez que a metodologia proposta melhorou a estimativa das propriedades térmicas do solo e, conseqüentemente, o fluxo de calor no solo, componente essencial para estudos de fechamento de balanço de energia na superfície.

Apêndice A

O modelo de Johansen (Johansen, 1977; Lu et al. 2007; Rózański; Stefaniuk, 2016) para a condutividade térmica do solo é representado por:

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry})K_e + \lambda_{dry} \quad (\text{A.1})$$

onde λ_{dry} e λ_{sat} são as condutividades térmicas para o solo seco e saturado, respectivamente, em unidades de solo ($Wm^{-1}K^{-1}$) e K_e é o *número de Kersten* definido por:

$$K_e \approx 0.7 \log_{10} S_r + 1.0 \quad (S_r > 0.5) \quad (\text{A.2})$$

$$K_e \approx \log_{10} S_r + 1.0 \quad (S_r > 0.1) \quad (\text{A.3})$$

onde ($S_r = \theta/\theta_s$) é o conteúdo de água no solo normalizado, θ_s é o conteúdo de água no solo saturado e θ é o conteúdo de água no solo, em unidades (m^3m^{-3}).

O parâmetro λ_{sat} é obtido por uma equação de média geométrica:

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n} \lambda_w^n \quad (\text{A.4})$$

onde n é a porosidade do solo (m^3m^{-3}), λ_s é a condutividade térmica do solo dos sólidos ($Wm^{-1}K^{-1}$) e λ_w é a condutividade térmica da água ($\lambda_w = 0.594 Wm^{-1}K^{-1}$ a $20^\circ C$).

O valor de λ_s é obtido por outra equação de média geométrica:

$$\lambda_s = \lambda_q^q \lambda_o^{1-q} \quad (\text{A.5})$$

onde q é o conteúdo de quartzo do total de sólidos, λ_o é a condutividade térmica dos demais materiais ($Wm^{-1}K^{-1}$) e λ_q é a condutividade térmica do quartzo ($\lambda_q = 7.7 Wm^{-1}K^{-1}$). λ_o foi tomado $2.0 Wm^{-1}K^{-1}$ para solos com $q > 0.2$ e $3.0 Wm^{-1}K^{-1}$ para solos com $q \leq 0.2$.

O parâmetro λ_{dry} foi definido por Johansen (Johansen, 1977; Lu et al. 2007; Rózański; Stefaniuk, 2016) por meio de uma relação semi-empírica em relação a densidade do solo, como segue:

$$\lambda_{dry} = \frac{0.135 \rho_b + 64.7}{2700 - 0.947 \rho_b} \quad (\text{A.6})$$

em que ρ_b é a densidade do solo ($kg\ m^{-3}$).

O modelo de Lu-Ren (Lu et al., 2007) segue conceitos análogos ao de Johansen (1977) diferindo na relação do *número de Kersten*, o qual é definido por:

$$K_e \approx e^{\{\alpha[1-s_r^{(\alpha-1.33)}]\}} \quad (\text{A.7})$$

onde α é um parâmetro dependente da textura do solo. Além disso, Lu et al. (2007) introduziram uma nova equação para λ_{dry} :

$$\lambda_{dry} = -0,56n + 0.51 \quad (\text{A.8})$$

com n a porosidade do solo ($m^3 m^{-3}$).

O modelo de Tong (Tong et al., 2016) é um modelo empírico para a condutividade térmica do solo, definido por:

$$\lambda = a - be^{(-c\theta)} \quad (\text{A.9})$$

em que a , b e c são parâmetros empíricos calibrados em função dos dados experimentais e θ é o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$).

Referências

- Aimi, D.M., Oliveira, M.E., Zimmer, T., Rubert, G.C., Souza, V.A., Roberti, D.R., 2018. Influência da Radiação de Onda Longa Incidente no Fechamento do Balanço de Radiação no Modelo SIB2: Estimativas para Pastagem no bioma Pampa. *Ciência e Natura* 40(3), 235-240. <https://doi.org/10.5902/2179460X30789>.
- An, K., Wang, W., Wang, Z., Zhao, Y., Yang, Z., Chen, L., Zhang, Z., Duan, L., 2016a. Estimation of Ground Heat Flux from Soil Temperature over a Bare Soil. *Theoretical and Applied Climatology* 129, n. 3-4, 913-922. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1816-8>.
- An, K., Wang, W., Zhao, Y., Huang, W., Chen, L., Zhang, Z., Wang, Q., Li, W., 2016b. Estimation from Soil Temperature of Soil Thermal Diffusivity and Heat Flux in Sub-surface Layers. *Boundary Layer Meteorology* 158, 473-488. <https://doi.org/10.1007/s10546-015-0096-7>.

Bristow, K.L., Kluitenberg, G.J., Horton R., 1994. Measurement of Soil Thermal Properties with a Dual-probe Heat-pulse Technique. *Soil Science Society of American Journal* 58, 1288–1294. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050002x>.

Burden, R.L., Faires, J.D., 2010. *Numerical Analysis*. ninth ed. Cengage Learning, Boston.

Campbell, G.S., 1985. *Soil Physics with Basic: Transport Models for Soil-Plant Systems*. *Developments in Soil Science* 14. first ed. Elsevier Science B.V., Netherlands.

Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., 1959. *Conduction of Heat in Solids*. fourth ed. Oxford University Press, London.

Cobos, D.R., Baker, J.M., 2003. In Situ Measurement of Soil Heat Flux with the Gradient Method. *Vadose Zone J.* 2, 589-594. <https://doi.org/10.2136/vzj2003.5890>.

de Vries, D.A., Peck, A.J., 1958. On the Cylindrical Probe Method of Measuring Thermal Conductivity with Special Reference to Soils. Part 1. Extension of Theory and Discussion of Probe Characteristics. *Australian Journal of Physics* 11, 255-271.

de Vries, D.A., 1963. *Thermal Properties of Soils*. *Physics of Plant Environment*, van Wijk WR (ed), North-Holland Publishing Company.

Fuchs, M., Hadas, A., 1973. Analysis of the Performance of an Improved Soil Heat Flux Transducer. *Soil Science Society of America Journal.* 37(2), 173–175. <https://doi.org/10.2136/sssaj1973.03615995003700020009x>.

Heusinkveld, B.G., Jacobs, A.F.G., Holtslag, A.A.M., Berkowicz, S.M., 2004. Surface Energy Balance Closure in an Arid Region: Role of Soil Heat Flux. *Agricultural and Forest Meteorology* 122, 21-37. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.09.005>.

Hukseflux, 2016. *User Manual HFP01 & HFP03 Heat Flux Plate / Heat Flux Sensor*, Delft.

Johansen, O. 1975. *Thermal Conductivity of Soils*. Ph.D. diss. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim (CRREL draft transl. 637, 1977).

Kimball, B.A., Jackson, R.D., Nakayama, F.S., Idso, S.B., Reginato, R.J., 1976. Soil-Heat Flux Determination: Temperature Gradient Method with Computed Thermal Conductivities. *Soil Science Society of American Journal* 40, 25-28. <https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000010011x>.

Kluitenberg, G.J., Bristow, K.L., Das, B.S., 1995. Error Analysis of the Heat Pulse Method for Measuring Soil Heat Capacity, Diffusivity and Conductivity. *Soil Science Society of American Journal* 59, 719–726. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900030013x>.

Kustas, W.P., Daughtry, C.S.T., 1990. Estimation of the Soil Heat Flux/Net Radiation Ratio from Spectral Data. *Agricultural and Forest Meteorology* 49, 205-223. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(90\)90033-3](https://doi.org/10.1016/0168-1923(90)90033-3).

- Kustas, W.P., Prueger, J.H., Hatfield, J.L., Ramalingam, K., Hipps, L.E., 2000. Variability in Soil Heat Flux from a Mesquite Dune Site. *Agricultural and Forest Meteorology* 103, 249–264. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00131-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00131-3).
- Li, Z., Yang, J., Zheng, Z., Yu, Y., Zhang, T., Hou, X., Wei, Z., 2017. Comparative Study of the Soil Thermal Regime in Arid and Semi-Humid Areas. *Environmental Earth Sciences* 76:28. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6354-2>.
- Li, R., Zhao, L., Wu, T., Wang, Q., Ding, Y., Yao, J., Wu, X., Hu, G., Xiao, Y., Du, Y., Zhu, X., Qin, Y., Yang, S., Bai, R., Du, E., Liu, G., Zou, D., Qiao, Y., Shi, J., 2019. Soil Thermal Conductivity and its Influencing Factors at the Tanggula Permafrost Region on the Qinghai–Tibet Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology* 264, 235-246. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.10.011>.
- Liebenthal, C., Foken, T., 2007. Evaluation of Six Parameterization Approaches for the Ground Heat Flux. *Theoretical and Applied Climatology* 88, 43-56. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0234-0>.
- Lu, S., Ren, T., Gong, Y., Horton, R., 2007. An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature. *Soil Science Society of America Journal* 71, 8-14. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0041>.
- Lu, Y., Lu, S., Horton, R., Ren, T., 2014. An Empirical Model for Estimating Soil Thermal Conductivity from Texture, Water Content, and Bulk Density. *Soil Science Society of America Journal*, 78, 1859–1868. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.05.0218>.
- Lu, S., Lu, Y., Peng, W., Ju, Z., Ren, T., 2019. A Generalized Relationship between Thermal Conductivity and Matric Suction of Soils. *Geoderma* 337, 491-497. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.057>.
- Mayocchi, C.L., Bristow, K.L., 1995. Soil Surface Heat Flux: Some General Questions and Comments on Measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 75, 43–50. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)02198-S](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02198-S).
- Mondal, S., Padmakumar, G.P., Sharma, V., Singh, D.N., Baghini, M.S., 2015. A Methodology to Determine Thermal Conductivity of Soils from Flux Measurement. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal* 11(1), 73-85, <https://doi.org/10.1080/17486025.2015.1020346>.
- Ochsner, T.E., Sauer, T.J., Horton, R., 2006. Field Tests of the Soil Heat Flux Plate Method and Some Alternatives. *Agronomy Journal* 98, 1005-1014. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0249>.
- Ochsner, T.E., Sauer, T.J., Horton, R., 2007. Soil Heat Storage Measurements in Energy Balance Studies. *Agronomy Journal* 99, 311-317. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0103S>.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions. European Geosciences Union* 11(5), pp. 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.

- Peng, X., Heitman, J., Horton, R., Ren T., 2015. Field Evaluation and Improvement of the Plate Method for Measuring Soil Heat Flux Density. *Agricultural and Forest Meteorology* 214-215, 341-349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.001>.
- Philip, J.R., 1961. The Theory of Heat Flux Meters. *Journal of Geophysical Research* 66(2), 571-579. <https://doi.org/10.1029/JZ066i002p00571>.
- Pratt, A.W., 1969. Heat Transmission in Low Conductivity Materials. 301-405. In R.P. Tye (ed.) *Thermal Conductivity*. Vol. 1. Academic Press, London, UK.
- Rózański, A., Stefaniuk, D. Prediction of Soil Solid Thermal Conductivity from Soil Separates and Organic Matter Content: Computational Micromechanics Approach. *European Journal of Soil Science* 67, 551-563, 2016, <https://doi.org/10.1111/ejss.12368>.
- Rubert, G.C.D., Roberti, D.R., Pereira, L.S., Quadros, F.L.F., Velho, H.F.C., de Moraes, O.L.L., 2018. Evapotranspiration of the Brazilian Pampa Biome: Seasonality and Influential Factors. *Water* 10, 1864, <https://doi.org/10.3390/w10121864>.
- Sauer, T.J., 2002. Heat Flux Density. In Dane J.H., Topp G.C. (ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 4. SSSA, Madison, WI. 1233–1248.
- Sauer, T.J., Meek, D.W., Ochsner, T.E., Harris, A.R., Horton, R., 2003. Errors in Heat Flux Measurement by Flux Plates of Contrasting Design and Thermal Conductivity. *Vadose Zone Journal* 2, 580-588.
- Sauer, T.J., Ochsner, T.E., Horton, R., 2007. Soil Heat Flux Plates: Heat Flow Distortion and Thermal Contact Resistance. *Agronomy Journal* 99, 304-310. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0038s>.
- Tong, B., Gao, Z., Horton, R., Li, Y., Wang, L., 2016. An Empirical Model for Estimating Soil Thermal Conductivity from Soil Water Content and Porosity. *American Meteorological Society* 17, 601-613. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0119.1>.
- Verhoef, A., van den Hurk, B.J.J.M., Jacobs, A.F.G., Heusinkveld, B.G., 1996. Thermal Soil Properties for Vineyard (EFEDA-I) and Savanna (HAPEX-Sahel) Sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 78, 1-18. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02254-6](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02254-6).
- Wang, Z., Bou-Zeid, E., 2012. A Novel Approach for the Estimation of Soil Ground Heat Flux. *Agricultural and Forest Meteorology* 154-155, 214-221. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.12.001>.
- Welch, S.M., Kluitenberg, G.J., Bristow, K.L., 1996. Rapid Numerical Estimation of Soil Thermal Properties for a Broad Class of Heat-Pulse Emitter Geometries. *Measurement Science and Technology* 7, 932-938. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/6/012>.
- Zhao, X., Zhou, G., Jiang, X., 2019. Measurement of Thermal Conductivity for Frozen Soil at Temperatures close to 0°C. *Measurement* 140, 504-510. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.069>.

3 ARTIGO 2: MODELAGEM NUMÉRICA DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO A PARTIR DE DADOS EXPERIMENTAIS DE FLUXO DE CALOR E TEMPERATURA DO SOLO⁵

Resumo: O conhecimento das propriedades difusividade (k) e condutividade (λ) térmicas do solo é importante em aplicações de diversas áreas relacionadas, principalmente, a interação solo-planta-atmosfera. Estudos para compreender o que afeta o valor destas propriedades estão, frequentemente, relacionados ao fechamento do balanço de energia na superfície, onde tais propriedades são fundamentais para determinação do fluxo de calor próximo a superfície do solo. Neste trabalho estima-se a condutividade e a difusividade térmicas do solo utilizando modelagem numérica e analítica, através de medidas experimentais obtidas em campo no período de um ano no Sul do Brasil. Para tanto, foram utilizados dois métodos de solução numérica da equação de condução de calor, para a condutividade térmica do solo: Gradiente e Gradiente modificado. Os valores calibrados da condutividade térmica do solo, pelos métodos Gradiente e Gradiente modificado conduziram a resultados de fluxo de calor análogos na profundidade de $-0.10m$. Porém, a $-0.20m$, o método Gradiente modificado conduziu a melhores índices estatísticos, confirmando a hipótese de necessidade de um parâmetro adicional. Em relação a difusividade térmica do solo, esta foi estimada utilizando dois métodos analíticos: Amplitude e Mudança de Fase; e, dois métodos de solução numérica da equação geral que descreve a variação de temperatura em um sólido isotrópico unidimensional, apresentando variabilidade nos resultados em relação aos métodos utilizados para estima-la. Além disso, na análise diária, foi possível observar que, dentre os métodos utilizados, o numérico foi quem teve menor variabilidade. Com os valores diários estimados, das propriedades térmicas do solo, realizou-se a classificação em função do conteúdo de água no solo, sendo possível identificar a existência de relação tanto da condutividade térmica do solo quanto da difusividade térmica do solo ambos em função do conteúdo de água no solo.

Palavras-Chave: Condutividade Térmica do Solo. Difusividade Térmica do Solo. Conteúdo de Água no Solo. Modelagem Numérica. Bioma Pampa.

⁵ Artigo submetido para publicação na sua versão em Inglês.

1 Introdução

O conhecimento detalhado das propriedades térmicas do solo difusividade (k) e condutividade (λ) é importante em aplicações de diversas áreas relacionadas, principalmente, a interação solo-planta-atmosfera (Evetts et al., 2012). Estudos para compreender o que afeta o valor destas propriedades estão fortemente relacionados ao fechamento do balanço de energia na superfície, onde tais propriedades são fundamentais para determinação do fluxo de calor na superfície do solo (G_0) (Ochsner et al., 2001, Alkhaier et al., 2012; Venegas et al., 2013). Além disso, o conhecimento das propriedades térmicas do solo é fundamental para estimativas da temperatura do solo, variável importante em estudos de germinação e crescimento de plantas (Wang e Bou-Zheid, 2012).

As propriedades térmicas do solo dependem de um grande número de fatores tais como, textura, composição mineralógica, presença de sal, conteúdo de água no solo, entre outros (An et al., 2016a), o que pode tornar suas estimativas difíceis. Em geral, estes modelos são estimados utilizando-se dados de experimentos controlados, em laboratório, por técnicas de medição que incluem métodos de estado-estacionário tais como o “método de placa aquecida protegida” (Pratt, 1969) e, métodos transientes incluindo fonte de calor simples linear (de Vries e Peck, 1958; Mondal, 2015) e dupla prova por pulso de calor (Bristow et al., 1994; Kluitenberg et al., 1995; Welch et al., 1996). Um desafio tem sido obter estimativas de condutividade térmica do solo *in situ* (ou, em experimentos de campo) em que as propriedades do solo não são bem caracterizadas como um resultado das limitações técnicas (Ochsner et al., 2006; Peng et al., 2015) e/ou climáticas.

Diferentes pesquisas têm sido realizadas, de modo a relacionar k e λ a fatores como conteúdo de água no solo (θ) e densidade do solo (ρ) (Campbell, 1985; de Vries, 1956; Wang et al., 2005; Arkhangel'skaya, 2009; Lu et al., 2014; Tong et al., 2016). Entretanto, com frequência, estes estudos são realizados em laboratório, o que pode limitar os resultados, uma vez que dados de laboratório estão restritos a condições de controle, diferentemente de dados de campo em que não é possível restringir as condições, tais como, umidade e temperatura do solo (Cobos e Baker, 2003).

Neste trabalho estima-se a condutividade e a difusividade térmicas do solo utilizando modelagem numérica e analítica, através de medidas experimentais obtidas em campo no período de um ano no Sul do Brasil. Para tanto, serão realizadas estimativas de condutividade térmica do solo, pelos métodos Gradiente e Gradiente modificado a dois diferentes níveis de profundidade e, de difusividade térmica do solo pelos métodos de Amplitude, Mudança de

Fase, a dois diferentes níveis de profundidade, e, Numérico, para um nível de profundidade, considerando estas propriedades constantes para o período de um ano. Posteriormente, serão calculadas estimativas diárias destas propriedades, considerando o método que melhor as estimou para todo o período, a fim de avaliar sua variação em função do conteúdo de água no solo. A variação do conteúdo de água no solo, será realizada considerando os modelos de Tong et al. (2016) e Zimmer et al. (2019) para o caso da condutividade térmica do solo e, os modelos de Arkhangel'skaya (2009), Tikhonravova e Khitrov (2003) e Polinomial de Grau 3, para o caso da difusividade térmica do solo.

Enquanto diversos estudos têm apresentado uma relação entre a condutividade térmica do solo e o conteúdo de água no solo - $\lambda(\theta)$ - utilizando dados experimentais de laboratório e de campo (Lu et al., 2014; Tong et al., 2016; e Zimmer et al., 2019), poucos estudos na literatura descrevem a relação entre a difusividade térmica do solo e o conteúdo de água no solo, $k(\theta)$. Com dados obtidos em laboratório, Arkhangel'skaya (2009) descreve um modelo para $k(\theta)$ para uso em diferentes tipos de solo.

Para atingir o objetivo proposto neste trabalho, ele está dividido nas seções: Material e Métodos, em que são descritos o sítio experimental e o processo de obtenção dos dados, além da revisão bibliográfica de trabalhos relacionados ao proposto nesta pesquisa e da modelagem numérica utilizada para estimativa das propriedades térmicas do solo; Resultados e Discussões, em que são apresentados os resultados obtidos e a comparação entre os modelos utilizados, bem como suas contribuições para o fechamento do balanço de energia na superfície; e, Conclusões: em que são apresentadas as ponderações referentes aos resultados obtidos.

2 Material e Métodos

2.1 Descrição do Sítio Experimental

As medidas experimentais foram obtidas em uma área de vegetação nativa destinada a pecuária, no município de Aceguá, estado do Rio Grande do Sul, fronteira entre Brasil e Uruguai, na localização geográfica ($31^{\circ} 39' 21,1''S$; $54^{\circ} 10' 30,7''W$, 170 m), inserida na região do bioma Pampa. O clima pertence a zona do franco Cfa, temperado úmido com verão quente, classificação de Köppen (Nimer, 1989), com temperaturas do ar que variam de máximas em torno dos $40^{\circ}C$ a mínimas negativas em torno de $-1^{\circ}C$ e precipitação climática em torno de 1500 mm ao ano.

As temperaturas do solo foram medidas com sensores de temperatura (T108, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA), posicionados a 0,05m, a 0,15m e a 0,25m abaixo da superfície e o fluxo de calor no solo foi medido com sensores de fluxo (HFP01, Hukseflux Thermal Sensor B.V., Delft, The Netherland), posicionados a 0,10m e a 0,20m abaixo da superfície do solo, de modo que este esteja na posição média entre os sensores de temperatura do solo. Também foi medido o conteúdo de água no solo (θ) utilizando reflectômetro de conteúdo de água (CS616, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) instalados a 0,05m e 0,10m abaixo da superfície. Os dados foram coletados a cada minuto e foram realizadas médias de 30 minutos no período de 18 de janeiro de 2018 a 18 de janeiro de 2019. Falhas nas coletas são comuns, devido a problemas de manutenção em sensores, falta de energia, etc., porém, nenhuma metodologia de fechamento de falhas foi realizada nos dados aqui utilizados.

A Figura 1 apresenta a distribuição dos sensores de solo instalados no sítio experimental. Os sensores utilizados foram separados em dois níveis. O nível 1 é definido pelo intervalo de profundidades entre $-0,15m$ e $-0,05m$, contendo dois sensores de temperatura, um sensor de fluxo de calor no solo e um sensor de conteúdo de água no solo. De forma análoga, o nível 2 é definido pelo intervalo de profundidades entre $-0,25m$ e $-0,15m$, contendo dois sensores de temperatura e um sensor de fluxo de calor no solo. O sensor de temperatura instalado a $-0,15m$ foi utilizado para ambos os níveis (1 e 2).

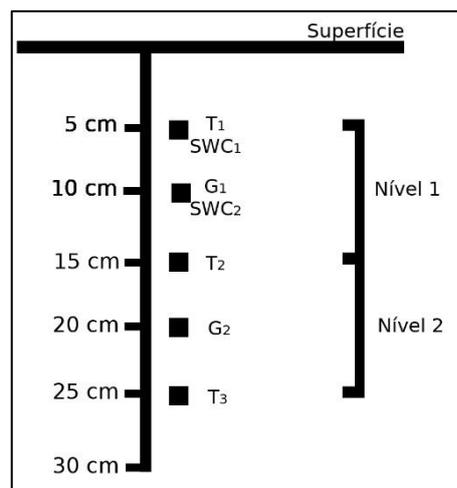


Figura 1 - Configuração das posições dos sensores de solo instalados no sítio experimental de Aceguá-RS. *G* representa o sensor de fluxo de calor no solo, *T* representa o sensor de temperatura do solo e *SWC* o sensor de conteúdo de água no solo.

2.2 Propriedades Térmicas do Solo

O Fluxo de Calor no Solo a uma profundidade z é dado pela Lei de Condução de Calor (Carslaw e Jaeger, 1959):

$$G_z = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

em que G_z (Wm^{-2}) é o fluxo de calor no solo, λ ($Wm^{-1}K^{-1}$) é a condutividade térmica do solo, T (K) é a temperatura do solo e z (m) é a profundidade do solo em relação a superfície.

A equação de condução de calor unidimensional em um meio isotrópico, é definida por (Carslaw e Jaeger, 1959):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c_v} \frac{\partial G_z}{\partial z} \quad (2)$$

onde t (s) é o tempo e c_v ($Jm^{-3}K^{-1}$) é a capacidade térmica volumétrica. Substituindo a Equação 1 na Equação 2, tem-se:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c_v} \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Assumindo que a capacidade térmica volumétrica é constante e a condutividade térmica do solo dependa do conteúdo de água no solo e da profundidade, a Equação 3 pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c_v} \lambda(\theta(z)) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{c_v} \frac{\partial}{\partial z} \lambda(\theta(z)) \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4)$$

renomeando:

$$\gamma = \frac{1}{c_v} \frac{\partial}{\partial z} \lambda(\theta(z)) \quad (5.1)$$

$$k = \frac{\lambda(\theta(z))}{c_v} \quad (5.2)$$

de modo que:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \gamma \frac{\partial T}{\partial z} \quad (6)$$

Analisando os termos do lado direito da Equação 6 em relação a dependência da condutividade térmica do solo em função da profundidade (z), pode-se considerar dois casos:

1. Caso: $\gamma = 0$

A Equação 6 reduz-se a Equação de Condução de Calor (Carslaw e Jaeger, 1959):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (7)$$

onde a difusividade térmica do solo é independente da profundidade. Neste caso, assume-se que o solo tem as propriedades de isotropia e homogeneidade, além de a condutividade térmica do solo não ser dependente da profundidade. Assim, assume-se que as trocas de energia ocorrem somente por processo condutivo.

2. Caso: $\gamma \neq 0$

O segundo termo do lado direito da Equação 6 pode ser interpretado como uma variação vertical da condutividade térmica do solo em função do conteúdo de água no solo. Assumindo-se assim que o solo não é verticalmente homogêneo.

Outros autores, também analisaram situações levando em consideração que o solo não é homogêneo, como por exemplo, Gao et al. (2003) os quais avaliaram a existência de processos de condução e convecção térmicos de forma independente de modo a incorporar as duas equações para estimar a variação temporal da temperatura do solo. Para estes autores, o valor de γ é definido como:

$$\gamma = -\frac{C_w}{C_g} w \varphi$$

com w a taxa de infiltração de líquido, φ o conteúdo de água no solo, C_w a capacidade térmica volumétrica da água e C_g a capacidade térmica volumétrica do solo. Gao et al. (2008) propuseram um modelo supondo que γ poderia ser escrito como a associação entre o modelo sugerido por Gao et al. (2003) e o apresentado na Equação 5.1, ficando assim definido:

$$\gamma = \frac{\partial k}{\partial z} - \frac{C_w}{C_g} w \varphi$$

lembrando que $k = \frac{\lambda}{c_v}$. Além disso, os autores identificaram que o principal contribuinte nesta relação é $\frac{\partial k}{\partial z}$.

Liu et al. (2019) consideraram a necessidade de incorporar os processos convectivos na equação de condução de calor, definindo o parâmetro γ como sendo:

$$\gamma = \frac{C_w}{C_r} u$$

em que C_w é a capacidade térmica volumétrica da água, C_r é a capacidade térmica volumétrica do sistema fluído-rocha (uma solução para C_r pode ser encontrada em Rau et al. (2014)) e u é a taxa volumétrica de fluxo. Liu et al. (2019), ainda, descrevem uma solução analítica para a Equação 6. Estes autores mencionam, também, que quanto maior a variação da umidade do solo, em relação a profundidade, maior será o valor de γ . Em contrapartida, se não houver variação da umidade do solo ou esta for desprezível, γ tenderá a zero.

Importante destacar que as proposições de Gao et al. (2003, 2008) e de Liu et al. (2019) requerem uma análise matemática mais elaborada e um número maior de informações referentes as propriedades físicas do solo em comparação ao proposto neste trabalho que requer somente medidas de temperatura do solo a profundidades conhecidas.

2.2.1 Solução Analítica: Métodos de Amplitude e Mudança de Fase

A Equação 7 pode ser resolvida analiticamente, de modo que a temperatura do solo pode ser descrita por uma função periódica (Carslaw e Jaeger, 1959; Horton et al., 1983; Verhoef et al., 1996; An et al., 2016a). Com condições de contorno:

$$T(0, t) = T_m + A \text{sen}(\omega t)$$

$$T(\infty, t) = T_m$$

cuja temperatura a uma dada profundidade (z) será dada por:

$$T(z, t) = T_m + A e^{\varphi} \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

com T_m a temperatura média diária, ω a velocidade angular de rotação da terra, definida por $\omega = \frac{2\pi}{P}$, com P sendo o período (24 horas), $\varphi = -z \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$ e A a amplitude da onda de temperatura da superfície.

O método da amplitude é definido por (An et al., 2016b):

$$k_A = \frac{\omega(z_1 - z_2)^2}{2 \left[\ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \right]^2} \quad (9)$$

em que A_1 e A_2 são as amplitudes nas profundidades z_1 e z_2 , respectivamente.

E, o método da mudança de fase, é definido por (An et al., 2016b):

$$k_P = \frac{\omega(z_1 - z_2)^2}{2(\varphi_1 - \varphi_2)^2} \quad (10)$$

em que φ_1 e φ_2 são as fases nas profundidades z_1 e z_2 , respectivamente.

2.2.2 Solução Numérica

As equações diferenciais parciais, presentes na Equação 1 e na Equação 6, podem ser resolvidas numericamente pelo método das diferenças finitas, assumindo que:

$$\frac{\partial T}{\partial z} \approx \frac{T_{z_{i+1}}^n - T_{z_{i-1}}^n}{2 \Delta z} \quad (11.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_z^{n+1} - T_z^{n-1}}{2 \Delta t} \quad (11.2)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \approx \frac{T_{z+1}^n - 2T_z^n + T_{z-1}^n}{(\Delta z)^2} \quad (11.3)$$

onde T representa a temperatura do solo a uma dada profundidade z , t é o tempo e os índices n e i representam, respectivamente, a variação temporal e a variação de profundidade da medida de temperatura do solo.

Optou-se pelo método das diferenças finitas por apresentar melhores características de estabilidade (Burden e Faires, 2010). Uma vez que, este método consiste em substituir cada uma das derivadas na equação diferencial por uma aproximação por quociente de diferenças. A escolha particular do quociente de diferenças é realizada de modo que se mantenha uma ordem específica de erro de truncamento (Burden e Faires, 2010), sendo utilizado, para este caso, diferenças finitas centradas.

Assim, utilizando a aproximação da Equação 11.1, a Equação 1 torna-se:

$$G_z = \lambda \left[\frac{T_{z_{i+1}}^n - T_{z_{i-1}}^n}{2 \Delta z} \right] \quad (12)$$

Em Romio et al. (2019) propõe-se uma modificação para a Equação 12, a qual consiste no acréscimo de um parâmetro empírico constante (ε) para ajustar o comportamento observado dos dados experimentais:

$$G_z = \lambda \left[\frac{T_{z_{i+1}}^n - T_{z_{i-1}}^n}{2 \Delta z} \right] + \varepsilon \quad (13)$$

Usando as aproximações das Equações 11.1 a 11.3, a Equação 6 é resolvida da seguinte forma:

$$\left[\frac{T_z^{n+1} - T_z^{n-1}}{2 \Delta t} \right] = k \left[\frac{T_{z+1}^n - 2T_z^n + T_{z-1}^n}{(\Delta z)^2} \right] + \gamma \left[\frac{T_{z+1}^n - T_{z-1}^n}{2 \Delta z} \right] \quad (14)$$

Chen e Kling (1996), ao estudar a solução numérica da Equação 7 propuseram o acréscimo de um parâmetro A , de modo que tenha a seguinte forma numérica:

$$\left[\frac{T_z^{n+1} - T_z^n}{\Delta t} \right] = k \left[\frac{T_{z+1}^n - 2T_z^n + T_{z-1}^n}{(\Delta z)^2} \right] + A \quad (15)$$

Segundo os autores, o acréscimo de um parâmetro constante considera os efeitos não lineares de todos os processos não-condutivos presentes nas medidas de solo. Além disso, mostraram que estes processos influenciam mais significativamente em camadas mais profundas. Entretanto, por ser um parâmetro constante pode não representar de forma adequada o fluxo vertical de variação da temperatura do solo. Portanto, a solução apresentada na Equação 14, demonstra uma representação física do parâmetro A .

2.3 Propriedades Térmicas do Solo em Função do Conteúdo de Água no Solo

2.3.1 Condutividade Térmica do Solo em Função do Conteúdo de Água no Solo

Na literatura diversos estudos apresentam equações que descrevem o comportamento da condutividade térmica em função do conteúdo de água no solo, alguns utilizando apenas propriedades físicas do solo (de Vries, 1963; Johansen, 1975; Côté e Konrad, 2005) e outros utilizando parâmetros empíricos (Lu et al., 2014; Tong et al., 2016; Zimmer et al., 2019). Neste trabalho serão analisados dois modelos empíricos, Tong et al. (2016) e Zimmer et al. (2019), com parâmetros calibrados utilizando os valores de condutividade térmica diária obtidos pela Equação 13 (método Gradiente modificado).

Tong et al. (2016), analisando diferentes modelos da literatura, propuseram uma relação da forma:

$$\lambda(\theta) = a - b \cdot e^{(-c\theta)} \quad (16)$$

em que a , b e c são parâmetros empíricos a serem estimados e θ é o conteúdo de água no solo.

Zimmer et al. (2019) propõem um novo modelo empírico para estimativa da condutividade térmica do solo em função do conteúdo de água no solo, sendo definido por:

$$\lambda(\theta) = \lambda_{dry} + e^{(\beta)} \cdot e^{\left(\frac{\phi}{(\theta - \theta_{min})^\alpha} \right)} \quad (17)$$

em que λ_{dry} ($Wm^{-1}K^{-1}$) é a condutividade térmica de uma amostra de solo próximo ao conteúdo de água no solo mínimo, e^β está relacionado ao valor assintótico de λ dependendo, também, do menor valor de λ experimental, θ_{min} é o conteúdo de água no solo mínimo do conjunto de dados e, os parâmetros φ e α são fatores de ajuste.

2.3.2 Difusividade Térmica do Solo em Função do Conteúdo de Água no Solo

Na literatura técnica, são poucos os trabalhos que estudam a relação entre a difusividade térmica do solo e o conteúdo de água no solo. Um destes trabalhos, é o de Arkhangel'skaya (2009) o qual descreve a relação $k(\theta)$ por meio da função:

$$k(\theta) = k_0 + a e^{\left[-0.5 \left(\frac{\ln\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)}{b} \right)^2 \right]} \quad (18)$$

em que k_0 é a difusividade térmica do solo inicial (definida por uma relação da função log-normal), θ é o conteúdo de água no solo, θ_0 é o conteúdo de água no solo mínimo (definido por uma relação da função log-normal) e a e b parâmetros a estimar empiricamente.

Tikhonravova e Khitrov (2003) (apud Arkhangel'skaya, 2009) propuseram uma equação polinomial de grau 5 descrita por:

$$k(\theta) = k_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^5 \quad (19)$$

onde k_0 , a_1 , a_2 e a_3 são parâmetros a serem estimados empiricamente. Neste estudo sugerimos o uso de uma função polinomial de grau 3, na perspectiva de reduzir o grau do polinômio e avaliar o comportamento em relação aos dados experimentais, definida por:

$$k(\theta) = k_0 + b_1\theta + b_2\theta^2 + b_3\theta^3. \quad (20)$$

De modo análogo ao modelo de Tikhonravova e Khitrov (2003) (apud Arkhangel'skaya, 2009) é necessário calibrar os quatro parâmetros k_0 , b_1 , b_2 e b_3 .

2.4 Calibração e Análise dos Modelos

Dados de G_{exp} e T_{soil} (para as diferentes profundidades) foram selecionados de 3 dias aleatórios (dados de um dia inteiro) de cada mês do ano, totalizando 36 dias, os quais foram utilizados para estimar λ e k por diferentes métodos.

Para estimar λ foram utilizados os seguintes métodos:

- MG : Método dos Mínimos Quadrados aplicado a Equação 12;
- MR : Método dos Mínimos Quadrados aplicado a Equação 13;

Para estimar k foram utilizados os seguintes métodos:

- MA : Método da Amplitude (Equação 9);
- MPS : Método da Mudança de Fase (Equação 10);
- MN : Método dos Mínimos Quadrados aplicado a Equação 14, considerando o parâmetro γ nulo ($\gamma = 0$);
- MN_γ : Método dos Mínimos Quadrados aplicado a Equação 14, considerando o parâmetro γ constante, neste caso, γ também é estimado.

O valores de λ e ε obtidos por cada ajuste foram inseridos nas respectivas equações de cada método com os valores experimentais de temperatura do solo, obtendo-se G_z estimados (G_{MA} , G_{MPS} , ...). A validação de cada método, foi realizada utilizando-se estes valores de G_z com os valores obtidos experimentalmente (G_{exp}). De maneira análoga, os valores de k e γ obtidos por cada ajuste foram inseridos nas respectivas equações de cada método com os valores experimentais de temperatura do solo, obtendo-se T_z estimados (T_{MA} , T_{MPS} , ...). A validação de cada método, foi realizada utilizando-se estes valores de T_z com os valores obtidos experimentalmente (T_{soil}), excluindo-se os dados relativos aos dias usados para estimação.

Foram utilizadas equações para estimar λ e k em função de θ (conteúdo de água no solo). Para estes casos, utilizou-se os dados diários de λ e k (de todo o período), estimados pelos métodos MG , MR e MN_γ agrupados em relação ao conteúdo de água no solo. Para λ utilizou-se as equações:

- Tong et al. (2016), calibrada em relação valores de λ diários, agrupados em função do conteúdo de água no solo, estimados por MR em dois diferentes níveis de profundidade;

- Zimmer et al. (2019), calibrada em relação aos valores de λ diários, agrupados em função do conteúdo de água no solo, estimados por MR em dois diferentes níveis de profundidade.

Para k utilizou-se as equações:

- Arkhangel'skaya (2009) calibrada em relação aos valores de k estimados diariamente por MN_{γ} e agrupados em função do conteúdo de água no solo;
- Tikhonravova e Khitrov (*apud* Arkhangel'skaya, 2009) calibrada em relação aos valores de k estimados diariamente por MN_{γ} e agrupados em função do conteúdo de água no solo;
- Função Polinomial de Grau 3 calibrada em relação aos valores de k estimados diariamente por MN_{γ} e agrupados em função do conteúdo de água no solo.

Os índices estatísticos utilizados foram $RMSE$ e R^2 . Estes índices foram calculados pelas seguintes equações:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Y_{exp} - Y_{est})^2}{n}}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_{exp} - Y_{est})^2}{\sum(Y_{exp} - \bar{Y})^2}$$

em que Y_{exp} representa os valores experimentais, Y_{est} os valores estimados, \bar{Y} a média das observações e n o número de observações.

3 Resultados e Discussões

3.1 Variáveis do Solo

As Figuras 2 e 3 apresentam os valores de temperatura do solo, conteúdo de água no solo e fluxo de calor no solo, nas diferentes profundidades, durante o período do experimento. A variação da temperatura do solo apresenta sazonalidade característica das estações do ano na região. Nas camadas mais superficiais há maior variabilidade da temperatura do solo entre os períodos diurno e noturno. Os primeiros dois meses do ano apresentaram menor conteúdo

de água no solo, afetando inclusive o conteúdo de água nas maiores profundidades. Este fenômeno se deu por conta da precipitação, de aproximadamente $74 \text{ mm m\text{ês}^{-1}}$, abaixo da média para o período. Segundo estudo local publicado pela Embrapa⁶ (Embrapa, 2015), neste período, a precipitação média é de aproximadamente $80 \text{ mm m\text{ês}^{-1}}$, já considerada de déficit hídrico.

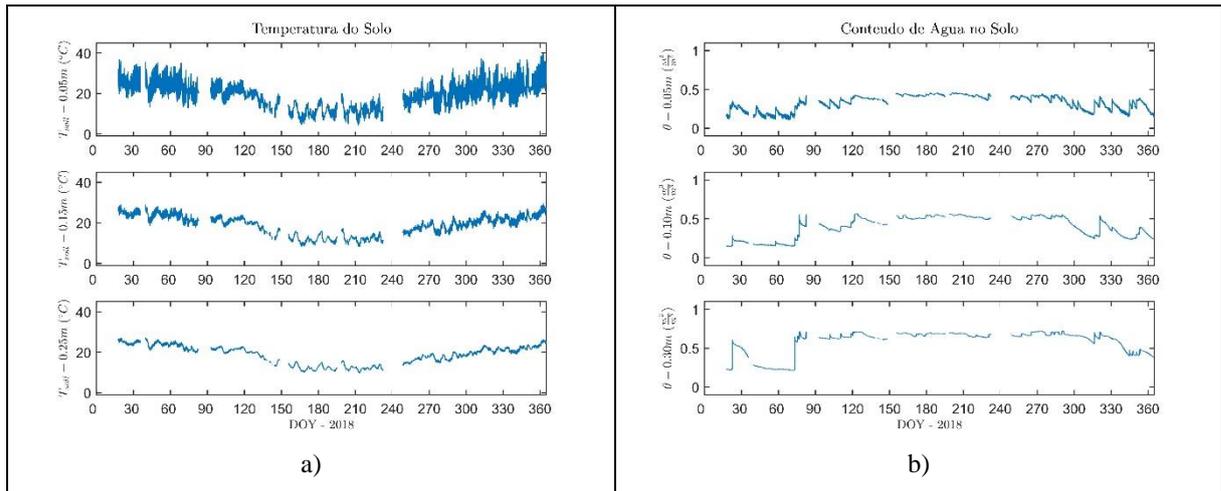


Figura 2 - Medidas de meia-hora da Temperatura do Solo ($-0,05\text{m}$, $-0,15\text{m}$ e $-0,25\text{m}$) e Conteúdo de Água no Solo ($-0,05\text{m}$, $-0,10\text{m}$ e $-0,30\text{m}$).

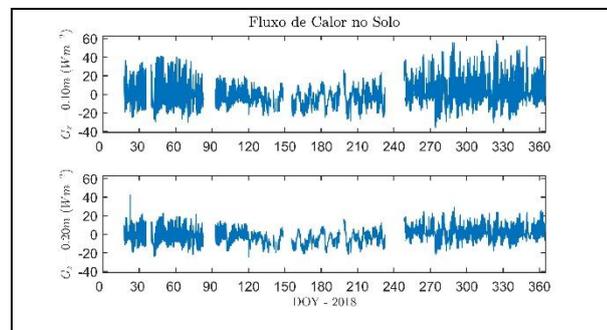


Figura 3 - Medidas de meia-hora do Fluxo de Calor no Solo ($-0,10\text{m}$ e $-0,20\text{m}$).

3.2 Propriedades do Solo

3.2.1 Condutividade Térmica do Solo

A condutividade térmica do solo (λ) foi estimada utilizando-se *MG* e *MR*, nos diferentes níveis, cujos valores obtidos são apresentados na Tabela 1.

⁶ Embrapa: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Empresa Pública vinculada ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Fonte: <http://www.embrapa.br>.

Tabela 1 - Valores estimados de λ e ε (quando disponível) para diferentes métodos e diferentes níveis de amostragem.

Método	Nível	λ ($W m^{-1}K^{-1}$)	ε ($W m^{-2}$)
<i>MG</i>	1	0,42	-
	2	0,78	-
<i>MR</i>	1	0,42	-0,53
	2	0,81	-2,84

A estimativa dos valores de λ no nível 1 é igual em ambos os métodos e similar para o nível 2, com maiores valores para *MR*. Os resultados para o nível 1 são quase 50% menores em comparação ao nível 2, para ambos os métodos, mostrando que λ varia com a profundidade. O parâmetro ε estimado por *MR* apresentou uma diferença de $2,31 W m^{-2}$ de um nível para outro, sendo, em módulo, maior no nível mais profundo. Estes resultados podem estar relacionados ao conteúdo de água no solo, que varia com a profundidade, conforme se observa na Figura 2b.

Lu et al. (2014) analisando 17 diferentes tipos de solo, verificaram valores de λ que variaram de $\sim 0,2 W m^{-1}K^{-1}$ a $\sim 2,3 W m^{-1}K^{-1}$. Além da variação dos valores de λ para os diferentes tipos de solo, indicaram que esta variação ocorreu, também, em um mesmo tipo de solo, mencionando que isto pode estar relacionado ao conteúdo de água no solo (θ) e a densidade aparente (ρ_b). Resultados que corroboram com os aqui obtidos para o perfil de solo analisado nesta pesquisa.

A Figura 4 apresenta os gráficos de dispersão do fluxo de calor no solo experimental (G_{exp}) comparado aos valores de fluxos de calor no solo estimados pela Equação 12 utilizando-se os valores de λ obtidos por *MR*, para as profundidades $-0,10m$ e $-0,20m$. Em relação ao nível 1 não há diferença significativa entre os fluxos de calor no solo estimados pelos diferentes métodos. Isto deve-se, em especial, pelos valores calibrados de condutividade térmica do solo para ambos os métodos serem muito semelhantes e o valor de ε ser muito baixo para interferir significativamente nas estimativas do fluxo de calor no solo. Porém, no nível 2 é possível observar uma melhora nos índices estatísticos quando o fluxo de calor no solo é estimado por *MR*.

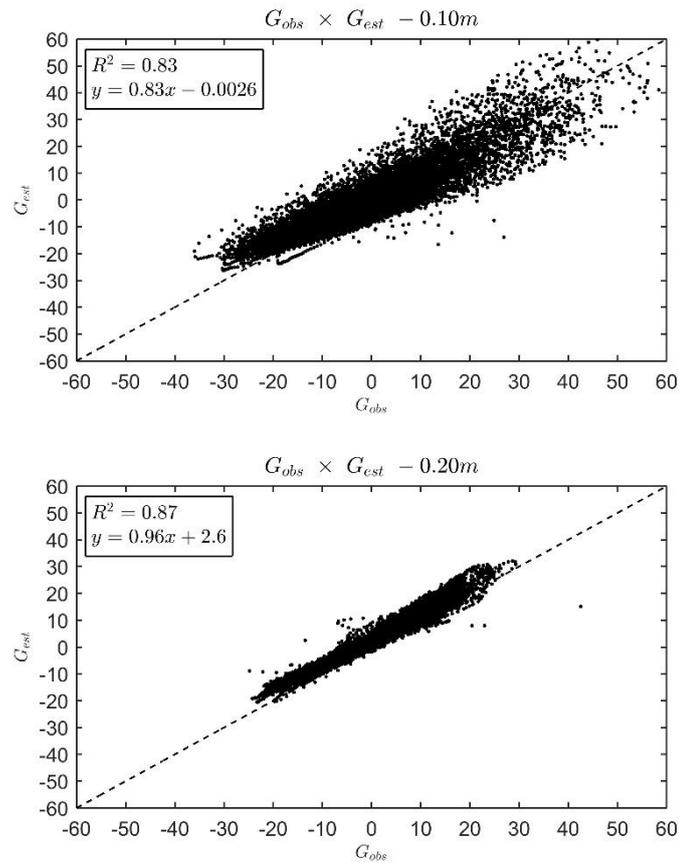


Figura 4 - Gráfico de dispersão referente a Eq. 12 (para as profundidade $-0,10m$ e $-0,20m$) utilizando λ obtido por MR.

3.2.1.1 Variação Diária da Condutividade Térmica do Solo

A condutividade térmica do solo diária é apresentada na Figura 5 para ambos os métodos. Uma significativa variabilidade ocorre para o nível 1, com valores entre $0,18 Wm^{-1}K^{-1}$ e $1,00 Wm^{-1}K^{-1}$ quando λ é estimada utilizando *MG* e entre $0,19 Wm^{-1}K^{-1}$ e $0,84 Wm^{-1}K^{-1}$ para *MR*. Para o nível 2, os valores de condutividade térmica do solo variaram entre $0,15 Wm^{-1}K^{-1}$ e $1,79 Wm^{-1}K^{-1}$ para *MG* e entre $0,46 Wm^{-1}K^{-1}$ e $1,24 Wm^{-1}K^{-1}$ para *MR*. Não é possível definir uma sazonalidade nas estimativas da condutividade térmica do solo em ambos os níveis. No entanto, é possível perceber que, para ambos os casos, *MR* apresentou menor variabilidade nos valores da condutividade térmica do solo devido, particularmente, ao parâmetro adicional ε cujo objetivo é realizar uma correção na solução numérica da Lei de Condução de Calor para que o modelo

possa adequar-se melhor ao comportamento observado nos dados experimentais de fluxo de valor no solo e gradiente de temperatura no solo.

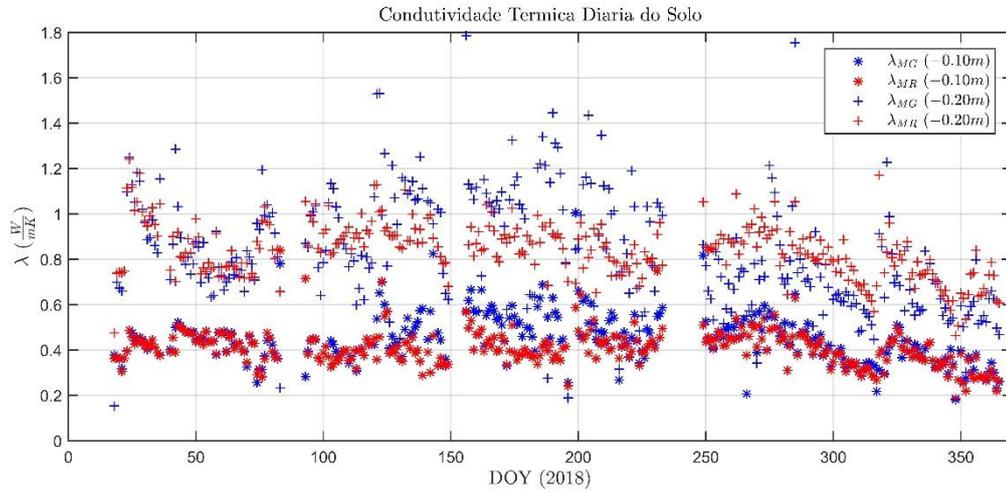


Figura 5 - Condutividade Térmica do Solo Diária (0.10m e 0.20m) estimados pelos métodos *MG* e *MR*. A linha horizontal indica o dia do ano (DOY).

3.2.2 Difusividade Térmica do Solo

A difusividade térmica foi calculada utilizando os métodos *MA*, *MPS*, *MN* e *MN_γ*. Para os métodos *MA* e *MPS* foram utilizadas as medidas de temperatura do solo nas profundidades $-0,15m$ e $-0,05m$; $-0,25m$ e $-0,15m$; e, $-0,25m$ e $-0,05m$; e, para os métodos *MN* e *MN_γ*, foram utilizadas as medidas de temperatura a $-0,25m$, $-0,15m$ e $-0,05m$. Os resultados da difusividade térmica do solo para os diferentes métodos e nas diferentes profundidades são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores estimados de k (m^2s^{-1}) e γ (ms^{-1}) para diferentes métodos e diferentes intervalos de amostragem.

Intervalo	<i>MN_γ</i>		<i>MN</i>	<i>MA</i>	<i>MPS</i>
	(k_{N_γ})	(γ)	(k_N)	(k_A)	(k_P)
$-0,05m$ $-0,15m$				$2,9 \times 10^{-7}$	$3,87 \times 10^{-7}$
$-0,15m$ $-0,25m$				$3,95 \times 10^{-7}$	$5,69 \times 10^{-7}$
$-0,05m$ $-0,25m$	$2,93 \times 10^{-7}$	$1,12 \times 10^{-6}$	$2,98 \times 10^{-7}$	$3,36 \times 10^{-7}$	$4,65 \times 10^{-7}$

Os resultados observados indicam que os valores de difusividade térmica do solo obtidos pelos métodos *MN* e *MN_γ* foram semelhantes. Valores, também, semelhantes a *MA*

para o intervalo de profundidade $[-0.15m, -0.05m]$. O método *MPS* apresentou maiores valores de difusividade térmica do solo para ambas as profundidades. Uma variação média de aproximadamente 30% entre os diferentes métodos é observada, indicando que o método utilizado influencia nos resultados obtidos, assim como conclui An et al. (2016b). Ainda, nota-se diferenças nos resultados em relação a estimativa a diferentes profundidades, fato que pode estar relacionado com diferenças no tipo de solo, por exemplo.

An et al. (2016b) estimaram a difusividade térmica do solo para diferentes profundidades e diferentes condições ambientais numa região caracterizada como semiárida, encontrando valores que variam de $10^{-5}m^2s^{-1}$ a $10^{-7}m^2s^{-1}$. Wang et al. (2010) estimaram a difusividade térmica do solo para uma região de argila obtendo valores da ordem de $10^{-7}m^2s^{-1}$. Otunla e Oladiran (2013) estimaram k para um solo argilo-arenoso (loamy sand) obtendo valores que variaram de $2,5 \times 10^{-7}m^2s^{-1}$ a $8,4 \times 10^{-7}m^2s^{-1}$. Considerando os resultados dos diferentes autores é possível observar que os valores estimados nesta pesquisa estão de acordo com a literatura, uma vez que, estão situados em um intervalo de $2,9 m^2s^{-1}$ a $5,69 m^2s^{-1}$, para os diferentes métodos e diferentes profundidades de amostragem.

3.2.2.1 Variação Diária da Difusividade Térmica do Solo

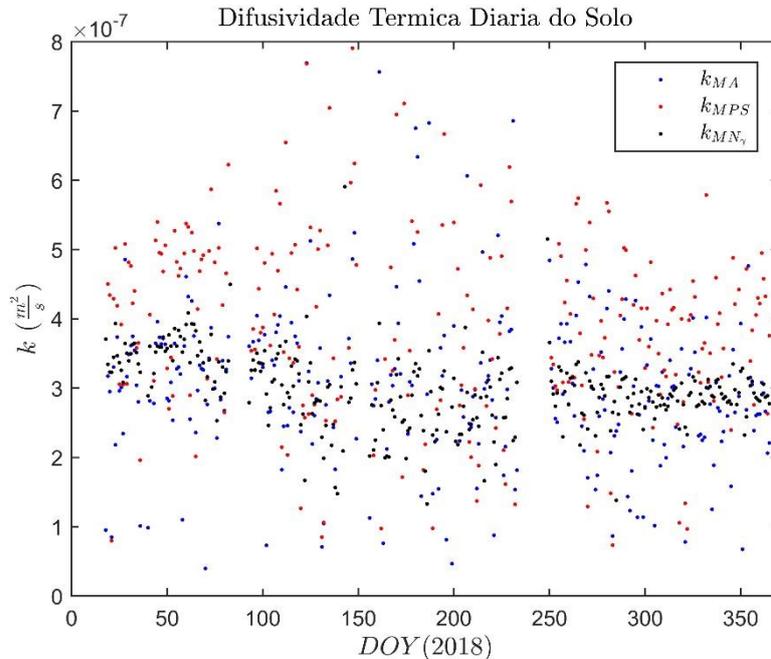


Figura 6 - Difusividade Térmica Diária do Solo estimada por três diferentes métodos: *MA*, *MPS* e *MN_γ*.

De forma semelhante a condutividade térmica do solo, os valores de difusividade térmica do solo diários não apresentaram sazonalidade, mas grande variabilidade, especialmente, os valores obtidos com os métodos *MA* e *MPS* (Figura 6). Os valores obtidos por MN_γ estão mais próximos entre si em uma faixa que varia de $1,307 \times 10^{-7} m^2s^{-1}$ a $5,907 \times 10^{-7} m^2s^{-1}$, enquanto os obtidos por *MA* variam de $0,3985 \times 10^{-7} m^2s^{-1}$ a $7,695 \times 10^{-7} m^2s^{-1}$ e os por *MPS* variam de $0,7343 \times 10^{-7} m^2s^{-1}$ a $7,909 \times 10^{-7} m^2s^{-1}$. Esta maior variação dos métodos *MA* e *MPS* deve-se, em especial, as características das funções, a primeira por possuir uma operação logarítmica da razão entre as amplitudes - Equação 9 - e a segunda por possuir uma diferença de fases no denominador - Equação 10. Para o caso do parâmetro γ de MN_γ é possível, também, observar uma variabilidade sem apresentar sazonalidade, conforme Figura 7, com valores compreendidos entre $-3.51 \times 10^{-6} ms^{-1}$ e $3.22 \times 10^{-6} ms^{-1}$ e γ médio de $1.12 \times 10^{-6} ms^{-1}$ (Tabela 2).

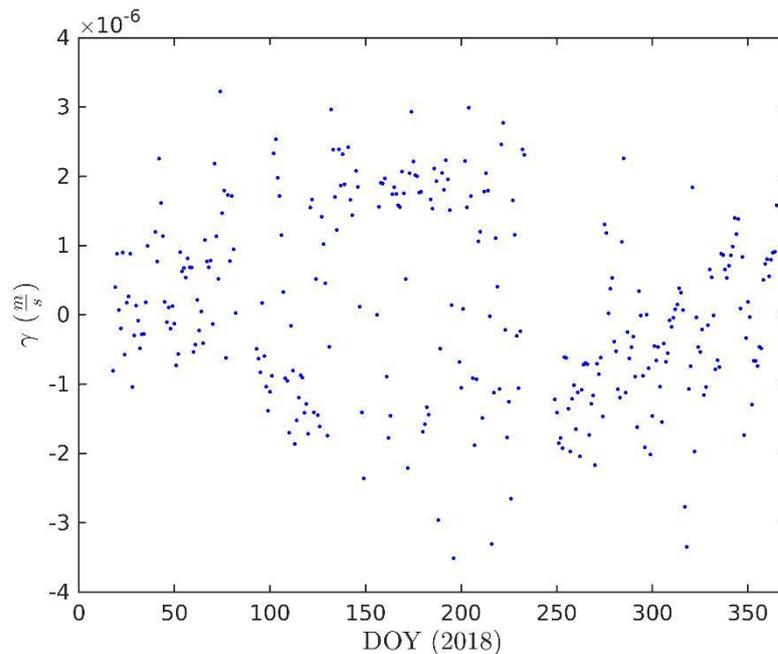


Figura 7 - Valores diários de γ obtidos por MN_γ .

3.3 Análise das Propriedades Térmicas do Solo em Função do Conteúdo de Água no Solo

Nesta etapa serão analisadas as variações das propriedades térmicas condutividade e difusividade do solo em função do conteúdo de água no solo. Para isso, foram estimados os valores diários de ambas as propriedades. Em relação a condutividade térmica do solo,

utilizou-se os valores diários obtidos por MR - Equação 13 – e, quanto a difusividade térmica do solo, utilizou-se os valores diários obtidos por MN_{γ} .

3.3.1 Condutividade Térmica do Solo em Função do Conteúdo de Água no Solo

A Figura 8 apresenta os valores da condutividade térmica do solo, obtidos por MR , estimados para ambos os níveis (1 e 2) distribuídos em função do conteúdo médio diário de água no solo, bem como os modelos calibrados de Tong et al. (2016) e Zimmer et al. (2019). Para calibração dos modelos agrupou-se os valores diários da condutividade térmica do solo por intervalos de $0,01\text{ mm}$ do conteúdo médio diário de água no solo (a $-0,05\text{m}$), em seguida, calculou-se a média e o desvio-padrão dos agrupamentos e, com os valores médios calibrou-se os modelos. A escolha pelos valores diários de λ obtidos por MR dá-se em função de apresentar melhores estimativas em comparação a MG .

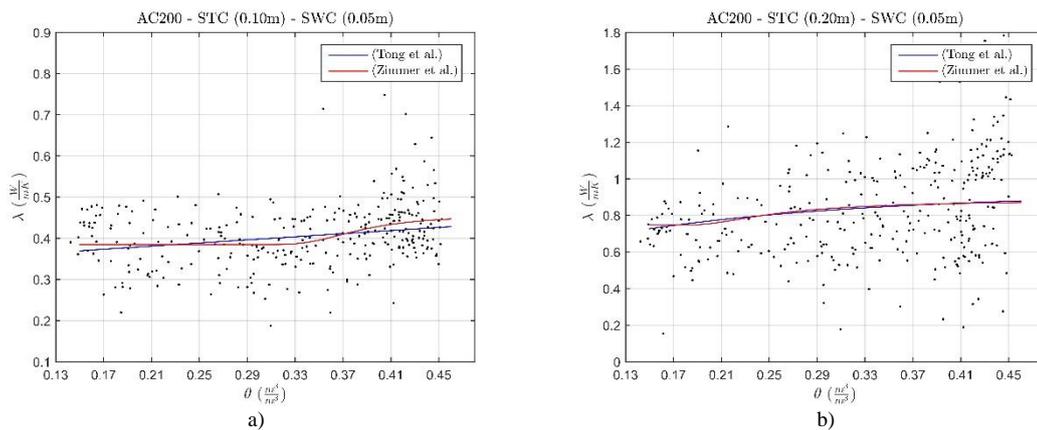


Figura 8 - Condutividade Térmica do Solo Diária a $-0,10\text{m}$ e a $-0,20\text{m}$ agrupada por Conteúdo de Água no Solo Diário a $-0,05\text{m}$ com, respectivas, média e desvio-padrão. Bem como, funções ajustadas de Tong et al. e Zimmer et al.

A Tabela 3, apresenta os valores dos parâmetros calibrados para os modelos de Tong et al. (2016) e Zimmer et al. (2019), a $-0,10\text{m}$ e a $-0,20\text{m}$. Observa-se que os parâmetros diferiram significativamente para as diferentes profundidades, em ambos os modelos. Porém, não foi possível identificar regularidades na variação destes parâmetros em relação a variação da profundidade.

Tabela 3 - Parâmetros estimados dos modelos de Tong et al. (2016) e Zimmer et al. (2019) para as profundidades $-0,10\text{ m}$ e $-0,20\text{ m}$.

		$-0,10\text{ m}$	$-0,20\text{ m}$
Zimmer et al. (2019)	α	6,3886	1,7608
	β	-2,6650	-1,9738
	φ	$6,441 \times 10^{-5}$	0,0154
Tong et al. (2016)	a	3,2854	0,9216
	b	2,9447	0,4079
	c	0,0656	4,9418

Os resultados estatísticos R^2 e RMSE para os diferentes casos são apresentados na Tabela 4. O modelo de Zimmer et al. (2019) apresentou melhores resultados em comparação ao modelo de Tong et al. (2016), para ambas as profundidades, com R^2 de 0,56 e 0,60, para as profundidades $-0,10\text{ m}$ e $-0,20\text{ m}$, respectivamente, em comparação a Tong et al. (2016), que obteve, para as mesmas profundidades 0,53 e 0,57.

Tabela 4 - Resultados estatísticos dos modelos de Tong et al. (2016) e Zimmer et al. (2019) para as diferentes profundidades.

	R^2	RMSE
Tong - $STC_{-0.10m}$	0,53	0,027
Zimmer - $STC_{-0.10m}$	0,56	0,021
Tong - $STC_{-0.20m}$	0,57	0,039
Zimmer - $STC_{-0.20m}$	0,60	0,036

3.3.2 Difusividade Térmica do Solo em Função do Conteúdo de Água no Solo

Devido a existência de dependência da condutividade térmica do solo com o conteúdo de água no solo, é esperado que a difusividade térmica do solo também seja influenciada pelo conteúdo de água no solo. Para analisar esta relação, os valores diários da difusividade térmica do solo, apresentados na Figura 6, foram distribuídos em função do conteúdo médio diário de água no solo (a $-0,05\text{ m}$), conforme apresentado na Figura 9, que possui, também, as curvas calibradas das Funções sugeridas por Arkhangel'skaya (2009) e Tikhonravova e Khitrov (2003). Para calibração destes modelos, realizou-se agrupamento análogo ao caso da condutividade térmica do solo, ou seja, os valores diários de difusividade térmica do solo foram agrupados por intervalos de $0,01\text{ mm}$ do conteúdo médio diário de água no solo (a

–0,05 m), em seguida, calculou-se a média e o desvio-padrão dos agrupamentos e, com os valores médios calibrou-se os modelos.

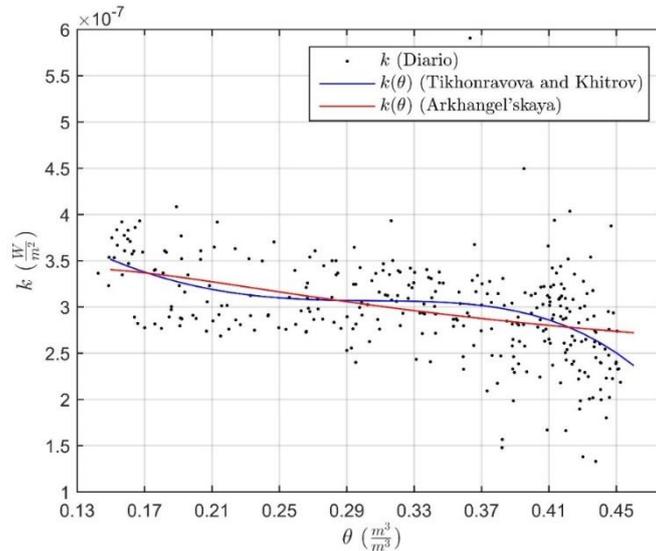


Figura 9 - Difusividade térmica diária agrupada em função do conteúdo de água no solo e, respectivos, modelos de Tikhonravova e Khitrov e Arkhangel'skaya.

A Tabela 5, apresenta os valores obtidos para os modelos de Arkhangel'skaya (2009) e Tikhonravova e Khitrov (2003). O parâmetro θ_0 foi obtido a partir dos dados experimentais. O parâmetro k_0 do modelo de Tikhonravova e Khitrov (2003) é, relativamente, menor que o de Arkhangel'skaya. Os demais parâmetros foram calibrados em função do conjunto de dados.

Tabela 5 - Parâmetros estimados dos modelos de Tikhonravova e Khitrov e Arkhangel'skaya.

Arkhangel'skaya (2009)	k_0	$2,229 \times 10^{-7}$
	θ_0	0,13
	a	$1,219 \times 10^{-7}$
	b	0,92
Tikhonravova e Khitrov (2003)	k_0	$5,598 \times 10^{-7}$
	a_1	$-2,046 \times 10^{-6}$
	a_2	$4,426 \times 10^{-6}$
	a_3	$-1,545 \times 10^{-5}$

Os resultados estatísticos R^2 e RMSE para os diferentes casos são apresentados na Tabela 6. O modelo de Tikhonravova e Khitrov (2003) apresentou melhores resultados, com

$R^2 = 0,70$ em comparação ao de Arkhangel'skaya (2009) cujo $R^2 = 0,55$. Isto pode estar relacionado a variação do conteúdo de água no solo da região. Arkhangel'skaya (2009) possuía, no sítio experimental, na região de Vladimir Opolie (Russia), um intervalo de conteúdo de água no solo entre $0,01 m^3 m^{-3}$ e $0,5 m^3 m^{-3}$. Diferentemente da região analisada nesta pesquisa cujo intervalo está entre $0,14 m^3 m^{-3}$ e $0,45 m^3 m^{-3}$.

Tabela 6 - Resultados estatísticos dos modelos de Arkhangel'skaya e Tikhonravova e Khitrov.

	R^2	RMSE
Arkhangel'skaya	0,55	$1,941 \times 10^{-8}$
Tikhonravova e Khitrov	0,70	$1,587 \times 10^{-8}$

Outra etapa realizada foi comparar o modelo sugerido por Tikhonravova e Khitrov (*apud* Arkhangel'skaya, 2009), que consiste de um polinômio de grau 5, com um polinômio de grau 3. Os parâmetros calibrados, para ambos os modelos, são apresentados na Tabela 7. O parâmetro k_0 da função polinomial de grau 3 é relativamente menor que o do modelo de Tikhonravova e Khitrov (2003), porém, uma diferença menor em comparação aos modelos de Tikhonravova e Khitrov (2003) e Arkhangel'skaya (2009). Os demais parâmetros são calibrados em função do conjunto de dados.

Tabela 7 - Parâmetros estimados dos modelos de Tikhonravova e Khitrov (2003) e Função Cúbica.

Tikhonravova e Khitrov (2003)	k_0	$5,598 \times 10^{-7}$
	a_1	$-2,046 \times 10^{-6}$
	a_2	$4,426 \times 10^{-6}$
	a_3	$-1,545 \times 10^{-5}$
Cúbica	k_0	$6,973 \times 10^{-7}$
	b_1	$-3,96 \times 10^{-6}$
	b_2	$1,344 \times 10^{-5}$
	b_3	$-1,52 \times 10^{-5}$

A Figura 10 apresenta o comportamento dos dois modelos em função dos dados utilizados. É possível observar que o comportamento gráfico de ambos os modelos é similar. Os resultados estatísticos, também, indicam que ambas as funções descrevem comportamento análogo, com $R^2 = 0,70$, para os dois modelos, e RMSE de $1,587 \times 10^{-8}$ e $1,577 \times 10^{-8}$, para os casos, respectivamente, de Tikhonravova e Khitrov (2003) e Função Polinomial de Grau 3.

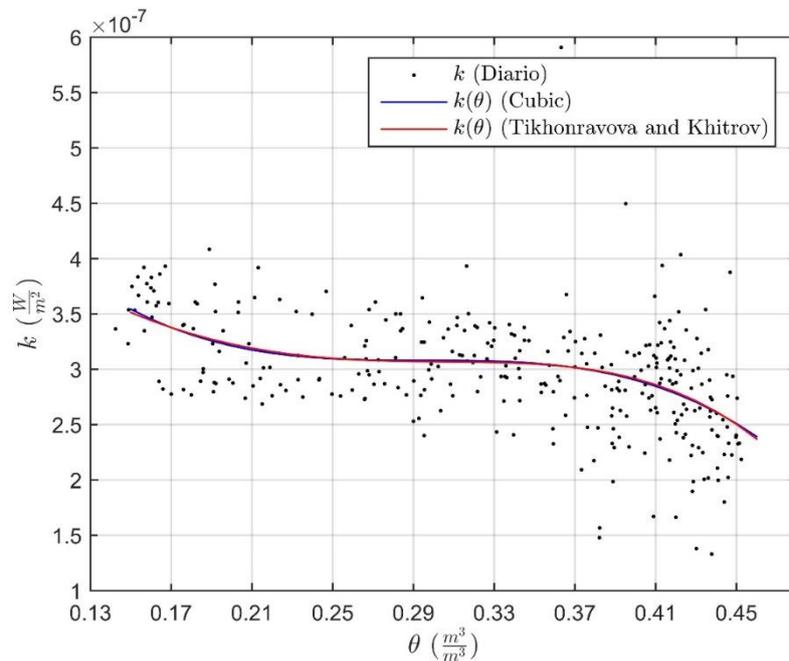


Figura 10 - Difusividade térmica diária agrupada em função do conteúdo de água no solo e, respectivos, modelos Função Polinomial de Grau 3 e de Tikhonravova e Khitrov.

4 Conclusões

O presente trabalho teve por objetivo estimar e analisar a condutividade térmica do solo e a difusividade térmica do solo para uma região de vegetação do bioma Pampa. Além disso, verificou-se a dependência destas propriedades em relação ao conteúdo de água no solo.

A estimativa da condutividade térmica do solo, para todo o período, foi realizada considerando-se os métodos *MG* e *MR*. Para a difusividade térmica do solo, considerou-se os métodos *MA*, *MPS*, *MN* e MN_{γ} .

Os resultados obtidos indicam que, os valores calibrados da condutividade térmica do solo, pelos métodos *MG* e *MR* conduziram a resultados de fluxo de calor no solo análogos na profundidade de $-0,10m$. Porém, para a profundidade de $-0,20m$, o valor obtido da condutividade térmica do solo, conduziu a melhores estimativas de fluxo de calor no solo por *MR*, confirmando a hipótese de necessidade de um parâmetro adicional (ε).

Em relação a difusividade térmica do solo, esta apresentou variabilidade nos resultados em relação aos métodos utilizados para estimá-la. Além disso, na análise diária, foi possível observar que, dentre os métodos utilizados, o numérico foi quem teve menor

variabilidade. O método numérico foi estimado considerando-se $\gamma = 0$ e $\gamma \neq 0$ (neste caso γ constante), para a região estudada, verificou-se que o parâmetro γ , mesmo apresentando valores equivalentes aos encontrados na literatura, contribuiu fracamente nas estimativas. Ainda, alguns autores mencionam que o parâmetro γ varia com a profundidade, porém, não foi possível avaliar esta característica devido ao desenho do experimento.

Para analisar a dependência das propriedades térmicas (condutividade e difusividade térmicas do solo) em função do conteúdo de água no solo, realizou-se a estimativa diária dessas propriedades, com a intenção de analisar, por exemplo, possíveis sazonalidades. A partir da estimativa diária das propriedades, foi possível identificar que os resultados obtidos são influenciados pelo método utilizado para estimá-las.

Com os valores diários estimados das propriedades térmicas do solo, realizou-se a classificação em função do conteúdo de água no solo. Sendo possível identificar a existência de relação tanto da condutividade térmica do solo quanto da difusividade térmica do solo ambos em função do conteúdo de água no solo.

Os resultados obtidos indicam que, para a condutividade térmica do solo, o modelo proposto por Zimmer et al. (2019) apresentou melhores resultados. Quanto a difusividade térmica do solo, apesar de o modelo de Arkhangel'skaya ser mais recente, apresentou resultados inferiores quando comparado aos modelos polinomiais de grau 3 e grau 5, este último sugerido por Tikhonravova e Khitrov (2003). Em relação ao modelo de Arkhangel'skaya deve-se destacar que ele possui a vantagem de permitir o ajuste dos parâmetros conhecendo-se as propriedades físicas do solo, o que não ocorre com os modelos polinomiais.

Por fim, em relação a Equação 16, para o caso de $\gamma \neq 0$, é possível avaliar a solução da derivação parcial, supondo λ dependente diretamente de θ e indiretamente de z , analisando o comportamento individual de cada parcela como:

$$\frac{\partial \lambda(\theta(z))}{\partial z} = \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

Porém, tal caso não será tratado neste trabalho devido a limitações no desenho do experimento.

Referências

- Alkhaier, F., Su, Z., Flerchinger, G.N., 2012. Reconnoitering the Effect of Shallow Groundwater on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance using MODIS and SEBS. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 1833–1844. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1833-2012>.
- An, K., Wang, W., Wang, Z., Zhao, Y., Yang, Z., Chen, L., Zhang, Z., Duan, L., 2016a. Estimation of Ground Heat Flux from Soil Temperature over a Bare Soil. *Theoretical and Applied Climatology* 129, n. 3-4, 913-922. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1816-8>.
- An, K., Wang, W., Zhao, Y., Huang, W., Chen, L., Zhang, Z., Wang, Q., Li, W., 2016b. Estimation from Soil Temperature of Soil Thermal Diffusivity and Heat Flux in Sub-surface Layers. *Boundary Layer Meteorology* 158, 473-488. <https://doi.org/10.1007/s10546-015-0096-7>.
- Arkhangel'skaya, T.A., 2009. Parameterization and Mathematical Modeling of the Dependence of Soil Thermal Diffusivity on the Water. *Content Eurasian Soil Science* 42(2), 162-172. <https://doi.org/10.1134/S106422930902007>.
- Bristow, K.L., Kluitenberg, G.J., Horton R., 1994. Measurement of Soil Thermal Properties with a Dual-probe Heat-pulse Technique. *Soil Science Society of American Journal* 58, 1288–1294. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050002x>.
- Burden, R.L., Faires, J.D., 2010. *Numerical Analysis*. ninth ed. Cengage Learning, Boston.
- Campbell, G.S., 1985. *Soil Physics with Basic: Transport Models for Soil-Plant Systems*. *Developments in Soil Science* 14. first ed. Elsevier Science B.V., Netherlands.
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., 1959. *Conduction of Heat in Solids*. fourth ed. Oxford University Press, London.
- Chen, D., Kling, J., 1996. Apparent Thermal Diffusivity in Soil: Estimation from Thermal Records and Suggestions for Numerical Modeling, *Physical Geography*, 17:5, 419-430. <https://doi.org/10.1080/02723646.1996.10642593>.
- Cobos, D.R., Baker, J.M., 2003. In Situ Measurement of Soil Heat Flux with the Gradient Method. *Vadose Zone J.* 2, 589-594. <https://doi.org/10.2136/vzj2003.5890>.
- de VRIES, D.A., 1956. Thermal Conductivity of Soil. *Nature* 178, 1074-1074, <https://doi.org/10.1038/1781074a0>.
- de Vries, D.A., Peck, A.J., 1958. On the Cylindrical Probe Method of Measuring Thermal Conductivity with Special Reference to Soils. Part 1. Extension of Theory and Discussion of Probe Characteristics. *Australian Journal of Physics* 11, 255-271.
- de Vries, D.A., 1963. *Thermal Properties of Soils*. *Physics of Plant Environment*, van Wijk WR (ed), North-Holland Publishing Company.
- Evelt, S.R., Agam, N., Kustas, W.P., Colaizzi, P.D., Schwartz, R.C., 2012. Soil Profile Method for Soil Thermal Diffusivity, Conductivity and Heat Flux: Comparison to Soil Heat

- Flux Plates. *Adv. Water Resour.* 50, 41–54. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.04.012>.
- Gao, Z., Fan, X., Bian, L., 2003. An Analytical Solution to One-Dimensional Thermal Conduction-Convection in Soil. *Soil Science* 168(2), 99-107. <https://doi.org/10.1097/00010694-200302000-00004>.
- Gao, Z., Determination of Soil Heat Flux in a Tibetan Short-Grass Prairie. *Boundary-Layer Meteorology* 114, 165-178. <https://doi.org/10.1007/s10546-004-8661-5>.
- Horton, R. Wierenga, P.J., Nielsen, D.R. 1983. Evaluation of Methods for Determining the Apparent Thermal Diffusivity of Soil Near the Surface. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, 25-32
- Hukseflux, 2016. User Manual HFP01 & HFP03 Heat Flux Plate / Heat Flux Sensor, Delft.
- Johansen, O. 1975. Thermal Conductivity of Soils. Ph.D. diss. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim (CRREL draft transl. 637, 1977).
- Kimball, B.A., Jackson, R.D., Nakayama, F.S., Idso, S.B., Reginato, R.J., 1976. Soil-Heat Flux Determination: Temperature Gradient Method with Computed Thermal Conductivities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40, 25-28. <https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000010011x>.
- Kluitenberg, G.J., Bristow, K.L., Das, B.S., 1995. Error Analysis of the Heat Pulse Method for Measuring Soil Heat Capacity, Diffusivity and Conductivity. *Soil Science Society of American Journal* 59, 719–726. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900030013x>.
- Kustas, W.P., Daughtry, C.S.T., 1990. Estimation of the Soil Heat Flux/Net Radiation Ratio from Spectral Data. *Agricultural and Forest Meteorology* 49, 205-223. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(90\)90033-3](https://doi.org/10.1016/0168-1923(90)90033-3).
- Kustas, W.P., Prueger, J.H., Hatfield, J.L., Ramalingam, K., Hipps, L.E., 2000. Variability in Soil Heat Flux from a Mesquite Dune Site. *Agricultural and Forest Meteorology* 103, 249–264. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00131-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00131-3).
- Li, Z., Yang, W., Cai, C., Wang, J., 2013. Aggregate Mechanical Stability and Relationship With Aggregate Breakdown Under Simulated Rainfall. *Soil Science* 178(7), 369-377. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3182a74255>.
- Li, Z., Yang, J., Zheng, Z., Yu, Y., Zhang, T., Hou, X., Wei, Z., 2017. Comparative Study of the Soil Thermal Regime in Arid and Semi-Humid Areas. *Environmental Earth Sciences* 76:28. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6354-2>.
- Li, R., Zhao, L., Wu, T., Wang, Q., Ding, Y., Yao, J., Wu, X., Hu, G., Xiao, Y., Du, Y., Zhu, X., Qin, Y., Yang, S., Bai, R., Du, E., Liu, G., Zou, D., Qiao, Y., Shi, J., 2019. Soil Thermal Conductivity and its Influencing Factors at the Tanggula Permafrost Region on the Qinghai–Tibet Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology* 264, 235-246. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.10.011>.
- Liu, Q., Chen, S., Jiang, L., Wang, D., Yang, Z., Chen, L., 2019. Determining Thermal Diffusivity using near-surface periodic Temperature Variations and its Implications for Tracing Groundwater Movement at the Eastern Margin of the Tibetan Plateau. *Hydrological*

Processes 33, 1276-1286. <https://doi.org/10.1002/hyp.13399>.

Liebenthal, C., Foken, T., 2007. Evaluation of Six Parameterization Approaches for the Ground Heat Flux. *Theoretical and Applied Climatology* 88, 43-56. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0234-0>.

Lu, Y., Lu, S., Horton, R., Ren, T., 2014. An Empirical Model for Estimating Soil Thermal Conductivity from Texture, Water Content, and Bulk Density. *Soil Science Society of America Journal*, 78, 1859–1868. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.05.0218>.

Lu, S., Lu, Y., Peng, W., Ju, Z., Ren, T., 2019. A Generalized Relationship between Thermal Conductivity and Matric Suction of Soils. *Geoderma* 337, 491-497. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.057>.

Mondal, S., Padmakumar, G.P., Sharma, V., Singh, D.N., Baghini, M.S., 2015. A Methodology to Determine Thermal Conductivity of Soils from Flux Measurement. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal* 11(1), 73-85, <https://doi.org/10.1080/17486025.2015.1020346>.

Nimer, E., 1989. *Climatologia do Brasil*. IBGE. 421p.

Ochsner, T.E., Horton, R., Ren, T., 2001. A New Perspective on Soil Thermal Properties. *Soil Science Society of America Journal* 65, 1641-1647. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1641>.

Philip, J.R., 1961. The Theory of Heat Flux Meters. *Journal of Geophysical Research* 66(2), 571-579. <https://doi.org/10.1029/JZ066i002p00571>.

Pratt, A.W., 1969. Heat Transmission in Low Conductivity Materials. 301-405. In R.P. Tye (ed.) *Thermal Conductivity*. Vol. 1. Academic Press, London, UK.

Rau, G.C., Andersen, M.S., McCallum, A.M., Roshan, H., Acworth, R.I., 2014. Heat as a Tracer to Quantify Water Flow in Near-Surface Sediments. *Earth-Science Reviews* 129, 40-58. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.10.015>.

Romio, L.C., Roberti, D.R., Buligon, L., Zimmer, T., Degrazia, G.A., 2019. A Numerical Model to Estimate the Soil Thermal Conductivity using Field Experimental Data. *Applied Sciences*. <submetido>

Rubert, G.C.D., Roberti, D.R., Pereira, L.S., Quadros, F.L.F., Velho, H.F.C., de Moraes, O.L.L., 2018. Evapotranspiration of the Brazilian Pampa Biome: Seasonality and Influential Factors. *Water* 10, 1864, <https://doi.org/10.3390/w10121864>.

Tong, B., Gao, Z., Horton, R., Li, Y., Wang, L., 2016. An Empirical Model for Estimating Soil Thermal Conductivity from Soil Water Content and Porosity. *American Meteorological Society* 17, 601-613. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0119.1>.

Venegas, P., Grandón, A., Jara, J., Paredes, J., Hourly Estimation of Soil Heat Flux Density at the Soil Surface with three Models and two Field Methods. *Theoretical and Applied Climatology* 112, 45-59, <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0705-z>.

Verhoef A., Van den Hurk B.J., Jacobs A.F., Heusinkveld B.G. (1996) Thermal Soil Properties for Vineyard (EFEDA-I) and Savanna (HAPEX-Sahel) Sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 78(1):1–18. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02254-6](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02254-6).

Wang, K., Wang, P., Liu, J., Sparrow, M., Haginoya, S., Zhou, X., 2005. Variation of Surface Albedo and Soil Thermal Parameters with Soil Moisture Content at a Semi-Desert Site on the Western Tibetan Plateau. *Boundary-Layer Meteorology* 116, 117-129, <https://doi.org/10.1007/s10546-004-7403-z>.

Wang, Z., Bou-Zeid, E., 2012. A Novel Approach for the Estimation of Soil Ground Heat Flux. *Agricultural and Forest Meteorology* 154-155, 214-221. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.12.001>.

Welch, S.M., Kluitenberg, G.J., Bristow, K.L., 1996. Rapid Numerical Estimation of Soil Thermal Properties for a Broad Class of Heat-Pulse Emitter Geometries. *Measurement Science and Technology* 7, 932-938. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/6/012>.

Yoon, S., Kim, M., 2019. Prediction of Ground Thermal Diffusivity from Thermal Response Tests. *Energy & Buildings* 185, 239-246. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.027>.

Zimmer, T., Roberti, D.R., Buligon, L., Souza, V.A., Romio, L.C. 2019. Influence of Weather Conditions in Soil Thermal Characterization in the Pampa Biome Brazilian. *Em preparação*.

4 DISCUSSÕES

Os artigos, apresentados nesta tese, realizaram análises das propriedades térmicas do solo, em dois sítios experimentais instalados em diferentes localidades do bioma Pampa Brasileiro, distantes entre si aproximadamente 60 km. A pesquisa realizada nestes locais permitiu compreender as características particulares deste bioma. Em outras palavras, foi possível perceber que, mesmo estudando um único bioma, verificam-se diferenças, em especial, nas características físicas do solo, conseqüentemente, conduzindo a diferentes caracterizações das propriedades térmicas do solo.

No sítio de Pedras Altas-RS têm-se solos do tipo Neossolo e Cambissolo, enquanto que, em Aceguá-RS encontram-se solos do tipo Vertissolo. Ambos os experimentos foram mantidos por longos períodos, diferenciando de um grande número de pesquisas encontradas na literatura, em que os experimentos são de laboratório ou de curto período variando de alguns dias a algumas semanas. A intenção de realizar experimentos para períodos maiores, aproximadamente um ano ou mais, é avaliar possíveis sazonalidades existentes e que possam interferir na estimativa das propriedades térmicas do solo. Para o caso da região do bioma Pampa, em especial, por estar compreendida em um clima subtropical com as quatro estações do ano bem definidas.

O sítio experimental de Pedras Altas-RS apresentou conteúdo de água no solo diário médio de $0,17 m^3 m^{-3}$, com mínimas de $0,06 m^3 m^{-3}$ e máximas de $0,33 m^3 m^{-3}$. O sítio de Aceguá-RS apresentou conteúdo de água no solo diário médio de $0,33 m^3 m^{-3}$, com mínimas de $0,14 m^3 m^{-3}$ e máximas de $0,45 m^3 m^{-3}$.

Os sítios, devido à proximidade, possuem climatologia semelhante com precipitação média anual de aproximadamente 1500 mm e variação mensal entre 100 mm e 160 mm, de acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET⁷.

Para o sítio de Pedras Altas-RS, foi proposto um modelo numérico para estimativa da condutividade térmica do solo a partir de medidas experimentais de fluxo de calor no solo e temperatura do solo em diferentes profundidades. A proposta tem por base o método Gradiente modificado pelo acréscimo de um parâmetro empírico constante (ε) cujo objetivo foi tornar a modelagem mais próxima das características apresentadas pelo conjunto de dados.

Foram utilizados diferentes métodos de solução da Equação 2 – Artigo 1 e comparados entre si, bem como, comparados ao modelo proposto (Equação 3 – Artigo 1),

⁷ Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>.

ajustado utilizando-se o Método dos Mínimos Quadrados. Também, organizou-se os dados em função do conteúdo de água no solo diário, medido a $-0,05 m$. Sendo possível identificar a existência de correlação entre a condutividade térmica do solo e o conteúdo de água no solo.

Para o sítio de Aceguá-RS, como já era conhecido, do experimento anterior (artigo 1), que havia a necessidade de acréscimo de um parâmetro empírico ao método Gradiente e a melhor forma de ajustar os dados experimentais, dentre os métodos analisados no artigo 1, seria utilizando o Método dos Mínimos Quadrados, optou-se por verificar se este comportamento mantinha-se em outro sítio experimental, realizando-se assim processo semelhante ao feito em Pedras Altas-RS.

Os valores obtidos de condutividade térmica do solo, com metodologia análoga e profundidade equivalente, foram relativamente diferentes nos sítios experimentais. Pelo método Gradiente, em Pedras Altas-RS obteve-se $1,01 Wm^{-1}K^{-1}$ com resultados diários variando de $-0,02 Wm^{-1}K^{-1}$ a $1,63 Wm^{-1}K^{-1}$ e, em Aceguá-RS, $0,42 Wm^{-1}K^{-1}$ com resultados diários variando de $0,18 Wm^{-1}K^{-1}$ a $1,0 Wm^{-1}K^{-1}$. Para o método Gradiente modificado, em Pedras Altas-RS obteve-se $0,993 Wm^{-1}K^{-1}$ com resultados diários variando de $0,68 Wm^{-1}K^{-1}$ a $1,46 Wm^{-1}K^{-1}$ e, em Aceguá-RS de $0,42 Wm^{-1}K^{-1}$ com resultados diários variando de $0,19 Wm^{-1}K^{-1}$ a $0,84 Wm^{-1}K^{-1}$. Ainda, para o método Gradiente modificado, os valores de ε , foram, para Pedras Altas-RS, de $-2,216 Wm^{-2}$ com resultados diários variando de $-4,58 Wm^{-1}K^{-1}$ a $-0,92 Wm^{-1}K^{-1}$ e, para Aceguá-RS, de $-0,53 Wm^{-2}$ com resultados diários variando de $-8,41 Wm^{-2}$ a $10,18 Wm^{-2}$. Indicando que, mesmo estando em um único bioma, as propriedades térmicas do solo diferenciam-se significativamente.

No artigo 2, uma segunda etapa, consistiu em estimar a difusividade térmica do solo. Foram utilizados quatro métodos para estimativa da difusividade térmica sendo dois analíticos (métodos de Amplitude e Mudança de Fase) e dois numéricos. No caso dos modelos numéricos, a equação geral é a mesma, porém, considerando-se casos diferentes, o primeiro em que se leva em consideração, somente o processo condutivo e o segundo em que, além do processo condutivo propôs-se uma modificação a equação numérica para estimativa da difusividade térmica do solo que leva em consideração a variação vertical da condutividade térmica do solo em função do conteúdo de água no solo.

A análise dos valores diários da difusividade térmica do solo indicou que os modelos analíticos apresentam maior variabilidade, em relação aos modelos numéricos. Ainda, para este sítio em particular, o parâmetro γ influenciou fracamente na estimativa da difusividade

térmica do solo, diferentemente do mencionado na literatura técnica. Resultado este devido, muito provavelmente, a configuração do experimento. Dentre os modelos analisados o modelo numérico foi o que melhor estimou a difusividade térmica do solo.

O desenho do experimento em Aceguá-RS permitiu, ainda, analisar a condutividade térmica do solo em dois perfis de profundidade. Indicando que o valor da condutividade aumenta em profundidades maiores. E, novamente o método Gradiente modificado foi quem melhor estimou a condutividade térmica do solo.

Em ambos os trabalhos foi estudada a relação entre a condutividade térmica do solo e o conteúdo de água no solo. No artigo 1, foram analisados os modelos teóricos de Johansen (JOHANSEN, 1977) e Lu-Ren (LU et al., 2007) e o modelo empírico de Tong (TONG et al., 2016). Enquanto, no artigo 2, foram analisados dois modelos empíricos, de Tong (TONG et al., 2016) e de Zimmer (ZIMMER et al., 2019). Sendo identificada relação entre essas duas variáveis do solo. Do artigo 1, verificou-se que o modelo de Tong representou melhor os dados observados. A partir disso, no artigo 2, utilizou-se o modelo de Tong como referência além do modelo de Zimmer. Observando-se que, ambos os modelos representaram a relação entre estas variáveis. Entretanto, o de Zimmer representou melhor as estimativas.

Em Aceguá-RS, particularmente, também foi possível estudar a relação entre a difusividade térmica do solo e o conteúdo de água no solo. Foram analisados dois modelos existentes na literatura e uma sugestão. Os modelos analisados foram o de Arkhangel'skaya, o qual tem por base uma função de distribuição do tipo log-normal, o de Tikhonravova e Khitrov que tem por formato uma função polinomial de grau 5 e, como sugestão, uma função polinomial de grau 3. Observou-se que, dentre os modelos, os polinomiais representaram melhor a relação entre as variáveis, com resultados estatisticamente iguais. Destaca-se que o modelo de Arkhangel'skaya, apesar de apresentar resultados inferiores, é um modelo semi-teórico que permite a estimativa dos parâmetros a partir das propriedades físicas do solo ou por meio de ajuste em função dos dados experimentais.

Ambos os trabalhos mostram a influência das diferentes metodologias na avaliação da dependência das propriedades térmicas (condutividade e difusividade térmicas do solo) em função do conteúdo de água no solo. Uma vez que, dependendo da metodologia utilizada, diferentes estimativas serão obtidas, tanto para as propriedades quanto para os parâmetros das equações, em especial, empíricas que relacionam essas variáveis.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa foram realizadas estimativas das propriedades térmicas do solo, em particular, condutividade térmica e difusividade térmica, para dois sítios experimentais, em diferentes municípios da região do bioma Pampa. As estimativas foram realizadas considerando-se modelos presentes na literatura, bem como, modelos numéricos propostos para condutividade térmica do solo (Equação 3 – Artigo 1) e difusividade térmica do solo (Equação 14 – Artigo 2).

A proposição dos modelos levou em consideração a análise do comportamento observado nos dados experimentais, além da, simplicidade dos modelos propostos. Em outras palavras, modelos que exigem o conhecimento de um número reduzido de propriedades do solo e que consigam representar melhor os dados observados.

Diferentes técnicas numéricas de solução da Equação 2 – Artigo 1 foram utilizadas e comparadas ao método utilizado no modelo proposto (Equação 3 – Artigo 1). O estudo, realizado no artigo 1, mostrou que a escolha por isolar λ na Equação 2 – Artigo 1 ($M1$, $M2$ e $M3$) pode afetar a acurácia da estimativa da condutividade térmica do solo. O método $M1$ foi o que pior representou os dados observados. Os métodos $M2$ e $M3$ comparados a $M1$ representaram melhor os dados observados. Entretanto, a exclusão de dados foi necessária para os três processos.

Ainda, no artigo 1, observou-se que o uso do MMQ para estimar a condutividade térmica ($M4$ e $M5$) apresentou melhores resultados que outros métodos, o que permite concluir que o MMQ é a técnica mais adequada para esta estimativa. Ainda, a solução da Equação 3 por MMQ ($M5$) apresentou os melhores resultados, confirmando assim a hipótese de que o acréscimo de um parâmetro empírico é necessário e influencia na acurácia do modelo. Resultado análogo obtido, também, no artigo 2.

Em relação a difusividade térmica do solo, estudada no artigo 2, esta apresentou variabilidade nos resultados em relação aos métodos utilizados para estimá-la. Além disso, na análise diária, foi possível observar que, dentre os métodos utilizados, o numérico foi que teve menor variabilidade. O método numérico foi estimado considerando-se duas circunstâncias $\gamma = 0$ e $\gamma \neq 0$ (neste caso γ constante). Para a região estudada, verificou-se que o parâmetro γ contribuiu fracamente nas estimativas. Alguns autores mencionam que o parâmetro γ varia com a profundidade, entretanto, não foi possível avaliar esta característica devido ao desenho do experimento.

Em relação a Equação 14 – Artigo 2, para o caso de $\gamma \neq 0$, é possível avaliar a solução da derivação parcial, uma vez que λ foi suposto dependente diretamente de θ e indiretamente de z . Em outras palavras, pode-se analisar o comportamento individual de cada parcela desta derivação, ou seja,

$$\frac{\partial \lambda(\theta(z))}{\partial z} = \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

Para isso, deve-se estudar a variação da condutividade térmica do solo a partir de medições verticais do conteúdo de água no solo. Porém, tal caso não pôde ser analisado devido a limitações no desenho do experimento.

Assim, pode-se afirmar que os modelos propostos representaram melhor os dados experimentais, em comparação a modelos presentes na literatura. Indicando que, para o caso da condutividade térmica do solo, torna-se importante o acréscimo de um parâmetro empírico ao método Gradiente de modo a melhor representar os dados experimentais observados. E, para a difusividade térmica do solo, evidencia a existência de uma variação vertical da condutividade térmica do solo. Ressalta-se que, em relação a difusividade, outros autores também identificam a existência desta variação, porém, com diferentes interpretações, por exemplo, interpretando como processos convectivos.

Analisou-se, também, a existência de relação entre a condutividade e a difusividade térmicas do solo em função do conteúdo de água no solo. Cujos resultados obtidos corroboram com trabalhos presentes na literatura para regiões com características de solo semelhantes. Em outras palavras, existe relação entre as propriedades do solo e o conteúdo de água no solo. Uma perspectiva de trabalho futuro, sabendo da relação existente entre essas propriedades, consiste em analisar as estimativas delas considerando períodos com e sem chuva, por exemplo. Uma vez que, em períodos de chuva poderá ocorrer de o solo atingir seu ponto de saturação, interferindo nas estimativas das propriedades térmicas.

Conforme já mencionado, sabe-se dos eventuais problemas envolvendo medições experimentais *in situ*. De modo que, estes dados podem não ser os melhores para estimar a condutividade e a difusividade térmicas do solo quando comparados a dados de laboratório. Porém, atualmente existem muitas medições de dados obtidas em torres micrometeorológicas de redes de fluxos (FluxNet, SulFlux, AmeriFlux, ...) ao passo que, é importante realizar estudos para estimar as propriedades térmicas do solo com dados experimentais *in situ* (de campo).

O estudo das propriedades térmicas do solo é de suma importância, em particular, as propriedades relacionadas ao fechamento do balanço de energia na superfície, tais como a condutividade e a difusividade térmicas do solo. Uma vez que, medidas imprecisas dificultam o fechamento do balanço de energia. Neste sentido, torna-se pertinente continuar estudando estas propriedades, buscando relacioná-las a outras características, por exemplo, sazonalidade, porosidade do solo, teor mineralógico, além de outras características que, por ventura, possam ser identificadas e que possuam correlação com as propriedades estudadas neste trabalho.

Além disso, é importante, avaliar a utilização dos modelos propostos para simulação em ambientes computacionais de biosfera, a fim de verificar o comportamento apresentado em relação a diferentes modelos já existentes na literatura.

Acredita-se que os resultados obtidos nesta pesquisa possam contribuir para o avanço dos modelos de clima e tempo. Uma vez que, auxiliam no melhoramento das estimativas experimentais de fechamento do balanço de energia na superfície. Melhoramento este, especialmente, devido a relação dos modelos estudados com o fluxo de calor no solo, variável importante para o fechamento do balanço de energia na superfície.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALKHAIER, F.; SU, Z.; FLERCHINGER, G. N. Reconnoitering the Effect of Shallow Groundwater on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance using MODIS and SEBS. **Hydrological and Earth System Sciences**, v. 16, p. 1833–1844, 2012.
- AN, K. et al. Estimation of ground heat flux from soil temperature over a bare soil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3, p. 913–922, 2016a.
- _____. Estimation from soil temperature of soil thermal diffusivity and heat flux in subsurface layers. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 158, p. 473–488, 2016b.
- ARKHANGEL'SKAYA, T. A. Parameterization and Mathematical Modeling of the Dependence of Soil Thermal Diffusivity on the Water Content. **Eurasian Soil Science**, v. 42, n. 2, p. 162-172, 2009.
- ARYA, S. P. **Introduction to Micrometeorology**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2001. 420 p.
- BAGGIO, R. **Estratégias de Manejo Adaptativo para os Campos Sulinos**. 2017. 128 p. Tese (Doutorado em Ciências – Ecologia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- BOLDRINI, I. L. et al. **Bioma Pampa: Diversidade Florística e Fisionômica**. Porto Alegre: Palloti, 2010.
- BRASIL. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapas**. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/tematicos.html>>. Acesso em: 20 de julho de 2019.
- BRISTOW, K. L.; KLUITENBERG, G. J.; HORTON, R. Measurement of Soil Thermal Properties with a Dual-probe Heat-pulse Technique. **Soil Science Society of America Journal**, n. 58, p. 1288-1294. 1994.
- BRISTOW, K. L. Measurement of Thermal Properties and Water Content of Unsaturated Sandy Soil using Dual-probe Heat-pulse Probes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 89, p. 75-84, 1998.
- BURDEN, R.L.; FAIRES, J. D. **Numerical Analysis**. 9. ed. Boston: Cengage Learning, 2010, 872 p.
- CAMPBELL, G.S., **Soil Physics with Basic: Transport Models for Soil-Plant Systems**. **Developments in Soil Science 14**. 1. ed. Netherlands: Elsevier Science B.V. 1985.
- CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. **Conduction of Heat in Solids**. 2. ed. London: Oxford University Press, 1959. 510 p.
- CHEN, D.; KLING, J. Apparent Thermal Diffusivity in Soil: Estimation from Thermal Records and Suggestions for Numerical Modeling. **Physical Geography**, v. 17, n. 5, p. 419-430. 1996.

COBOS, D. R.; BAKER, J. M. In Situ Measurement of Soil Heat Flux with the Gradient Method. **Vadose Zone Journal**, v. 2, 589-594, 2003.

CÔTÉ, J.; KONRAD, J-M. A Generalized Thermal Conductivity Modelo for Soils and Construction Materials. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 42, n. 2, p. 443-458, 2005.

CUNHA, N. G. da et al. **Estudo dos Solos do Município de Pedras Altas-RS** (Circular Técnica). Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005. 420 p.

_____. **Estudos de Solos do Município de Aceguá, RS** (Circular Técnica). Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2015, 75 p.

de VRIES, D. A. Thermal Conductivity of Soil. **Nature**, v. 178, p. 1074-1074, 1956.

_____. Thermal Properties of Soils. **Physics of Plant Environment**, van Wijk WR (ed.), North-Holland Publishing Company, 1963.

de VRIES, D. A.; PECK, A. J. On the Cylindrical Probe Method of Measuring Thermal Conductivity with Special reference to Soils. Part 1. Extension of Theory and Discussion of Probe Characteristics. **Australian Journal of Physics**, v. 11, p. 255-271, 1958.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied Regression Analysis**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1966.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. 306 p.

EVETT, S. R. Soil Profile Method for Soil Thermal Diffusivity, Conductivity and Heat Flux: Comparison to Soil Heat Flux Plates. **Advances in Water Resources**, v. 50, p. 41-54, 2012.

FAROUKI, O. T. **Thermal Properties of Soil**. 1981. 151 p. Monografia, U.S. Cold Regions Research Engineering Laboratory. Hanover, 1981.

FORBES, J. D. Account of some Experiments on the Temperature of the Earth at different Depths, and in different Soils, near Edinburgh. **Transactions of the Royal Society of Edinburgh**, v. 16, n. 2, p. 189-236, 1846.

FRITZ, J. **Partial Differential Equations**. 4. ed. New York: Springer-Verlag, 1982.

FUCHS, M. Heat Flux. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of Soil Analysis: Part 1 (Physical and Mineralogical Methods)**. 2. ed. Madison: _____. 1986. 1188 p.

GAO, Z.; FAN, X.; BIAN, L. An Analytical Solution to One-Dimensional Thermal Conduction-Convection in Soil. **Soil Science**, v. 168, n. 2, p. 99-107, 2003.

GAO, Z. et al. Comparison of Two Soil Temperature Algorithms for a Bare Ground Site on the Loess Plateau in China. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, p. D18105.1-D18105.11, 2008.

HELENE, O. **Método dos Mínimos Quadrados com Formalismo Matricial**. São Paulo: Livraria da Física, 2006, 102 p.

HORTON, R.; WIERENGA, P. J.; NIELSEN, D. R. Evaluation of Methods for Determining the Apparent Thermal Diffusivity of Soil near the Surface. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, p. 25-32, 1983.

HEUSINKVELD, B. G.; JACOBS, A. F. G.; HOLTSLAG, A. A. M.; BERKOWICZ, S. M. Surface Energy Balance Closure in an Arid Region: Role of Soil Heat Flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 122, p. 21-37, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.09.005>.

HUKSEFLUX. **User Manual HFP01 & HFP03 Heat Flux Plate / Heat Flux Sensor**, Delft, 2016.

JACKSON, R. D.; KIRKHAM, D. Method of measurement of the real thermal diffusivity of moist soil. **Soil Science Society of America**, v. 22, n. 6, p. 479–482, 1958.

JOHANSEN, O. **Thermal Conductivity of Soils**. Corps of Engineers, U.S. Army, Cold Regions Research Engineering Laboratory. Hanover, 1977. 291 p.

KLUITENBERG, G. J.; BRISTOW, K. L.; DAS, B. S. Error Analysis of the Heat Pulse Method for Measuring Soil Heat Capacity, Diffusivity and Conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, n. 59, p. 719-726, 1995.

KUSTAS, W. P.; DAUGHTRY, C. S. T. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 49, p. 205–223, 1990.

KUSTAS, W. P. et al. Variability in Soil Heat Flux from a Mesquite Dune Site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, p. 249–264. 2000.

LI Z. et al. Comparative Study of the Soil Thermal Regime in Arid and Semi-Arid Areas. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 1, 2017.

LIEBETHAL, C.; FOKEN, T. Evaluation of six parameterization approaches for the ground heat flux. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 88, p. 43–56, 2007.

LIU, Q. et al. Determining Thermal Diffusivity using Near-Surface Periodic Temperature Variations and its Implications for Tracing Groundwater Movement at the Eastern Margin of the Tibetan Plateau. **Hydrological Processes**, v. 33, p. 1276-1286, 2019.

LU, S. et al. An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 1, p. 8-14. 2007.

LU, Y. et al. An Empirical Model for Estimating Soil Thermal Conductivity from Texture, Water Content, and Bulk Density. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, p. 1859-1868, 2014.

- MONDAL, S. et al. A Methodology to Determine Thermal Conductivity of Soils from Flux Measurement. **Geomechanics and Geoengineering: An International Journal**, v. 11, p. 73-85, 2015.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. IBGE, 1989.
- OCHSNER, T. E.; HORTON, R.; REN, T. A New Perspective on Soil Thermal Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1641-1647, 2001.
- OCHSNER, T. E.; SAUER, T. J.; HORTON, R. Field Tests of the Soil Heat Flux Plate Method and Some Alternatives. **Agronomy Journal**, v. 98, p. 1005-1014, 2006.
- OKE, T. R. **Boudary Layer Climates**. 2. ed. London: Routledge, 1987. 464 p.
- ONCLEY, S. P. et al. The Energy Balance Experiment EBEX-2000. **American Meteorological Society Meeting**, 2002.
- OTUNLA, T. A.; OLADIRAN, E. O. Evaluation of Soil Thermal Diffusivity Algorithms at Two Equatorial Sites in West Africa. **Annals of Geophysics**, v. 56, n. 1, p. R0101.1-R0101.12, 2013.
- PENG, X. et al. Field Evaluation and Improvement of the Plate Method for Measuring Soil Heat Flux Density. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 214-215, p. 341-349, 2015.
- PHILIP, J. R. The Theory of Heat Flux Meters. **Journal of Geophysical Research**, v. 66, n. 2, p. 571-579. 1961.
- PRATT, A. W. Heat Transmission in Low Conductivity Materials. p. 301–405. In TYE, R. P. (ed.) **Thermal Conductivity**, v. 1, London (UK): Academic Press, 1969.
- RAU, G. C. et al. Heat as a Tracer to Quantify Water Flow in Near-Surface Sediments. **Earth-Science Reviews**, v. 129, p. 40-58. 2014.
- ROMIO, L. C. et al. A Numerical Model to Estimate the Soil Thermal Conductivity using Field Experimental Data. **Applied Sciences**, 2019. <submetido>
- RUBERT, G. C. D. **Variabilidade Sazonal e Controle Biofísico da Evapotranspiração na Vegetação do Bioma Pampa**. 2017. 98 p. Teste (Doutorado em Meteorologia) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- RUSSEL, E. S. et al. Impacts of soil heat flux calculation methods on the surface energy balance closure. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 215, p. 189–200, 2015.
- SAUER, T.J. Heat Flux Density. In: Dane, J. H.; Topp, G. C. (ed.) **Methods of Soil Analysis. Part 4**. SSSA, Madison, WI. 1233-1248, 2002.
- SAUER, T. J. et al. Errors in Heat Flux Measurement by Flux Plates of Contrasting Design and Thermal Conductivity. **Vadose Zone Journal**, v. 2, p. 580-588, 2003.

SAUER, T.J. et al. Soil Heat Flux Plates: Heat Flow Distortion and Thermal Contact Resistance. *Agronomy Journal*, v. 99, p. 304-310, 2007. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0038s>.

SELLERS, P. J. et al. A Simple Biosphere Model (*SiB*) for use within general circulation models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 43, n. 6, p. 505–531, 1986.

SHIOZAWA, S.; CAMPBELL, G. S. Soil Thermal Conductivity. *Remote Sensing Reviews*, v. 5, n. 1, p. 301-310, 1990.

TONG, B. et al. An Empirical Model for Estimating Soil Thermal Conductivity from Soil Water Content and Porosity. *American Meteorological Society*, v. 17, p. 601-613, 2016.

VENEGAS, P. et al. Hourly Estimation of Soil Heat Flux Density at the Soil Surface with Three Models and Two Field Methods. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 112, n. 1, p. 45–59, 2013.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. *Meteorologia Básica e Aplicações*. Viçosa: UFV, 2000. 448p.

WANG, K. et al. Variation of Surface Albedo and Soil Thermal Parameters with Soil Moisture Content at a Semi-Desert Site on the Western Tibetan Plateau. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 116, p. 117-129, 2005.

WANG, Z.-H.; BOU-ZEID, E. A Novel Approach for the Estimation of Soil Ground Heat Flux. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 154-155, p. 214–221, 2012.

WELCH, S. M.; KLUITENBERG, G. J.; BRISTOW, K. L. Rapid Numerical Estimation of Soil Thermal Properties for a Broad Class of Heat-Pulse Emitter Geometries. *Measurement Science and Technology*, v. 7, n. 6, p. 932-938, 1996.

ZHANG N.; WANG, Z. Review of Soil Thermal Conductivity and Predictive Models. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 117, p. 172-183, 2017.

ZIMMER, T. *Dinâmica das Propriedades Térmicas e do Fluxo de Calor no Solo em uma Área de Pastagem do Bioma Pampa*. 2017. 60 p. Dissertação (Mestrado em Física) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

ZIMMER, T., ROBERTI, D. R., BULIGON, L., SOUZA, V. A., ROMIO, L. C. Influence of Weather Conditions in Soil Thermal Characterization in the Pampa Biome Brazilian. *Em Preparação*, 2019.

ANEXO A – MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS - MMQ

A estimativa de parâmetros consiste de uma etapa importante na modelagem matemática. Devido ao fato de, por meio dela, serem obtidos os coeficientes de um modelo. O Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) é um dos recursos amplamente utilizados em ciências experimentais. Ele consiste em minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores experimentais e os estimados para uma dada função. Ou seja, supondo o caso, por exemplo, de uma função afim ($y = ax + b$), tem-se (HELENE, 2006; BURDEN; FAIRES, 2010):

$$MMQ(a, b) = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - ax_i - b)^2}{\sigma_i^2} \quad (\text{A.1})$$

onde: σ_i^2 é a variância entre x e y.

Os valores que minimizam $MMQ(a, b)$ são os valores ajustados \tilde{a} e \tilde{b} dos parâmetros, que são obtidos resolvendo-se as equações:

$$\frac{\partial MMQ(\tilde{a}, \tilde{b})}{\partial \tilde{a}} = 0 \quad \frac{\partial MMQ(\tilde{a}, \tilde{b})}{\partial \tilde{b}} = 0 \quad (\text{A.2})$$

Em outras palavras, os valores que minimizam $MMQ(a, b)$ são as soluções das derivadas parciais em relação a a e a b , calculadas simultaneamente em \tilde{a} e \tilde{b} . Uma descrição matricial simplificada, para o caso de uma função afim, é apresentada a seguir.

Considere um conjunto de n dados experimentais $y_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$:

$$\begin{aligned} ax_{11} + b &= y_1 \\ ax_{21} + b &= y_2 \\ &\vdots \\ ax_{n1} + b &= y_n \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

que pode ser representado matricialmente por:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & 1 \\ x_{21} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_{n1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Fazendo:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & 1 \\ x_{21} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_{n1} & 1 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

Pode-se obter a solução matricial dada por:

$$XA = Y$$

$$X^t X A = X^t Y$$

$$(X^t X)^{-1} (X^t X) A = (X^t X)^{-1} X^t Y$$

$$I A = (X^t X)^{-1} X^t Y$$

$$A = [(X^t X)^{-1} X^t] Y$$

onde: X é a matriz dos valores de entrada, A é a matriz dos valores a serem estimados (a e b) e Y é a matriz dos valores de saída. E, a operação entre colchetes é denominada de pseudo-inversa e corresponde, em linhas gerais, a solução das Equações A.2.

Ressalta-se que foi utilizada a representação matricial por permitir uma descrição mais objetiva do processo envolvido na estimativa de parâmetros utilizando o Método dos Mínimos Quadrados.

ANEXO B – MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

O método das diferenças finitas tem por base discretizar equações diferenciais, de modo a permitir uma “solução” através de computadores. Métodos envolvendo diferenças finitas para solução de problemas de valor de contorno substituem cada uma das derivadas na equação diferencial por uma aproximação adequada de quociente de diferenças.

O quociente de diferenças e o tamanho do passo h são escolhidos de modo que se mantenha uma certa ordem de erro de truncamento. O método das diferenças finitas para, por exemplo, um problema de valor de contorno linear de segunda ordem (BURDEN; FAIRES, 2010):

$$y'' = p(x)y' + q(x)y + r(x) \quad (\text{B.1})$$

para $a \leq x \leq b$, com $y(a) = \alpha$ e $y(b) = \beta$, requer que as aproximações dos quocientes das diferenças sejam utilizados para aproximar y' e y'' . Primeiro, seleciona-se um inteiro $N > 0$ e divide-se o intervalo $[a, b]$ em $(N + 1)$ subintervalos iguais cujos pontos da malha são $x_i = a + ih$ para $i = 0, 1, \dots, N + 1$, onde $h = (b - a)/(N + 1)$.

Nos pontos interiores da malha - x_i , para $i = 1, 2, \dots, N$, a equação a ser aproximada é:

$$y''(x_i) = p(x_i)y'(x_i) + q(x_i)y(x_i) + r(x_i) \quad (\text{B.2})$$

Expandindo y em um polinômio de Taylor sobre x_i estimado x_{i-1} e x_{i+1} e, somando-se as equações tem-se:

$$y''(x_i) = \frac{1}{h^2} [y(x_{i+1}) - 2y(x_i) + y(x_{i-1})] - \frac{h^2}{24} [y^{(4)}(\xi_i^+) + y^{(4)}(\xi_i^-)] \quad (\text{B.3})$$

Utilizando-se o Teorema do Valor Intermediário, pode-se simplificar o termo de erro de modo que, a Equação B.3 pode ser reescrita como:

$$y''(x_i) = \frac{1}{h^2} [y(x_{i+1}) - 2y(x_i) + y(x_{i-1})] - \frac{h^2}{12} y^{(4)}(\xi_i) \quad (\text{B.4})$$

Esta equação é denominada de fórmula da diferença centrada para a derivada segunda da função y (y'').

Um fórmula de diferença centrada para derivada primeira da função y (y') pode ser obtida de forma semelhante, resultando em:

$$y'(x_i) = \frac{1}{2h} [y(x_{i+1}) - y(x_{i-1})] - \frac{h^2}{6} y'''(\xi_i) \quad (\text{B.5})$$

O método das diferenças finitas por diferença centrada, conforme descrito pelas equações B.4 e B.5 leva a um erro de truncamento da ordem de $O(h^2)$.

Obs.: Ao utilizar métodos de discretização para equações diferenciais, deve-se levar em consideração equações que conduzam a erros de truncamento equivalentes.