

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO NO
PANTANAL MATOGROSSENSE NO PERÍODO
SECO E ALAGADO**

RAYANNA DE OLIVEIRA COSTA

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOÃO BASSO MARQUES

Cuiabá, MT
Fevereiro, 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO NO
PANTANAL MATOGROSSENSE NO PERÍODO
SECO E ALAGADO**

RAYANNA DE OLIVEIRA COSTA

*Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Física Ambiental do
Instituto de Física da Universidade Federal
de Mato Grosso, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de Mestre em
Física Ambiental.*

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOÃO BASSO MARQUES

Cuiabá, MT
Fevereiro, 2019

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

D278c de Oliveira Costa, Rayanna.
COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO NO PANTANAL MATO-
GROSSENSE NO PERÍODO SECO E ALAGADO / Rayanna de Oliveira Costa. --
2019
69 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: João Basso Marques.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física,
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2019.
Inclui bibliografia.

1. Fluxo de calor no solo. 2. Temperatura do solo. 3. propriedade física do solo. I.
Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

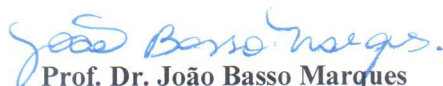
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO NO PANTANAL
MATO-GROSSENSE NO PERÍODO SECO E ALAGADO

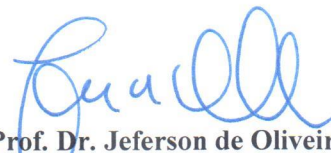
AUTORA: RAYANNA DE OLIVEIRA COSTA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 26 de fevereiro de 2019, pela
comissão julgadora:



Prof. Dr. João Basso Marques
Orientador

Programa Nacional de Pós-Doutorado/PNPD/CAPES



Prof. Dr. Jeferson de Oliveira
Examinador Externo

Instituto de Física - UFMT



Prof. Dr. Fernando da Silva Sallo
Examinador Externo

Universidade de Cuiabá – UNIC/Cuiabá



Profa. Dra. Hellen Cristine Santos Zagatto
Examinadora Externa

Universidade de São Paulo - USP

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, irmão e todos os colegas de curso.

AGRADECIMENTOS

- A Deus, por me dar forças e capacidade para poder realizar este trabalho.
- Ao Prof. Dr. João Basso Marques pela orientação prestada na realização deste trabalho.
- À minha família, meus pais Rita Cassia de Oliveira Costa, Feliciano Moreira da Costa Filho e meu irmão Gabriel de Oliveira Costa, por estarem sempre me apoiando e me ajudando.
- Aos colegas do grupo de Instrumentação e aerossóis, em especial a José de Souza Nogueira, Rafael da Silva Palácios e Lucas Douglas Rothmund pelas viagens a campo, que possibilitou a realização de trabalho.
- A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da UFMT, dos quais levo grandes lições e exemplo de vida.
- A todos os amigos e colegas de curso que ajudaram em muito e com eles aprendi muito.
- Ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental pela oportunidade de realizar este trabalho e pelo empenho em produzir conhecimento e formar profissionais nesta área.
- Ao CNPq pelo auxílio financeiro relativo ao Processo 131219/2017-0 – Bolsa de Mestrado.
- A todos que de forma direta ou indireta contribuíram na construção desse trabalho – Muito Obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	IX
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMÁTICA	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	2
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Pantanal	4
2.2 Temperatura do solo.....	5
2.3 Fluxo de calor no solo	7
2.4 Propriedades térmicas do solo.....	9
2.4.1 Capacidade de calor volumétrica.....	10
2.4.2 Difusividade térmica do solo.....	10
2.4.3 Condutividade térmica do solo	11
3 MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1 Localização e descrição da área experimental.....	14
3.2 Materiais utilizados	15
3.3 Calibração do sensor.....	16
3.4 Cálculos Utilizados	18
3.4.1 Difusividade térmica do solo.....	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1 Avaliação Geral da área de estudo	21
4.2 Análise das propriedades térmicas do solo no pantanal e sua sazonalidade.	
.....	24
4.3 Estimativa do fluxo de calor no solo	33
4.4 Estimativa da difusividade térmica do solo	37
5 CONCLUSÕES.....	44
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
Anexo	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema dos sentidos de fluxo de calor no solo e gradiente térmico durante o dia e a noite.	13
Figura 2 - Mapa de localização da torre micrometeorológica da Baía das Pedras.	14
Figura 3 – Esquemas das instalações dos termistorres e fluxímetros para cinco camadas diferentes no solo, próximo a uma torre micrometeorológicas.....	16
Figura 4 - Regressão linear das medidas de fluxo de calor do solo (mV), realizadas com o sensor alternativo e o comercial instalados a 1 cm de profundidade no dia 12/09/2016.	18
Figura 5 - Ajuste das medidas de fluxo de calor do solo após regressão linear realizadas com o sensor alternativo e o comercial, instalados a 1 cm de profundidade (medida do dia 12/09/2016).	18
Figura 6 - Saldo de radiação com média diária coletados durante a época de estudo entre 2016 e 2017 com falhas parciais de dados durante os meses de dezembro, janeiro e maio.	22
Figura 7 - Média mensal do saldo de radiação durante o período do estudo de 2016 a 2017 para a Baía das Pedras com falhas parciais nos meses de dezembro, janeiro e maio.	22
Figura 8 - Precipitação mensal acumulada durante o período de estudo para a Baía das Pedras.	23
Figura 9 - Média de 30 min da temperatura do solo para as profundidades de 1 cm, 3 cm, 7 cm, 15 cm e 30 cm para a área de estudo no período de 2016 e 2017 na Baía das Pedras.	25
Figura 10 - Média horária mensal da temperatura do solo para as profundidades de 1 cm, 3 cm, 7 cm, 15 cm e 30 cm para a área de estudo no período de 2016 e 2017 na Baía das Pedras.	26
Figura 11 – Amplitude térmica da temperatura do solo a 1 cm, 3 cm, 7 cm, 15 cm e 30 cm durante o período de estudo na Baía das Pedras.	27
Figura 12 - Temperatura média horária mensal do solo para as diferentes profundidades ao longo de um dia característico, sendo: a) para o mês de outubro e b) para o mês de fevereiro.	28
Figura 13 - Perfil de temperatura do solo em diferentes horários referente aos dias 01 de cada mês durante o período de 2016 a 2017 na Baía das Pedras referente aos meses de (a) setembro; (b) outubro; (c) novembro; (d) janeiro; (e) fevereiro; (f) março e (g) abril.	32

Figura 14 - Média de 30 min para o fluxo de calor no solo para 5 profundidades diferentes localizado na Baía das Pedras.	34
Figura 15 - Média diária para o fluxo de calor no solo para 5 profundidades diferentes localizado na Baía das Pedras.	37
Figura 16 - Difusividade térmica do solo calculada pelos métodos da amplitude, arco tangente e logarítmico para as camadas de 1-3 cm e 1-7 cm para período seco e chuvoso dos anos de 2016 e 2017. O boxplot representam os quartis inferior e superior (25% (Q1) e 75% (Q3)), com mediana indicada pela marca central.	41
Figura 17 - Difusividade térmica do solo calculada pelos métodos da amplitude, arco tangente e logarítmico para as camadas de 1-15 cm e 1-30 cm para período seco e chuvoso dos anos de 2016 e 2017. Os boxplots representam os quartis inferior e superior (25% (Q1) e 75% (Q3)), com mediana indicada pela marca central.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores das condutividades térmicas do solo para alguns constituintes.....	12
Tabela 2 - Valores da média mensal de fluxo de calor no solo (Wm^{-2}) para 5 profundidades diferentes durante o período de estudo de 2016 a 2017 para Baía das Pedras.	35
Tabela 3 - Parâmetros estatísticos da difusividade térmica diária média mensal do solo, referente a quatro camadas específicas, estimadas a partir de dados coletados ao longo do ano de estudo.....	38

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

Rn - Saldo de radiação
Rg – Radiação solar incidente
G - Fluxo de calor no solo
K – Condutividade térmica do solo
D – Difusividade térmica do solo
 $\delta T / \delta z$ – Gradiente de temperatura do solo
 ρ_b – Densidade aparente
 θ – Teor de água volumétrica
C – Capacidade calorífica volumétrica do solo
c – Calor específico
RPPN - Reserva Particular do Patrimônio Natural
BAPP – Base avançada de Pesquisas no Pantanal

RESUMO

COSTA, R.O. Comportamento Térmico do Solo no Pantanal Mato-Grossense no Período Seco e Alagado. 69f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2019.

O conhecimento dos mecanismos de troca de energia entre a superfície e a atmosfera é de fundamental importância para a compreensão do microclima de uma região. No cálculo do balanço de energia na superfície, o fluxo de calor no solo é um importante componente que se refere à quantidade de energia térmica transferida a níveis inferiores do solo por unidade de área durante determinado período de tempo. Este índice geralmente é obtido a partir de medições com fluxímetros, termistores de solo, ou ainda, estimado por satélites ambientais, seguindo metodologias específicas. O objetivo deste trabalho foi analisar a temperatura e o fluxo de calor no solo, assim como determinar o valor da difusividade térmica para uma região do Pantanal Mato-grossense. Além disso, o trabalho busca encontrar uma relação dessas propriedades com a lâmina d'água formada durante a cheia, para verificar o comportamento do fluxo de calor no solo em superfície alagada. Uma torre micrometeorológica automática instalada na Baía das Pedras - Poconé/MT, foi usada para obtenção dos dados das variáveis de solo e de atmosfera para o estudo. Para isto, foram usadas medidas de temperaturas e fluxo de calor nas profundidades de 1 cm; 3 cm; 7 cm; 15 cm e 30 cm. Os resultados indicam uma diferença no comportamento térmico entre os dois períodos estudados, sendo que no período chuvoso devido à presença de água, o transporte de calor na lâmina d'água apresentou comportamento condutivo a partir do nascer do sol, passando a convectivo à tarde até o nascer do sol do próximo dia.

Palavras-chave: Fluxo de calor no solo, temperatura do solo, propriedade física do solo.

ABSTRACT

COSTA, R.O. Soil Thermal Behavior in the Mato-Grossense Pantanal in the Dry and Flooded Period. 69f. Dissertation (Master's Degree in Environmental Physics) – Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso, Cuiabá, 2019.

Knowledge of the mechanisms of energy exchange between the surface and the atmosphere is of fundamental importance for understanding the microclimate of a region. And in the calculation of the surface energy balance, the heat flux in the soil is an important component that refers to the amount of thermal energy transferred to lower soil levels per unit area over a given period of time. This index is usually obtained from measurements with flowmeters, soil thermistors, or estimated by environmental satellites according to specific methodologies. The objective of this work was to analyze the temperature and the heat flux in the soil, as well as to determine the thermal diffusivity value of the soil for a region of the Mato Grosso Pantanal. In addition, the work intends to find a relation of these properties with the water layer formed during the flood, in order to verify the behavior of the heat flux in the soil on flooded surface. An automatic micrometeorological tower installed in Baía das Pedras - Poconé / MT, was used to obtain soil and atmosphere variables data for this study. For this, measurements of temperatures and heat flow were used in the depths of 1 cm; 3 cm; 7 cm; 15 cm and 30 cm. The results indicate a difference in the thermal behavior between the two studied periods, and in the rainy season due to the presence of water, the heat transport in the water layer showed conductive behavior from sunrise, passing the convective in the afternoon until the next day's sunrise.

Keywords: Heat flux in soil, soil temperature, soil physical property.

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA

As avaliações feitas pelo IPCC, em 2001, indicam que nos últimos anos a preocupação com o possível impacto antrópico sobre o meio ambiente tem aumentado, em especial, devido a especulações de que tais mudanças nos ecossistemas apresentam magnitude suficiente para alterar a dinâmica da interação biosfera e atmosfera. Nesse contexto, o Brasil destaca-se por apresentar uma rica biodiversidade, integrando dentro de seu território seis biomas: Mata Atlântica, Caatinga, Pampas, Amazônia, Cerrado e Pantanal.

O Pantanal conhecido como a maior área alagável do mundo, se encontra no centro da América do Sul e possui uma rica biodiversidade em flora e fauna. A sua flora é formada por um mosaico composto pela floresta Amazônica, Cerrado e Chacos. Esse bioma é formado por grandes planícies e deltas aluviais, fazendo parte da Bacia hidrográfica do Paraguai. Seu clima é dito como quente e úmido e seu regime pluviométrico apresenta duas estações bem definidas que se alternam durante o ano: a estação chuvosa, entre os meses de outubro e março, e a estação seca, entre os meses de abril e setembro.

O solo, como parte do ecossistema terrestre, é fundamental para o desenvolvimento da vida sobre a superfície, pois, além de servir como alicerce para as raízes das plantas, é a principal fonte de nutrição para a flora e, no caso do Pantanal, devido suas propriedades de drenagem é responsável pelas áreas de alagamentos característicos da região, em determinados períodos do ano, o que contribui para a complexidade da vegetação pantaneira.

O solo é dito como um recurso natural não é renovável, e sujeito a ser degradado em função do seu uso inadequado pelo homem, o que acarreta interferências negativas no equilíbrio ambiental. Havendo, por isso, a necessidade de obtenção de informações referentes ao comportamento das propriedades do solo para seu correto manejo e preservação.

As propriedades térmicas são uma das características influenciadas por mudanças no uso e ocupação do solo, pois, de acordo com os estudos feitos por Gasparin et al. (2005), a propriedade térmica denominada de fluxo de calor no solo, sofre influência do tipo de cobertura vegetal, uma vez que a superfície terrestre é a principal trocadora e

armazenadora de energia térmica nos ecossistemas terrestre. É por meio da incidência da radiação solar na superfície que a troca de calor ocorre, provocando variações térmicas nas camadas subjacentes, ocasionando então, um aquecimento e seu resfriamento ao longo do dia. Outra contribuição para as variações térmicas está nas condições micrometeorológicas locais, que por sua vez, influencia em todos os processos físicos, químicos e biológicos do solo.

A busca por informações derivadas do comportamento térmico do solo é de grande interesse para estudos relacionados ao balanço energético e, principalmente, na área da agricultura. O que se observa na literatura, contudo, são estudos locais de curta duração sobre as propriedades térmicas do solo, havendo poucas séries longas de observação direta dessas propriedades, especialmente, quando analisamos na perspectiva do bioma Pantanal.

1.2 JUSTIFICATIVA

Estudos associados às propriedades térmicas do solo são de extrema importância na proteção e conservação dos ecossistemas, pois, elas estão diretamente ligadas ao ciclo biogeoquímico do ambiente. Como, por exemplo, na atividade microbiológica, que se não permanecer dentro de certos limites, a temperatura do solo pode ser interrompida, assim como, nos processos de desenvolvimento das plantas sementes e de germinação. Por outro lado, a complexa interação entre solo, vegetação e atmosfera precisa ser entendida para melhoria das previsões meteorológicas, visto que, é fundamental o conhecimento sobre as características térmicas do solo para possíveis reconstruções da temperatura ao longo do tempo e profundidade e possíveis previsões.

Como há diferentes características para cada tipo de solo é necessário que, em diferentes ecossistemas, sejam identificadas as propriedades térmicas da superfície. O fluxo de calor no solo é uma das propriedades térmicas que pode ser medida diretamente utilizando sensores de fluxo de calor. A instalação desses sensores em diferentes profundidades permite ainda, por meio de observações regulares, o conhecimento do comportamento térmico do solo, fazendo assim, com que os experimentos de monitoramento em grande área se tornem importantes.

No Pantanal, as inundações são um fenômeno importante que lhe confere características peculiares que influenciam nas propriedades térmicas como níveis altos de saturação do solo e alterações nas quantidades e composição dos nutrientes, devido a deposição e mineralização de matéria orgânica em áreas alagadas.

Contudo, tendo em vista esse cenário, poucos estudos que buscam conhecer a dinâmica térmica do solo do Pantanal, nos períodos de seca e inundação, têm sido desenvolvidos, havendo ainda, a necessidade de entender como a dinâmica térmica varia de acordo com o período do ano, e conseqüentemente, o papel ecológico das inundações no Bioma.

O objetivo geral deste trabalho, portanto, foi compreender a dinâmica sazonal do fluxo de calor no solo em diferentes profundidades na região norte do Pantanal Matogrossense. Tendo como objetivos específicos:

- Caracterizar a variação do perfil de temperatura no solo;
- Avaliar o efeito da sazonalidade na temperatura do solo em diferentes profundidades;
- Avaliar a influência, da presença de água no solo, na temperatura e no fluxo de calor no solo;
- Estimar a difusividade térmica através dos métodos da amplitude, do logarítmico e do arco tangente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo dedica-se a uma breve revisão dos principais tópicos que fundamentaram a pesquisa, através dos quais, a revisão permitiu compreender melhor os parâmetros utilizados, suas características, principalmente, as relações com as propriedades físicas analisadas neste trabalho. Serão mostrados também alguns aspectos sobre a distribuição de energia no perfil do solo e como é obtida a expressão de fluxo.

2.1 Pantanal

Os pântanos estão entre os ecossistemas mais frágeis e ameaçados do planeta, já que estão sujeitos a degradação das atividades humanas - tanto em terra quanto na água. Como uma das maiores zonas alagada do planeta, o Pantanal é um exemplo de complexidade de regime hidrológico (JUNK et al., 2006). Localizado na bacia hidrográfica do alto Rio Paraguai, o Pantanal é caracterizado por baixas altitudes e baixos gradientes topográficos. Referido como a maior área úmida do mundo, o Pantanal é uma vasta extensão de terras baixas, mal drenadas que sofrem inundações mensais a cada ano durante a estação chuvosa (ALHO, 1988; ASSINE, 2005). Mesmo abrigando uma grande variabilidade de espécies de plantas e animais, em mais de 250 anos de ocupação dessa região, suas fitofisionomias formam um imenso mosaico, o que o torna naturalmente fragmentado e uma grandes áreas contínuas onde não se observa um único tipo de vegetação. Observando-se no Pantanal, em várias porções, a ocorrência de contatos florísticos entre as Regiões Fitoecológicas (regionalmente conhecidas por Mata Decídua, Mata Semidecídua, Cerrado e Chaco) e vegetação pioneira, que são aquelas influenciadas pelo alagamento dos rios e das baías, formando os campos alagados e brejos (SILVA et al., 2007).

Existem várias propostas de divisões das sub-regiões para o Pantanal brasileiro, denominados de diferentes formas por vários pesquisadores como: Hamilton et al. (1996), Silva e Abdon (1998) e Padovani (2010).

Segundo Silva e Abdon (1998) há uma participação de 15 municípios na composição da área fisiográfica do Pantanal brasileiro sendo que 6 destes estão no estado de Mato Grosso, ocupando 34,27% da área do Pantanal e 9 municípios no estado de Mato Grosso do Sul, ocupando 65,73% da área do Pantanal.

O Pantanal se estendendo por todo o oeste do Brasil e em partes do território da Bolívia e do Paraguai, cobrindo uma área de cerca de 140.000 km² da Bacia Hidrográfica

do Alto Paraguai. Os períodos de inunções que são seguidos por seca extrema, tendo apenas uma pequena parcela inundada durante o resto do ano para o Pantanal, influenciam fortemente a vida animal e vegetal. Esses pulsos de inundações são condicionados pelo ciclo de chuva de toda a bacia, principalmente durante os meses de setembro a janeiro no norte do Pantanal e novembro-março na porção sul (LEADY & GOTTEGENS, 2001; MOURÃO et al., 2002).

Há uma variação entre 11.000 a 110.000 km² da superfície de inundação e dependendo do ano com uma média de 53.000 Km² (MOURÃO et al., 2002). Como resultado das inundações sazonais decorrentes da aumento dos níveis das águas durante o período de cheia dos rios da região ou de grandes precipitações, de restrições de drenagem ou da elevação do nível do lençol freático, parte significativa dos solos do Pantanal permanece saturada ou inundada por períodos que podem variar de alguns dias a vários meses (CORINGA et al., 2012).

A planície pantaneira foi recentemente dividida em 20 sub-regiões de acordo com as características da paisagem e da inundação, frequentemente chamadas de pantanais, o que reforça a heterogeneidade da região. Além disso, a diversidade é encontrada dentro das sub-regiões, e existem várias categorias em relação à intensidade da inundação (baixo, médio e alto pantanal), rios (Pantanal do Taquari, Pantanal do Rio Negro e Pantanal do Taboco) e outros (POTT & DA SILVA, 2015).

A geologia e a geomorfologia do Pantanal são bem descritas em Assine et al. (2015). O clima é sazonal, chuvoso em outubro-abril e seco em maio-setembro, com precipitação média anual de 1100 ± 300 mm. Toda a parte superior da bacia do Paraguai pode ser definida como clima tropical de savana (Aw), de acordo com a classificação de Köppen (Da SILVA et al, 2009). No entanto, é possível verificar variações entre Aw e Bw, ou seja, entre climas úmidos e seco áridos (POTT & DA SILVA, 2015).

2.2 Temperatura do solo

Com ideias qualitativas de “quente e frio”, o conceito de temperatura tem sua origem criada baseada no ato de contanto, ou seja, em nosso tato, contudo muitas propriedades da matéria que podemos medir dependem da temperatura. Essa relação em geral é bastante complexa. A energia cinética das moléculas de um determinado material está relacionada a temperatura, todavia é importante compreender que os conceitos de calor e a temperatura podem ser definidos independente de qualquer movimentação molecular (YOUNG & FREEDMAN, 2008).

Cindra e Teixeira (2004) diz que no século XVII existiam duas correntes que explicavam que procuravam explicar o calor, sendo uma associada à ideia de fluído e a outra que o considerava como partícula (movimento), porém, não havia um consenso quanto à validade de cada uma delas, pois durante esse período não existia uma preocupação em estabelecer uma diferença entre os conceitos de calor e temperatura do ponto de vista quantitativo. No entanto, para o estabelecimento dessa diferenciação a utilização dos termômetros foi essencial.

O entendimento de vários aspectos relacionados às propriedades térmicas dos materiais e propriamente do solo, foi possível pelo refino da técnica de construção de termômetro. Tendo sua origem de processos físico, químicos e biológicos, o solo é formado de uma mistura heterogênea de materiais sólidos, líquidos e gasosos que foram formadas e transformadas no decorrer das eras geológicas por meio da desintegração, decomposição e recombinação (CINDRA & TEIXEIRA, 2004; REICHARDT & TIMM, 2004).

A temperatura do solo está em constante transformação visto que este é continuamente perturbado pelo “ganho” de calor mediante incidência de raios solares como também pela “perda” através de processos físicos como a evaporação (DINIZ et al., 2014). Os processos físicos e biológicos suportáveis por uma planta, são afetados pela variação da temperatura do solo, entretanto, a partir do momento em que o solo passa a sofrer varrições de valores extremos, seu desenvolvimento é seriamente comprometido (HILLEL, 2004).

A temperatura governa a evaporação e a aeração, bem como os tipos e as taxas de reações químicas que ocorrem no solo (HILLEL, 1998). Sendo assim, a disponibilidade de radiação solar superficial e das suas propriedades térmicas, são uma função da temperatura do solo, que causam efeito significativo sobre o crescimento e o desenvolvimento das plantas (CARNEIRO et al., 2014).

Para Richardt e Timm (2004), a temperatura do solo afeta diretamente no comportamento do solo, e como exemplos temos a germinação das sementes, o desenvolvimento das raízes e da planta, a atividade dos microrganismos, a difusão dos solutos e dos gases, as reações químicas e uma série de outros processos. Assim como a composição mineralógica do solo, como densidade, umidade e matéria orgânica. Já Hillel (1998) apresenta que a temperatura do solo varia em resposta às mudanças nos processos de troca de energia radiante, térmica e latente, e que suas taxas são afetadas pelas propriedades do solo.

Além de armazenar e transferir calor, o solo também permitir os processos de transferência de solutos, água e gases (GASPARIM et al., 2005). Prevedello (1996) cita que a “capacidade de um solo armazenar e transferir calor é determinada pelas suas propriedades térmicas e pelas condições meteorológicas do local, que, por sua vez, influenciam todos os processos químicos, físicos e biológicos do solo”.

O conhecimento de importantes propriedades, como a difusividade e condutividade térmica, são possíveis graças as observações regulares em diferentes profundidades que possibilitam identificar seu comportamento térmico (CARNEIRO et al., 2014).

As propriedades térmicas do solo são necessárias em muitas áreas de engenharia, agronomia e ciência do solo. Nos últimos anos, um esforço considerável passou a desenvolver técnicas para determinar essas propriedades (OCHSNER et al., 2001).

Estimativas independentes das propriedades térmicas do solo para comparação com as medidas de sonda dupla foram obtidas usando os procedimentos padrão de De Vries (1963) e Campbell (1985) e aqui, resumimos a teoria na qual esses procedimentos são baseados (BRISTOW, 1998).

2.3 Fluxo de calor no solo

Ao se aquecer uma certa substância, o aquecimento gerado pelo calor tende a se propagar em todas as direções até que o equilíbrio térmico seja atingido. Para cada substância, a propagação de calor é diferente devido aos vários tipos de interações que podem ocorrer entre a matéria e a energia térmica (TOULOUKIAN et al., 1973).

O fluxo de calor no solo (G) é uma fração da radiação líquida e representa a quantidade de energia utilizada no processo de aquecimento e resfriamento do solo. A transferência, aos diferentes níveis de profundidade do solo, da fração do saldo de radiação dependentes da temperatura e da condutividade térmica do solo (SOARES, 2013).

O balanço de energia ou radiação líquida (R_n) é o saldo de radiação no ambiente, sendo uma fonte de energia disponível para os processos de calor latente (evapotranspiração, LE), calor sensível (aquecimento do ar, H) e fluxo de calor no solo (aquecimento do solo, G), além dos processos de fotossíntese e respiração dos vegetais (FUNARI & PEREIRA FILHO, 2017).

Como um componente do balanço de energia superficial, o fluxo de calor no solo pode ter uma magnitude considerável em certas condições (por exemplo, condições de solo nu, durante a noite ou logo após o nascer do sol) e, portanto, precisa ser determinado com precisão (PENG et al., 2015). De acordo com Tubelis e Nascimento (1980), este

fluxo energético pode ser positivo ou negativo. Ele é positivo quando há entrada, descendente, de energia nas camadas do solo aquecendo-o, e negativo quando a energia é dissipada, ou seja, quando é ascendente, tendo o comportamento proporcional ao balanço diário de radiação (LEITE et al., 2018).

A condutividade térmica e os gradientes de temperaturas controlam o fluxo de calor de solo, e essas propriedades podem ser determinadas, para o caso do gradiente térmico de forma experimental usado se sondas térmicas e no caso da condutividade térmica, pode ser encontrada através do cálculo da capacidade térmica volumétrica do solo em função da umidade (SOARES, 2013).

O fluxo de calor no solo pode ser obtido por meio de diferentes métodos, dos quais, os dois mais utilizados são os que estimam o fluxo por meio de temperaturas e os que obtém o fluxo por meio de sensores próprio para sua medição. Inicialmente, o método usado para estimar o fluxo a partir da temperatura, requer mais informações sobre a distribuição do perfil de temperatura ao longo da profundidade e o outro método citado requer a obtenção do fluxo por medição direta utilizando-se sensores (SANTOS, 2014; ROMIO et al., 2018.).

O uso de fluxímetro foi utilizado em diversos estudos, como vemos nos trabalhos de Silva et al (2007), Galvani et al (2011), Pereira et al (2011), entre outros, que realizaram as medições em diferentes climas, solos e tipos de cultura.

Ao desenvolver uma solução mais simplificar para a equação da condução de calor, Wierenga (1969) e Decico (1974) consideraram um meio homogêneo para o transporte de calor, baseando-se na modelagem da série de Fourier para difusão de calor.

Neste trabalho, o método usado para encontrar o fluxo de calor no solo (G) foi desenvolvido por Decico (1967, 1974) pôr meio da teoria da condução térmica, também conhecida como lei de Fourier. O cálculo estabelece que o fluxo de calor em um corpo homogêneo é proporcional ao gradiente térmico e pode ser escrito como:

$$G = -K \left(\frac{\delta T}{\delta z} \right) \quad \text{Eq. (1)}$$

onde G é o fluxo de calor no solo ($Jm^{-2}s^{-1} = Wm^{-2}$), $\left(\frac{\delta T}{\delta z} \right)$ é o gradiente térmico (onde T é dado pela temperatura do solo (°C) e z pela profundidade da superfície do solo em metros) e a condutividade térmica do solo (K, $Wm^{-1} °C^{-1}$). O sinal negativo indica que o calor flui de um ponto de temperatura mais alta para um ponto de temperatura mais baixa (HORTON et al., 1983).

2.4 Propriedades térmicas do solo

Devido as variações climáticas, o solo está sujeito a mudanças de temperatura e também está sujeito a mudanças de fluxo de calor proveniente de seu interior da Terra em direção a superfície. Essas variações provocam mudanças nas suas propriedades térmicas, assim como alteram a composição do solo, devido as variações nos gradientes térmico, principalmente no que diz respeito a água presente nos mesmos (FAROUKI, 1986).

As propriedades térmicas determinam o armazenamento e o movimento do calor no solo e, como tal, determinam a temperatura e o fluxo de calor em função do tempo e da profundidade (BRISTOW et. al., 1998).

De Vries (1963) desenvolveu um método de estimar a condutividade térmica do solo (K), usando parâmetros como a textura do solo, a densidade aparente (ρ_b) e teor volumétrico da água (θ). O método, apesar de incluir as propriedades mais importantes do solo que afetam o K , é limitado porque requer conhecimento de parâmetros chamados fatores de forma que descrevem como as partículas do solo são arrançadas. Os fatores de forma são específicos para um determinado solo e devem ser medidos. Eles são, de fato, parâmetros de ajuste.

Sendo a capacidade térmica uma soma das capacidades térmicas dos constituintes do solo, muitos pesquisadores tem usado essa relação em seus trabalhos (DE VRIES, 1963; ABU-HAMDEH, 2003). Usando-se dessa relação, pelo cálculo da difusividade térmica é possível determinar a condutividade térmica (ABUEL-NAGA et al., 2009).

As características térmicas governam a propagação do calor no solo e para a modelagem do fluxo e calor no solo, são necessárias essas propriedades térmicas. Basicamente, a transmissão de calor se dá por três modos distintos: condução, convecção e radiação, sendo para o solo a condução é predominante (DUARTE, 2006).

Alguns modelos dependem das propriedades térmicas do solo, onde informações sobre o fluxo de calor e o perfil de temperatura do solo são exigido, como vemos em Passerat de Silans et al (1989) cujo modelo é vinculado à umidade em solos nus e transporte de calor ou como vemos em Braud et al (1994); Smirnova et al (1997), cujo modelo é dado em superfícies coberta.

Estas propriedades são: a condutividade térmica (habilidade do solo em conduzir calor); a difusividade térmica (habilidade do solo em difundir calor, ou seja, a medida temporal necessária para a propagação do calor) e a capacidade calorífica volumétrica

(habilidade do solo em armazenar calor, através do ganho o da perda resultante da variação de temperatura) (ALVALÀ et al., 2002).

2.4.1 Capacidade de calor volumétrica

A capacidade de calor volumétrica é a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de 1cm³ de solo em 1°. Ou seja, corresponde a quantidade de calor presente num corpo em relação a variação de temperatura sofrida por ele e depende da massa do corpo, diferente do calor específico (c), o qual depende somente da substância.

A capacidade calorífica volumétrica (C) de um solo depende de vários fatores e podem ser organizados em dois grandes grupos: os inerentes ao próprio solo e os que podem ser dirigidos ou controlados até certo ponto.

Podendo ser representada em função da condutividade térmica (K) e da difusividade térmica (D), pela seguinte relação:

$$C = \frac{K}{D} \quad \text{Eq. (2)}$$

Sendo assim definida como a mudança do teor de calor do volume unitário por unidade de mudança de temperatura. Em unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI) é expresso como calorias por centímetros cúbicos por grau ou Joule por metro cúbico por Kelvin (cal/cm³K ou J/m³K). Assim, depende da composição da fase sólida do solo (componentes minerais e orgânicos), da densidade aparente e da umidade do solo (HILLEL, 1998).

A distribuição de temperatura no solo é afetada, consequentemente, pela variação no conteúdo de água no solo, que reflete diretamente na variação na condutividade térmica. Ou seja, uma elevação do conteúdo de água no solo, aumenta da condutividade térmica, pois os espaços anteriormente “vazios” que estavam presentes na estrutura física do solo, agora são ocupados pela água, e essa alteração nos valores da condutividade térmica é devido a água possuir uma maior condutividade que o ar, anteriormente presente no solo” (BELLAYER, 2010).

2.4.2 Difusividade térmica do solo

O equilíbrio térmico é atingido quando o calor gerado pelo aquecimento de uma certa porção de uma substância tende a se propagar em todas as direções. Os vários tipos de interações que podem ocorrer entre a matéria e a energia térmica, é gerado devido a diferentes propagações de calor gerada por diferentes tipos de substância (TOULOUKIAN, 1973 apud SAWADA, 2000).

A equação que estima as propriedades térmicas do solo, descreve a transferência unidimensional de calor por condução em um meio isotrópico, da seguinte forma (CARVALHO et al., 2013):

$$C \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left(K \frac{\delta T}{\delta z} \right) \quad \text{Eq. (3)}$$

onde T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$), t é o tempo (s), z é a profundidade (m), C é a capacidade calorífica volumétrica ($\text{Jm}^{-3}\text{C}^{-1}$) e K é a condutividade térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$).

Considerando que C e K são independentes do tempo, e o solo é homogêneo na direção vertical em relação às suas propriedades térmicas, reescrevendo a equação. (3) para torna-se:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = D \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \quad \text{Eq. (4)}$$

onde

$$D = \frac{K}{C} \quad \text{Eq. (5)}$$

é conhecido como a difusividade térmica do solo (m^2s^{-1}).

A difusividade térmica é uma propriedade intrínseca de cada material. Para se obter a difusividade térmica, existem vários métodos experimentais e todos eles consistem em variar a temperatura com o tempo de forma proposital (transiente ou periódica) sobre a amostra em investigação, de modo que se possa aplicar a equação de difusão térmica (eq. 4) sobre o sistema e assim determinar a difusividade térmica (SAWADA, 2000).

Vários métodos tem sido utilizados com o objetivo de quantificar a difusividade térmica, e segundo as literaturas (DE VRIES, 1963; HORTON et al., 1983; PASSERAT DE SILANS et al., 1996; VERHOEF et al., 1996.) utilizam-se de dados de temperatura do solo para diferentes profundidades.

2.4.3 Condutividade térmica do solo

A condutividade térmica (K) é definida como a quantidade de calor transferida através de uma área unitária do corpo condutor em unidade de tempo sob um gradiente de temperatura unitário. Como mostrado na Tabela 1, as condutividades térmicas de constituintes específicos do solo diferem amplamente. Portanto, a condutividade térmica

(macroscópica) média do solo depende da composição mineral e do teor de matéria orgânica, bem como das frações volumétricas da água e do ar (HILLEL, 1998).

A condutividade térmica do solo rege o processo de transferência de calor em solos em estado estacionário, sendo, portanto, uma propriedade chave para aplicações geotérmicas. A condutividade não é determinada apenas pelas propriedades físicas intrínsecas de cada constituinte do solo, mas também afetado pela fração volumétrica do mesmo. Especificamente, os principais fatores de influência da condutividade térmica do solo incluem o grau de saturação, a densidade seca, a mineralogia do solo, o tamanho das partículas, a geometria de empacotamento, etc. (DE VRIES, 1958).

Tabela 1 - Valores das condutividades térmicas do solo para alguns constituintes

Constituinte	(mcal/cm s C)	(W/m C)
Quartzo	21	8,8
Outros minerais (em média)	7	2,9
Matéria orgânica	0,6	0,25
Água (líquida)	1,37	0,57
Gelo	5,2	2,2
Ar	0,06	0,025

(Fonte: HILLEL, 1998)

O fundamento da condução de calor em meios porosos como o solo, tem por base a condução do calor em sólidos homogêneos e isotrópicos, e é dada pela equação de Fourier. Essa lei estabelece que a quantidade de calor que flui através do solo é diretamente proporcional à capacidade do solo de transmitir calor (condutividade térmica) e ao gradiente térmico (CLIVATI, 1991).

A quantidade de calor que passa através de uma seção transversal unitária por unidade de tempo, devido a um gradiente térmico imposto na direção do fluxo é definida como condutividade térmica de um solo. A equação 6 mostra que a condutividade térmica do solo foi definida a partir da equação de Fourier (CARSLAW & JAEGER, 1959) e que a figura 1 mostra um esquema durante o dia e a noite do fluxo de calor.

$$K = - \frac{G}{\frac{\delta T}{\delta z}} \quad \text{Eq. (6)}$$

onde G é densidade de fluxo de calor ($W m^{-2}$), $\frac{\delta T}{\delta z}$ é o gradiente de temperatura ($K m^{-1}$ ou $^{\circ}C m^{-1}$), e K é a condutividade térmica ($W m^{-1}K^{-1}$ ou $W m^{-1}^{\circ}C^{-1}$). Por meio da equação 6 pode-se analisar o fluxo de calor e o gradiente de temperatura, e como sua variação influência nos valores de condutividade.

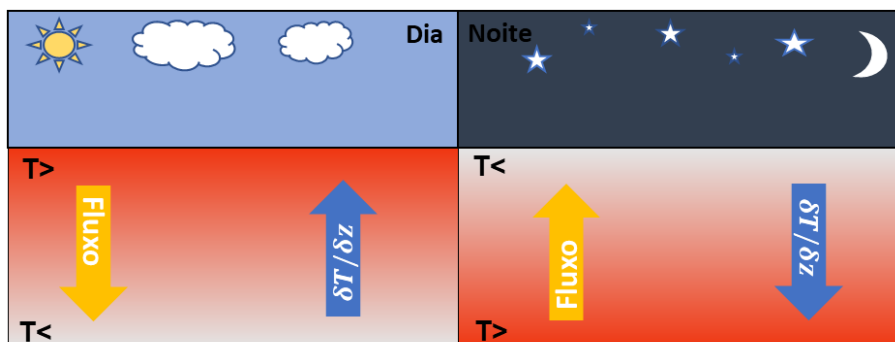


Figura 1 - Esquema dos sentidos de fluxo de calor no solo e gradiente térmico durante o dia e a noite.

A condutividade térmica de um solo depende de vários fatores. Esses fatores podem ser organizados em dois grandes grupos: aqueles que são inerentes ao próprio solo (a textura e a composição mineralógica), e aqueles que podem ser geridos ou controlados, pelo menos em certa medida, pela gestão humana (teor de água e o manejo do solo).

A maneira como um solo é gerenciado, desempenha um papel importante na determinação de sua condutividade, assim como no teor de água, que também é o mais difícil de gerenciar. Qualquer prática ou processo que cause a compactação do solo aumentará a densidade do solo e diminuirá a sua porosidade. Isto, por sua vez, terá um efeito significativo sobre condutividade térmica (ABU-HAMDEH & REEDER, 2000).

De Vries (1963) desenvolveu modelos que permitem estimar a condutividade térmica e a capacidade volumétrica de calor dos solos a partir das frações volumétricas de seus constituintes e da forma das partículas do solo. Sua técnica de pulso térmico com sonda dupla também foi usada para fazer medições das propriedades térmicas do solo. Consiste em duas sondas de agulha paralelas separadas por uma distância (r). Uma sonda contém um aquecedor e o outro um sensor de temperatura. Com o dispositivo de sonda dupla inserido no solo, um pulso de calor é aplicado ao aquecedor e a temperatura na sonda do sensor é registrada como uma função do tempo. Todas as três propriedades térmicas do solo, incluindo a condutividade térmica, podem ser determinadas a partir desses dados (ABU-HAMDEH e REEDER, 2000).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem a finalidade de apresentar uma breve descrição da área de estudo, bem como de estabelecer a base teórica para o entendimento dos métodos utilizados para encontrar a difusividade térmica do solo e discutir as dificuldades envolvidas no estudo, desde da coleta dos dados até as suas análises.

3.1 Localização e descrição da área experimental

O estudo foi conduzido no norte do Pantanal, aproximadamente 160 km de Cuiabá, Mato Grosso, Brasil (Lat: 16°29'50"S e Long: 56°24'50"O). Esta é uma área localizada na Base Avançada de Pesquisas do Pantanal – Baía das Pedras, pertencente a Reserva Particular do Patrimônio Natural - RPPN SESC – Poconé (Figura 2).

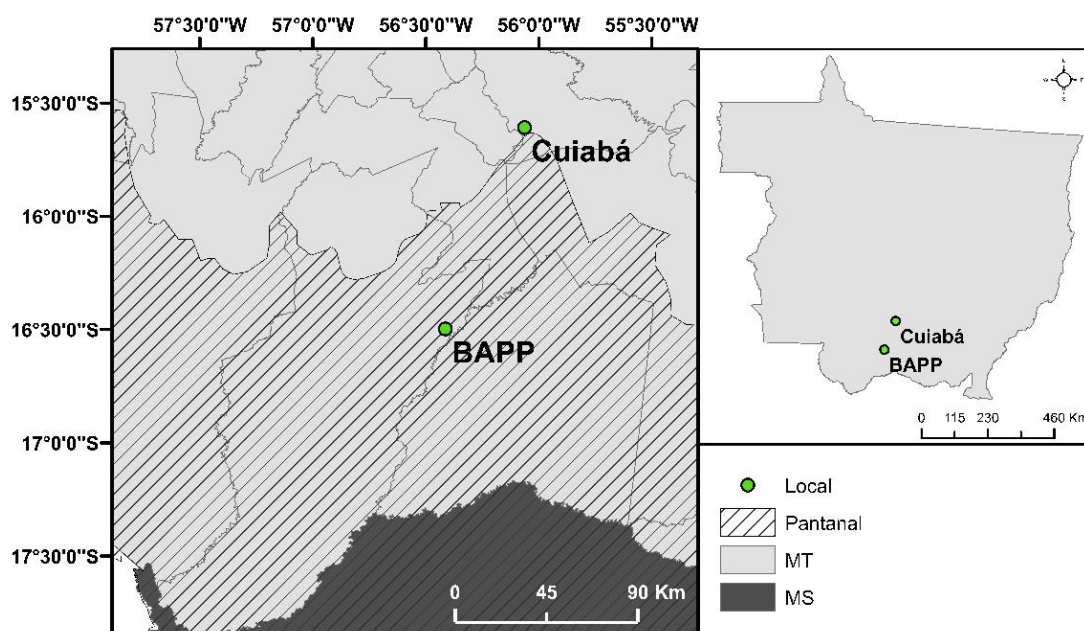


Figura 2 - Mapa de localização da torre micrometeorológicas da Baía das Pedras.

O clima é caracterizado como Aw, segundo classificação climática de Köppen por uma estação seca entre os meses de maio a setembro e uma estação chuvosa entre os meses de outubro a abril. A precipitação anual é de aproximadamente 1.400 milímetros onde as máximas ocorrem em dezembro e mínima em junho (SANCHES et al, 2010). O padrão de inundação no Pantanal é altamente influenciado pela precipitação local devido à paisagem plana. Nesta área, conhecida como Alto Pantanal onde fica o Pantanal de Poconé, as inundações são bastante superficiais, com até 2 m de profundidade (NUNES DA CUNHA & JUNK, 2004).

Os dados de temperatura e fluxo de calor foram coletados próximo a torre micrometeorológica, localizada na Baía das Pedras, e fornecidos pelo programa de pós-graduação em física ambiental - PGFA. A torre da Baía das Pedras encontra-se a 150 m de altitude em relação ao nível do mar. O solo nessa região é classificado como Gleissolo Háptico (EMBRAPA, 1997) de origem sedimentar com fases argilosas e arenosas de alternando entre si. A vegetação ao redor da torre micrometeorológicas apresenta-se como próxima da nativa pantaneira, com alguns pequenos estandes de Pombeiro (*Combretum lanceolatum Pohl*), Algodão-do-Pantanal (*Ipomoea carnea spp. fistulosa*) e alguns exemplares de Cambará (*Vochysia divergens Pohl*), cuja altura do dossel vegetativo chega próximo de 4 metros próxima a torre, onde existe a presença de uma cobertura de vegetação rasteira durante o período seco (CORINGA et al., 2012, NASSARDEN, 2015).

3.2 Materiais utilizados

Foram instalados, próximo a torre micrometeorológicas de pesquisa existente no local, cinco termistores e cinco placas de fluxo de calor no solo. A configuração do experimento seguiu-se nas profundidades de 1 cm, 3 cm, 7 cm, 15 cm e 30 cm. Na figura 3 podemos verificar o esquema da instalação dos sensores de fluxo de calor.

Foram utilizados neste estudo para a medição das variáveis:

- Temperatura do solo: Cinco termistores instalados nas respectivas profundidades citadas anteriormente, modelo 108-L (Campbell Scientific, Inc.);

Especificações do termistor 108-L

Tolerância: $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ (acima de 0° a 70°C);

Faixa de medição: -5 a 95°C ;

Precisão: $\pm 0,3$ (-3 a 90°C);

- Fluxo de calor no solo: Um fluxímetro (Campbell HFP01-L Soil Heat Flux Plate) na profundidade de 1 cm, mais cinco fluxímetros de pastilhas termoeletrica (Peltier, modelo TEC-112706 Acel Components) nas dimensões 40x40x40 mm, desenvolvidas por Marques (2016) e nomeada de termoflux, para as demais profundidades citadas acima;

Especificações da placa de fluxímetro hulseflux Campbell HFP01-L

Temperatura de funcionamento: -30 a 70°C ;

Faixa de medição: $\pm 2000 \text{ Wm}^{-2}$;

Sensibilidade (nominal): $50\mu\text{V W}^{-1}\text{m}^{-2}$;

Precisão típica esperada (totais de 12 horas): Dentro de -15% a $+5\%$ na maioria dos solos comuns;

- Aquisição de dados: Um datalogger alternativo feito com um Raspberry Pi B+, onde foi aplicado uma lógica de leitura e armazenamento e transmissão de dados (MARQUES, 2016).

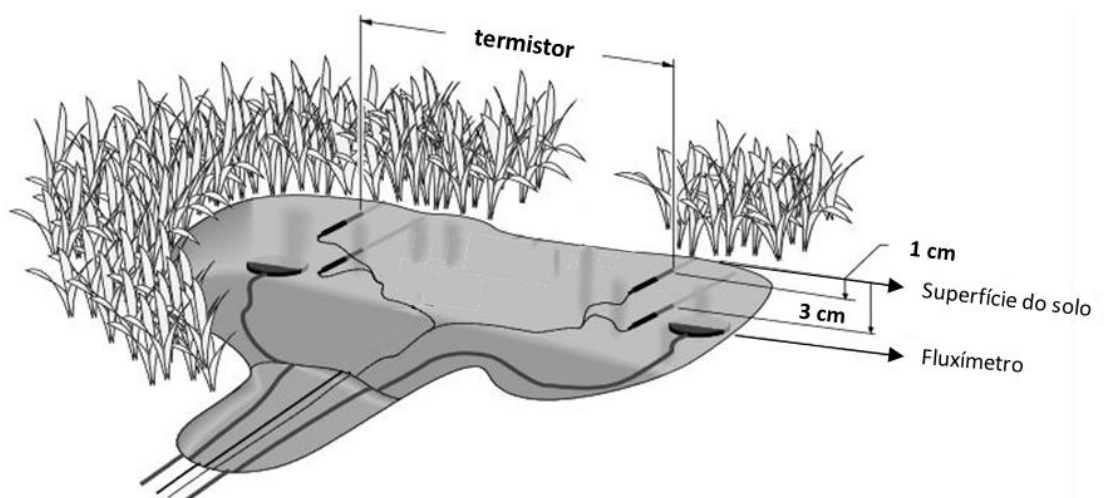


Figura 3 – Esquemas das instalações dos termistores e fluxímetros para cinco camadas diferentes no solo, próximo a uma torre micrometeorológicas.

A fabricação dos sensores de fluxo de calor utilizados neste estudo, foi feita por Marques (2016), pertencentes ao grupo de instrumentação meteorológica do PGFA. O medidor, termoflux, consiste em uma pastilha termoelétrica (Peltier), e seu funcionamento se dá basicamente aplicando-se uma tensão nos terminais que gerará uma troca de calor entre as placas. No entanto, a célula peltier foi utilizada de forma inversa neste estudo, onde ao ser submetida a um fluxo de calor, seja positivo ou negativo, é gerada uma diferença de potencial nos terminais, proporcional ao fluxo de calor.

Para a análise da temperatura, do fluxo de calor e da difusividade térmica do solo, foram coletados dados entre os períodos de julho de 2016 a julho de 2017, onde os dias que não houveram medições, devido a problemas na coleta, foram descartados.

Foram efetuadas medidas contínuas, com amostragem temporal de 1 minuto. O tratamento de dados consistiu em obter médias de 30 min, médias diárias e médias horárias, com base no período de dados disponível.

3.3 Calibração do sensor

Uma análise foi feita antes da instalação dos sensores. Após testes em laboratório, os protótipos dos sensores alternativos (termoflux) foram instalados no campo juntamente com sensores comerciais. Para verificar o desempenho do termoflux comparado ao fluxímetro comercial hukseflux (Campbell Scientific), realizou-se uma análise de correlação entre as leituras dos dois tipos de sensores e uma regressão linear para cada um deles. Os resultados da correlação feitos para o termoflux, nas medidas de fluxo de calor apresentaram bons resultados (MARQUES, 2016).

As saídas de dados do termoflux e do fluxímetro são dadas em mV e com base no certificado de calibração do fluxímetro comercial, uma constante é usada na transformação desses dados de mV em dados energia Wm^{-2} .

A coleta de dados teve início após a instalação, sendo coletados por volta de um ano os dados de fluxo de calor e temperatura do solo. Após a geração do banco de dados, uma calibração foi realizada para corrigir os dados dos sensores do termoflux, com base nos dados gerados pelo fluxímetro comercial, para que se tenha a garantia de que os dados seguem o modelo padrão de calibração certificados pelo fabricante.

Para a realização da calibração do fluxo de calor no solo foi escolhido um dia que melhor representasse uma grande variação na amplitude do fluxo em relação ao restante do dia, e o dia escolhido para a calibração foi 12 de setembro de 2016. Um diagrama de dispersão foi gerado e uma regressão linear foi realizada a partir dos dados de um período de 24 horas para a profundidade de 1 cm e o coeficiente de determinação (R^2) encontrado foi bem próximo de 1, como observa-se na figura 4.

Após o ajuste realizado pela calibração, os valores corrigidos aproximaram-se dos valores de referência, que pode ser observado na figura 5, mostrando que esse foi o melhor modelo matemático que melhor se ajustou aos valores observados. E assim, o ajuste feito para a camada 1cm, foi repetida para as outras demais camadas para que houvesse uma calibração dos seus valores.

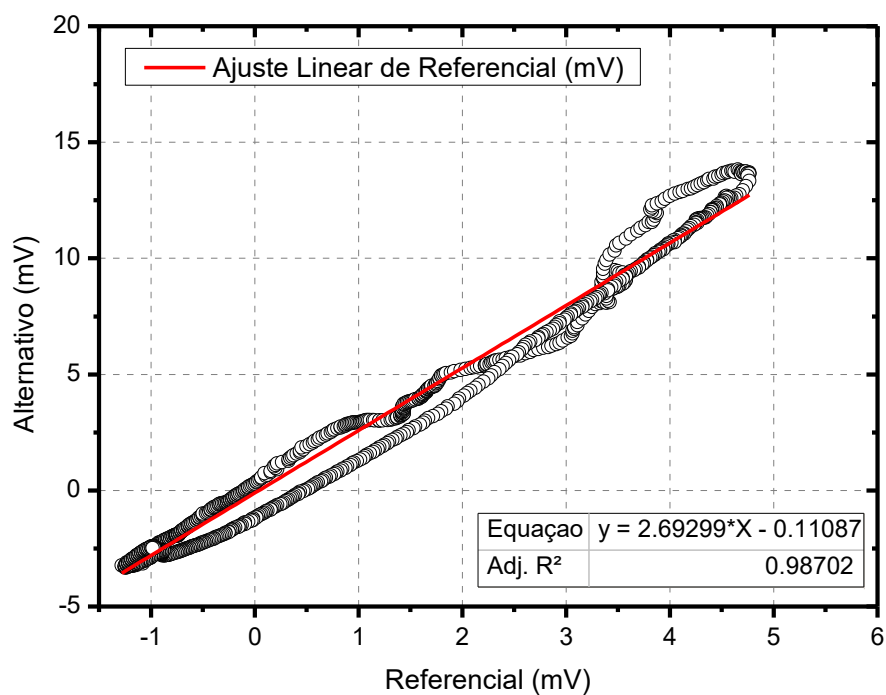


Figura 4 - Regressão linear das medidas de fluxo de calor do solo (mV), realizadas com o sensor alternativo e o comercial instalados a 1 cm de profundidade no dia 12/09/2016.

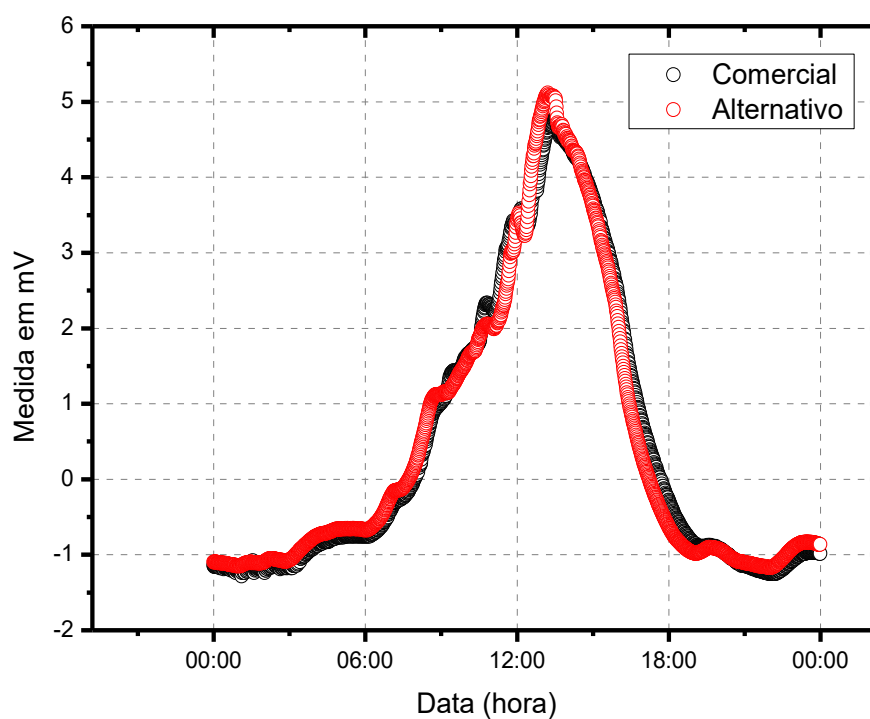


Figura 5 - Ajuste das medidas de fluxo de calor do solo após regressão linear realizadas com o sensor alternativo e o comercial, instalados a 1 cm de profundidade (medida do dia 12/09/2016).

3.4 Cálculos Utilizados

3.4.1 Difusividade térmica do solo

A difusividade térmica do solo varia com o tempo e espaço. A fim de estimar a difusividade térmica considerou-se o solo um meio homogêneo, isotrópico, sem fontes

ou sumidouros de calor, restringindo a análise apenas aos processos que ocorrem na direção vertical (DINIZ et.al., 2014).

Neste trabalho, os métodos amplitude, arco tangente e logarítmico, são utilizados e descritos a seguir. Os registros das temperaturas do solo foram armazenados no raspberry de minuto a minuto. Fez-se a média de 30 minutos, média horária e médias diárias. Os valores da difusividade térmica foram estimados diariamente entre as profundidades de 1 e 3 cm, 1 e 7 cm, 1 e 15 cm e 1 e 30 cm para os métodos.

Com o intuito de estimar os valores da difusividade térmica do solo, foram utilizadas as metodologias abaixo:

a) O método amplitude

A difusividade térmica do solo (D) nas diferentes profundidades pelo método da amplitude foi determinada pela equação (7) (RICHARDT & TIMM, 2004).

$$D = \left(\frac{\omega}{2} \right) \left[\frac{z_2 - z_1}{\ln(A_1/A_2)} \right]^2 \quad \text{Eq. (7)}$$

onde, ω é a frequência angular ($7,27 \times 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$), A_1 e A_2 são as amplitudes (diferença entre a temperatura máxima e a média do dia) térmicas nas profundidades z_1 e z_2 , respectivamente. Sua dedução encontra-se ao final do trabalho, em anexo.

Para cada profundidade, foi estimada a amplitude térmica A_1 na profundidade 1 cm e a amplitude térmica A_2 nas profundidades 3 cm, 7 cm, 15 cm e 30 cm (BELLAYER).

b) O método arco tangente

A temperatura pode ser descrita por uma série de senos, quando se trata do solo a nível da superfície, por meio de ajuste da série de Fourier relacionados aos valores da temperatura medida a uma profundidade conhecida, dada por:

$$T(t) = \bar{T} + \sum_{n=1}^M [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)] \quad \text{Eq. (8)}$$

sendo $\bar{T}$ o valor médio da temperatura no intervalo de tempo considerado, M o número de harmônicos, A_n e B_n as suas amplitudes, n o número de observações, ω a frequência angular e t o tempo. Somente os dois primeiros harmônicos são suficientes para descrever uma condição de contorno a nível de $z = z_1$ ($z_1 = 0$, a nível da superfície),

a difusividade poderá ser calculada usando-se a equação do arco tangente (NERPIN & CHUDNOSVSKII, 1967):

$$D = \frac{\omega(z_2 - z_1)^2}{2 \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{(T_1 - T_3)(T'_2 - T'_4) - (T_2 - T_4)(T'_1 - T'_3)}{(T_1 - T_3)(T'_1 - T'_3) + (T_2 - T_4)(T'_2 - T'_4)} \right] \right\}^2} \quad \text{Eq. (9)}$$

onde para a profundidade z_1 as temperaturas registradas são T_1 , T_2 , T_3 e T_4 e para a profundidade z_2 as temperaturas registradas são T'_1 , T'_2 , T'_3 e T'_4 , em intervalos de 6 em 6 h (0h, 6h, 12h e 18h) (BELLAYER, 2010).

c) O método logarítmico

A difusividade térmica do solo pelo método do logarítmico foi determinada com as mesmas variáveis utilizadas no método do arco tangente, e é dada por: (SEEMANN, 1979).

$$D = \left[\frac{0,121(z_2 - z_1)}{\ln \left[\frac{(T_1 - T_3)^2 + (T_2 - T_4)^2}{(T'_1 - T'_3)^2 + (T'_2 - T'_4)^2} \right]} \right]^2 \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde z_1 é a profundidade 1 cm, z_2 é respectivamente as profundidades de 3 cm, de 7 cm, de 15 cm e 30 cm e onde T_1 , T_2 , T_3 e T_4 e T'_1 , T'_2 , T'_3 e T'_4 utilizam dos mesmos horários usados no método do arco tangente.

Nos métodos utilizados, a difusividade térmica do solo considera a hipótese de que é, ao longo de um período, constante no tempo e na direção vertical, até uma profundidade teoricamente infinita. E como não precisa das condições iniciais sobre o perfil vertical de temperatura nos períodos estudados, teoricamente, este fato admite ser a temperatura média diária a mesma em todas as profundidades (PASSERAT DE SILANS et al., 2006).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo dedica-se a análise e discussão dos resultados encontrados a partir das estimativas das propriedades térmicas, temperatura e do fluxo de calor no solo, bem como a influência dos períodos secos e chuvosos nos processos de transferência de energia para o solo.

4.1 Avaliação Geral da área de estudo

A variação sazonal do comportamento da radiação solar incidente (R_g), obtidos pelo equipamento de saldo radiômetro, para o período estudado podem ser vistos nas figuras 6 e 7. Os maiores valores ocorrem durante o mês de novembro, enquanto os menores valores podem ser visto em julho de 2016 e 2017, com variação máxima chegando próximo de 615 Wm^{-2} em novembro e 482 e 492 Wm^{-2} em julho de ambos os anos. Esse comportamento se dá devido ao início da estação de verão para o hemisfério sul, no mês de dezembro, onde a incidência de radiação solar para esse período é maior durante os próximos três meses, e os menores valores de R_g se darão nos meses de junho, julho e agosto, período de inverno no hemisfério sul, tendo menores incidências solares (NOVAIS, 2011).

Observa-se que os valores de R_g foram maiores durante o período chuvoso e menores no período de seca, isso se deve a uma maior presença de nuvens e vapor d'água na atmosfera, o que faz com que a absorção de energia seja maior devido a maior disponibilidade hídrica no ambiente, fazendo com que o balanço de radiação de todos os fluxos radiativos que chegam e saem de uma superfície, ou seja, o saldo de radiação seja em média maior (MACHADO et al., 2016). Em contraste, há um menor aproveitamento da energia solar incidente em forma de saldo de radiação devido à escassez de precipitação nesse período e o baixo teor de vapor d'água na atmosfera, fazendo com que os valores de R_g sejam menores no período seco devido a uma presença maior de partículas na atmosfera, provenientes de queimadas (aerossóis) (BIUDES et al., 2009, CURADO et al., 2014).

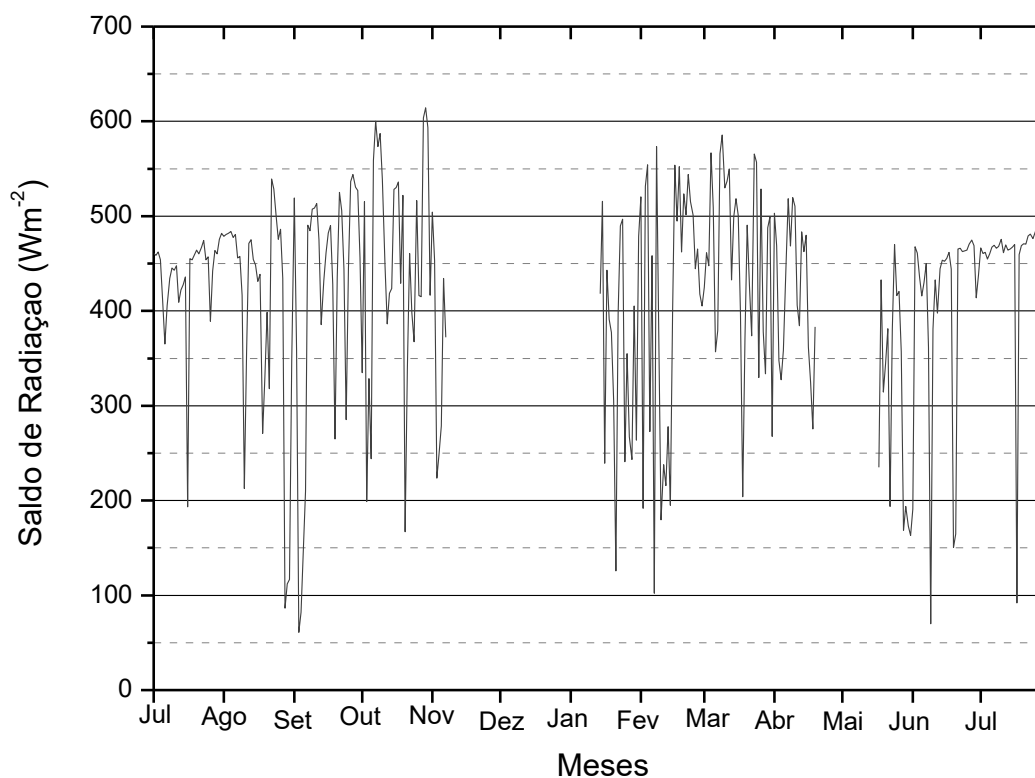


Figura 6 - Saldo de radiação com média diária coletados durante a época de estudo entre 2016 e 2017 com falhas parciais de dados durante os meses de dezembro, janeiro e maio.

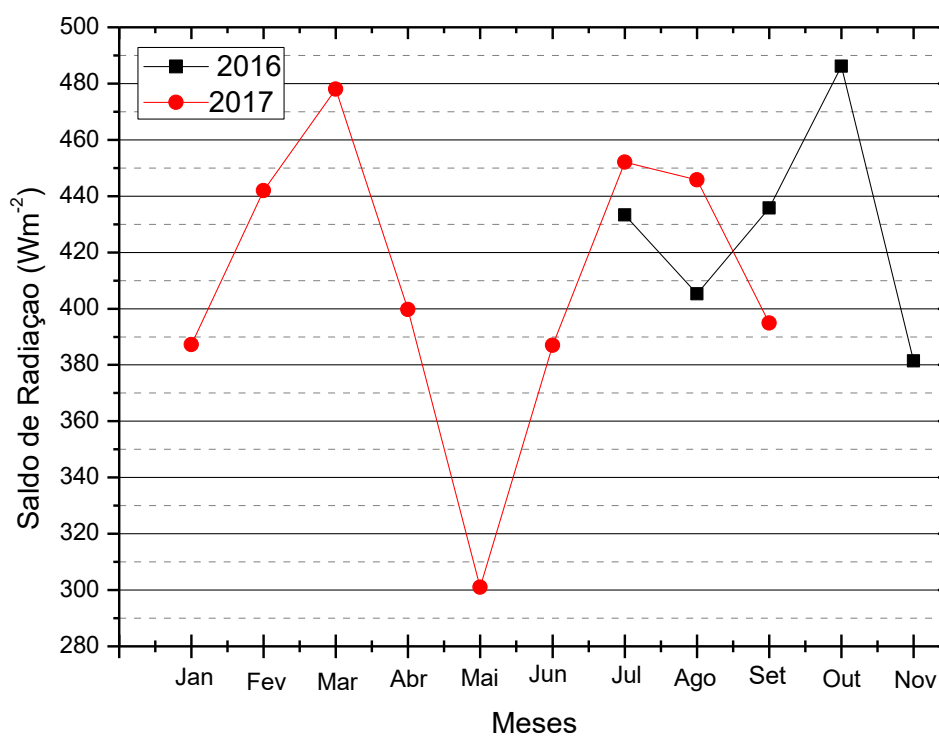


Figura 7 - Média mensal do saldo de radiação durante o período do estudo de 2016 a 2017 para a Baía das Pedras com falhas parciais nos meses de dezembro, janeiro e maio.

A precipitação mensal acumulada durante o período de estudo para os anos de 2016 e 2017, é mostrada na figura 8. Esses dados foram coletados de um sensor instalados na torre micrometeorológica presente no local. É possível verificar que o mês que

apresentou maior precipitação foi o mês de novembro com valor mensal de 314,53 mm e a menor precipitação foi registrada no mês de junho com valor mensal de 1,88mm. Durante o período do estudo, a precipitação acumulada anual foi de 1608,58 mm. O acúmulo máximo de chuva durante um dia ocorreu no mês de março, período de estação chuvosa, com 133,85 mm. Outros autores como Sanches et al. (2011) encontraram 1414 mm de precipitação acumulada para o ano de 2007 no norte do Pantanal.

Para facilitar a análise do estudo, foram determinados dois períodos de acordo com as literaturas presentes na fundamentação teórica, que definem como estações características do pantanal um período chuvoso e um período seco. Onde podemos dividir o ano em meses secos, que varia entre os meses de abril à setembro (“inverno”, sendo esses períodos mais definidos no norte do que na parte central e sul), cuja característica se dá pela precipitação mensal inferior a 100 mm e chuvosos que varia entre os meses de outubro à março (“verão”, quando ocorre cerca de 80% do total anual das chuvas), cuja precipitação mensal é superior a 100 mm (MORAIS et al, 2000; SANCHES et al., 2010).

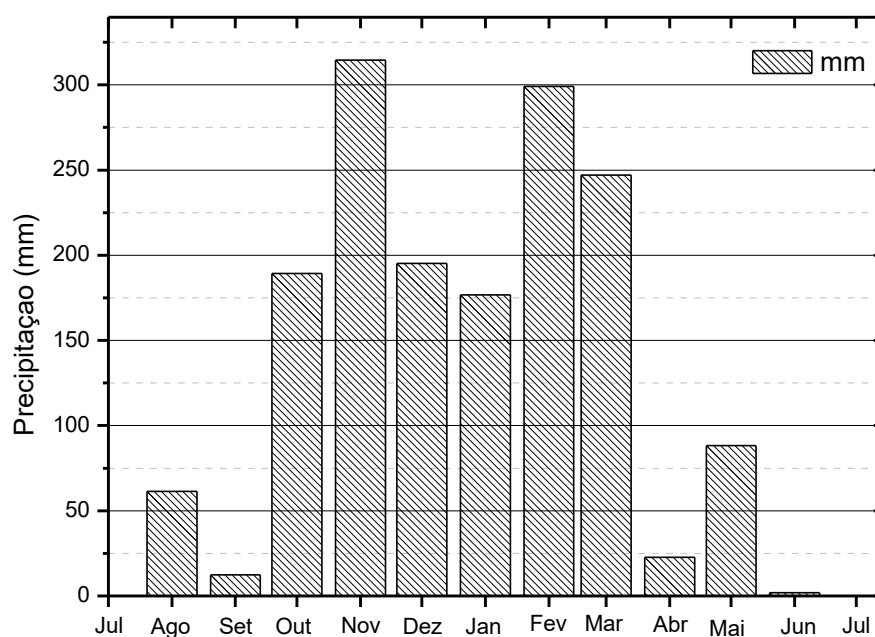


Figura 8 - Precipitação mensal acumulada durante o período de estudo para a Baía das Pedras.

O começo das inundações no pantanal coincide com o período chuvoso, começando no mês de outubro e estendendo-se até o mês de março. Durante esse período, há um fluxo de água nas regiões mais elevadas do cerrado em direção às mais baixas, alimentando o volume de água aprisionado na região, devido à baixa declividade do local, causando assim, o transbordamento de rios e lagos da região.

4.2 Análise das propriedades térmicas do solo no pantanal e sua sazonalidade

i) Temperatura do solo

Os valores de temperatura do solo para cinco profundidades diferentes durante o período de estudo entre 2016 e 2017, se encontram na figura 9. Observa-se que durante o período seco, houve um aumento na temperatura do solo e que a partir do mês de outubro uma queda pode ser vista nos valores de temperatura máxima até o mês de janeiro e segue-se com variações mínimas nos meses seguintes, registrando os menores valores de temperatura máxima entre os meses de janeiro e fevereiro.

Esse comportamento da variação mínima se deve ao fator da inundação local, que iniciam se por volta dos meses de dezembro e janeiro, devido as vazantes dos rios em grande parte do pantanal e na área do local do estudo.

Observou-se que a partir de janeiro, as temperaturas máximas tiveram novamente um aumento, porém com pouca variação entre os valores máximo e mínimos, que pode ser observado na figura 10 que mostra a média horária mensal para um dia característico do mês durante o período de estudo.

No período seco a temperatura do solo apresentou grande amplitude térmica mensal variando entre $16,6(3)$ a $14,2(3)^{\circ}\text{C}$ para os meses de setembro e outubro (figura 11). Durante o estudo, o dia que apresentou a maior temperatura do solo na camada mais superficial (1 cm) foi o dia 29 de setembro. Para esse dia os dados registraram uma temperatura máxima de $40,9(3)^{\circ}\text{C}$, temperatura mínima de $21,9(3)^{\circ}\text{C}$ e a amplitude térmica ficou em torno de $12,6(3)^{\circ}\text{C}$, já na camada mais profunda (30 cm) a temperatura máxima e mínimas ficaram em torno de $25,5(3)^{\circ}\text{C}$ e $24,7(3)^{\circ}\text{C}$ respectivamente e a amplitude térmica ficou em torno de $0,4(3)^{\circ}\text{C}$.

Essas diferenças de temperatura entre as 5 profundidades, podem ser explicadas devido ao retardamento da condução de calor ao longo do solo, onde as camadas mais superficiais possuem uma amplitude térmica maior do que as camadas mais profundas.

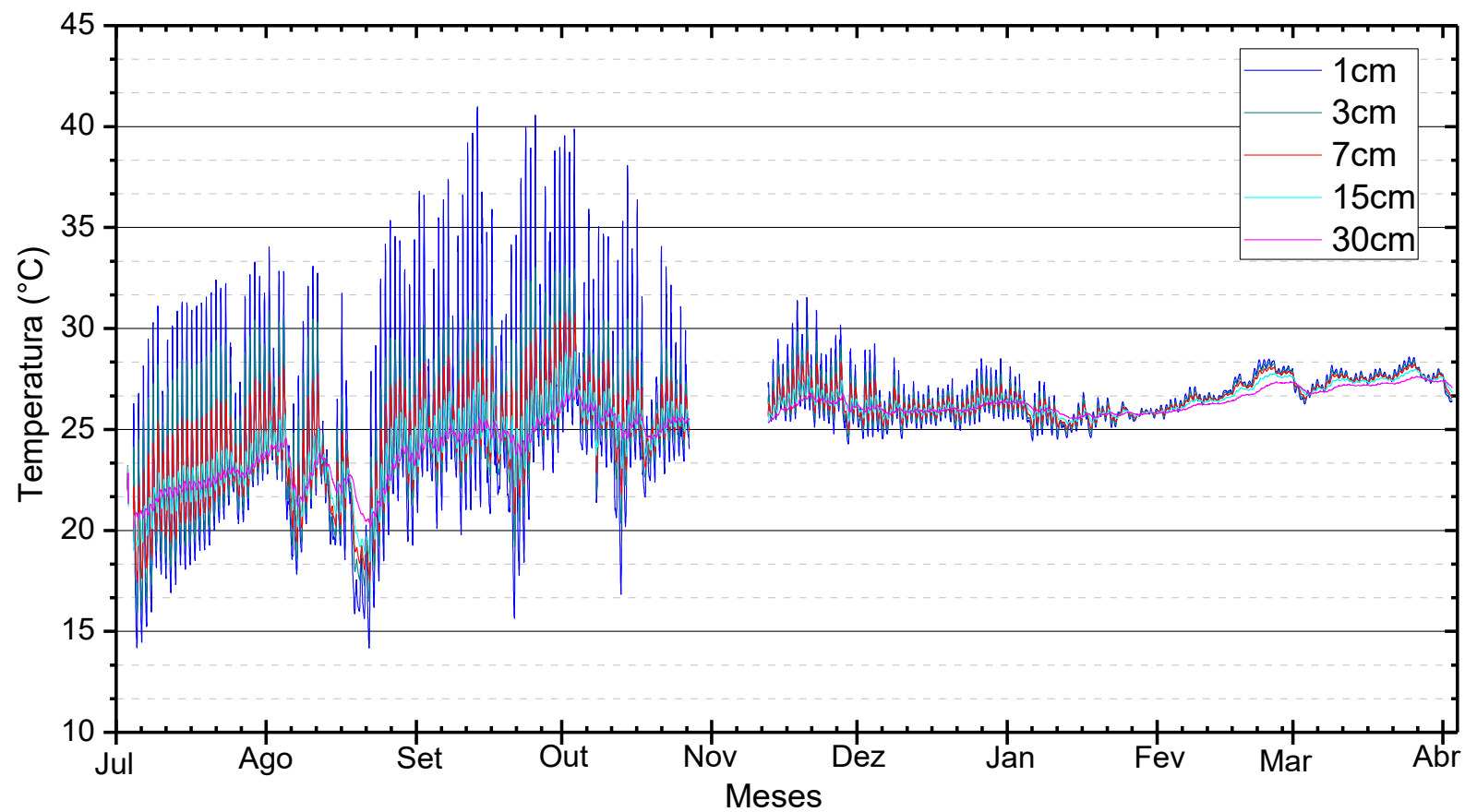


Figura 9 - Média de 30 min da temperatura do solo para as profundidades de 1 cm, 3 cm, 7 cm, 15 cm e 30 cm para a área de estudo no período de 2016 e 2017 na Baía das Pedras.

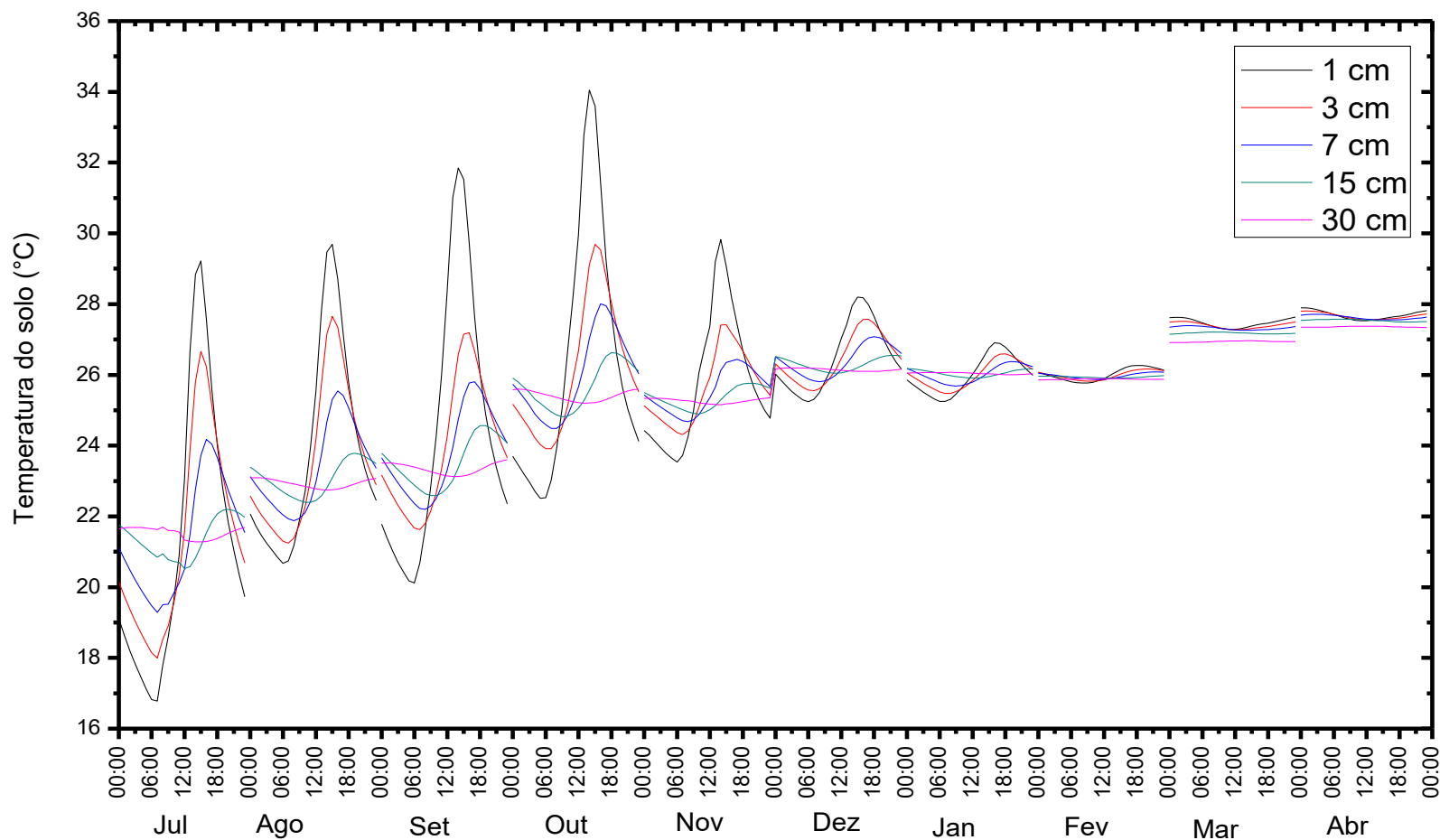


Figura 10- Média horária mensal da temperatura do solo para as profundidades de 1 cm, 3 cm, 7 cm, 15 cm e 30 cm para a área de estudo no período de 2016 e 2017 na Baía das Pedras.

O mês de outubro foi o mês que apresentou as temperaturas mais elevadas chegando a temperaturas maiores que $40,0(3)^{\circ}\text{C}$ na camada mais superficial. Para descrever um dia típico para o mês de outubro, uma média horária mensal foi realizada, como se observa na figura 12.a, e ao se analisar esse dia típico observou-se que a elevação da temperatura nas camadas superficiais começa a ocorrer a partir das 9h, quando vemos o gradiente da temperatura ascendente em direção à superfície, tendo o horário das 14h registrado a maior temperatura para o dia com $34,1(3)^{\circ}\text{C}$. Ao observarmos os horários onde há ausência da incidência solar, podemos ver o comportamento da temperatura contrário o que foi observado durante o dia, onde as camadas mais profundas estão com temperaturas maiores do que as superficiais, devido à perda de calor para as camadas mais próximas da superfície.

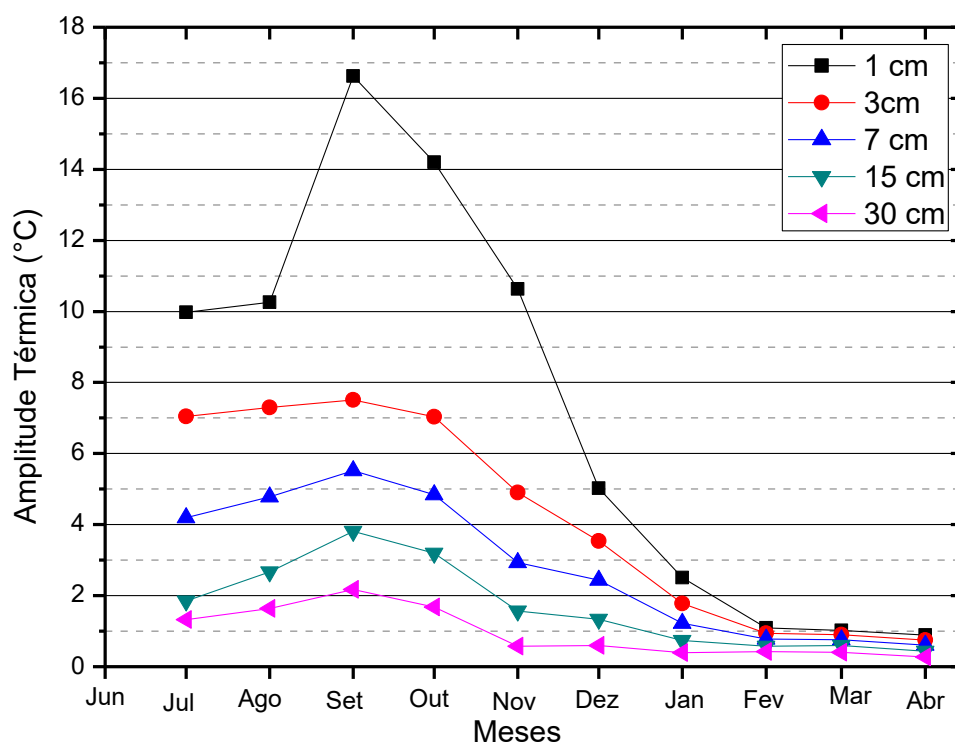


Figura 11 – Amplitude térmica da temperatura do solo a 1 cm, 3 cm, 7 cm, 15 cm e 30 cm durante o período de estudo na Baía das Pedras.

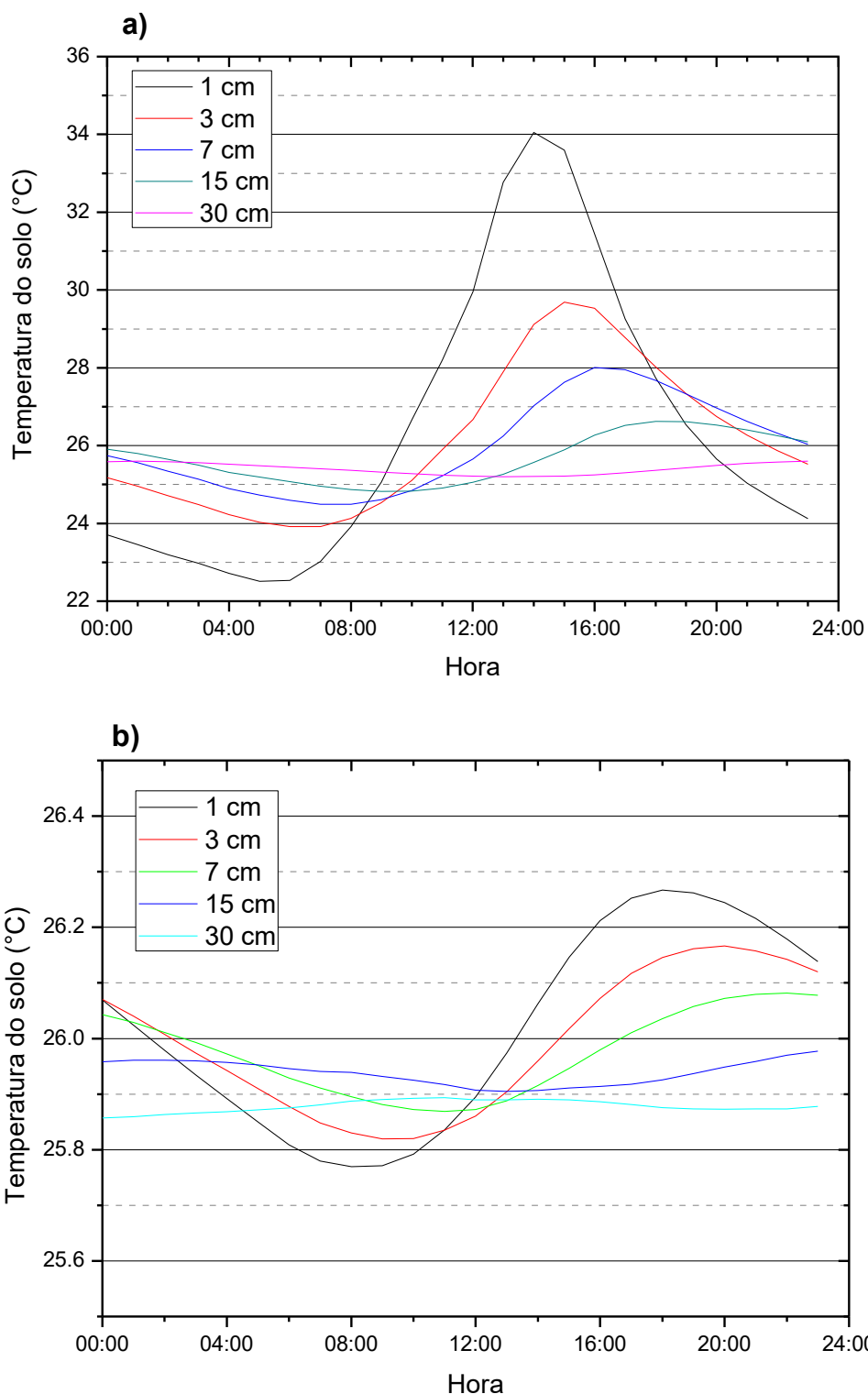


Figura 12 - Temperatura média horária mensal do solo para as diferentes profundidades ao longo de um dia característico, sendo: a) para o mês de outubro e b) para o mês de fevereiro.

Comportamento semelhante ao da figura 12.a se observa nos meses que se seguem entre julho a janeiro. Pois a partir deste último mês começa o alagamento nesta região e a dinâmica da temperatura no solo se altera, tornando as amplitudes térmicas menores devido a presença de uma lâmina d'água que permanece nessa região por meses.

Ao observamos a figura 12.b para um dia típico de fevereiro, podemos ver uma dinâmica diferente no decorrer das profundidades, pois no gráfico anterior o que se observava era a temperatura máxima sendo alcançada por voltas das 14h no período seco, já o que se observa para o período chuvoso, onde há ocorrência de inundações durante meses, é a temperatura máxima sendo alcançada durante o período noturno, e não durante o dia, quando há a presença de radiação solar incidindo no solo, que deveria aquecer sua superfície e esse aquecimento ser conduzido para as camadas mais profundas, tornando as profundidades próxima da superfície mais aquecidas durante o dia e ocasionado a perda de temperatura durante a noite para o meio externo (ar).

Pela figura 11, vemos que a menor amplitude térmica mensal foi registrada para o mês de abril onde variou em torno de $0,9(3)^{\circ}\text{C}$. para a camada de 1 cm e para a camada mais profunda (30 cm) o valor encontrado foi de $0,3(3)^{\circ}\text{C}$. Observou-se que as profundidades entre 7 cm a 30 cm apresentaram as menores amplitudes mensais da temperatura. Este comportamento está relacionado à composição do solo nesta profundidade, que interfere diretamente no armazenamento de calor para essas profundidades.

ii) Tautócronos¹

A temperatura do solo é apenas uma variável no tempo e no espaço assumindo grande importância nos processos físicos do solo e nas trocas de energia com a atmosfera. Ao longo do dia e da profundidade, ocorre o estudo das variação de temperatura do solo a partir da elaboração dos perfis de variação de temperatura do solo, denominado de tautócrono.

Os tautócronos da figura 13 foram obtidos para todos os dias primeiro de cada mês a fim de observar o comportamento da temperatura variando ao longo dos meses, assim como observar sua dinâmica durante o período das inundações locais no Pantanal.

O dia primeiro de setembro de 2016 foi escolhido para representar as variações de temperatura. Na figura 13.a), para os horários de ausência do sol, um gradiente ascendente entre as profundidades de 1 a 15 cm foi observado, tendo temperaturas superficiais menores do que em profundidades maiores. O mesmo comportamento pode ser observado para os horários das 6h e 9h, pois a partir desse horário o fluxo de calor nesse caso se torna descendente devido ao começo da incidência solar na superfície transferindo calor da superfície para as demais profundidades. Já para os horários das 13h, 15h e 18h podemos observar o comportamento oposto observado em horários anteriores. Nesses

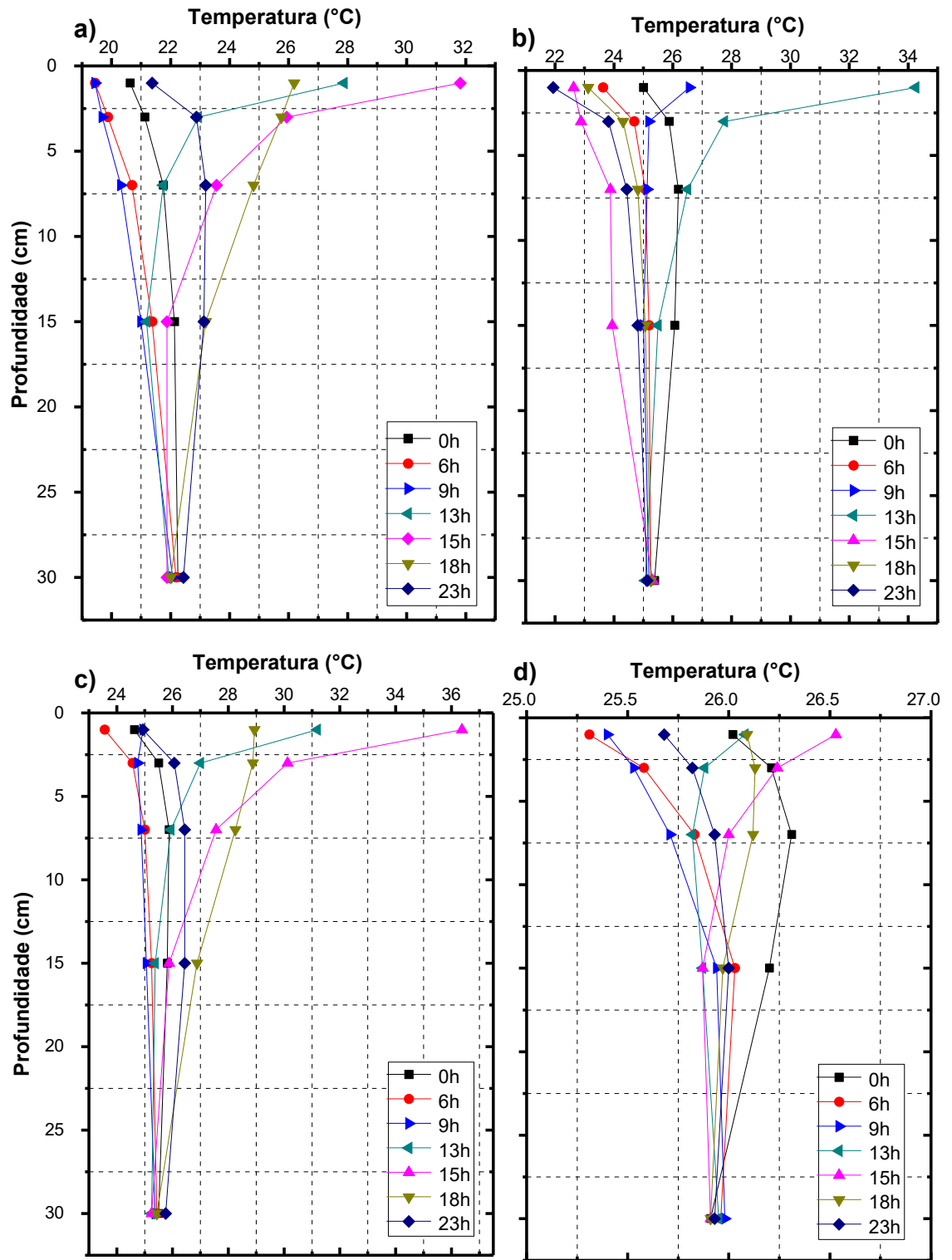
¹ Que ocorre ou se realiza ao mesmo tempo; sincrônico.

horários há um fluxo descendente nas camadas mais superficiais, até a profundidade de 15 cm, onde a inversão do fluxo ocorre, fazendo com que o calor se propague das camadas mais superficiais para as camadas mais profundas, tendo então, temperaturas maiores na superfície e menores nas demais profundidades. Neste dia a temperatura máxima registrada ocorreu por volta das 15h registrando $32,0(3)^{\circ}\text{C}$ a 1 cm e a menor temperatura registrada estava a $19,2(3)^{\circ}\text{C}$ a 1 cm às 0h.

No tautócrono do dia 01 de outubro de 2016 (figura 13.b) se observa um comportamento diferente do que se vê no tautócrono do mês de setembro, isso se dá pela influência da precipitação que ocorreu neste dia próximo das 14h. No horário das 15h a variação de temperatura até a profundidade 7 cm é ascendente e de 7 cm até 30 cm de profundidade é descendente, uma situação que não é normal, pois a normalidade nesse caso seria de fluxo descendente devido nesse horário ocorrer as maiores temperaturas.

Já o tautócrono do dia 01 de novembro de 2016 (figura 13.c) apresenta nas profundidades mais superficiais aquecimento entre 13h às 18h até a profundidade 7 cm, onde o gradiente de temperatura é descendente. Já para as temperaturas nos horários 0h, 6h e 9h temos que a temperatura possui um comportamento caracterizado como ascendente, onde as camadas mais superficiais possuem temperaturas menores que as temperaturas das demais profundidades.

Durante o período alagado a dinâmica é diferente, seus máximos estão sendo alcançados durante as noites, entre 18h e 23h. No dia 01 de janeiro (figura 13.d), a influência da inundação já é visível, pois a amplitude térmica na superfície (1 cm) é menor que aquelas observadas durante o período seco. Nos períodos onde há ausência de luz solar, as temperaturas mais próximas da superfície são menores do que as temperaturas em profundidades maiores, porém muito próximo da temperatura média alcançada a 30 cm.



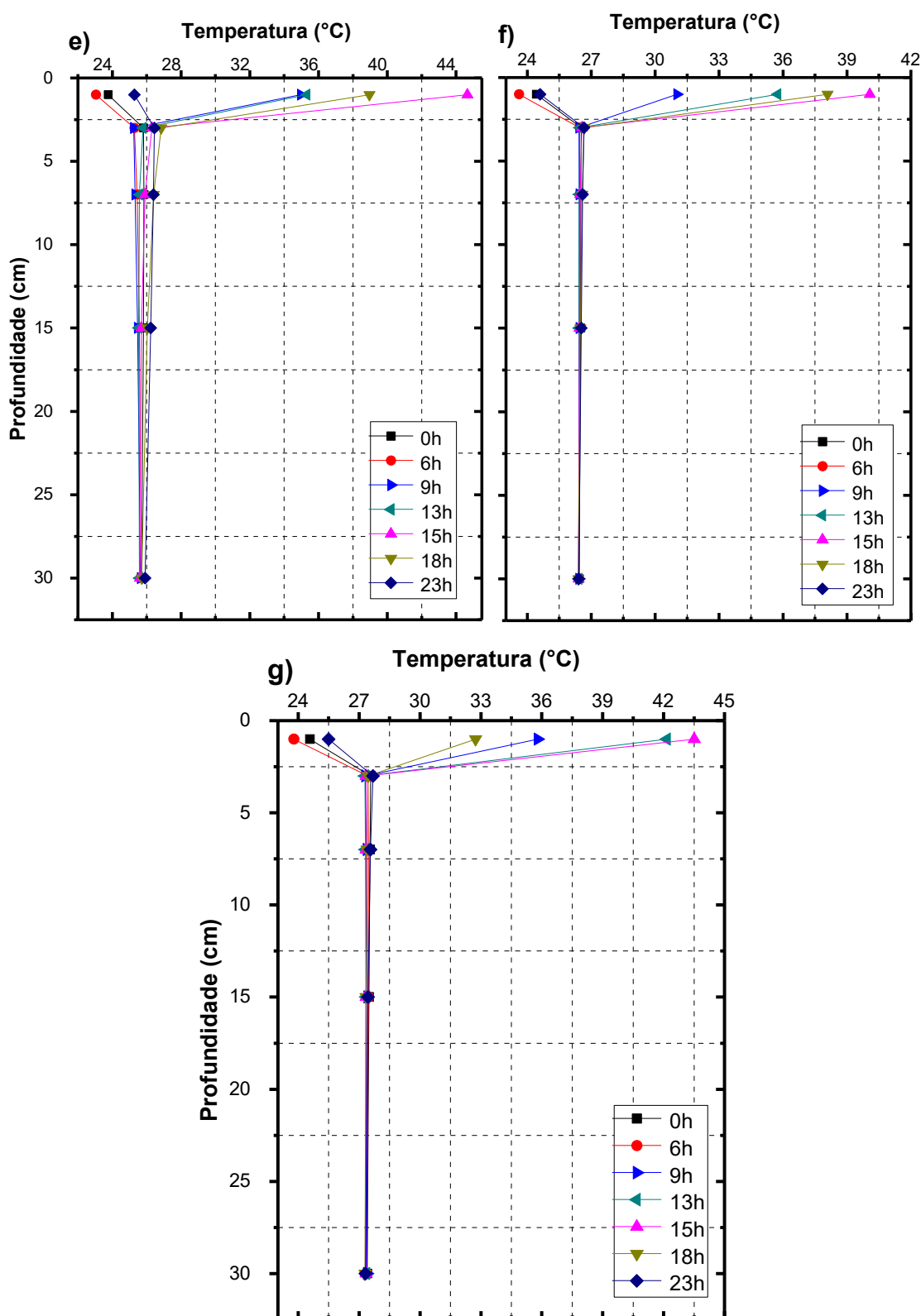


Figura 13 - Perfil de temperatura do solo em diferentes horários referente aos dias 01 de cada mês durante o período de 2016 a 2017 na Baía das Pedras referente aos meses de (a) setembro; (b) outubro; (c) novembro; (d) janeiro; (e) fevereiro; (f) março e (g) abril.

Já para os meses de fevereiro, março e abril, observa-se que há variação de temperatura no solo somente na profundidade de 1 cm, da profundidade 3 cm adiante, os valores da temperatura são muito próximos dos valores da temperatura média do solo. Esse

comportamento se dá, pela presença de água, que atua como uma espécie de isolante dificultando a perda de calor para o ar.

É possível inferir, segundo os padrões observados nos tautócronos, que as variações de temperatura à 30 cm são muito pequenas, próximas de zero, conseqüentemente, o fluxo de calor a partir desta profundidade é praticamente nulo.

4.3 Estimativa do fluxo de calor no solo

O fluxo de calor no solo representa a fração do saldo de radiação que foi transferida para os níveis inferiores do solo. Os dados de fluxo de calor apresentados na figura 14 são referentes ao período de aproximadamente 1 ano.

A análise da variação, durante um dia, dos componentes do fluxo de calor nos permitem inferir a respeito da dinâmica térmica do solo pantaneiro. Dessa forma pode-se discutir sobre como as propriedades térmicas do solo variam no período de um dia (BELLEVER, 2009).

Segundo Santos (2014), são estabelecidas condições iniciais, para as quais o perfil inicial de temperatura é uniforme ou seja, $T = T_0$; para $t = 0$; $z \leq 0$ estabelece que a temperatura inicial do solo através de toda a camada é a mesma, de forma que o cálculo do fluxo de calor no solo seja inicializado no momento que o fluxo é igual a zero. De forma prática alguns autores, como Hsieh et al (2009), consideram o início da noite ou a meia-noite o momento em que o fluxo de calor no solo é próximo de zero.

Verifica-se que os maiores valores de fluxo de calor ocorrem durante a estação seca, entre julho e outubro, com valores máximo mensal de $93(5) \text{ Wm}^{-2}$ para o mês setembro de 2016, e no período chuvoso, entre novembro e abril, o valor máximo mensal registrado foi de $45(5) \text{ Wm}^{-2}$ para o mês de dezembro de 2016. Os valores mínimos mensais para esses períodos foram de $-27(1) \text{ Wm}^{-2}$ para o mês de setembro de 2016 no período seco e $-42(2) \text{ Wm}^{-2}$ em outubro de 2016, como pode ser visto na tabela 2 o que corrobora com o que foi visto na figura 9, onde a temperatura máxima e mínimas do solo também ocorre neste mês.

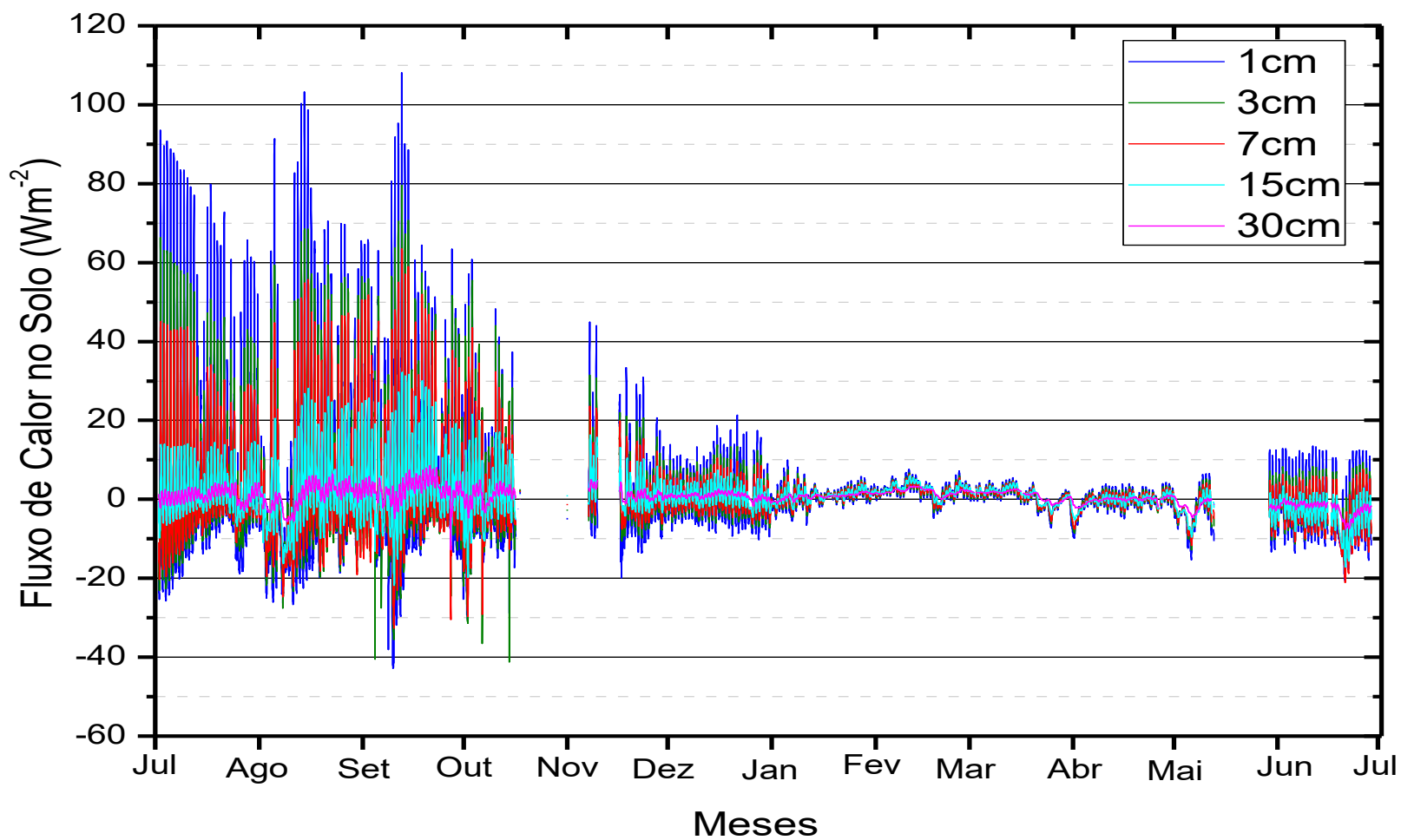


Figura 14 - Média de 30 min para o fluxo de calor no solo para 5 profundidades diferentes localizado na Baía das Pedras.

Para o período da seca, podemos observar um aumento nos valores máximos de fluxo de calor no solo, tendo uma pequena queda durante o mês de setembro que corrobora com os dados de temperatura, onde também é observado uma queda para esse mês. E para o período chuvoso, podemos observar pouca variabilidade entre os máximos e mínimos nos valores de fluxo, evidenciando uma baixa amplitude para o período decorrente do alagamento nesta região, que é uma característica predominante do Pantanal, como também é observado nos gráficos de temperaturas do solo.

Tabela 2 - Valores da média mensal de fluxo de calor no solo (Wm^{-2}) para 5 profundidades diferentes durante o período de estudo de 2016 a 2017 para Baía das Pedras.

Máxima (Wm ⁻²)						Mínimo (Wm ⁻²)				
2016										
Mês	1 cm	3 cm	7 cm	15 cm	30 cm	1 cm	3 cm	7 cm	15 cm	30 cm
7	93.49	66.29	45.06	14.01	2.43	-25.76	-23.08	-20.26	-9.82	-2.18
8	88,74	62.52	43.69	14.66	4.49	-25.01	-21.81	-19.53	-10.97	-3.39
9	103.20	68.59	55.71	28.11	6.37	-26.61	-27.58	-24.69	-16.25	-5.63
10	108.09	79.54	63.51	32.20	8.51	-42.83	-40.53	-32.57	-21.77	-12.80
11	48.28	43.95	34.54	19.94	4.93	-28.89	-41.17	-29.13	-10.46	-3.39
12	44.87	31.44	23.59	16.30	5.02	-19.87	-10.59	-7.50	-4.19	-1.06
2017										
Mês	1 cm	3 cm	7 cm	15 cm	30 cm	1 cm	3 cm	7 cm	15 cm	30 cm
1	21.32	13.78	10.42	7.44	2.52	-10.24	-7.25	-6.25	-4.52	-1.69
2	9.95	7.53	6.08	4.40	2.07	-6.51	-4.55	-3.93	-2.58	-0.70
3	7.62	6.72	6.28	6.01	3.32	-4.79	-3.39	-2.40	-1.42	0.01
4	5.47	4.75	4.58	4.31	2.61	-9.92	-8.55	-7.59	-5.18	-2.22
5	4.27	3.50	3.05	2.43	1.09	-9.47	-6.63	-5.89	-4.64	-2.02
6	12.88	8.22	6.26	3.32	0.28	-15.36	-12.78	-11.71	-9.56	-4.60
7	13.46	9.29	7.66	2.88	-0.35	-20.71	-18.83	-21.12	-17.18	-7.44

A dinâmica térmica do fluxo de calor e da temperatura do solo são muito semelhantes entre os dois períodos. No período seco, a ausência de água no solo dificulta a perda do fluxo de calor para o meio externo, fazendo com que as partes mais superficiais do solo tenham dificuldade em conduzir o calor para as partes mais inferiores, propiciando assim, um gradiente de temperatura maior, que por consequência faz com que as médias do fluxo de calor no período seco serem maiores do que o se observa no período chuvoso. Já no período chuvoso, com a presença de água proveniente das inundações e do acúmulo das chuvas, o fluxo de calor no solo é conduzido para as demais camadas com muito mais facilidades, já que a presença de água melhora a condução de calor no solo.

As médias diárias do fluxo de calor no solo a partir de janeiro tendem a valores negativo ou próxima de zero e observa-se que a partir de março há predominância de valores negativos, como se observa na figura 15. Isso se deve ao fato de que o solo está coberto com uma lâmina d'água, causando uma menor variação do fluxo de calor no solo neste período, ou seja, o fluxo é praticamente o mesmo próximo à superfície e ao fluxo encontrado à 30 cm, com valores próximos de zero, ou seja, nesse período a variação de temperatura no solo não sofre grande variação devido a presença da lâmina d'água, que atuará como um isolante térmico entre o solo e a atmosfera (ZIMMER et al., 2013).

Ao se observar o gráfico da figura 15, temos ideia de como se comporta o armazenamento ou a perda de fluxo de calor ao longo do dia, e como isso se relaciona com o balanço de energia de radiação. Dos componentes presentes no balanço de energia, o fluxo de calor no solo é o que recebe o menor percentual de parcela da energia, no qual grande parte dessa energia é destinada ao fluxo de calor sensível e latente (NOVAIS, 2011). E por menor que seja essa parcela no balanço final, ele (fluxo de calor) terá influência.

À medida que a onda de calor adentra no solo sua amplitude térmica sofre diminuição em função da atenuação da radiação solar e da umidade do solo, que varia consideravelmente no aumento das profundezas do solo (COSTA et al., 2018).

No período seco observa-se um fluxo de calor positivo, tendo uma maior perda de calor por parte da superfície para o meio externo, já que a variação do fluxo que entra no solo através da incidência solar, é facilmente perdida para o meio externo durante a noite, o que se observa ao analisarmos a temperatura do solo, tendo maiores temperaturas durante o dia e menores temperaturas durante a noite para esse mesmo período.

Já no período chuvoso, para os meses de dezembro e janeiro, quando há presença da lâmina d'água na região do estudo, o fluxo de calor no solo, tende a ser nulo, mostrando que toda a energia que entra no solo, devido a incidência solar, também sai, ou seja, o fluxo é nulo não tendo nem armazenamento e nem perda de energia, o que explica a pouca variação da temperatura durante esse tempo nas diferentes profundidades.

Para o mês de abril a junho, observa-se um fluxo negativo, mostrando que está armazenando mais calor do que perdendo para o meio externo. Esse comportamento talvez explique porque a variação da temperatura do solo é tão pequena se comparada com a variação do período seco para as diferentes profundidades.

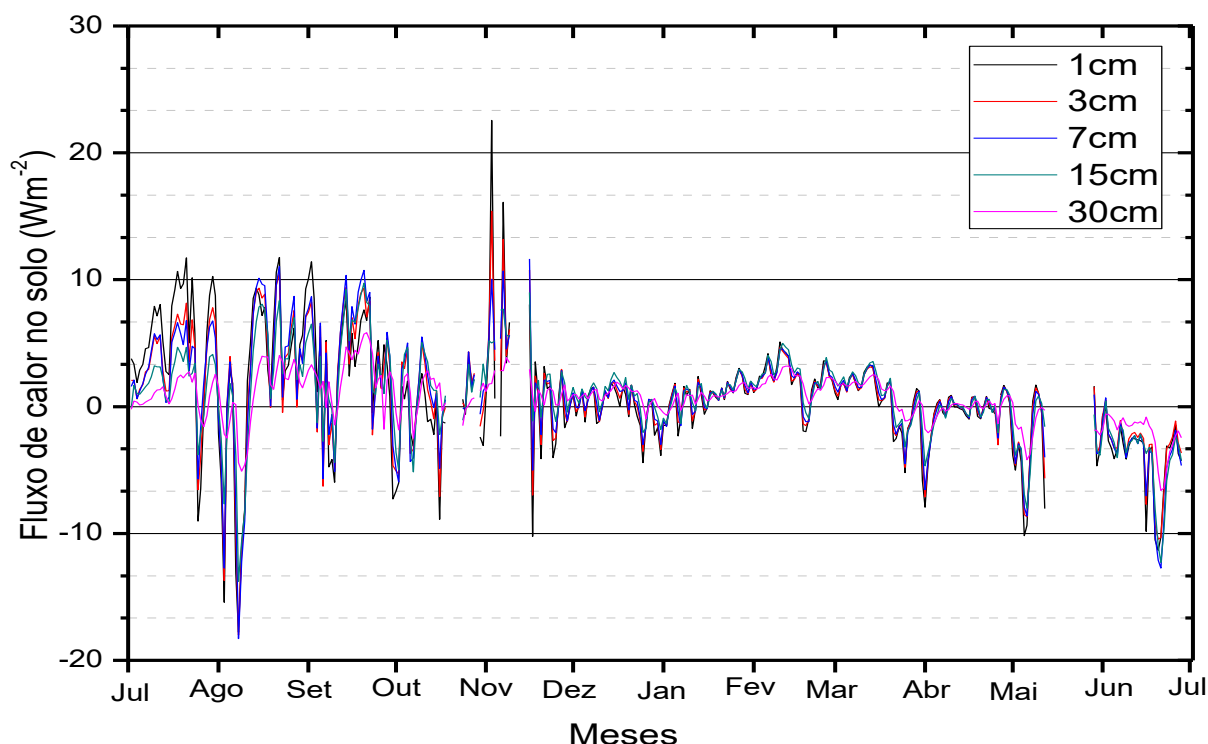


Figura 15 - Média diária para o fluxo de calor no solo para 5 profundidades diferentes localizado na Baía das Pedras.

A partir de maio pode-se ver novamente um aumento nos valores de fluxo de calor no solo, e esse comportamento é explicado devido a diminuição de lâmina d'água, aproximando-se do período da seca. Uma observação mais significativa pode ser vista nas diferentes profundidades. As camadas mais superficiais apresentam valores de fluxo de calor maiores do que as camadas mais profundas, que tende a não variar sua temperatura como pode ser visto nos gráficos de perfil dos tautócronos e fluxo de calor horário.

4.4 Estimativa da difusividade térmica do solo

Para estimar a difusividade térmica de uma camada de solo, baseando-se no procedimento estabelecido no tópico 3.4.1, é necessário obter as equações de difusividade térmica que podem ser encontrados por diferentes métodos, como foi descrito neste tópico.

Diversos métodos apresentados estimam a difusividade térmica dos solos, sendo que alguns envolvem modelos teóricos, como visto no trabalho De Vries (1963). Estes modelos se aplicam para solos com estrutura simples, apesar de basearem na fração volumétrica dos constituintes dos solos. Já outros métodos utilizam-se de medidas observadas em campo, cuja variável usada refere-se a temperatura do solo. A maioria deles se aplicam para solos homogêneos, graças as soluções analíticas da equação de condução

de calor unidimensional com a difusividade constante em um meio semi-infinito (HORTON et al., 1983).

Em hipótese da periodicidade constante que está implícita nas soluções, o perfil inicial da temperatura do solo não é exigido o seu conhecimento prévio. Embora assumamos homogeneidade vertical para todas as propriedades térmicas, para solo como os de região semiáridas, esta suposição pode não ser validada próxima da superfície terrestre, pois o solo seca de maneira muito rápido independente se ser solo nu ou coberto com vegetação esparsa (Costa et al., 2018).

A difusividade térmica do solo controla a velocidade com que o calor penetra nas demais profundidades do solo, ou seja, ela representa uma medida do temporal necessária para que ocorram as propagações das variações de temperatura e essa propriedade térmica pode ser observado nas figuras 16 e 17.

Neste trabalho, a estimativa da difusividade térmica utiliza-se dos dados de temperatura e para a determinação dos valores foram usados três métodos distintos para quatro camadas do solo, sendo a camada 1 (1-3cm), a camada 2 (1-7 cm), a camada 3 (1-15 cm) e a camada 4 (1-30 cm). Cada método usa um critério na estimativa da difusividade térmica, o qual geram valores diferentes.

Os valores encontrados para a difusividade térmica do solo estão de acordo com aquelas obtidas por Danelichen e Biudes (2011), com a mesma ordem de grandeza e estão uma ordem de grandeza maior se comparados com os trabalhos de Bellaver (2010) e Diniz et al. (2014). Nas figuras 16 e 17 se encontram os valores obtidos a partir de dados coletados ao longo do ano de 2016 e 2017, respectivamente.

Para uma análise descritiva dos períodos da difusividade térmica do solo, foram obtidos: a média, a mediana e o desvio padrão, como se vê na tabela 3. Essa tabela procura mostrar a comparação da difusividade térmica para os três métodos diferentes ao longo de todo o estudo.

Os valores da difusividade encontrados para o período chuvoso, são maiores que os valores encontrados no período seco, para ambos os métodos estudados. Observa-se que a médias pelos métodos da amplitude, do arco tangente e do logarítmico, tende a crescer com o aumento da profundidade e logo depois uma diminuição é observada, o que é esperado quando se trata de difusividade térmica do solo, pois a difusividade aumenta com o aumento do teor de umidade atingindo um máximo e depois diminui.

Se compararmos as médias dos diferentes métodos para as mesmas camadas, podemos observar que os métodos da amplitude e do arco tangente são semelhantes e difere do método do logarítmico, que se assemelha melhor aos valores encontrados na

literatura, como vemos no trabalho de Bellaver (2010), que fez seu trabalho para uma região de cambarazal no Pantanal e Souza et al. (2006) que estimou a difusividade térmica do solo em área de floresta amazônica e pastagem.

Tabela 3 - Parâmetros estatísticos da difusividade térmica do solo para os períodos seco e chuvoso, referente as quatro camadas específicas, estimadas a partir de dados coletados ao longo do ano de estudo.

Método	Índice	Profundidades (cm)			
		Chuvoso			
		1-3	1-7	1-15	1-30
Amplitude	Média	4.1E-07	8.6E-07	4.77E-07	5.1E-07
	Mediana	80.4E-07	1.46E-07	2.35E-07	3.19E-07
	Desvio padrão	0.28E-07	0.54E-07	0.15E-07	6.03E-07
Arco tangente	Média	6.54E-07	0.133E-07	0.0562E-07	0.0013E-07
	Mediana	1.52E-07	2.85E-07	4.42E-07	0.60E-07
	Desvio padrão	0.40E-07	0.631E-07	0.0066E-07	1.73E-05
Logarítmico	Média	0.0011E-07	0.0020E-07	0.0030E-07	0.0041E-07
	Mediana	0.095E-07	0.0017E-07	0.0026E-07	0.0033E-07
	Desvio padrão	0.0012E-07	0.0012E-07	0.0021E-07	0.0021E-07
Método	Índice	Seco			
		1-3	1-7	1-15	1-30
		1-3	1-7	1-15	1-30
Amplitude	Média	5.19E-07	6.34E-07	0.135E-07	0.213E-07
	Mediana	91.3E-07	1.22E-07	1.82E-07	3.25E-07
	Desvio padrão	0.399E-07	0.33E-07	0.73E-07	0.010E-07
Arco tangente	Média	2.88E-07	4.72E-07	0.182E-07	0.0084E-07
	Mediana	1.86E-07	2.76E-07	5.02E-07	0.90E-07
	Desvio padrão	7.17E-07	0.118E-07	0.53E-07	0.0049E-07
Logarítmico	Média	0.0015E-07	0.0025E-07	0.0034E-07	0.0032E-07
	Mediana	0.0015E-07	0.0026E-07	0.0032E-07	0.0029E-07
	Desvio padrão	0.0014E-07	0.0011E-07	0.0010E-07	0.0013E-07

O desvio padrão mostrou-se alto para os diferentes métodos, indicando uma grande dispersão dos dados, mostrando que há uma grande variabilidade. E ao observarmos a mediana podemos verificar pelos métodos da amplitude e do logarítmico, que a grande maioria dos dados estão na metade maior da amostra e que no método do arco tangente os dados encontram-se em sua grande maior na parte menor da metade. Esse dado pode ser melhor interpretado ao observarmos os boxplot nas figuras 16 e 17.

Ao analisarmos a figura 16, podemos observar na camada 1 (1-3cm) uma diferença significativa entre os métodos usados, além de podermos comparar os valores encontrados para os dois períodos presentes nesse estudo, o período seco e chuvoso. Para ambos os períodos, os valores obtidos pelos métodos da amplitude e do arco tangente são bem menores que os valores encontrados pelo método do logarítmico, assim como também se observou que os valores da difusividade para as camadas mais profundas

possuem valores maiores do que é observado nas camadas mais superficiais tanto para o período da seca quanto para o período chuvoso.

Esse comportamento se dá, pois segundo Bellaver (2010) para cada camada estudada, o solo se apresenta com uma composição diferente, assim, influência na retenção de água, onde a parte argilosa retém mais água que a arenosa, interferindo nos valores da difusividade térmica.

Neste estudo, os valores encontrados pelos diferentes métodos, difere-se muito com os valores encontrados na literatura em uma ordem de grandeza, mas assemelha-se com o trabalho feito por Danelichen e Biudes (2011), que também foi feito para uma região ao norte do Pantanal.

Os valores encontrados neste estudo para as camadas nos métodos da amplitude e do arco tangente, foram inferiores aos valores encontrados por Bellever (2010) e para o método no logarítmico os valores encontrados estão semelhantes, na mesma ordem de grandeza em ambos os períodos, para o que foi encontrado por ele. Esse comportamento talvez possa ser explicado pelo uso da cobertura vegetal da área de estudo. No trabalho feito por Bellaver (2010), na área de estudo usada havia a presença de serapilheira por se localizar em uma área de cambará, o que acaba interferindo no cálculo da difusividade pois retém umidade, que acaba interferindo na dinâmica da temperatura do solo, que é a variável usada para o cálculo da difusividade térmica do solo.

Tendo feito um estudo semelhante ao desse trabalho também para uma área do Pantanal, Bellaver (2010), encontrou os valores de $0,183 \text{ a } 0,472 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para alguns dias do período seco e para o alguns dias do período chuvoso, os valores encontrados foram de $0,251 \text{ a } 0,319 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para o método do logarítmico, já os valores encontrados pelos métodos da amplitude e do arco tangente foram de $0,175 \text{ a } 0,108 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ no período seco e $0,114 \text{ a } 0,112 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ no período chuvoso para a amplitude e de $0,320 \text{ a } 0,329 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para período seco e $0,428 \text{ a } 0,487 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para período chuvoso no arco tangente. Sendo esses valores referente à camada 1.

Já ao analisarmos a camada 2 (1-7 cm), podemos observar o comportamento térmico da difusividade semelhante ao observado na camada 1, com os valores da difusividade para os métodos da amplitude e arco tangente bem semelhantes entre os dois períodos, diferido dos valores encontrados pelo método do logarítmico, que pouco varia seus valores em relação aos períodos.

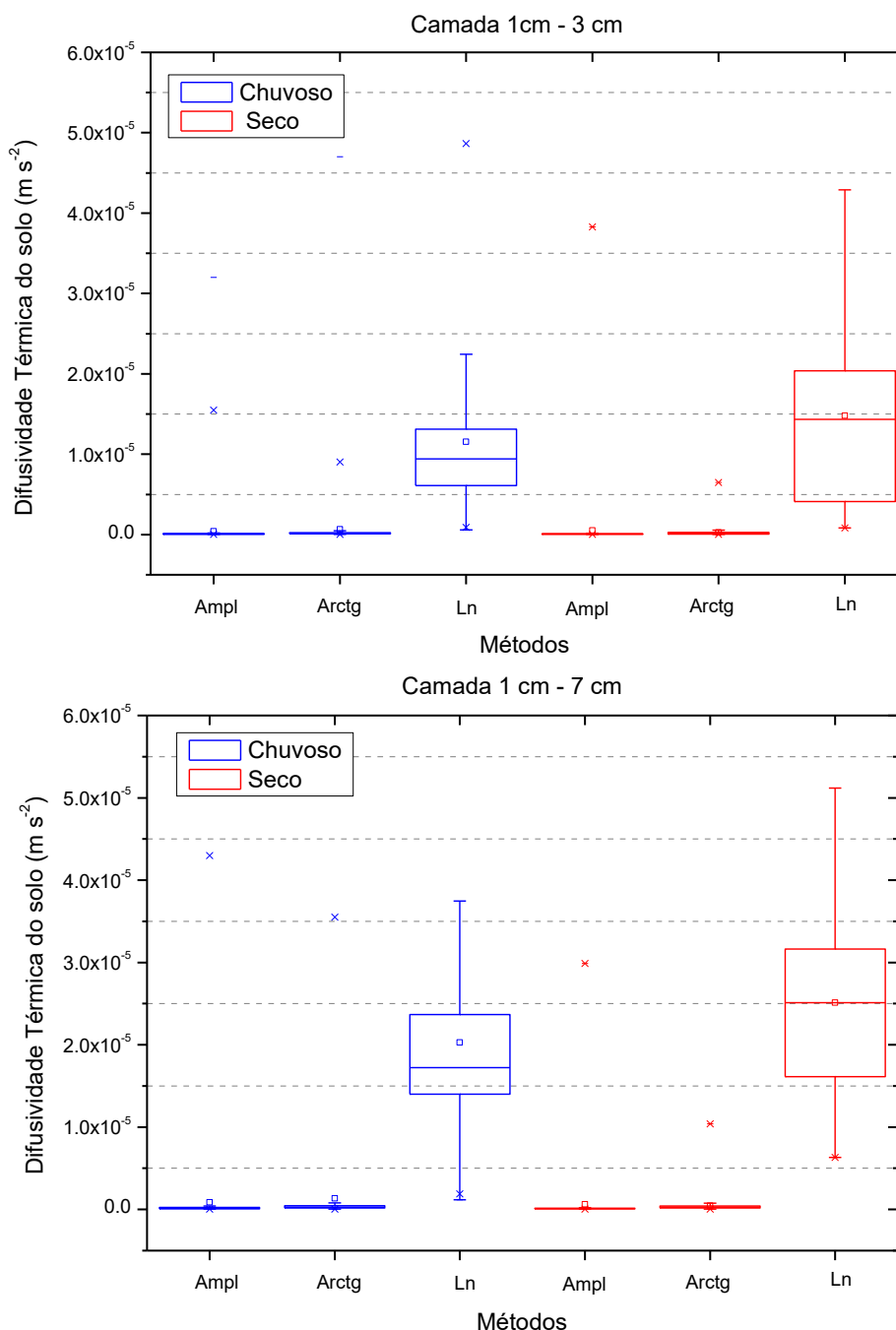


Figura 16 - Difusividade térmica do solo calculada pelos métodos da amplitude, arco tangente e logarítmico para as camadas de 1-3 cm e 1-7 cm para período seco e chuvoso dos anos de 2016 e 2017. O boxplot representam os quartis inferior e superior (25% (Q1) e 75% (Q3)), com mediana indicada pela marca central.

Os valores encontrado por Bellever (2010) na camada 2 para o período seco foi de $0,116$ a $0,136 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ e $0,108$ a $0,121 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ no chuvoso pelo método da amplitude, já para arco tangente foram encontrados $0,686$ a $0,375 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ no período seco e $0,334$ a $0,489 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ no chuvoso e para o método do logarítmico foi encontrado $0,088$ a $0,307 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ no período seco e no período chuvoso foi de $0,157$ a $0,238 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$.

Neste trabalho assim como no trabalho de Bellavar (2010), para o período chuvoso, observamos os menores valores de difusividade térmica para todas as camadas e observamos valores maiores de difusividade para o período seco. No período de transição entre o solo seco e o solo alagado, que ocorrem no período chuvoso, os valores nas camadas 1 e 2 são semelhantes e seguem um mesmo intervalo de valores ao longo da profundidade.

Denelichen e Buides (2011) explicam que o maior conteúdo de água na superfície do solo protege-o contra aquecimento excessivo, pois modifica o microclima local em função da alteração do balanço de energia do local.

Os valores da difusividade térmicas para as camadas 3 (1-15 cm) e camada 4 (1-30 cm) pode ser visto na figura 17. Nesta figura temos ao analisarmos camada 3, os valores de difusividade pelos métodos da amplitude e arco tangente são bem próximos entre ambos os período seco e período chuvoso e que o método do logarítmico apresenta valores maiores que os outros dois métodos, mas que são semelhantes entre si em ambos os períodos. Diferença maior ainda se vê na camada 4 para esse mesmo método.

Para a camada 3, Bellever (2010) encontrou pelo método da amplitude os valores de $0,109$ a $0,183 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para o período seco e $0,207$ a $0,208 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para o período chuvoso, pelo método da arco tangente foi encontrado $0,495$ a $0,505 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ no período seco e $0,531$ a $0,656 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para o chuvoso e por fim pelo método do logarítmico foi encontrado $0,165$ a $0,263 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ no período seco e $0,257$ a $0,264 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ no período chuvoso.

Para a camada 4, novamente os métodos da amplitude e arco tangente são semelhantes entre ambos os períodos e semelhantes aos valores encontrados em outros trabalhos, mas para o método do logarítmico os valores encontrados divergem muitos para os valores observados em outros trabalhos, tendo no período chuvoso valores ainda maiores que no período seco. Isso se deve a presença de água provenientes das inundações durante esse período, que faz com que a variação da temperatura sobre a profundidades maiores seja muito pequena.

Bellever (2010) encontrou pelo método da amplitude para o período seco $0,256$ a $0,332 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $0,362$ a $0,684 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para período chuvoso, já pelo método do arco tangente foi encontrado os valores de $0,13$ a $0,151 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ no período seco e $0,14$ a $3570 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para o período chuvoso e pelo método do logarítmico foi encontrado $0,251$ a $0,403 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para o período seco e $0,126$ a $0,636 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para o período chuvoso.

Métodos para determinar a difusividade térmica aparente do solo têm sido feitas para diferentes locais e profundidades. Trabalhos feitos por Horton et al.(1983), Rao et al.(2005) e Gao et al.(2009) utilizaram-se dos métodos da amplitude, do logarítmico, do arco tangente e outros métodos para calcular a difusividade térmica do solo.

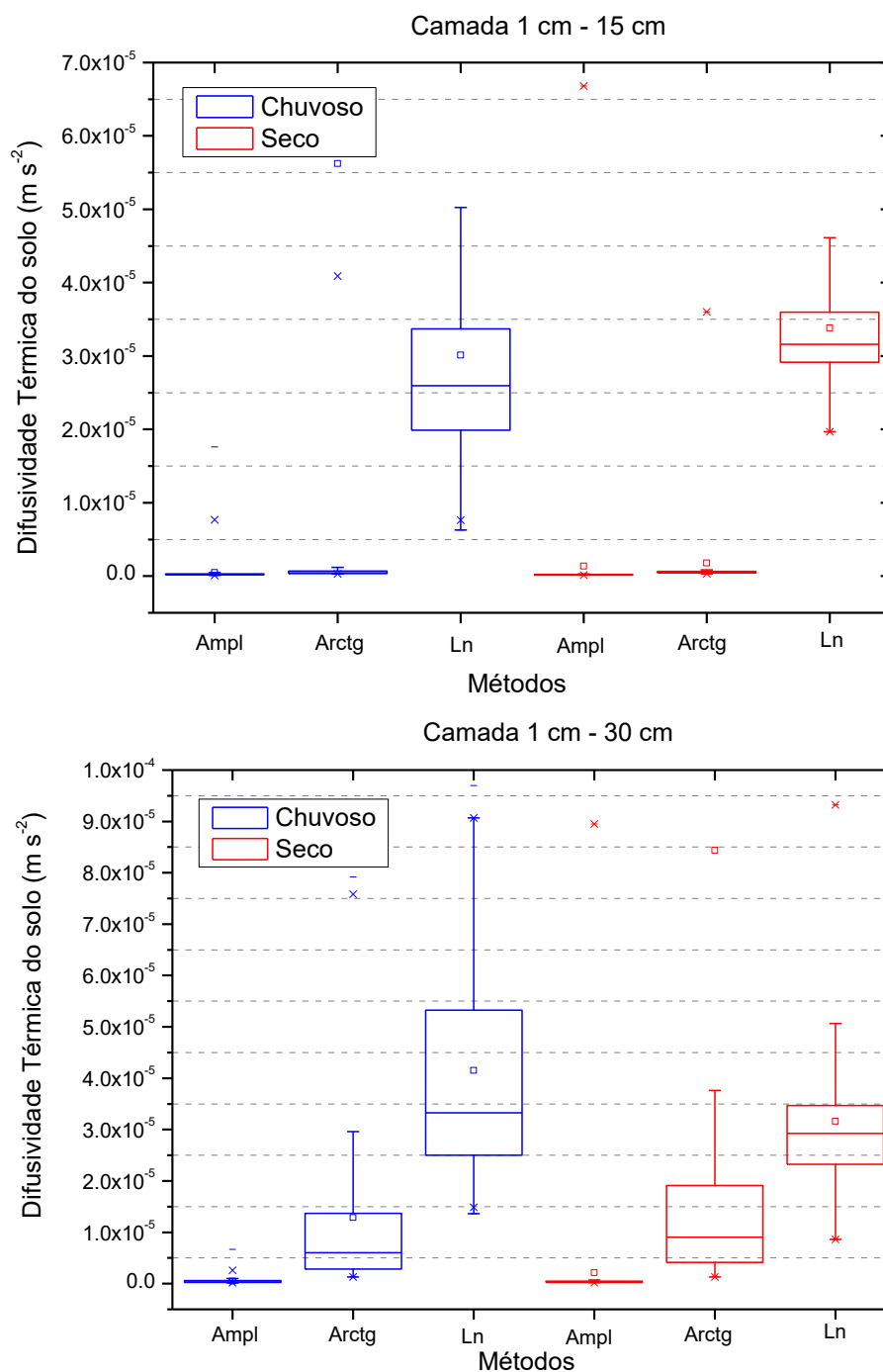


Figura 17 - Difusividade térmica do solo calculada pelos métodos da amplitude, arco tangente e logarítmico para as camadas de 1-15 cm e 1-30 cm para período seco e chuvoso dos anos de 2016 e 2017. Os boxplots representam os quartis inferior e superior (25% (Q1) e 75% (Q3)), com mediana indicada pela marca central.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, o objetivo foi analisar a dinâmica das propriedades térmicas do solo bem como a caracterização e contribuição da água no comportamento térmico do solo em uma área alagada da região norte do Pantanal. Assim sendo, pode-se inferir que os alagamentos que ocorrem ciclicamente no Pantanal influenciam os processos de transferência de energia (calor) relacionada no solo.

Os perfis de temperatura do solo são distintos entre o período seco e chuvoso e, com maiores variabilidades entre as camadas superficiais apresentando valores máximos entre às 13h e às 14h, para os dois períodos de observação. Já as camadas mais profundas apresentaram temperaturas praticamente constantes.

O período seco foi o período em que melhor observa-se as oscilações na temperatura, diferente do período chuvoso, com a presença de água, inibe-se diferenças de temperatura entre o máximo e o mínimo diário, fazendo com que as temperaturas não oscilem muito no decorrer do dia.

A presença de água no período chuvoso dificulta perda de energia para o ambiente à noite, contrariamente ao período seco, onde os máximos fluxos positivos e negativos foram maiores que o dos outros períodos. Sendo assim, o período alagado o Pantanal mostrou maior estabilidade que o período seco em relação às amplitudes de temperatura e fluxo de calor no solo.

O fluxo de calor no solo apresentou valores maiores durante o período da seca e menor valores durante o período chuvoso. E foi observado que durante o período que houve a presença da lâmina d'água na região do estudo, o fluxo de calor no solo era aproximadamente nulo, mostrando que toda a energia recebida durante o dia, era perdida durante a noite.

A partir da análise dos resultados verificou-se que os valores da difusividade térmica do solo estimados pelos três métodos neste trabalho, assemelham-se aos valores encontrados nas literaturas, principalmente quando se trata dos métodos de amplitude e logarítmico, já o método do arco tangente difere um pouco dos valores encontrados na literatura, neste trabalho os valores superestimam a literatura. Recomenda-se então para estimar a difusividade térmica do solo o uso dos métodos da amplitude e do logarítmico para regiões que apresentam as propriedades física iguais a do Pantanal.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-HAMDEH, Nidal H.; REEDER, Randall C. Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. **Soil science society of America Journal**, v. 64, n. 4, p. 1285-1290, 2000.

ABU-HAMDEH, Nidal H. Thermal properties of soils as affected by density and water content. **Biosystems engineering**, v. 86, n. 1, p. 97-102, 2003.

ADÂMOLI, J. O Pantanal e suas relações fitogeográficas com os cerrados: discussão sobre o conceito de complexo do Pantanal. In: do 32º Congresso nacional da Sociedade Botânica do Brasil, 1982, **Anais**, Teresina, PI, p.109-119.

ALHO, C. J. R.; LACHER JR, T. E.; GONCALVES, H. C. Environmental degradation in the Pantanal ecosystem. **BioScience-American Institute of Biological Sciences (USA)**, 1988.

ALVALÁ, R. C. S. et al. Medidas das propriedades térmicas do solo no Pantanal Sul Matogrossense durante o período seco de 2002. **INPE/CPTEC**, 2002.

ANDRADE, Ricardo Guimarães et al. Geotecnologias aplicadas à avaliação de parâmetros biofísicos do Pantanal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, n. 9, p. 1227-1234, 2012.

ASSINE, Mario Luis. River avulsions on the Taquari megafan, Pantanal wetland, Brazil. **Geomorphology**, v. 70, n. 3-4, p. 357-371, 2005.

ASSINE, Mario L. et al. Geology and geomorphology of the Pantanal basin. In: **Dynamics of the Pantanal Wetland in South America**. Springer, Cham, 2015. p. 23-50.

AZEVEDO, Tarik Rezende de; GALVANI, Emerson. Ajuste do ciclo médio mensal horário da temperatura do solo em função da temperatura do ar. 2003.

BELLAVER, V. *Difusividade térmica do solo em área monodominante de cambará no norte do Pantanal Matogrossense*. Cuiabá, 2010. 54F. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

BITTELLI, M., Ventura, F., Campbell, G. S., Snyder, R. L., Gallegati, F., & Pisa, P. R. Coupling of heat, water vapor, and liquid water fluxes to compute evaporation in bare soils. **Journal of Hydrology**, v. 362, n. 3-4, p. 191-205, 2008.

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.

BIUDES, M.S.; CAMPELO JUNIOR, J.H.; NOGUEIRA, J.S.; SANCHES, L. Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do Pantanal pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.24 n. 2, p 2009.

CAMPBELL, G. S. Soil Physics With Basic – Transport Models for Soil Plant Systems, 1st ed., 155 pp., Elsevier Sci, New York, 1985.

CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. An introduction to environmental biophysics. Springer, New York. **An introduction to environmental biophysics. Springer, New York.**, p. -, 1998.

CARNEIRO, R. G., MOURA, M. A., DA SILVA, V. D. P., JUNIOR, R. S. S., DE ANDRADE, A., & DOS SANTOS, A. B. Variabilidade da temperatura do solo em função da liteira em fragmento remanescente de mata atlântica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 99-108, 2014.

CARLAW, H. S.; JAEGER, J. C. Conduction of Heat in Solids, Clarendon. 1959.

CINDRA, José Lourenço; TEIXEIRA, Odete Pacubi Baierl. Calor e temperatura e suas explicações por intermédio de um enfoque histórico. MARTINS, R.; MARTINS, L.; SILVA, C, 2004.

CLIVATI, Alba Antonia. Método proposto para determinação da difusividade térmica de meios porosos. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, p. 4. 1991.

CORINGA, E. de A. O.; COUTO, E. G.; PEREZ, X. L. O.; TORRADO, P. V. Atributos de solos hidromórficos no Pantanal Norte Matogrossense. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 1, p. 19-28, 2012.

CURADO, L. F. A., DE SOUZA NOGUEIRA, J., SANCHES, L., RODRIGUES, T. R., DE ALMEIDA LOBO, F., & BÍUDES, M. S. (2014). Inter Seasonality of the Energy Fluxes in Brazilian Savana — Mato Grosso — Brazil. *Atmospheric and Climate Sciences*, 2014.

DANELICHEN, Victor Hugo de Moraes; BIUDES, Marcelo Sacardi. Avaliação da difusividade térmica de um solo no norte do Pantanal. *Ciência e Natura*, v. 33, n. 2, p. 227-240, 2011.

DA SILVA, João dos Santos Vila et al. Fragile ecosystem: the Brazilian Pantanal wetland. **Area studies-Brazil: regional sustainable development review: Brazil**, p. 302, 2009.

DECICO, A. 1967. Equações para o cálculo da condutividade térmica de algumas séries de solos. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, Tese de Doutorado.

DECICO, A.; REICHARDT, K. Determinação das propriedades térmicas do solo em condições de campo. *Ciência e Cultura*, Campinas, v.28, n.3, p.359-362, 1976.

DE VRIES, D.A. Thermal properties of soil. In: WIJK, W.R. van, ed. *Physics of plant environment*. Amsterdam, North Holland, 1963. p.210-235.

DINIZ, J. M. T.; ALBUQUERQUE, E. M.; RAFAEL, R. A. Estudo acerca da variabilidade térmica do solo. *Scientia Plena*, v. 10, p. 1-7, 2014.

DUARTE, Anna Paula Lougon. **Avaliação da Influência da Mineralogia, Índice de Vazios e Teor de Umidade em Propriedades Térmicas de Solos**. 2006. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

EVETT, S. R., Agam, N., Kustas, W. P., Colaizzi, P. D., & Schwartz, R. C. 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 Soils, Series on Rock and Soil Mechanics, Vol. 11, 136p. 1986.

FUNARI, Frederico Luiz; PEREIRA FILHO, Augusto José. Estimativa do fluxo de calor no solo a partir da temperatura do solo em São Paulo, SP. **Revista do Instituto Geológico**, v. 38, n. 1, p. 49-57, 2017.

GALVANI, Emerson; ESCOBEDO, João Francisco; PEREIRA, ANDRÉ BELMONT. Balanço de radiação e fluxo de calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado com pepineiro. *Bragantia*, p. 139-147, 2001.

Gasparim, E., & Prandini Ricieri, R., & Lima Silva, S., & Dallacort, R., & Gnoatto, E. (2005). Temperatura no perfil do solo utilizando duas densidades de cobertura e solo nu. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 27 (1), 107-114.

GIELOW, R., Bueno, A. M., Pinto, W. O., dos Santos Alvalá, R. C., & Manzi, A. O. Estudo da partição de energia sobre terrenos complexos cobertos com lâmina d'água em setor do Pantanal Matogrossense. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11.,2000, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: UFRJ, 2000. p. 2546-2554.

GILMAN, KEVIN. Estimating the soil heat flux in an upland drainage basin/Evaluation du flux de chaleur du sol sur un bassin versant montagneux. **Hydrological Sciences Journal**, v. 25, n. 4, p. 435-451, 1980.

HAMILTON, S. K., SIPPEL, S. J. & MELACK, J. M. Inundation patterns in the Pantanal Wetland of South America determined from passive microwave remote sensing. *Archives hydrobiology*, 137 (1):1-23, 1996.

HILLEL, Daniel. *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Elsevier, p.215, 1998.

HILLEL, D. *Introduction to environmental soil physics*. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004. 494p.

HORTON, R.; WIERENGA, P.J. & NIELSEN, D.R. Evaluation of methods for determining apparent thermal diffusivity of soil near the surface. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:23-32, 1983.

HSIEH, Cheng-I.; HUANG, Cheng-Wei; KIELY, Ger. Long-term estimation of soil heat flux by single layer soil temperature. **International journal of biometeorology**, v. 53, n. 1, p. 113-123, 2009.

JAEGER, J. C. Conduction of heat in a solid with periodic boundary conditions, with an application to the surface temperature of the moon. In: **Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**. Cambridge University Press, 1953. p. 355-359.

JUNK, W. J.; CUNHA, C. N.; WANTZEN, K. M.; PETERMANN, P.; STRÜSSMANN, C.; MARQUES, M. I.; ADIS, J. Biodiversity and its conservation in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. *Aquatic Sciences*. V. 68, 278-309, 2006.

LEADY, B. S.; GOTTGENS, J. S. Mercury accumulation in sediment cores and long food chains in two regions of the Brazilian Pantanal. *Wetlands Ecology and Management*, v. 9, n. 4, 349-361, 2001.

LETTAU, H.H. Improved models of thermal diffusion in the soil. *Trans.Am. Geophys. Union*, 35:121-132, 1954.

LEITE, Manoel Reinaldo; SILVA, Lucas Augusto; DE MAGALHÃES FILHO, Raul. Análise do comportamento da temperatura de superfície e fluxo de calor no solo: Um estudo de caso no perímetro urbano de Montes Claros, Minas Gerais. **Espaço Aberto**, v. 8, n. 1, p. 109-125, 2018.

Lu, S., Wang, H., Meng, P., Zhang, J., & Zhang, X. Determination of soil ground heat flux through heat pulse and plate methods: Effects of subsurface latent heat on surface energy balance closure. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 260, p. 176-182, 2018.

MACHADO, Nadja Gomes et al. Seasonality of Energy Balance and Evapotranspiration in a Flooded Scrubland in the Pantanal of Mato Grosso. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 1, p. 82-91, 2016.

MARQUES, J.B. **DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MONITORAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS MICROCLIMÁTICOS UTILIZANDO O PROGRAMA EPICS**. 2016. 69 f. Tese (Doutorado), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2016.

MAYOCCHI, C. L.; BRISTOW, Keith L. Soil surface heat flux: some general questions and comments on measurements. **Agricultural and forest meteorology**, v. 75, n. 1-3, p. 43-50, 1995.

MORAES, A., Resende, E. K., Rodrigues, C. A. G., Mauro, R. A., Galdinos, S., Oliveira, M. D. Embrapa Pantanal: 25 anos de pesquisas em prol da conservação do pantanal. **Anais do III Simpósio sobre recursos naturais e socioeconômicos do Pantanal: Os desafios do novo milênio**. Corumbá, 2000.

MOURÃO, Guilherme et al. O Pantanal mato-grossense. **Os sites e o Programa Brasileiro de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil (in Portuguese)**, p. 29-49, 2002.

NASSAR, I.N. & HORTON, R. Determination of the apparent diffusivity of a nonuniform soil. *Soil Sci.*, 147:238-244, 1989.

NASSARDEN, D.C.S. Dinâmica Sazonal de nutrientes no solo em diferentes fitofisionomias vegetais no Norte do Pantanal Mato-Grossense. Cuiabá, 2015, dissertação (mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

Nerpin, S.V.; Chudnovskii, F. *Physics of the soil*. Jerusalem: Keter Press. 1967. 466p. Israel program for scientific translations

NUNES DA CUNHA, C.; JUNK, W. J. Year-to-year changes in water level drive the invasion of *Vochysia divergens* in Pantanal grasslands. *Applied Vegetation Science*, v. 7, n. 1, p. 103-110, 2004.

NOVAIS, Jonathan Willian Zangeski. **Dinâmica geotérmica do solo de uma floresta de cambarás no pantanal mato-grossense**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso. Instituto de Física. Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, 2011.

OCHSNER, Tyson E.; HORTON, Robert; REN, Tusheng. A new perspective on soil thermal properties. **Soil science society of America Journal**, v. 65, n. 6, p. 1641-1647, 2001.

OLIVEIRA, S. S., Fideles Filho, J., Oliveira, S. V., & Araújo, T. S. Difusividade térmica do solo de Campina Grande para dois períodos do ano. **Revista de Geografia (Recife)-ISSN: 0104-5490**, v. 27, n. 2, p. 179-189, 2010.

PADOVANI, C. R. Dinâmica Espaço Temporal Das Inundações do Pantanal. Piracicaba, 2010. 174 p. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Centro de energia Nuclear na Agricultura, 2010.

PASSERAT DE SILANS, A. M. B.; MONTENY, Bruno; LHOMME, Jean-Paul. Apparent soil thermal diffusivity, a case study: HAPEX-Sahel experiment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 81, p. 201-216, 1996.

PASSERAT DE SILANS, Alain; MOREIRA DA SILVA, Fernando; ASSIS DOS REIS BARBOSA, Francisco de. Determinação in loco da difusividade térmica num solo da região de caatinga (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, 2006.

PENG, Xiaoyang et al. Field evaluation and improvement of the plate method for measuring soil heat flux density. **Agricultural and forest meteorology**, v. 214, p. 341-349, 2015.

PEREIRA, V. D. C., ESPÍNOLA SOBRINHO, J., BEZERRA, J., de MOURA, M. S. B., BORGES, V., & SANTOS, W. D. O. Saldo de radiação e fluxo de calor no solo nas diferentes fases de desenvolvimento da cultura do algodoeiro na Chapada do Apodi, RN. In: Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17., 2011, Guarapari. Riscos climáticos e cenários agrícolas futuros: anais. Guarapari: Incaper, 2011., 2011.

POTT, Arnildo; DA SILVA, João Santos Vila. Terrestrial and aquatic vegetation diversity of the Pantanal wetland. In: **Dynamics of the Pantanal Wetland in South America**. Springer, Cham, 2015. p. 111-131.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Salesward-Discovery, 1996.

RAO, Tantravahi V. Ramana; DA SILVA, Bernardo B.; MOREIRA, Atílio A. Características térmicas do solo em Salvador, BA Soil thermal characteristics at Salvador, BA. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 9, n. 4, p. 554-559, 2005.

RICHARDT, K.; TIMM, L. C.; Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. 1ª ed. Barueri: Manole, 478p., 2004.

ROMIO, L. C., ZIMMER, T., ROBERTI, D. R., & BULIGON, L. New approach for the estimation of soil heat flux for the pampa biome. *Ciência e Natura*, v. 40, p. 76-81, 2018.

SANCHES, Luciana et al. Estimativa do coeficiente Priestley-Taylor em floresta monodominante cambarazal no pantanal. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 4, 2010.

SANTOS, Marcos Aurelio Ferreira dos. Estimativa do fluxo de calor e da difusividade térmica do solo, baseado na solução da derivada temporal fracionária de meia ordem em ferramenta de software. 2014.

SAWADA, Lidia. Determinação da difusividade térmica de Cristais de Balífs puro e dopado. 2000. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.

SEEMANN, J. Measuring technology. In: SEEMANN, J.; CHIRKOV, Y.I.; LOMAS, J.; PRIMAULT, B. (eds) Agrometeorology. Berlin: Springer-Verlag, 1979, p.40-45

SILVA, J. dos S. V da; ABDON, M. de M. Delimitação do Pantanal brasileiro e suas subregiões. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.33, p 1703-1711, 1998.

SILVA, J. S. V.; MOURA ABDON, M.; POTT, A. Cobertura vegetal do Bioma Pantanal em 2002. 2007.

SOARES, W. A. Análise Comparativa do Fluxo de Calor no Solo em Profundidade e na Superfície (Brazil Comparative Analysis of Soil Heat Flux in Depth and Surface). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 665-679, 2013.

SOUZA, J. et al. Thermal properties and heat fluxes in soils, beneath forest and pasture áreas. **Marabá, PA, Brazil Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, p. 89-103, 2006.

TAYLOR, Sterling A.; CAVAZZA, Luigi. The Movement of Soil Moisture in Response to Temperature Gradients 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 18, n. 4, p. 351-358, 1954.

TOULOUKIAN, Yeram S. " Thermal Expansion" Thermophysical Properties of Matter. **The JPRC Data Series**, v. 891, 1973 apud SAWADA, LIDIA. **Determinação da difusividade térmica de Cristais de Balífs puro e dopado**. 2000. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.

VERHOEF, A., VAN DEN HURK, B. J., JACOBS, A. F., & HEUSINKVELD, B. G. Thermal soil properties for vineyard (EFEDA-I) and savanna (HAPEX-Sahel) sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 78, n. 1-2, p. 1-18, 1996.

WATSON, Kenneth. Geologic applications of thermal infrared images. **Proceedings of the IEEE**, v. 63, n. 1, p. 128-137, 1975.

WIERENGA, P. J.; NIELSEN, D. R.; HAGAN, R. M. Thermal Properties of a Soil Based Upon Field and Laboratory Measurements 1. **Soil science society of America Journal**, v. 33, n. 3, p. 354-360, 1969.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A., **Física II: Termodinâmica E Ondas**. Volume 2., 12º Edição, Editora Pearson, Rio de Janeiro. p.180-181. 2008.

Anexo

Dedução dos métodos das difusividades térmicas

a) Método a amplitude

A equação de fluxo de calor por condução é dada pela equação de Fourier, descrita por

$$q = -K \frac{\delta T}{\delta x} \quad \text{Eq. (1)}$$

Usando a equação da continuidade

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = - \frac{\delta q}{\delta x} \quad \text{Eq (2)}$$

E em calorimetria

$$dQ = C dt \quad \text{Eq. (3)}$$

Substitua (3) e (1) em (2)

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta t} (C \delta T) &= - \frac{\delta}{\delta x} \left(-K \frac{\delta T}{\delta x} \right) \\ C \frac{\delta T}{\delta t} &= \frac{\delta}{\delta x} \left(K \frac{\delta T}{\delta x} \right) \end{aligned} \quad \text{Eq. (4)}$$

Simplificando

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{K}{C} \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad \text{Eq. (5)}$$

Mas $\frac{K}{C} = D$, então eq. (5) ficará:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = D \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad \text{Eq. (6)}$$

A solução de eq. (6), levando em consideração que a temperatura na superfície é do tipo senoidal ($T(0, t) = \bar{T} + T_0 \text{sen}(\omega t)$) e que $T(\infty, t) = \bar{T}$, temos a solução:

$$T(z, t) = \bar{T} + T_0 \exp(-z\sqrt{\omega/2D}) \text{sen}(\omega t - \sqrt{\omega/2D}z) \quad \text{Eq. (7)}$$

A amplitude é uma função dada só por:

$$A(z) = T_0 \exp(-z\sqrt{\omega/2D}) \quad \text{Eq. (8)}$$

Aplicando para duas profundidades z_1 e z_2 , temos

$$\frac{A(z_1)}{A(z_2)} = \frac{T_0 \exp(-z_1 \sqrt{\omega/2D})}{T_0 \exp(-z_2 \sqrt{\omega/2D})} = \frac{\exp(-z_1 \sqrt{\omega/2D})}{\exp(-z_2 \sqrt{\omega/2D})}$$

Aplicando logarítmico, temos

$$\log \left\{ \frac{e^{-\alpha}}{e^{-\beta}} \right\} = \log e^{-\alpha+\beta} = -\alpha + \beta$$

$$\log \left\{ \frac{A(z_1)}{A(z_2)} \right\} = -z_1 \sqrt{\omega/2D} + z_2 \sqrt{\omega/2D}$$

$$\log \left\{ \frac{A(z_1)}{A(z_2)} \right\} = \sqrt{\frac{\omega}{2D}} (z_2 - z_1) \quad \text{Eq. (9)}$$

Simplificando

$$\log \left\{ \frac{A(z_1)}{A(z_2)} \right\}^2 = \frac{\omega}{2D} (z_2 - z_1)^2 \quad \text{Eq. (10)}$$

Isolando D chegamos a equação:

$$D = \frac{\omega}{2} \frac{(z_2 - z_1)^2}{\ln(A_{z_1}/A_{z_2})^2} \quad \text{Eq. (11)}$$