



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO DE  
LAGOA SECA-PB**

JÚLIO MANNUEL TAVARES DINIZ

CAMPINA GRANDE – PB

2014

JÚLIO MANNUEL TAVARES DINIZ

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO DE  
LAGOA SECA-PB**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para a obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

**Área de concentração:** Agrometeorologia e Micrometeorologia

**Sub-Área:** Necessidades Hídricas de Culturas

**Orientador:** Prof. Dr. Renilson Targino Dantas

**Coorientador:** Prof. Dr. José Fideles Filho

**CAMPINA GRANDE – PB**

**2014**



JÚLIO MANNUEL TAVARES DINIZ

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO DE LAGOA SECA – PB

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 25/02/2014

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. RENILSON TARGINO DANTAS  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOSÉ FIDELES FILHO  
Departamento de Física  
Universidade Estadual da Paraíba



Dr. JOSÉ QUEIROGA NÓBREGA  
Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a todos aqueles que verdadeiramente acreditaram em meu potencial acadêmico, em particular, minha mãe e minha avó. A meu pai (in memoriam), pois, em muitos momentos a sua vida foi uma grande fonte de inspiração para a minha caminhada. A todos os professores que vêm me auxiliando na construção do conhecimento.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido a força e sabedoria necessária para a elaboração deste trabalho científico.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Renilson Targino Dantas e Prof. Dr. José Fideles Filho, pelo apoio e amizade estabelecida ao longo desta caminhada.

Aos professores que compõem o Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da UFCG, visto que estes contribuíram significativamente para o meu crescimento intelectual.

A coordenação do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da UFCG, em especial a secretária Divanete C. Rocha, a qual sempre se mostrou disposta a responder as minhas indagações.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo subsídio financeiro concedido a mim durante estes dois anos.

A todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para que o meu sonho se tornasse realidade, a minha completa e sincera gratidão.

“Melhor é ser repreendido pelo sábio, do que ser enganado pela adulação dos insensatos”

(Eclesiastes 7: 6)

## RESUMO

A variação da temperatura do solo que uma planta consegue suportar é relativamente ampla, no entanto, seu desenvolvimento é seriamente comprometido a partir do momento em que solo passa a assumir temperaturas abaixo ou acima de certos valores limites. Até então, embora se saiba que a temperatura do solo é um dos fatores ambientais de maior importância para agricultura, poucos estudos acerca dessa variável foram realizados pela comunidade científica para os solos do Brasil. Logo, a presente pesquisa tem como objetivo investigar a variabilidade espaço-temporal das temperaturas e difusividade térmica do solo de Lagoa Seca-PB, a partir de dados obtidos ao longo de todo o ano de 2010 e 2011. Para alcançar este objetivo foram utilizados sensores de temperatura, programados a operar ininterruptamente ao longo dos ciclos diários, instalados em quatro profundidades distintas do solo. A fim de estimar a magnitude da difusividade térmica do solo foram empregados três métodos distintos. A partir dos resultados, verifica-se que o comportamento térmico do solo observado em ambos os anos são bastante semelhantes, especialmente no que diz respeito às horas e aos meses de ocorrência das máximas e mínimas temperaturas. O método do arco tangente, para o caso específico da camada compreendida entre 05 e 50cm de profundidade, não mostrou-se adequado para a estimativa da difusividade térmica do solo.

**Palavras-chave:** Temperatura do solo, comportamento térmico do solo, difusividade térmica do solo.



## **ABSTRACT**

The variation of soil temperature which a plant can support is relatively wide, however, its development is seriously compromised from the moment in that the soil begins to assume temperatures below or above certain limits values. Until then, although it is known that soil temperature is one of environmental factor of greatest importance to agriculture, few studies on this variable were performed by the scientific community for soils of Brazil. Therefore, this research aims to investigate the spatial-temporal variability of temperature and soil thermal diffusivity of Lagoa Seca-PB, from data obtained throughout the year 2010 and 2011. To achieve this objective it was using temperature sensors, programmed to operate continuously over the daily cycles, installed in four different soil depths. In order to estimate the magnitude of soil thermal diffusivity were employed three different methods. From the results, verified that the soil thermal behavior observed in both years are quite similar, especially with respect to the hours and months of occurrence of maximum and minimum temperatures. The arctangent method, to the specific case of layer between 05 and 50cm depth, is not adequate for the estimation of this physical greatness.

**Keywords:** Soil temperature, soil thermal behavior, soil thermal diffusivity.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Perfil vertical do solo.....	17
<b>Figura 2.</b> Elemento de volume para a análise da condução de calor unidimensional .....	26
<b>Figura 3.</b> Flutuação diária, idealizada, das temperaturas do solo .....	32
<b>Figura 4.</b> Localização geográfica da área de estudo.....	37
<b>Figura 5.</b> Estação meteorológica automática instalada na EMEPA de Lagoa Seca-PB.....	39
<b>Figura 6.</b> Comportamento térmico do solo de Lagoa Seca-PB, observado durante todo o ano de 2010, nas seguintes profundidades: 5cm (A), 15cm (B), 30cm (C) e 50cm (D). 46	
<b>Figura 7.</b> Comportamento térmico do solo de Lagoa Seca-PB, observado durante todo o ano de 2011, nas seguintes profundidades: 5cm (A), 15cm (B), 30cm (C) e 50cm (D). 47	
<b>Figura 8.</b> Temperatura do solo, referente ao ciclo anual de 2010, observada em diferentes profundidades e nos seguintes horários: 6 (A), 12 (B), 18 (C) e 24 (D) UTC.....	50
<b>Figura 9.</b> Temperatura do solo, referente ao ciclo anual de 2011, observada em diferentes profundidades e nos seguintes horários: 6 (A), 12 (B), 18 (C) e 24 (D) UTC.....	51
<b>Figura 10.</b> Temperatura média diária do solo, referente a quatro profundidades distintas, observada ao longo dos seguintes ciclos anuais: 2010 (A) e 2011 (B) .....	54
<b>Figura 11.</b> Total pluviométrico e coeficiente de variação da temperatura do solo, referente aos ciclos diários e profundidades em estudo, obtido a partir de dados coletados ao longo do ano de 2010 (A) e 2011 (B).....	56

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Classificação de desempenho com base no índice de confiança (Fonte: ZONTA et al., 2012). .....	45
<b>Tabela 2.</b> Difusividade térmica diária média mensal do solo ( $\times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s), referente a quatro camadas específicas, estimada a partir de métodos distintos e de dados coletados ao longo do ano de 2010.....	59
<b>Tabela 3.</b> Difusividade térmica diária média mensal do solo ( $\times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s), referente a quatro camadas específicas, estimada a partir de métodos distintos e de dados coletados ao longo do ano de 2011.....	60
<b>Tabela 4.</b> Resultados obtidos a partir do emprego das seguintes ferramentas estatísticas: coeficiente de correlação “r”, índice de concordância “d” e índice de confiança “c” .....	63

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Objetivo geral.....	15
1.1.2 Objetivos específicos .....	15
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	16
2.1 O solo .....	16
2.1.1 Horizontes do solo .....	17
2.1.2 Constituição do solo .....	18
2.1.2.1 A fração sólida .....	18
2.1.2.2 A fração líquida.....	20
2.1.2.3 A fração gasosa .....	21
2.2 Temperatura do solo.....	22
2.2.1 Transferência de calor no solo .....	24
2.2.1.1 Condução .....	25
2.2.1.1.1 Condutividade térmica .....	28
2.2.1.1.2 Calor específico .....	29
2.2.1.2 Convecção.....	30
2.2.2 Regime de temperatura do solo .....	31
2.2.3 Procedimentos para modificar o regime de temperatura do solo .....	35
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	37
3.1 Descrição da área de estudo.....	37
3.2 Dados.....	38

3.3 Variabilidade diária das temperaturas do solo .....	39
3.4 Difusividade térmica do solo .....	40
3.4.1 Método da amplitude .....	40
3.4.2 Método do arco tangente.....	41
3.4.3 Método do logarítmico.....	42
3.5 Simulação da temperatura do solo .....	42
3.6 Análise dos dados.....	44
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>46</b>
4.1 Perfil térmico diário e anual .....	46
4.2 Temperatura horária .....	49
4.3 Temperatura média diária .....	54
4.4 Coeficiente de variação .....	55
4.5 Difusividade térmica .....	58
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>6. RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>65</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>66</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A temperatura do solo é uma propriedade de natureza física que influi diretamente em uma série de processos ambientais relacionados às plantas tais como germinação de sementes, velocidade e duração de crescimento, desenvolvimento e atividade radicular, ocorrência e severidade de pragas, etc. (HILLEL, 2004). Segundo MOTA (1983), a temperatura do solo possui maior importância ecológica para a vida vegetal do que a própria temperatura do ar.

O aquecimento demasiado do solo na fase inicial de estabelecimento das culturas compromete a absorção de nutrientes pelas plantas (CASTRO, 1989). As altas temperaturas também ocasionam efeitos nocivos sobre as raízes e a atividade microbiana (FURLANI et al., 2008). Johnson e Lowery (1985), ao realizarem estudo acerca dos efeitos de práticas de cultivo sobre as temperaturas e propriedades térmicas do solo, verificaram que a variação de 1°C na temperatura do solo pode afetar significativamente a taxa de crescimento do milho em regiões de clima temperado.

Medições de temperatura em diferentes profundidades do solo são freqüentemente realizadas em estações meteorológicas, no entanto, pouco se utiliza de tal acervo de dados uma vez que grande parte dos estudos não considera o fator térmico como limitante para a produção agrícola (atribuem maior ênfase ao fator hídrico). Informações acerca das temperaturas do solo, sua magnitude e forma de variação no tempo e espaço, são elementos de importância primordial para a determinação da taxa e direção dos processos físicos existentes no solo.

Quando uma mesma quantidade de energia está disponível para solos distintos o processo de aquecimento e resfriamento pode ser bastante variável em virtude de suas propriedades térmicas específicas. Basicamente, as propriedades térmicas dos solos que intervêm diretamente em seu regime de temperatura são denominadas de calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica. Entre outros fatores, suas magnitudes dependem principalmente da composição do solo.

Em particular, a difusividade térmica do solo está diretamente relacionada à capacidade desse meio em conduzir calor através de seu perfil vertical, ou seja, é um indicativo da rapidez com que o calor difunde-se no solo. Como se verifica em GAO et al. (2009), diferentes métodos vêm sendo propostos na busca de estimar a magnitude dessa propriedade.

A difusividade térmica é função da constituição, granulometria, densidade e estrutura do solo (SILANS et al. 2006).

Sabendo-se da sua importância e uma vez que cada tipo de solo possui características específicas, faz-se necessário que sejam identificadas para cada situação particular as suas propriedades térmicas (RAO et al., 2005). Até então, poucos estudos dessa natureza foram realizados pela comunidade científica para os solos do Brasil.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Investigar a variabilidade espaço-temporal das temperaturas e difusividade térmica do solo de Lagoa Seca-PB.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Analisar a variabilidade diária, mensal e anual das condições térmicas do solo em quatro profundidades distintas;
- Empregar métodos distintos a fim de estimar a difusividade térmica do solo;
- Investigar a variabilidade da difusividade térmica ao longo do perfil vertical do solo;
- Simular as temperaturas do solo para diferentes profundidades e ciclos diários;
- Identificar o grau de proximidade entre as temperaturas simuladas e aquelas mensuradas;
- Correlacionar as alterações no regime de temperatura do solo à ocorrência da precipitação pluvial;

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 O solo

O termo solo refere-se, sob o ponto de vista agrícola, a camada superficial da crosta terrestre em que se apóiam e se nutrem as plantas (CANECCHIO FILHO, 1973). Esta camada é oriunda da rocha matriz que devido à ação de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, transformou-se ao longo das eras geológicas, em um material poroso de características peculiares (REICHARDT e TIMM, 2004). Pode-se considerar o solo como sendo um sistema dinâmico aberto continuamente sujeito a ganhos e perdas de energia, água, matéria orgânica e inorgânica.

Para o crescimento satisfatório das plantas é essencial que o solo proporcione um ambiente com características físicas favoráveis para o desenvolvimento das raízes, a fim de que estas se tornem capazes de explorar suficientemente o solo para prover as exigências das plantas. O solo é de fundamental importância para as plantas em virtude de suprir diariamente as suas necessidades de água e nutrientes, como também pelo fato de lhes propiciar ancoragem e estabilidade (OLIVEIRA et al., 2005).

O crescimento das plantas no contexto de produção agrícola exige condições adequadas para se obter uma colheita de maneira economicamente vantajosa. Para uma produção agrícola eficiente é importante compreender as condições ambientais do solo em que as plantas estão inseridas, a fim de reconhecer as limitações daquele ambiente e para melhorá-lo sempre que possível sem prejudicar a sua qualidade. É importante para todos assegurar que o manejo do solo seja bem praticado de modo que este recurso seja continuamente utilizado pela geração atual e futura.

O solo em seu estado natural raramente oferece as mais favoráveis condições físicas para o crescimento das culturas (GARDNER et al., 1999). O preparo do solo e a seleção das culturas apropriadas a serem empregadas são procedimentos adotados que tem ocasionado melhoramento significativo da produtividade. Apesar da grande maioria não dispor de conhecimentos científicos, os agricultores reconhecem muitas das limitações físicas do solo para o crescimento de determinadas culturas e devido à experiência adquirida ao longo de anos são capazes de conseguir sua melhoria em muitas situações.

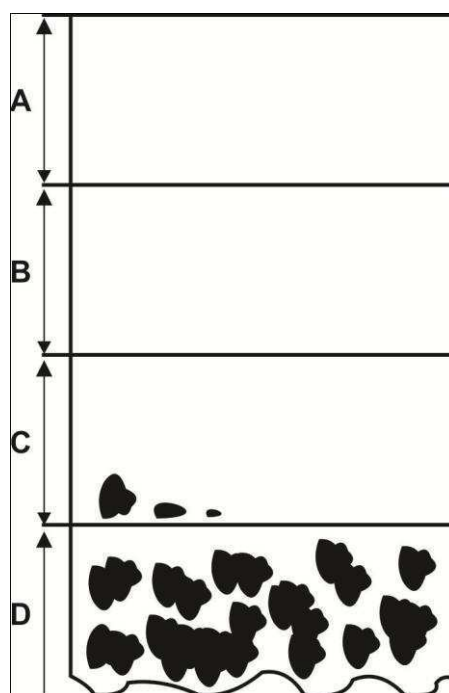
A intervenção orientada de mecanismos motores têm se apresentado freqüentemente benéfica, melhorando a extensão e forma de cultivo do solo, permitindo que áreas muito



maiores sejam cultivadas com o uso de sistemas de irrigação e/ou drenagem. No entanto, embora essa conduta melhore inicialmente a produção agrícola, pode favorecer a deterioração da qualidade do solo.

### 2.1.1 Horizontes do solo

À medida que a rocha matriz se decompõe começa-se a perceber, fazendo um corte vertical no perfil do solo, a sua diferenciação em camadas superpostas horizontalmente denominadas horizontes do solo. A diferenciação de tais horizontes é, em geral, tanto mais visível quanto maior a intensidade dos fatores climáticos em ação e quanto maior a quantidade de matéria orgânica acumulada (CANECCHIO FILHO, 1973). De acordo com REICHARDT e TIMM (2004), um solo completo é composto por quatro horizontes (A, B, C e D), que podem ainda ser subdivididos de acordo com as suas características específicas (Figura 1).



**Figura 1.** Perfil vertical do solo

O horizonte A é a camada mais superficial ou superior do solo, exposta diretamente a atmosfera, representando a região mais rica em matéria orgânica e organismos vivos do solo (no geral, possui uma coloração mais escura que as demais). Este é também conhecido como horizonte de eluviação, uma vez que há perdas de elementos químicos por lavagens sucessivas com a água da chuva. Logo abaixo vem o chamado horizonte B, ou também denominado de horizonte de iluviação, sendo este mais denso e menos permeável que o

horizonte superior. O horizonte C é formado pelo material que deu origem ao solo, em estado de decomposição, e o horizonte D, pela rocha matriz (REICHARDT e TIMM, 2004).

Em determinados tipos de solo é às vezes extremamente difícil distinguir os diferentes horizontes sem o auxílio de um exame detalhado, tal a semelhança de cor e disposição das partículas ao longo do perfil vertical. As espessuras de tais horizontes são variáveis e a falta destes em certos solos é bastante comum.

### **2.1.2 Constituição do solo**

O solo é essencialmente constituído por minerais e matéria orgânica, além de ar e água que preenchem os espaços vazios entre as partículas sólidas. Portanto, pode-se considerar o solo como sendo um sistema multicomponente, integrado por uma fração sólida, líquida e gasosa (abordadas detalhadamente a seguir). Essas duas últimas são complementares, ou seja, a máxima presença de uma implica na ausência da outra.

Além da matéria morta, tanto mineral como orgânica, o solo também é constituído por organismos vivos de diferentes qualidades e quantidades, desempenhando um importante papel nos processos de formação e evolução do solo. Em geral, os animais macroscópicos presentes no solo (visto sem o auxílio de aparelhos especiais), exercem uma ação mecânica frequentemente benéfica a sua estrutura, as condições de arejamento, ao processo de infiltração e retenção de água, etc.

Os microorganismos, especialmente certas bactérias, desempenham múltiplas funções no interior do solo. Estas são essenciais para a decomposição da matéria orgânica do solo e para a solubilização dos elementos nutritivos, auxiliam na decomposição das substâncias minerais do solo e na libertação dos elementos nutritivos essenciais, destroem as substâncias residuais eliminadas pelas plantas (evitando o seu acúmulo), fixam o nitrogênio do ar em forma utilizável pelas plantas, etc.

#### **2.1.2.1 A fração sólida**

A fração sólida do solo constitui-se basicamente de minerais e matéria orgânica. A parte mineral advém da rocha na qual o solo se formou e chama-se primária quando possui a mesma estrutura e composição dos minerais que constituem a rocha. A matéria mineral é dita secundária quando esta é uma matéria nova, composição e estrutura diferente, estabelecida durante o processo de formação do solo (REICHARDT e TIMM, 2004).

A matéria orgânica é um dos fatores de maior importância no condicionamento da produtividade dos solos, uma vez que a sua presença produz alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Esta, por sua vez, é constituída de compostos orgânicos de origem vegetal ou animal, em seus mais variados graus de transformação. A decomposição da matéria orgânica vai se fazendo através de uma série de estágios intermediários. Quando a estrutura dos tecidos das plantas e animais já foi destruída, sem que tenha sido atingida a sua mineralização completa, convencionou-se chamar a substância de cor escura de húmus. Muitas vezes empregam-se indistintamente as palavras “matéria orgânica” e “húmus”, mais é bom ter-se em mente que, enquanto todo húmus é matéria orgânica, nem toda matéria orgânica é húmus. A parcela da matéria orgânica que ainda não se transformou em húmus é chamada usualmente de matéria orgânica fresca ou matéria orgânica crua.

As partículas que compõem a fração sólida do solo variam significativamente em tamanho e qualidade. O processo de determinação da distribuição dos tamanhos das partículas sólidas é conhecido como análise mecânica do solo. Em geral, a separação das frações é feita mediante o peneiramento do solo seco com uma seqüência de peneiras, até ser atingido um diâmetro de partícula de 0,05mm. Para separar as partículas sólidas de menor diâmetro é comum utiliza-se do método da sedimentação, que consiste basicamente em dispersar uma amostra de solo em suspensão aquosa e medir as velocidades de decantação das partículas de diferentes tamanhos.

A expressão textura do solo faz referência à distribuição das partículas do solo tão-somente quanto ao seu tamanho, de modo que, cada solo recebe uma denominação referente à sua textura (propicia uma idéia do tamanho das partículas constituintes). Usualmente, as partículas minerais que compõem o solo são divididas em três frações de tamanho (frações texturais): areia, silte e argila. Logo, recebem denominações distintas, solos com diferentes proporções de areia, silte e argila. Na prática, sem o auxílio de uma análise mecânica feita em laboratório, é algumas vezes possível reconhecer a textura do solo por diferenças de tacto, cor e tamanhos das partículas.

Enquanto que a textura é uma propriedade do solo que faz referência a dimensão das partículas, a estrutura depende da maneira como se agrupam e se arranjam as partículas sólidas do solo (a estrutura também define a geometria dos espaços porosos). Uma vez que o arranjo das partículas do solo é em geral muito complexo para permitir qualquer caracterização geométrica simples, não há meio prático de “medir” a estrutura de determinado

solo. A junção de partículas do solo dá origem a agregados, os quais são classificados segundo a sua forma e tamanho.

Para as plantas cultivadas é de grande importância a estrutura do solo. Uma boa estrutura é aquela em que há arejamento (poros e espaços bastante volumosos para permitir uma fácil infiltração das águas de chuva, bom desenvolvimento do sistema radicular das plantas, etc.), apresentando ao mesmo tempo agregados densos e coesos para permitir uma boa capacidade de retenção de umidade. Não é o ideal a estrutura dos solos muito arenosos, em que as partículas se apresentam inteiramente soltas, com poros muito grandes para a retenção de umidade, nem tão pouco é ideal a estrutura dos solos muito argilosos, em que as partículas se apresentam inteiramente agrupadas, com poros muito pequenos para permitir a fácil infiltração das águas de chuva e o bom arejamento.

Além do mencionado anteriormente, a estrutura de determinado solo intervém diretamente nas condições de temperatura ao longo do perfil vertical do solo. O objetivo das operações de cultivo está centrado no melhoramento da estrutura do solo para o crescimento satisfatório das plantas, porém, realizadas de maneira incorreta pode ocasionar danos estruturais em longo prazo.

### **2.1.2.2 A fração líquida**

A fração líquida, isoladamente, caracteriza a umidade do solo e é representada pela água ou solução do solo, contendo íons como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$ , etc. Uma vez que as plantas retiram íons da solução do solo, a concentração destes pode se alterar com o tempo de modo distinto para cada nutriente e cada condição ambiental especial (REICHARDT e TIMM, 2004).

A fração líquida pode preencher de maneira completa ou parcial os espaços porosos presentes no solo. No primeiro caso, todos os poros do sistema poroso estarão preenchidos por água e, assim, diz-se que o solo está saturado ou encharcado. Em contrapartida (segundo caso), apenas uma parcela do sistema poroso total pode apresentar água e, então, o solo é dito não saturado de água.

O segundo caso é a condição que caracteriza os solos agrícolas, situação em que o espaço poroso total é ocupado tanto pela fase líquida quanto pela fase gasosa. Verifica-se, portanto, que essas duas fases são complementares, ou seja, a máxima presença de uma implica na ausência da outra (PREVEDELLO, 1996). O equilíbrio entre ambas, propiciando um

adequado suprimento de água e ar para as plantas, constitui-se um dos mais importantes fatores do solo que determinam a sua adequação como meio de desenvolvimento radicular.

A movimentação de água no solo, geralmente induzida pela presença de gradientes de temperatura, propicia importantes alterações nas propriedades térmicas do solo (oriunda da variação do conteúdo de água). Segundo BELLAVER (2010), ao alterar o conteúdo de água do solo, também se altera a sua capacidade de conduzir calor (condutividade térmica). Na medida em que se eleva o conteúdo de água do solo verifica-se o aumento da sua condutividade térmica, pois, o espaço poroso passa a ser preenchido por água que, por sua vez, possui maior condutividade térmica que o ar (FAROUKI, 1986).

Uma vez que a condutividade e difusividade térmica do solo são grandezas diretamente proporcionais (abordadas detalhadamente mais adiante), o conteúdo de água do solo também influi na difusividade térmica do presente meio. Abu-Hamdeh (2003), ao realizar testes em laboratórios, verificou que o efeito do conteúdo de água sobre a difusividade térmica do solo depende da textura do mesmo. Em particular, a difusividade térmica tanto do solo arenoso quanto do argiloso aumentou com o aumento da sua umidade, contudo, no solo arenoso a taxa de incremento da difusividade térmica com a umidade foi superior à do solo argiloso. Além disso, no solo arenoso verificou-se um pico no valor da difusividade térmica antes de sua estabilização a um valor inferior a esse pico, o que não foi verificado para o solo argiloso.

De acordo com Prevedello (1996), a difusividade térmica do solo eleva-se com o aumento do teor de umidade do solo, até alcançar certo valor máximo. A partir desse momento, a condutividade térmica do solo não mais se eleva com o aumento da umidade do solo e, por conseguinte, a difusividade térmica decresce.

### **2.1.2.3 A fração gasosa**

Segundo Prevedello (1996), a fase gasosa caracteriza a porosidade de aeração do solo ou porosidade livre de água, a qual contém gases como o  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$  e vapor de água. De acordo com VAN BAVEL (1965), a composição do ar do solo depende das condições de aeração. No caso específico de solos com boa aeração, a sua composição gasosa não difere de maneira significativa do ar atmosférico, exceto por apresentar uma umidade relativa quase sempre próxima à saturação e uma maior (menor) concentração de  $\text{CO}_2$  ( $\text{O}_2$ ).

Em particular, o oxigênio presente no solo é consumido pelos microorganismos e pelo sistema radicular das plantas superiores, de tal maneira que a sua concentração é em geral

inferior ao do ar atmosférico. Em contrapartida, o  $\text{CO}_2$  é liberado a partir de processos metabólicos que ocorrem no interior do solo, propiciando sua concentração mais elevada. No caso de adubação com uréia, sulfato de amônia, etc. a concentração de  $\text{NH}_3$  na atmosfera do solo pode se elevar de modo expressivo. A atividade biológica do solo pode, também, alterar a concentração de demais gases.

É de grande importância para a produtividade do solo o processo de aeração. Para grande parte das plantas, a transferência do oxigênio da atmosfera para as raízes precisa ser em proporções suficientes para suprir suas exigências. Uma vez que para o crescimento satisfatório das raízes é necessário a presença de oxigênio no solo, as trocas de gás entre a atmosfera e o solo têm de ocorrer com uma velocidade suficiente para não se permitir a deficiência de  $\text{O}_2$  (ou excesso de  $\text{CO}_2$ ) na zona ativa das raízes.

A troca de gases entre o solo e a atmosfera pode ocorrer mediante o processo de difusão (em poros não ocupados por água, interconectados e em comunicação com a atmosfera), ou a partir do fluxo de massa (gases dissolvidos em água). Visto que a difusão dos gases no ar é geralmente maior que na fase líquida, a porosidade livre de água torna-se de extrema importância na aeração do solo.

## **2.2 Temperatura do solo**

Um dos elementos de maior importância para o desenvolvimento das plantas é a temperatura do solo. A atividade microbológica poderá ser interrompida, as sementes poderão não germinar e as plantas não se desenvolverem, caso o solo não apresente uma temperatura dentro dos limites fisiológicos dos processos envolvidos. A variação da temperatura do solo que uma planta consegue suportar é relativamente ampla, no entanto, seu desenvolvimento é seriamente comprometido a partir do momento em que solo passa a assumir temperaturas abaixo ou acima de certos valores extremos (varia de acordo com a espécie vegetal). A diminuição da temperatura do solo reduz progressivamente as suas taxas de desenvolvimento. Em contrapartida, até ser atingido certo valor máximo cessando por completo o crescimento das plantas, efeitos quase que desprezíveis são observados a temperaturas pouco acima daquela considerada como ideal. De acordo com LAL e SHUKLA (2004), a temperatura ideal para o crescimento satisfatório das plantas é aquela compreendida entre  $20^\circ\text{C}$  e  $30^\circ\text{C}$ , de modo que a taxa de crescimento decai consideravelmente quanto esta grandeza assumir uma magnitude inferior a  $20^\circ\text{C}$  ou superior a  $35^\circ\text{C}$ .

Para algumas espécies é de fundamental importância suas sementes sejam expostas a temperaturas abaixo de determinado limiar antes de ser desencadeada a germinação. O sucesso desse processo é então obtido para certas faixas de temperaturas, podendo ser diferente daquela considerada como ideal para as fases de crescimento posteriores. Em alguns casos, o conteúdo de água e a aeração do solo podem atenuar o impacto de suas temperaturas desfavoráveis ao processo de desenvolvimento das plantas.

Em adição ao mencionado anteriormente, a temperatura do solo intervém diretamente nas propriedades e movimentação da água no interior do solo, na difusão dos solutos e dos gases, nas reações químicas e em uma série de outros processos importantes (HILLEL, 2004). Um dos principais elementos que propiciam o crescimento satisfatório das raízes são as condições favoráveis de temperatura do solo. O sistema radicular com dimensões consideráveis possui maior capacidade de fornecer água e nutrientes para os órgãos vegetais que se encontram acima do solo. As taxas de absorção desses nutrientes pelas raízes são também influenciadas pelas condições térmicas do solo.

A temperatura do solo pode intervir indiretamente nas plantas através dos seus efeitos sobre os processos físicos existentes no solo, particularmente nas taxas de perda de água para a atmosfera mediante o processo físico de evaporação. Grande parte dos processos químicos que ocorrem no solo se intensifica com o aumento da temperatura, no entanto, a importância relativa desse fenômeno pode mudar de acordo com a magnitude dessa grandeza. Não diferente dos demais processos, as atividades dos organismos vivos presentes no solo também são influenciadas pelas condições térmicas do presente meio (HILLEL, 2004). Tal como ocorre com as plantas, a atividade dos microorganismos do solo alcança um máximo para certo intervalo de temperatura ideal. A decomposição de matéria orgânica e mineralização são assim fortemente dependentes das temperaturas do solo, como também a biodegradação de pesticidas e outros produtos químicos de natureza orgânica.

A cobertura vegetal, a coloração da superfície, a composição mineralógica e estrutura do solo, etc. são alguns dos fatores que vêm a intervir diretamente na condição de temperatura do solo. A cobertura vegetal, por exemplo, impede as variações bruscas da temperatura do solo observadas durante os ciclos diários em regiões tropicais. Portanto, a cobertura vegetal atua como uma espécie de isolante térmico impedindo que o solo se aqueça e resfrie significativamente durante o período diurno e noturno, respectivamente. Em particular, solos

de coloração escura absorvem boa parte da radiação solar incidente, aquecendo-se de maneira mais considerável que aquele de cor clara.

A temperatura do solo está em constante mudança visto que este é continuamente perturbado pela “entrada” de calor mediante incidência de radiação solar como também pela “saída” através de processos físicos como a evaporação. Variações diurnas e sazonais na incidência de radiação solar fazem com que as condições térmicas do solo estejam em permanente alteração (HANKS, 1992). Hillel (1980) enfatizou a formidável tarefa que consiste em quantificar e simular o regime de temperatura do solo, além da dificuldade em prever as possíveis conseqüências oriundas das tentativas de modificar e controlar o seu comportamento térmico.

Além de armazenar e permitir os processos de transferência de água, solutos e gases, o solo também armazena e transfere calor ao longo de seu perfil vertical. A capacidade do solo em armazenar e transferir calor é determinada pelas suas propriedades térmicas e pelas condições meteorológicas que, por sua vez, influenciam todos os processos químicos, físicos e biológicos do presente meio (PREVEDELLO, 1996). Portanto, as propriedades térmicas do solo e as condições meteorológicas são fatores de significativa importância para o desenvolvimento das plantas.

É importante ter o entendimento de que a temperatura do solo varia continuamente no tempo e espaço (em especial ao longo do perfil vertical). Muitas vezes os estudos de desenvolvimento de culturas que incluem elementos de temperatura do solo têm falhado no monitoramento dessa grandeza ao longo do perfil vertical (GARDNER et al., 1999). Quaisquer conclusões a respeito do papel das temperaturas baseadas em tais informações são, portanto, duvidosas.

### **2.2.1 Transferência de calor no solo**

De acordo com HALLIDAY et al. (2006), calor é a energia transferida entre um determinado sistema e o seu ambiente devido à presença de um gradiente térmico (diferença de temperatura). A transferência de calor pode ocorrer a partir de três processos distintos denominados de condução, convecção e radiação. Independentemente de suas características particulares, os mecanismos de transferência de calor requerem a existência de um gradiente térmico e fluxo ocorre sempre em direção a região de menor temperatura. A ciência que se dedica a determinação das taxas de transferência de tal energia é a termodinâmica.



No caso específico do presente trabalho, se está interessando na transferência de calor observada ao longo do perfil vertical do solo. A condução é, sem dúvida, o principal mecanismo de transferência de calor no solo. Em solos úmidos também é observada a transferência de calor mediante o processo de convecção, no entanto, pode-se desprezar esse processo uma vez que o fluxo de massa no interior do solo ocorre de maneira relativamente lenta (REICHARDT e TIMM, 2004).

### 2.2.1.1 Condução

O processo de condução está associado à transferência de energia a partir das partículas mais energéticas de uma substância para as adjacentes de energia inferior como resultado de suas interações. A transferência de calor mediante condução pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases. Nos líquidos e gases a condução é proveniente das colisões entre moléculas durante seu movimento aleatório. No caso específico dos sólidos está relacionada ao movimento vibratório da estrutura cristalina (ou rede), induzido pela vibração das moléculas de maneira periódica em torno de uma posição relativamente fixa, como também ao transporte de energia através do fluxo de elétrons livres (CENGEL, 2002).

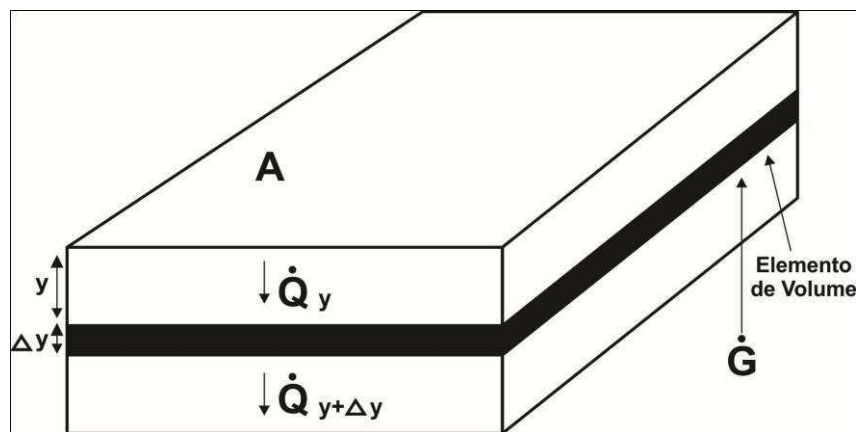
Considere a transferência de calor constante por condução através de uma grande parede plana de espessura  $\Delta x = L$ , área  $A$  e com uma diferença de temperatura entre suas superfícies expressa por  $\Delta T = T_2 - T_1$ . Experiências mostram que a taxa de transferência de calor  $\dot{Q}_{\text{cond}}$  através da parede é dobrada quando a diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) ou a área das superfícies ( $A$ ) normais a direção de propagação de calor é também dobrada, porém, é reduzida pela metade quando se dobra a espessura da parede ( $L$ ). Conclui-se, conseqüentemente, que a taxa de condução de calor através de certa camada plana é diretamente proporcional a sua área superficial e a diferença de temperatura existente ao longo de seu perfil, mais é inversamente proporcional a sua espessura. Essa conclusão, tratando-se de um fluxo unidimensional, pode ser expressa matematicamente da seguinte maneira:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

Em que,  $\dot{Q}_{\text{cond}}$  é a taxa de transferência de calor (quantidade de calor transferida por unidade de tempo),  $k$  é a condutividade térmica do meio,  $A$  é a área da superfície normal a direção de propagação de calor e  $\partial T/\partial x$  representa o gradiente de temperatura nesta direção (taxa de variação de  $T$  com relação à  $x$ ). A equação acima é denominada de lei da condução

de calor de Fourier, após Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), ter-la apresentada pela primeira vez em seu texto de transferência de calor publicado no ano de 1822. O sinal negativo é inserido a fim de que o segundo princípio da termodinâmica seja satisfeito. Além de ser função da diferença de temperatura, as taxas de condução de calor através de determinado meio dependem também de sua geometria, espessura e composição (no caso específico do presente trabalho, da composição do solo).

Em determinadas situações é comum aproximar o processo de condução de calor a um simples caso unidimensional, uma vez que esse processo é dominante em uma determinada direção e negligenciável nas demais (HOLMAN, 2010). No caso específico do solo, o processo de condução de calor observado ao longo do perfil vertical se sobrepõe aquele observado no plano horizontal. A fim de desenvolver uma equação de condução de calor unidimensional em coordenada retangular, considere um elemento de volume de espessura  $\Delta y$  inserido em uma grande camada plana (por exemplo, uma camada qualquer do solo), como mostra a Figura 2.



**Figura 2.** Elemento de volume para a análise da condução de calor unidimensional

Considera-se que a densidade desta camada seja  $\rho$ , o calor específico seja  $c$ , e a área superficial normal a direção de transferência de calor seja  $A$ . O balanço de energia deste elemento de volume para um curto intervalo de tempo  $\Delta t$  pode ser expresso da seguinte maneira:

(Taxa de condução de calor em  $y$ ) – (Taxa de condução de calor em  $y + \Delta y$ ) + (Taxa de geração de calor dentro do elemento de volume) = (Taxa de variação do conteúdo de energia do elemento de volume)

De acordo com CENGEL (2002), o balanço acima pode ser expresso matematicamente da seguinte maneira:

$$\dot{Q}_y - \dot{Q}_{y+\Delta y} + \dot{G}_{\text{elemento}} = \frac{\Delta E_{\text{elemento}}}{\Delta t} \quad (2)$$

No entanto, a variação do conteúdo de energia do elemento de volume e a taxa de geração de calor dentro deste, podem ser expressos como:

$$\Delta E_{\text{elemento}} = E_{t+\Delta t} - E_t = mc(T_{t+\Delta t} - T_t) = \rho c A \Delta y (T_{t+\Delta t} - T_t) \quad (3)$$

$$\dot{G}_{\text{elemento}} = \dot{g} V_{\text{elemento}} = \dot{g} A \Delta y \quad (4)$$

Substituindo as equações acima na equação (2), obtém-se:

$$\dot{Q}_y - \dot{Q}_{y+\Delta y} + \dot{g} A \Delta y = \rho c A \Delta y \frac{T_{t+\Delta t} - T_t}{\Delta t} \quad (5)$$

Dividindo ambos os termos por  $A \Delta y$ , obtém-se:

$$-\frac{1}{A} \frac{\dot{Q}_{y+\Delta y} - \dot{Q}_y}{\Delta y} + \dot{g} = \rho c \frac{T_{t+\Delta t} - T_t}{\Delta t} \quad (6)$$

No caso limite de  $\Delta x \rightarrow 0$  e  $\Delta t \rightarrow 0$ , a equação anterior se reduz a forma diferencial:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial y} \left( k A \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{g} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

A equação anterior é obtida partindo-se da definição de derivada e da lei da condução de calor, de modo que:

$$\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\dot{Q}_{y+\Delta y} - \dot{Q}_y}{\Delta y} = \frac{\partial \dot{Q}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( -k A \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (8)$$

Portanto, a equação da condução de calor unidimensional para uma camada plana torna-se:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{g} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

A condutividade térmica de um determinado material é, em geral, dependente da temperatura (como também de  $y$ ), de modo que esta grandeza não pode ser retirada da derivada. Para o caso específico de solos homogêneos (composição, densidade, umidade e

porosidade constante), a equação acima pode ainda ser simplificada, uma vez que  $k$  pode ser considerado constante. A fim de facilitar a análise, também será considerada a ausência de fontes secundárias de calor ( $\dot{g} = 0$ ). Assim, a equação (9) reduz-se a seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

Em que, a propriedade  $\alpha = k/\rho c$  é a difusividade térmica do material ou meio. A difusividade térmica é uma propriedade física presente frequentemente em situações envolvendo a condução de calor, sendo esta um indicativo da rapidez com que o calor difunde-se através de determinado material. Esta, por sua vez, pode ser definida da seguinte maneira:

$$\alpha = \frac{\text{Calor conduzido}}{\text{Calor armazenado}} = \frac{k}{\rho c} = \left( \text{m}^2/\text{s} \right) \quad (11)$$

Observa-se na relação acima que a condutividade térmica ( $k$ ) representa o quão bem um material conduz calor, e a capacidade calorífica ( $\rho c$ ) refere-se à quantidade de energia que este é capaz de armazenar por unidade de volume. Portanto, um meio que possui elevada condutividade térmica ou baixa capacidade calorífica irá obviamente possuir acentuada difusividade térmica. Segundo CENGEL (2002), quanto maior a magnitude da difusividade térmica mais rapidamente será a propagação de calor, de modo que os baixos valores desta grandeza indicam que o calor é significativamente absorvido pelo material (apenas uma pequena parcela irá ser conduzida). Um dos objetivos principais deste trabalho concentra-se em estimar, mediante o uso de métodos distintos, a difusividade térmica do solo (ou seja, o quão rápido o calor difunde-se através do perfil vertical do solo). Os métodos utilizados neste trabalho serão abordados detalhadamente mais adiante.

#### **2.2.1.1.1 Condutividade térmica**

A condutividade térmica ( $k$ ) de determinado meio pode ser definida como a taxa de transferência de calor através de uma unidade de área de secção transversal, por unidade de gradiente de temperatura (NUSSENZVEIG, 2002). Esta, por sua vez, pode ser compreendida como uma medida da capacidade deste para conduzir calor, de modo que uma elevada (baixa) magnitude desta grandeza indica que o meio é um bom (mau) condutor de calor. As magnitudes da condutividade térmica dos diferentes meios variam numa vasta gama de

valores, sendo as mais elevadas (baixas) aquelas associadas aos cristais e metais puros (gases).

De acordo com LAL e SHUKLA (2004), a condutividade térmica do solo depende das proporções volumétricas da fração sólida, líquida e gasosa constituinte. A composição mineral, o conteúdo de matéria orgânica, o tamanho e arranjo das partículas sólidas do solo, etc. são alguns dos elementos que também influem diretamente na sua condutividade térmica (HILLEL, 2004). A magnitude desta grandeza para a água é bastante superior a do ar, portanto, ao aumentar o conteúdo de água do solo também se eleva a capacidade do meio em conduzir calor.

Uma vez que o conteúdo de ar e água altera-se continuamente, a condutividade térmica do solo encontra-se em permanente alteração. Além disso, como a composição do solo é raramente uniforme ao longo do perfil vertical, esta é também variável espacialmente. Logo, pode-se concluir que a condutividade térmica do solo é uma grandeza função do tempo e espaço (como a condutividade e difusividade térmica são grandezas diretamente relacionadas, deduz-se que a difusividade térmica do solo também apresenta uma variabilidade espaço-temporal). No presente trabalho, a fim de facilitar o estudo, assumi-se que o solo possui propriedades uniformes em todas as direções (meio isotrópico). Hillel (2004), expõem a condutividade térmica dos diferentes elementos constituintes do solo.

#### **2.2.1.1.2 Calor específico**

De acordo com HALLIDAY et al. (2009), a capacidade calorífica ( $C$ ) de um meio é a constante de proporcionalidade entre o calor ( $Q$ ) que este absorve ou perde e a variação de temperatura ( $\Delta T$ ) resultante. Logo, esta grandeza pode ser definida matematicamente da seguinte maneira:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (12)$$

A capacidade calorífica também pode ser compreendida como a quantidade de energia necessária para variar a temperatura de um meio em  $1^\circ\text{C}$  ou  $1\text{K}$ . É conveniente na análise termodinâmica definir uma capacidade calorífica por unidade de massa ou por unidade de volume. Estas grandezas derivadas são chamadas de calor específico gravimétrico ( $c_g$ ) e calor específico volumétrico ( $c_v$ ), respectivamente. A diferença entre ambas está centrada no fato de que  $c_g$  é expresso em unidade de massa ( $\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ), enquanto  $c_v$  por unidade de volume

( $J/m^3 \cdot ^\circ C$ ). No caso específico de solos, as magnitudes destas grandezas dependem da composição da fração sólida do solo (componentes minerais e orgânicos), como também da densidade e umidade do presente meio.

Uma vez que o solo é um meio multicomponente, o calor específico deste pode ser obtido a partir da soma dos calores específicos de seus constituintes, que em termos gravimétricos é expresso da seguinte maneira:

$$c_{g(\text{solo})} = c_{gm} f_{gm} + c_{go} f_{go} + c_{gag} f_{gag} + c_{gar} f_{gar} \quad (13)$$

Em que,  $c_{g(\text{solo})}$  é o calor específico gravimétrico do solo ( $J/kg \cdot ^\circ C$ );  $c_{gm}$ ,  $c_{go}$ ,  $c_{gag}$  e  $c_{gar}$  são, respectivamente, os calores específicos gravimétricos das frações mineral, orgânica, da água e do ar do solo ( $J/kg \cdot ^\circ C$ ); e  $f_{gm}$ ,  $f_{go}$ ,  $f_{gag}$  e  $f_{gar}$  são, respectivamente, as frações gravimétricas da matéria mineral, orgânica, da água e do ar do solo ( $kg/kg$ ). É comum despreza-se o último termo da equação (13), visto que o calor específico gravimétrico do ar é quase que desprezível ao comparar com os dos demais constituintes.

De acordo com PREVEDELLO (1996), com base no volume, a equação anterior transforma-se em:

$$c_{v(\text{solo})} = c_{gm} f_{vm} \rho_{pm} + c_{go} f_{vo} \rho_{po} + c_{gag} f_{vag} \rho_{ag} + c_{gar} f_{var} \rho_{ar} \quad (14)$$

Em que,  $c_{v(\text{solo})}$  é o calor específico volumétrico do solo ( $J/m^3 \cdot ^\circ C$ );  $c_{gm}$ ,  $c_{go}$ ,  $c_{gag}$  e  $c_{gar}$  são, novamente, os calores específicos gravimétricos das frações mineral, orgânica, da água e do ar do solo ( $J/kg \cdot ^\circ C$ );  $\rho_{pm}$ ,  $\rho_{po}$ ,  $\rho_{ag}$  e  $\rho_{ar}$  são, respectivamente, as massas específicas das partículas minerais, orgânicas, da água e do ar do solo ( $kg/m^3$ ); e  $f_{vm}$ ,  $f_{vo}$ ,  $f_{vag}$  e  $f_{var}$  são, respectivamente, as frações volumétricas das partículas minerais, orgânicas, da água e do ar ( $m^3/m^3$ ). Similarmente ao caso anterior, pode-se desprezar o último termo da equação (14).

### 2.2.1.2 Convecção

A convecção é o processo de transferência de energia que ocorre entre certa superfície sólida e um líquido (ou gás) adjacente em movimento, envolvendo os efeitos combinados de condução e movimentos de fluidos (HOLMAN, 2010). Quanto mais rápido o fluido estiver se movimentando, maior será a taxa de transferência de calor mediante o processo físico de convecção ( $\dot{Q}_{\text{convecção}}$ ). Caso o fluido não apresente nenhuma espécie de movimento

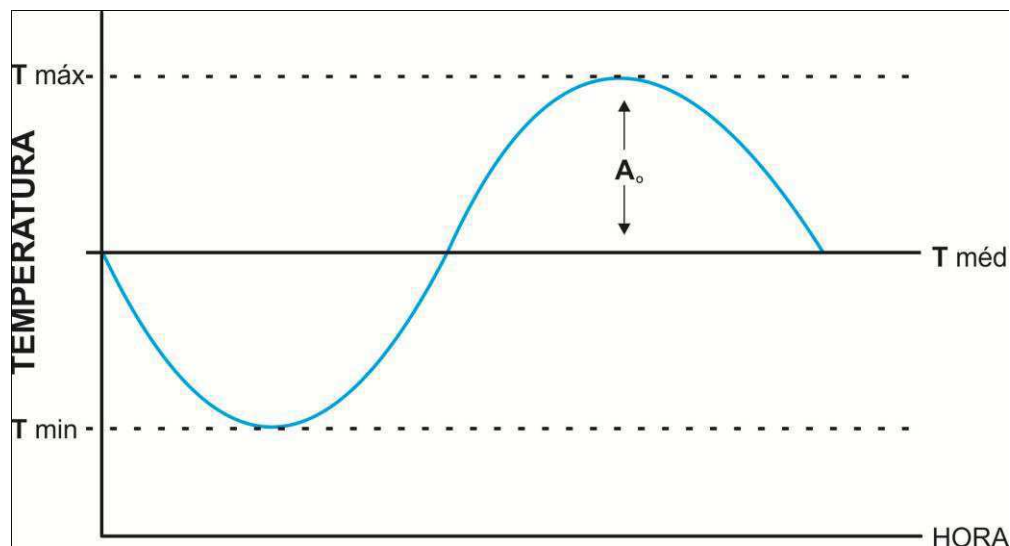
(velocidade = 0), a transferência de calor entre este e a superfície sólida irá acontecer apenas por meio da condução.

Um exemplo claro de convecção é o resfriamento de determinada superfície a partir do movimento de ar “frio” sobre esta. No instante inicial, calor é transferido para a camada adjacente de ar por intermédio da condução. Após certo intervalo de tempo, devido à diferença de densidade, o ar agora aquecido é removido da superfície (levado para níveis mais elevados da atmosfera) e substituído por um de temperatura inferior (movimento induzido pelas forças de fluabilidade ou empuxo). O processo anterior, repetido inúmeras vezes, resulta no resfriamento da superfície e aquecimento da massa de ar. Esse fenômeno, de importância significativa na atmosfera, é denominado de convecção. Alguns não consideram a convecção como sendo um dos mecanismos fundamentais de transferência de calor uma vez que este requer essencialmente a presença de fluidos em movimento, porém, precisa-se dar a este fenômeno combinado uma nomenclatura a menos que seja referido como “condução com fluidos em movimento” (CENGEL, 2002). Assim, é prático reconhecer a convecção como um processo distinto de transferência de calor, apesar dos argumentos contrários.

No caso específico de solos, o processo de convecção não é tão importante quanto à condução, exceto em algumas situações (por exemplo, durante a infiltração e redistribuição de água no perfil do solo, sendo este mais frio que a água de entrada). No entanto, como mencionado anteriormente, uma vez que o fluxo de massa no interior do solo ocorre de maneira lenta à convecção pode ser desprezada (REICHARDT e TIMM, 2004). Em GAO et al. (2009), verifica-se que há um método destinado a estimativa da difusividade térmica do solo com a presença de termos referentes ao processo de convecção, no entanto, neste trabalho assumi-se que a condução é o único processo de transferência de energia (calor) no interior do solo.

### **2.2.2 Regime de temperatura do solo**

A representação matemática mais simples do regime de temperatura do solo é obtida assumindo-se que, para todo o perfil vertical, a temperatura oscila como uma pura função harmônica (senoidal) do tempo em torno de um valor médio (Figura 3). Esta pode ser uma aproximação grosseira (as variações reais não são ordenadas), no entanto, em determinadas situações pode fornecer valores bastante satisfatórios.



**Figura 3.** Flutuação diária, idealizada, das temperaturas do solo

Assumi-se inicialmente que, embora a temperatura do solo se modifique de maneira distinta para as diferentes profundidades, a temperatura média é a mesma para todo o perfil vertical ( $T_{méd}$ ). A seguir, escolhe-se um tempo de partida ( $t = 0$ ), de tal maneira que a temperatura da superfície coincida com a  $T_{méd}$ . A temperatura para a superfície pode então ser expressa como uma função do tempo:

$$T(0, t) = T_{méd} + A_o \text{sen}(\omega t) \quad (15)$$

Em que,  $T(0, t)$  é a temperatura para  $z = 0$  (superfície do solo) como uma função do tempo,  $T_{méd}$  é a temperatura média da superfície (bem como do perfil), e  $A_o$  é a amplitude da flutuação de temperatura na superfície (diferença entre a temperatura máxima, ou mínima, e a  $T_{méd}$ ). Finalmente,  $\omega$  é a velocidade angular da Terra ( $\omega = 7,27 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ). Logo, ao invés de grau, verifica-se que o argumento da função seno é expresso em radiano.

A equação anterior é a condição de contorno para  $z = 0$ . Por uma questão de conveniência, considera-se que a uma profundidade infinita ( $z = \infty$ ) a temperatura seja constante e igual à  $T_{méd}$ . Nestas circunstâncias, a temperatura para qualquer profundidade  $z$  pode também ser representada como uma função seno do tempo:

$$T(z, t) = T_{méd} + A_z \text{sen}[\omega t + \phi(z)] \quad (16)$$

Em que,  $A_z$  é a amplitude para a profundidade  $z$ . As variáveis,  $A_z$  e  $\phi(z)$ , são apenas função da profundidade ( $z$ ). Estas, por sua vez, podem ser determinadas substituindo a



solução da equação (15) na equação. (10). Após algumas manipulações matemáticas, obtém-se a seguinte solução:

$$T(z, t) = T_{\text{média}} + A_0 e^{(-z/d)} [\text{sen}(\omega t - z/d)] \quad (17)$$

Essa solução, cujos detalhes podem ser vistos em DECICO (1974), diz que a temperatura varia exponencialmente com a profundidade (o termo exponencial só tem a variável  $z$ ) e senoidalmente com o tempo e a profundidade. Para o caso particular de  $z = 0$  (superfície do solo), a equação anterior se reduz a equação (15). A constante  $d$  é uma profundidade característica, denominada de profundidade de amortecimento, na qual a amplitude da temperatura é igual a  $1/e$  ( $1/2,718 = 0,37$ ) da amplitude para a superfície do solo ( $A_0$ ). A magnitude da profundidade de amortecimento pode ser obtida mediante a seguinte razão:

$$d = \left( \frac{2\alpha}{\omega} \right)^{1/2} \quad (18)$$

Pode-se observar que para qualquer profundidade a amplitude da flutuação de temperatura  $A_z$  é menor do que  $A_0$  por um fator  $e^{z/d}$ , e que existe um deslocamento de fase (tempo de atraso do pico de temperatura) igual a  $-z/d$ . O decréscimo da amplitude e o aumento da fase com a profundidade são fenômenos típicos na propagação de uma onda periódica de temperatura no solo. A razão física para estes fenômenos está associada ao fato de que certa quantidade de calor é absorvida ao longo do seu caminho de propagação (propicia o aumento da temperatura do solo), e devido à resistência imposta pelo solo à propagação de calor ao longo de seu perfil vertical (quanto menor a condutividade térmica do meio, maior será a resistência a propagação de calor).

De acordo com HILLEL (2004), quando um ponto zero arbitrário  $t_0$  é introduzido na escala de tempo, a equação (17) torna-se:

$$T(z, t) = T_{\text{média}} + A_0 e^{(-z/d)} [\sin(\omega t + \phi_0 - z/d)] \quad (19)$$

A constante  $\phi_0$  é chamada de constante de fase. A variação anual da temperatura do solo a uma profundidade considerável apresenta desvios da suposição simplista de que a temperatura média diária é a mesma para todo o perfil vertical. O efeito combinado da variação anual e diária da temperatura do solo pode ser expresso por:

$$T(z, t) = T_{\text{média}, y} + A_y e^{(-z/d_y)} [\sin(\omega_y t + \phi_y - z/d_y)] \\ + A_d e^{(-z/d_d)} [\sin(\omega_d t + \phi_d - z/d_d)] \quad (20)$$

Em que os índices subscritos  $y$  e  $d$  referem-se à onda anual e diária de temperatura, respectivamente. Assim,  $T_{\text{média}, y}$  é a temperatura média anual. Os ciclos diários, agora são vistos como perturbações de curto prazo sobrepostas no ciclo anual. Eventos de tempo extremos (chuva excessiva, elevada nebulosidade, etc.) podem causar consideráveis desvios de simples flutuações harmônicas, particularmente para os ciclos diários. Irregularidades climáticas de longo prazo podem também afetar o ciclo anual em curso. Além disso, uma vez que a onda de temperatura anual penetra de maneira muito mais profunda que a onda diária, a suposição da homogeneidade do solo ao longo do perfil vertical e a invariabilidade temporal das propriedades térmicas do solo são claramente irrealistas (GAO et al., 2003).

Uma aproximação teórica alternativa, com menos suposições restritivas, é possível ser obtida (HANKS, 1992). Esta pode basear-se em métodos numéricos, ao invés de analíticos, para resolver a equação diferencial da condução de calor. Modelos de simulação matemática com base computacional agora permitem variar as propriedades térmicas do solo no tempo e espaço (por exemplo, em resposta as mudanças na umidade do solo). Estes, por sua vez, também permitem que as variações climáticas sejam seguidas mais realisticamente. A amplitude da temperatura da superfície não necessita mais ser considerada como uma variável independente, mais sim uma que dependa do balanço superficial de energia  $e$ , sendo assim, é afetada diretamente pelas propriedades do solo e pelas condições acima deste. Exemplos de aproximações numéricas podem ser encontrados em trabalhos publicados por VAN BAVEL e HILLEL (1975, 1976), HILLEL (1977) e EVETT et al. (1994).

Outros desenvolvimentos de importância prática incluem novas técnicas (ou tecnologias) para o monitoramento do regime térmico do solo, de modo que estas fornecem informações mais precisas que as obtidas anteriormente. Uma dessas novas tecnologias é o termômetro de radiação infravermelha, utilizada para detectar remotamente a temperatura da superfície dos solos nu ou vegetados (sem perturbar a superfície medida). O conhecimento da temperatura da superfície e sua variação temporal são importantes parâmetros na avaliação da troca de energia entre o solo e a atmosfera, bem como na determinação das condições de contorno para a transferência de calor no interior do solo.

Uma técnica adicional é o uso de placas de fluxo de calor. Trata-se de placas (ou discos) planas e finas de condutividade térmica constante, que permite medir com precisão a diferença de temperatura entre suas superfícies e, assim, obter o fluxo de calor através dela. Quando inseridas horizontalmente no solo em intervalos regulares de profundidade, esta série de placas de fluxo de calor pode proporcionar um registro contínuo da transferência de calor através do perfil. No entanto, a presença de tais placas pode distorcer o fluxo de calor no meio circunvizinho, caso sua condutividade térmica seja muito diferente daquela do solo. O erro experimental pode ser minimizado através da construção de placas de condutividade térmica máxima e espessura mínima, além de calibrá-los em um meio cuja condutividade térmica seja próxima ao do solo em que estas serão inseridas. Outro aspecto importante no uso de tais placas está associado ao fato destas impedirem o fluxo de vapor no solo que, em determinadas situações, pode ser um importante componente no processo de transferência de calor. A utilização das placas de fluxo de calor é descrita detalhadamente em SAUER (2002).

### **2.2.3 Procedimentos para modificar o regime de temperatura do solo**

Seria freqüentemente benéfico alterar as condições térmicas do solo no período de germinação das sementes e crescimento inicial. O aumento da temperatura do solo no início da primavera pode permitir que a germinação ocorra mais cedo, estendendo-se desse modo o período de crescimento por uma ou duas semanas. No entanto, em determinadas situações para que a germinação aconteça é necessária a diminuição da temperatura do solo.

Uma vez que o comportamento térmico dos solos ainda não é compreendido detalhadamente, a maioria das tentativas de melhorar as condições de campo é baseada na experiência empírica (HILLEL, 1980). Habitualmente o regime de temperatura do solo é modificado em decorrência de práticas de cultivo, porém, métodos aprimorados que buscam a sua manipulação durante todo o período de crescimento de uma cultura são dificilmente empregados devido aos elevados custos (GARDNER et al., 1999). Portanto, as características térmicas do solo é um dos elementos de fundamental importância no processo de seleção das culturas a serem estabelecidas (a cultura pode apenas desenvolver-se satisfatoriamente em uma região cuja temperatura do solo esteja dentro de um limite tolerável para esta).

De acordo com GARDNER et al. (1999), a aplicação superficial de caulino favorece o aumento do albedo da superfície do solo e pode ser eficaz na redução de suas temperaturas, enquanto que o depósito de pó de carvão ocasiona impacto oposto. Operações de drenagem a fim de reduzir o conteúdo de água de solos úmidos favorecem a elevação das temperaturas do

solo, fazendo com que não ocorra atraso na germinação e colheita das culturas. As próprias plantas podem propiciar a redução das temperaturas do solo visto que estas refletem e absorvem boa parte da radiação solar incidente.

A cobertura do solo é uma prática agrícola capaz de alterar parâmetros importantes do microclima, tais como as condições de temperatura do solo (GONÇALVES et al., 2005). A presença de resíduos sobre a superfície do solo restringe tanto a “entrada” quanto a “saída” de energia, reduzindo as flutuações diurnas da temperatura do solo. Além disso, independentemente da sua natureza, a cobertura reduz a evaporação e aumenta a conservação da umidade do solo (GASPARIM et al., 2005). Os efeitos estão bem documentados (ALAM et al., 1993; AZOOZ et al., 1995; DWYER et al., 1995), porém, métodos aprimorados para a previsão das temperaturas do solo em resposta a essa prática ainda são limitados. Bussiere e Cellier (1994), conseguiram quantificar e modelar a influência de coberturas nas trocas de água e energia entre o solo e atmosfera.

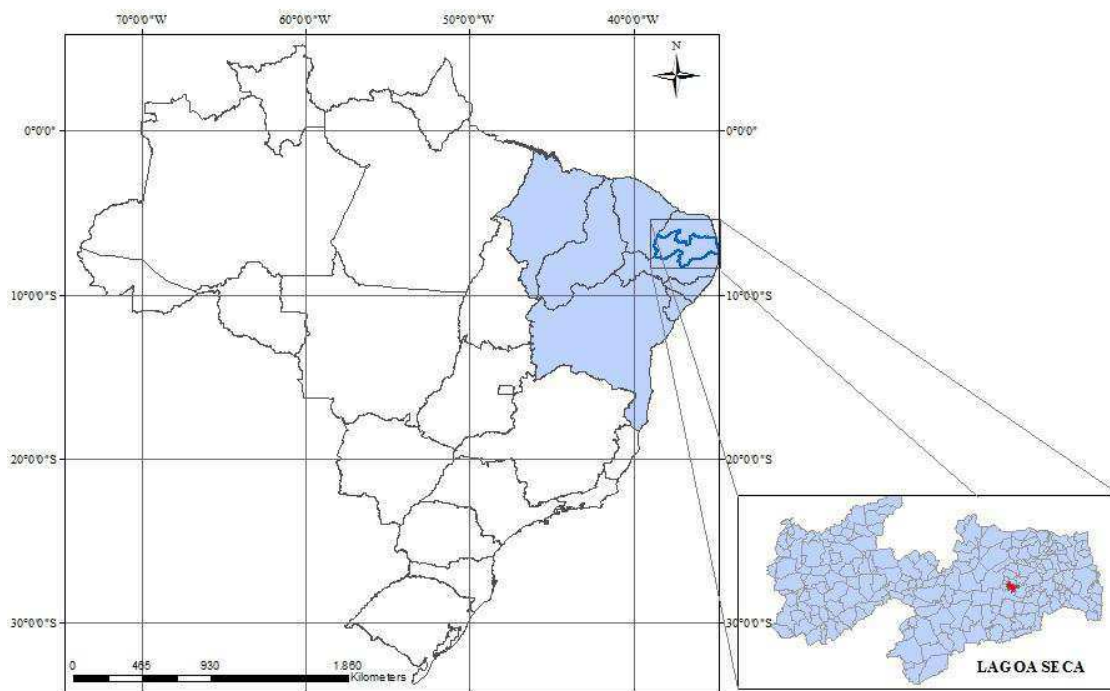
Em regiões tropicais a redução das temperaturas do solo devido ao emprego de coberturas é muitas vezes favorável. GAJRI et al. (1994), atribuiu os aumentos distintos da área foliar das plantas de milho cultivadas no noroeste da Índia a presença de resíduos sobre o solo, fazendo com que este assumisse temperaturas de menor magnitude durante o período inicial de crescimento. Em regiões extratropicais, a cobertura do solo durante determinados períodos do ano pode ocasionar malefícios a germinação.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Estação Experimental de Lagoa Seca (7,16°S; 35,85°O e altitude média de 634m), pertencente à Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba – EMEPA/PB. De acordo com ARAÚJO (2008), o solo da região é classificado como Neossolo Regolítico (também denominado Regossolo), caracterizado quimicamente e fisicamente pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA/Algodão e pelo Laboratório de Irrigação e Salinidade do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

A Estação Experimental de Lagoa Seca está situada no Sítio Imbaúba, mesorregião do agreste paraibano, a cerca de 15 km da cidade de Campina Grande-PB (Figura 4). Possui uma área total de 110 ha (hectares), sendo esta composta por áreas experimentais e reservas florestais. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo tropical chuvoso, com estação seca no verão. A precipitação média anual é da ordem de 940 mm (maior concentração de chuva ocorre no período compreendido entre março e agosto), com uma umidade relativa e temperatura média anual do ar de aproximadamente 65% e 21,6°C, respectivamente (ARAÚJO et al., 2010).



**Figura 4.** Localização geográfica da área de estudo.

Neossolos são solos pouco desenvolvidos e geralmente pouco profundos, em via de formação devido à reduzida atuação dos processos pedogenéticos (consequência da resistência do material de origem ao intemperismo, condição climática ou geomorfológica) ou ao pouco tempo de ação dos agentes intempéricos e pedológicos (PEDRON, 2007). O Neossolo Regolítico é um tipo de solo que apresenta textura arenosa e baixa capacidade de adsorção de nutrientes, quando comparado com solos argilosos (TITO et al., 1997); naturalmente, possui baixo teor de matéria orgânica e nitrogênio que diminuem, após alguns anos de uso (JACOMINE, 1996).

### **3.2 Dados**

Para o desenvolvimento da presente pesquisa foram utilizados dados obtidos ao longo dos anos de 2010 e 2011, a partir de uma estação meteorológica automática (Figura 5) em funcionamento na Estação Experimental de Lagoa Seca. Esta possui diversos equipamentos, no entanto, fez-se uso de apenas alguns destes. Com o objetivo de monitorar o regime térmico do solo foram utilizados sensores de temperatura operando ininterruptamente ao longo dos ciclos diários (o datalogger encontra-se programado a fornecer a magnitude média horária desta variável), instalados em quatro profundidades distintas do solo: 05, 15, 30 e 50 centímetros. Também se fez uso de um pluviômetro, instalado de acordo com as especificações da Organização Mundial de Meteorologia (OMM), a fim de obter subsídios que possibilitem correlacionar as alterações nos regimes de temperatura do solo a ocorrência da precipitação pluvial.



**Figura 5.** Estação meteorológica automática instalada na EMEPA de Lagoa Seca-PB

### **3.3 Variabilidade diária das temperaturas do solo**

De acordo com SPIEGEL (1993), o grau ao qual os dados numéricos tendem a dispersar-se em torno de um valor médio chama-se variação ou dispersão dos dados. Dispõe-se de várias medidas de dispersão ou variação, sendo a utilizada nesta pesquisa denominada de coeficiente de variação (CV). A fim de verificar para cada profundidade a variabilidade diária das temperaturas do solo em torno dos respectivos valores médios (referentes a cada ciclo diário), fez-se uso da seguinte equação:

$$\text{Coeficiente de Variação} = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (21)$$

Em que,  $s$  é o desvio padrão e  $\bar{X}$  são as médias diárias da temperatura do solo para cada profundidade. Segundo LARSON e FARBER (2004), pode-se interpretar o resultado do coeficiente de variação da seguinte maneira: quanto menor o CV mais homogêneo é o conjunto de dados e quanto maior o CV mais heterogêneo é o conjunto de dados.

### 3.4 Difusividade térmica do solo

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 (FIDELES FILHO, 1988). A partir dessas considerações irá ser aplicado o tratamento clássico de condução de calor a um meio homogêneo proposto por Fourier, que permite conhecer as amplitudes e fases da onda de calor.

Uma vez que a difusividade térmica é calculada para certas camadas específicas do solo, faz-se necessário que sejam destacados os critérios adotados nesta pesquisa. Devido à disponibilidade de dados as estimativas foram realizadas para as porções do solo denominadas de camada 1 (estende-se desde 0,05 até 0,15 metros de profundidade), camada 2 (estende-se desde 0,15 até 0,3 metros de profundidade), camada 3 (estende-se desde 0,3 até 0,5 metros de profundidade) e camada 4 (estende-se desde 0,05 até 0,5 metros de profundidade).

Mediante as informações e considerações anteriores foram empregados determinados métodos a fim de se estimar a difusividade térmica do solo, cujos detalhes podem ser encontrados em GAO et al. (2009). Os utilizados na presente pesquisa são denominados de método da amplitude, método do arco tangente e método logarítmico.

#### 3.4.1 Método da Amplitude

De acordo com BELLAYER (2010), a amplitude ( $A$ ) de oscilação da temperatura do solo para uma determinada profundidade (metade da diferença entre o máximo e o mínimo valor diário da temperatura do solo) pode ser estimada a partir da seguinte equação:

$$A(z) = A_0 e^{(-z\sqrt{\omega/2\alpha})} \quad (22)$$

Em que,  $A_0$  é a amplitude de oscilação para a superfície do solo,  $z$  é a profundidade para a qual se deseja obter a informação,  $\omega$  é a velocidade angular da Terra ( $\omega = 7,27 \times 10^{-5}$  radianos/segundo) e  $\alpha$  é a difusividade térmica do solo para aquela profundidade. Suponha que se deseje estimar a amplitude de oscilação da temperatura do solo para duas profundidades distintas ( $z_1$  e  $z_2$ ). Com base no mencionado anteriormente, a fim de alcançar esse objetivo, devem ser empregadas as seguintes equações:

$$A(z_1) = A_0 e^{(-z_1\sqrt{\omega/2\alpha})} \quad (23)$$



$$A(z_2) = A_0 e^{(-z_2 \sqrt{\omega/2\alpha})} \quad (24)$$

Dividindo-se as equações (uma pela a outra) e aplicando o logarítmico em ambos os termos da expressão, obtém-se:

$$\ln\left(\frac{A(z_1)}{A(z_2)}\right) = \ln\left(e^{(-z_1 \sqrt{\omega/2\alpha})} e^{(z_2 \sqrt{\omega/2\alpha})}\right) \quad (25)$$

Elevando ambos os termos da expressão anterior ao quadrado e após algumas manipulações matemáticas, chega-se a seguinte equação:

$$\alpha = \left(\frac{\omega}{2}\right) \left[\frac{(z_2 - z_1)}{\ln\left(\frac{A(z_1)}{A(z_2)}\right)}\right]^2 \quad (26)$$

O método da amplitude, caracterizado pelo emprego da equação acima, é obtido partindo-se da suposição de que o regime de temperatura para a superfície é bem descrito por uma função senoidal. Erros devido a essa suposição simplista podem ser reduzidos a partir do uso da série de Fourier, uma vez que esta pode descrever mais precisamente a variação diurna da temperatura da superfície do solo (VAN WIJK, 1963).

### 3.4.2 Método do arco tangente

Segundo GAO et al. (2009), a temperatura da superfície do solo pode ser descrita por uma série de Fourier:

$$T = \bar{T} + \sum_{i=1}^n [a_i \sin(i\omega t) + b_i \cos(i\omega t)] \quad (27)$$

Em que,  $\bar{T}$  é o valor médio da temperatura do solo para o intervalo de tempo considerado,  $n$  é o número de harmônicos,  $a_i$  e  $b_i$  são as amplitudes,  $\omega$  é novamente a velocidade angular da Terra e  $t$  o tempo. Com a condição de contorno  $n = 2$  (os dois primeiros harmônicos são, em geral, suficientes para descrever o regime térmico do solo), a difusividade térmica ( $\alpha$ ) poderá ser estimada a partir do método do arco tangente, mediante o emprego da seguinte equação:

$$\alpha = \frac{\omega(Z_2 - Z_1)^2}{2 \left\{ \arctan \left[ \frac{(T_1 - T_3)(T'_2 - T'_4) - (T_2 - T_4)(T'_1 - T'_3)}{(T_1 - T_3)(T'_1 - T'_3) + (T_2 - T_4)(T'_2 - T'_4)} \right] \right\}^2} \quad (28)$$

De modo que  $T_1, T_2, T_3$  e  $T_4$  são as temperaturas registradas na profundidade  $z_1$ , enquanto que,  $T'_1, T'_2, T'_3$  e  $T'_4$  são aquelas registradas na profundidade  $z_2$ . Para ambas as profundidades, devem ser utilizadas as temperaturas observadas em intervalos de 6 em 6 horas (NERPIN e CHUDNOVSKII, 1967).

### 3.4.3 Método logarítmico

Seemann (1979), utilizando a mesma metodologia do método anterior, mostrou que a difusividade térmica do solo ( $\alpha$ ) pode também ser estimada a partir da seguinte equação:

$$\alpha = \left\{ \frac{0,0121[Z_2 - Z_1]}{\ln \left\{ \frac{[(T_1 - T_3)^2 + (T_2 - T_4)^2]}{[(T'_1 - T'_3)^2 + (T'_2 - T'_4)^2]} \right\}} \right\}^2 \quad (29)$$

Nesta equação, característica do método logarítmico, também é necessário que as temperaturas utilizadas sejam aquelas observadas em intervalos de 6 em 6 horas. Novamente,  $T_1, T_2, T_3$  e  $T_4$  são as temperaturas registradas na profundidade  $z_1$ , enquanto que,  $T'_1, T'_2, T'_3$  e  $T'_4$  são aquelas registradas na profundidade  $z_2$ .

### 3.5 Simulação da temperatura do solo

Considere, como exposto anteriormente na Figura 3, que a temperatura da superfície do solo oscila diariamente de modo senoidal em torno de um valor médio ( $T_{\text{média}}$ ). No instante em que a temperatura da superfície ( $z = 0$ ) alcança uma magnitude máxima, esta pode ser obtida mediante o emprego da seguinte relação:

$$T(0, t) = T_{\text{média}} + A_o \quad (30)$$

Em que,  $T_{\text{média}}$  é a temperatura média da superfície e  $A_o$  é a amplitude da flutuação de temperatura da superfície. Sabe-se, mediante o apresentado anteriormente, que a temperatura para qualquer profundidade ( $z$ ) e tempo ( $t$ ) pode ser obtida mediante o emprego da equação (19). Para o caso específico da superfície do solo ( $z = 0$ ), esta se reduz a seguinte forma:

$$T(0, t) = T_{\text{média}} + A_o [\sin(\omega t + \phi_o)] \quad (31)$$

Suponha que a temperatura da superfície do solo alcance um máximo, ao longo do ciclo diário, em torno das 13:00 horas. Logo, a equação acima pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$T(0,13) = T_{\text{média}} + A_o [\sin(13\omega + \phi_o)] \quad (32)$$

O valor obtido mediante o emprego da equação (32) tem que ser idêntico aquele oriundo da equação (30). Matematicamente, deve-se observar a seguinte igualdade:

$$T_{\text{média}} + A_o = T_{\text{média}} + A_o [\sin(13\omega + \phi_o)] \quad (33)$$

Em ambas os casos,  $T_{\text{média}}$  refere-se à temperatura média da superfície do solo. Logo, a equação anterior se reduz a seguinte forma:

$$A_o = A_o [\sin(13\omega + \phi_o)] \quad (34)$$

Para que esta igualdade seja verdadeira, a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$\sin(13\omega + \phi_o) = 1 \quad (35)$$

Ou seja:

$$13\omega + \phi_o = \frac{\pi}{2} \quad (36)$$

Uma vez que:

$$\omega = \frac{2\pi}{24} \quad (37)$$

A equação (36) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{26\pi}{24} + \phi_o = \frac{\pi}{2} \quad (38)$$

Após algumas manipulações matemáticas verifica-se, mediante as condições de contorno impostas anteriormente, que a magnitude da constante de fase ( $\phi_o$ ) é:

$$\phi_o = -\frac{7\pi}{12} \quad (39)$$

Portanto, a equação (19) deve ser reescrita da seguinte maneira:

$$T(z, t) = T_{\text{média}} + A_0 e^{(-z/d)} \left[ \sin \left( \omega t - \frac{7\pi}{12} - \frac{z}{d} \right) \right] \quad (40)$$

A equação acima, fazendo uso das magnitudes da difusividade térmica do solo obtidas mediante as considerações e métodos apresentados anteriormente, foi utilizada na simulação da temperatura do solo para diferentes profundidades e cada do dia. Temperaturas próximas daquelas mensuradas indica que os métodos utilizados forneceram valores condizentes com a realidade.

### 3.6 Análise dos dados

Após simular a temperatura do solo empregando-se as diferentes magnitudes da difusividade térmica, estimadas a partir do uso dos métodos e considerações abordadas anteriormente, se faz necessário verificar o quanto estes valores se aproximam daqueles obtidos pelos sensores térmicos. Diferentes indicadores estatísticos podem ser utilizados a fim de alcançar este objetivo.

De acordo com SPIEGEL (1993), o grau de relação existente entre duas variáveis quaisquer pode ser quantificado através do chamado coeficiente de correlação ( $r$ ). Deste modo, a temperatura simulada e aquela mensurada foram correlacionadas a partir do uso da seguinte equação:

$$r = \frac{n(\sum T_s T_m) - (\sum T_s)(\sum T_m)}{\sqrt{n(\sum T_s^2) - (\sum T_s)^2} \sqrt{n(\sum T_m^2) - (\sum T_m)^2}} \quad (41)$$

De tal modo que  $T_s$  e  $T_m$  são as temperaturas simuladas e mensuradas, respectivamente. A variável  $n$  representa o número de pares de dados (tamanho da amostra) e pode ser, uma vez que se está trabalhando com os valores referentes a cada hora do dia, considerada igual a 24. Valores próximos de 1 (0), indica que ambas estão fortemente (fracamente) correlacionadas (LARSON e FARBER, 2004).

O grau de aproximação entre ambas pode ser obtido por um índice designado de concordância, representado pela letra “ $d$ ” (WILLMOTT et al., 1985). Os valores, similarmente ao índice anterior, variam de 0 (nenhuma concordância) a 1 (concordância perfeita). Este, por sua vez, é obtido a partir da seguinte equação:

$$d = 1 - \frac{\sum (T_s - T_m)^2}{\sum (|T_s - \bar{T}_m| + |T_m - \bar{T}_m|)^2} \quad (42)$$

Novamente,  $T_s$  e  $T_m$  são as temperaturas simuladas e mensuradas, respectivamente. A variável  $\bar{T}_m$  representa a média das temperaturas mensuradas. O índice de confiança ( $c$ ) também será utilizado na presente pesquisa a fim de verificar o desempenho da equação (40), na simulação da temperatura do solo para diferentes profundidades e horas do dia. De acordo com CAMARGO e SENTELHAS (1997), a magnitude deste pode ser obtida a partir do seguinte produto:

$$c = r \times d \quad (43)$$

Em que,  $r$  é o coeficiente de correlação e  $d$  é o índice de concordância. O desempenho da equação (40), avaliado a partir do índice de confiança, será classificado de acordo com a Tabela 1.

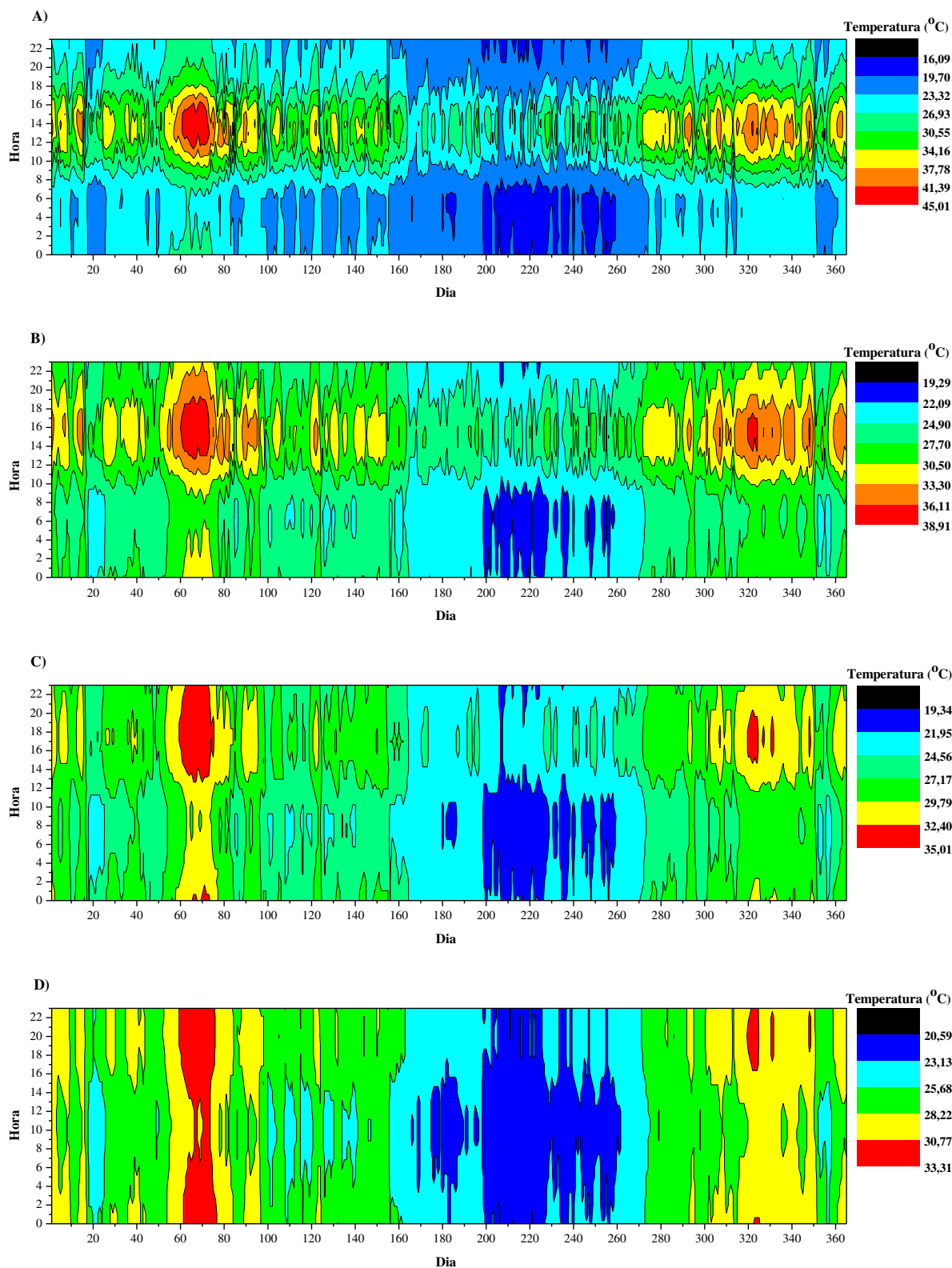
**Tabela 1.** Classificação de desempenho com base no índice de confiança (Fonte: ZONTA et al., 2012).

Valor de $c$	Desempenho
$>0,85$	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

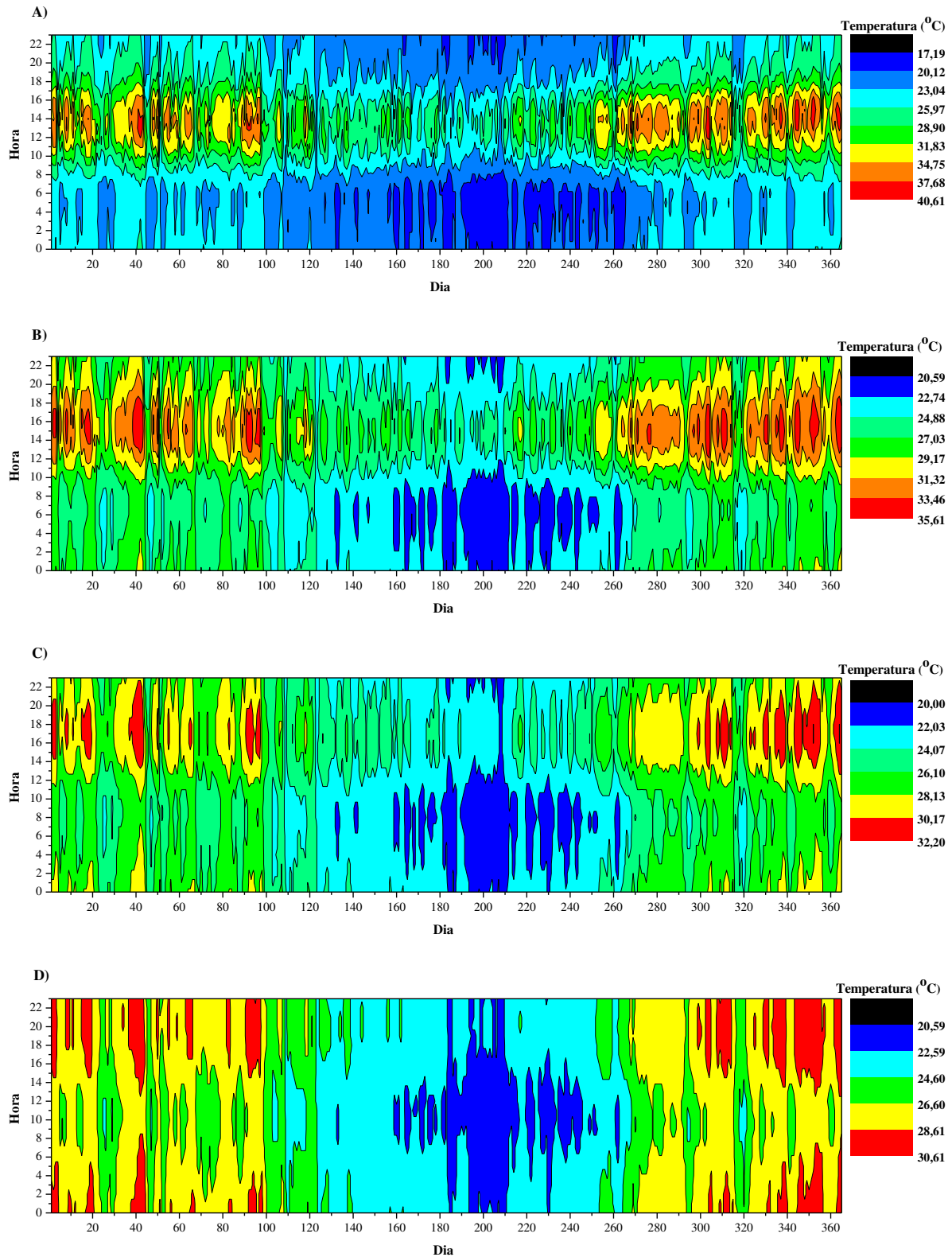
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Perfil térmico diário e anual

A partir dos dados de temperatura do solo, obtidos em quatro profundidades distintas, tornou-se possível o estudo do regime térmico diário e anual do presente meio. A Figura 6 e 7 expõem, para estas profundidades, o comportamento térmico do solo observado durante os anos de 2010 e 2011, respectivamente.



**Figura 6.** Comportamento térmico do solo de Lagoa Seca-PB, observado durante todo o ano de 2010, nas seguintes profundidades: 5cm (A), 15cm (B), 30cm (C) e 50cm (D).



**Figura 7.** Comportamento térmico do solo de Lagoa Seca-PB, observado durante todo o ano de 2011, nas seguintes profundidades: 5cm (A), 15cm (B), 30cm (C) e 50cm (D).

Verifica-se, a partir da análise das Figuras 6 e 7, que o comportamento térmico do solo observado em ambos os ciclos anuais são significativamente semelhantes. Em todo o perfil vertical, as temperaturas mais elevadas foram aquelas observadas nos primeiros e últimos meses dos respectivos anos (Janeiro-Março e Outubro-Dezembro). As máximas temperaturas para todo o período de análise foram registradas entre os dias 01 e 21 de março do ano de 2010, de modo que na profundidade de 05cm, esta grandeza alcançou uma magnitude próxima dos 45°C. As mínimas foram observadas entre os meses de Junho-Setembro, de modo que na profundidade de 05cm e no ano de 2010, registraram-se temperaturas em torno dos 16°C. Esse comportamento, uma vez que a responsável pelo aquecimento é a energia advinda do Sol, já era esperado visto que no verão (inverno) há uma maior (menor) disponibilidade de energia solar à superfície (DINIZ, 2013a).

Visto que as regiões mais profundas foram as que apresentaram menor variabilidade térmica anual, pode-se considerar que estas grandezas estão inversamente relacionadas. Com relação à profundidade de 05cm, verificou-se uma amplitude térmica em torno dos 29°C e 23°C para os ciclos anuais de 2010 e 2011, respectivamente. Aquela referente à profundidade de 50cm, para ambos os anos de análise, não chegou a ultrapassar os 13°C. Vale também destacar que o ciclo anual que apresentou maior variabilidade térmica, para todo o perfil vertical do solo, foi aquele de 2010. A precipitação pluvial foi a principal responsável pelo fenômeno mencionado anteriormente, a registrada para todo o ano de 2010 foi quase que a metade daquela precipitada em 2011, uma vez que esta ocasiona uma alteração considerável no teor de umidade do solo e é capaz de impedir que uma parcela significativa da energia proveniente do Sol incida na superfície. De acordo com Carneiro et al. (2014), o regime pluviométrico exerce grande influência na incidência de radiação solar à superfície sendo, portanto, de grande contribuição para a variabilidade da temperatura do solo no decorrer do ano. Uma vez que a disponibilidade energética pouco se altera ao longo do ano em regiões próximas ao equador geográfico (baixas latitudes), a variabilidade anual das condições térmicas do solo não é acentuada como a oriunda de demais regiões (médias e altas latitudes).

A precipitação pluvial é capaz de alterar significativamente o comportamento térmico diário do solo. Na ausência deste fenômeno, verifica-se que os ciclos térmicos diários são bastante semelhantes, divergindo basicamente quanto às magnitudes das temperaturas. Neste caso específico, constata-se até meados das 10 horas da manhã o progressivo aumento das temperaturas à medida que se avança em profundidade, com os valores máximos sendo observados em 50cm. Após esse período, em consequência da incidência mais acentuada de



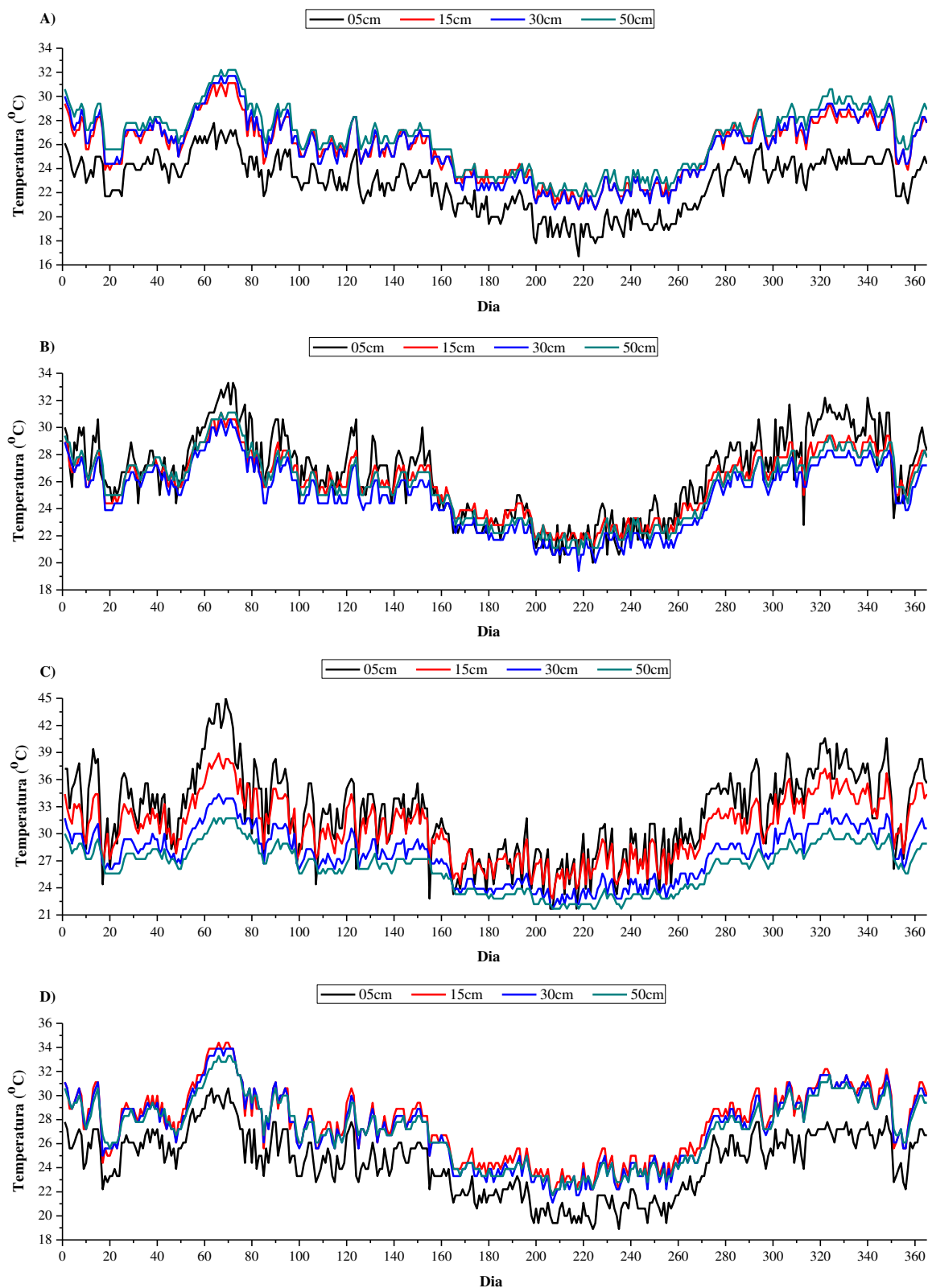
radiação solar, a temperatura da superfície do solo e de regiões adjacentes passa a apresentar um significativo aumento de suas magnitudes. No entanto, à medida que se avança em profundidade verifica-se que a variabilidade térmica tende a diminuir (variações bastante sutis), de modo que as temperaturas permanecem quase que constante ao longo dos ciclos diários na profundidade de 50cm. Portanto, como já havia sido destacado anteriormente para o ciclo anual, ambas apresentam-se novamente inversamente relacionadas (quanto maior a profundidade, menor será a variabilidade térmica diária e anual). Segundo Azevedo e Galvani (2003), quanto mais próximo da superfície, maior é a amplitude térmica e mais imediata é a resposta da temperatura do solo à incidência da radiação solar. De acordo com Gasparim et al. (2005), pode-se definir a profundidade de 20cm como a profundidade de transição entre as grandes e as pequenas variações da temperatura do solo. As regiões mais próximas a superfície apresentam maior amplitude térmica diária em decorrência da maior facilidade em ganhar (período diurno) e perder (período noturno) calor durante os ciclos diários.

As temperaturas mais elevadas observadas ao longo dos ciclos diários foram aquelas registradas em torno dos seguintes horários: 14 horas (profundidade de 5cm), 16 horas (profundidade de 15cm) e 18 horas (profundidade de 30cm). Em particular, para a profundidade de 50cm, estas foram registradas nas primeiras e últimas horas do ciclo diário. Oliveira et al. (2010), fazendo uso de dados obtidos em uma localidade relativamente próxima, verificaram que em regiões superficiais as máximas temperaturas são observadas entre as 13 e 14 horas. Ainda segundo estes autores, em profundidades intermediárias as máximas são observadas entre o fim da tarde e início da noite. Ao comparar à hora de ocorrência das máximas temperaturas do solo verifica-se, portanto, que estas não ocorrem simultaneamente ao longo de todo o perfil vertical. Este fenômeno está associado ao fato de que o solo exerce certa “resistência” a propagação de calor (quanto menor esta “resistência”, menor será a defasagem de ocorrência das temperaturas máximas), variando de acordo com as suas propriedades térmicas específicas. De acordo com Geiger (1980), esta mudança em comparação a região mais superficial é consequência do fluxo de calor no interior do solo ocorrer de maneira relativamente lenta.

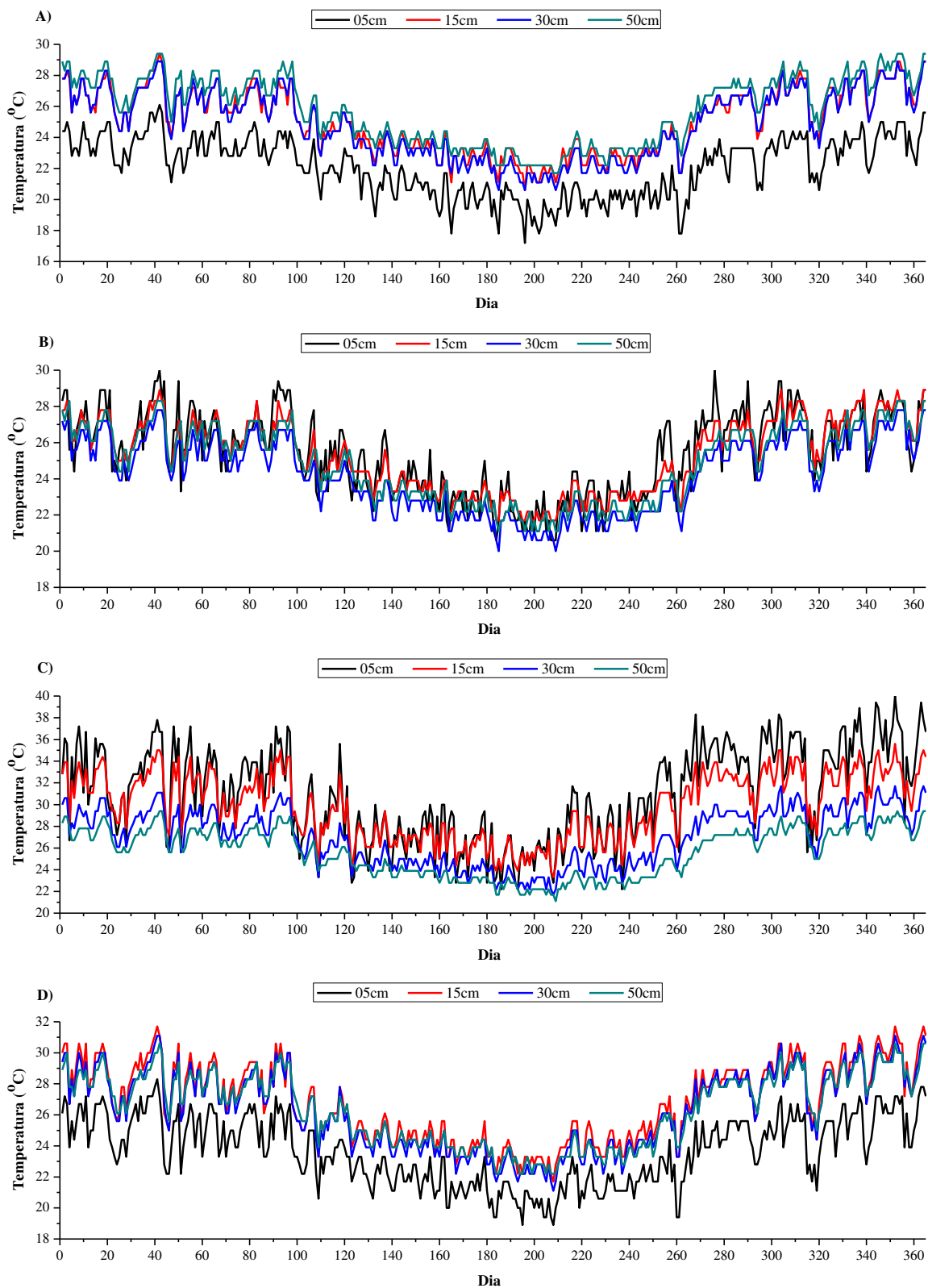
## **4.2 Temperatura horária**

Nesta seção, serão analisadas as características térmicas do solo, observadas em horas específicas do ciclo diário (6, 12, 18 e 24UTC). A Figura 8 e 9 apresenta, para estes horários e

aquelas profundidades, o comportamento térmico do solo referente ao ciclo anual de 2010 e 2011, respectivamente.



**Figura 8.** Temperatura do solo, referente ao ciclo anual de 2010, observada em diferentes profundidades e nos seguintes horários: 6 (A), 12 (B), 18 (C) e 24 (D) UTC.



**Figura 9.** Temperatura do solo, referente ao ciclo anual de 2011, observada em diferentes profundidades e nos seguintes horários: 6 (A), 12 (B), 18 (C) e 24 (D) UTC.

As características térmicas do solo observadas em horas específicas do ciclo diário, como já esperava-se mediante a análise realizada, são bastante semelhantes em ambos os anos de estudo. No entanto, características distintas podem ser observadas ao analisar separadamente cada caso exposto nas Figuras 8 e 9. Às 3 horas (Figura 8A e Figura 9A), verifica-se o aumento gradual das temperaturas do solo na medida em que se avança em profundidade, com as magnitudes mínimas e máximas sendo observadas em 5 e 50cm, respectivamente. Portanto, uma vez que o calor flui em direção as regiões de menor temperatura, se supõem que há nesse instante um fluxo ascendente de calor (gradiente térmico descendente). Segundo Galvani et al. (2001), este fenômeno é função da temperatura em diferentes níveis e da condutividade térmica do solo, sendo influenciado diretamente pela variação da primeira. Outro aspecto que merece destaque é o fato de que não há uma diferença significativa entre as temperaturas observadas nas profundidades de 15, 30 e 50cm (em geral, esta não ultrapassa 1°C). Logo, visto que este processo encontra-se diretamente relacionado ao gradiente térmico, o calor deve fluir de maneira mais significativa entre as profundidade de 5 e 15cm.

Às 9 horas (Figura 8B e Figura 9B), verifica-se que as temperaturas das regiões mais profundas do solo tendem a assumir uma menor magnitude em relação aquela observada anteriormente, uma vez que estas fornecem calor durante todo o período noturno as regiões mais superficiais na busca de alcançar o equilíbrio térmico. Em geral, verifica-se que as magnitudes máximas e mínimas passam a ser observadas nas profundidades de 5 e 30cm, respectivamente. A incidência de energia solar sobre a superfície é a responsável pelo aquecimento, mesmo que discreto até então, observado na profundidade de 5cm. Verifica-se, portanto, que o calor passa a fluir em sentido descendente. De acordo com Moura e Querino (2010), somente há um fluxo líquido descendente de calor a partir das 9 horas. Neste instante não há um gradiente térmico expressivo ao longo do perfil vertical do solo, as temperaturas não diferem de maneira significativa, de modo que se pode considerar que o fluxo de calor através deste é praticamente nulo.

A energia disponível para o aquecimento da superfície e de regiões adjacentes é quase que máxima às 15 horas (Figura 8C e Figura 9C), de modo que a temperatura das regiões mais superficiais encontra-se consideravelmente elevada nesta hora do dia. Diferem de modo significativo as temperaturas observadas nas profundidades de 5 e 50cm, chegando a ultrapassar em determinados momentos os 10°C. No entanto, em determinados períodos do ano esta diferença não é considerável, tendo em vista que certos fenômenos podem modificar significativamente o regime térmico diário do solo. Em virtude do elevado gradiente térmico

observado na maior parte dos ciclos diários, pode-se considerar que há neste instante um acentuado fluxo descendente de calor. Carneiro et al. (2014), com base em informações obtidas a partir de equipamentos destinados a mensurar o fluxo de calor no solo, verificaram que este é descendente entre as 11 e 17 horas. Segundo Moura e Querino (2010), independentemente da estação climática, este fluxo alcança uma magnitude máxima entre as 12 e 14 horas. As regiões mais profundas do solo não apresentam um aquecimento considerável ao longo dos ciclos diários, pois, quantidades significativas de calor são absorvidas ao longo do seu caminho de propagação e pelo fato deste fluir de maneira relativamente lenta. Desta forma, não há energia suficiente capaz de propiciar um aquecimento similar ao observado nas demais profundidades (em particular, aquelas próximas da superfície).

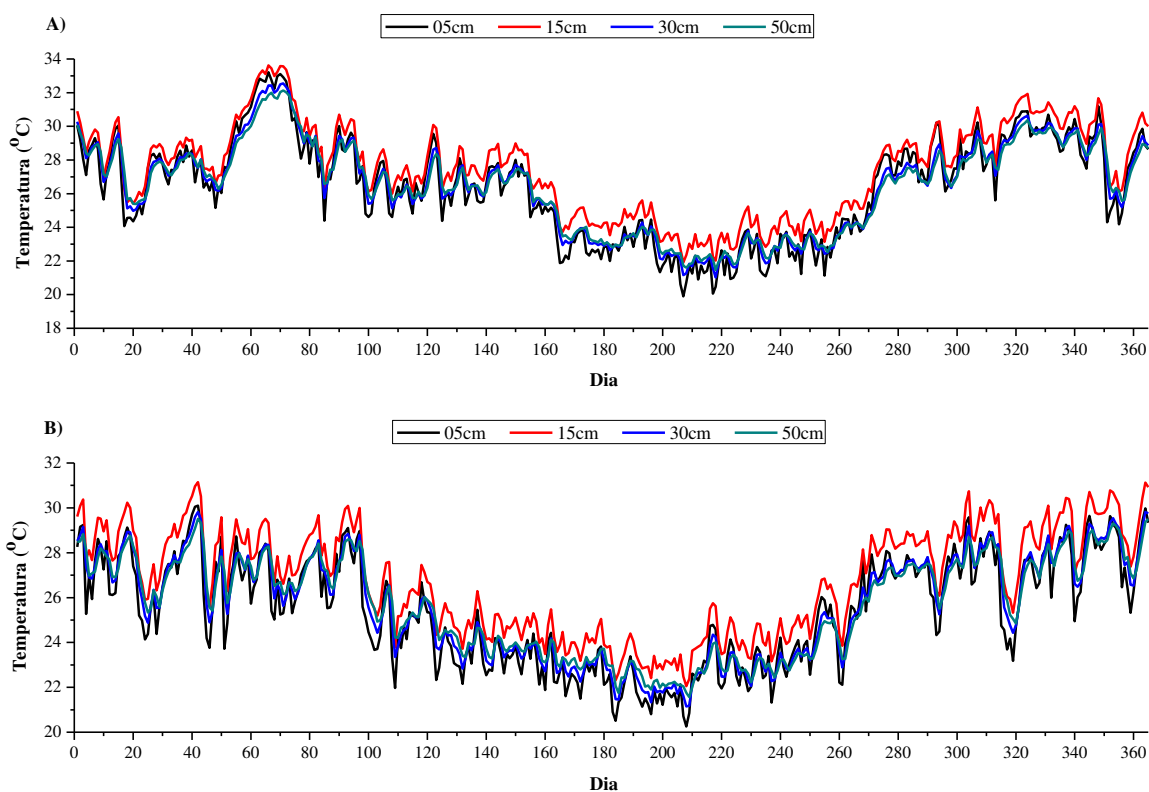
Após as 15 horas, devido ao decaimento da disponibilidade energética, observa-se a diminuição das temperaturas na profundidade de 5cm. Às 21 horas (Figura 8D e Figura 9D), já transcorreu tempo suficiente para que esta se arrefeça de maneira considerável, de modo que as menores temperaturas passam a ser novamente observadas nesta profundidade. No entanto, o tempo transcorrido não foi suficiente para o mesmo processo ser verificado na profundidade de 15 cm, de modo que neste horário as temperaturas desta profundidade são ligeiramente superiores as demais. Segundo Rao et al. (2005), durante todo o ciclo anual, as regiões mais próximas a superfície são as que apresentam menor temperatura neste horário. Com exceção daquelas associadas à profundidade de 5 cm, as magnitudes das temperaturas observadas nas demais profundidade são bastante semelhantes. O calor volta a fluir em sentido ascendente, nova inversão do gradiente térmico (sentido descendente), apresentando-se de modo mais significativo entre as profundidades de 5 e 15cm. Em geral, o comportamento térmico do perfil vertical do solo observado neste horário é significativamente semelhante aquele oriundo das 3 horas.

Em resumo, durante o período noturno as temperaturas de maior (menor) magnitude são aquelas observadas nas regiões mais profundas (superficiais), de modo que o fluxo de calor ocorre no sentido ascendente (gradiente térmico descendente). Durante o período diurno verifica-se a inversão do gradiente térmico, as temperaturas mais elevadas passam a ser aquelas das regiões próximas da superfície, de modo que o fluxo de calor passa a ocorrer no sentido descendente. Portanto, o sentido do gradiente térmico altera-se duas vezes ao longo do ciclo diário. Em geral, o comportamento térmico diário do solo segue um regime bem

definido (processo cíclico), podendo vir a ser alterado em decorrência da influência de determinados fatores externos.

### 4.3 Temperatura média diária

A Figura 10 apresenta as temperaturas médias do solo para os ciclos diários de 2010 e 2011.



**Figura 10.** Temperatura média diária do solo, referente a quatro profundidades distintas, observada ao longo dos seguintes ciclos anuais: 2010 (A) e 2011 (B)

Características semelhantes são facilmente perceptíveis a partir da análise da Figura 10A e Figura 10B. De modo geral, as magnitudes das temperaturas médias diárias do solo são bastante semelhantes para as diferentes profundidades. No entanto, apresentam-se ligeiramente superior as demais, aquelas oriundas da profundidade de 15 cm (em geral, esta superioridade não ultrapassa os 2°C). Este comportamento está associado ao fato desta região se aquecer de maneira considerável durante o período diurno (chega a assumir, no final da tarde, temperaturas superiores aquelas observadas na profundidade de 5 cm) e não apresentar um resfriamento significativo durante o período noturno (temperaturas próximas daquelas observadas nas profundidades de 30 e 50cm). As médias diárias referentes à profundidade de 5cm, devido ao significativo resfriamento observado durante o período noturno, tornam-se

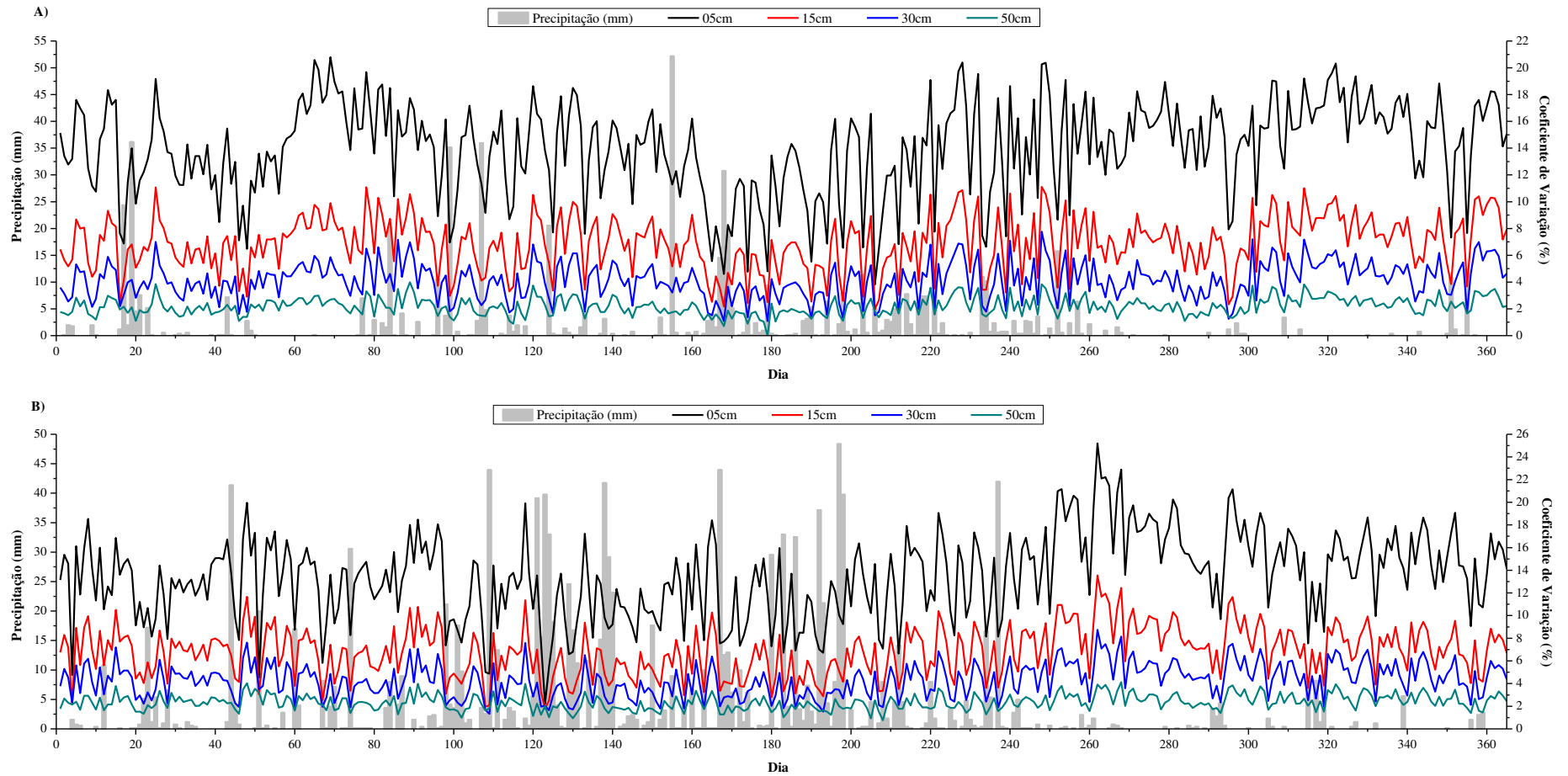
semelhantes aquelas oriundas das demais profundidades. Logo, para este caso específico, as médias diárias divergem de maneira considerável daquelas temperaturas observadas ao longo período diurno. As médias diárias referentes às regiões mais profundas, tendo em vista que as temperaturas apresentam baixa variabilidade diária, são muito similares aquelas observadas ao longo dos ciclos diários. Portanto, quanto mais próximo da superfície, maior a amplitude de flutuação das temperaturas em torno das respectivas médias diárias.

A todo instante, tendo em vista que o equilíbrio térmico nunca é alcançado, observa-se o fluxo de calor através do perfil vertical do solo. Por ser uma região intermediária, verifica-se o fluxo ininterrupto de calor através da profundidade de 15cm, propiciando que esta permaneça aquecida durante todo o ciclo diário. Durante o período diurno, em virtude das temperaturas mais elevadas serem observadas próximos da superfície, esta é aquecida pelo fluxo descendente de calor. Mesmo durante o período noturno, ocasião em que as temperaturas mais elevadas são aquelas observadas nas regiões mais profundas, verifica-se que esta continua sendo aquecida em consequência do fluxo ascendente de calor.

Em geral, ao comparar as magnitudes das temperaturas médias observadas em ambos os ciclos anuais, verifica-se uma nítida superioridade daquelas associadas ao ano de 2010. Neste caso específico, verifica-se que as médias diárias chegam a alcançar magnitudes em torno dos 34°C. Em contrapartida, com relação ao ano de 2011, observa-se que as máximas não ultrapassaram os 32°C. A causa desta diferença está relacionada ao total pluviométrico referente a ambos os ciclos anuais (a registrada para o ano de 2010 foi quase que a metade daquela precipitada em 2011). Como já mencionado, a ocorrência deste fenômeno faz com que o solo não se aqueça de maneira expressiva durante o período diurno, de modo que as médias associadas a estes ciclos diários são inferiores aquelas oriundas de dias ausentes de precipitação.

#### **4.4 Coeficiente de variação**

Segundo Diniz et al. (2013c), uma maneira eficaz de verificar a variabilidade diária das temperaturas do solo com relação aos respectivos valores médios é através da estimativa do coeficiente de variação (CV). A Figura-4 apresenta as magnitudes do coeficiente de variação das temperaturas do solo, referentes aos ciclos diários e profundidades de estudo, juntamente com os totais pluviométricos.



**Figura 11.** Total pluviométrico e coeficiente de variação da temperatura do solo, referente aos ciclos diários e profundidades em estudo, obtido a partir de dados coletados ao longo do ano de 2010 (A) e 2011 (B)



A partir do emprego desta ferramenta estatística constata-se que, de acordo com as análises realizadas anteriormente, a variabilidade diária das temperaturas do solo está inversamente relacionada à profundidade. As magnitudes do coeficiente de variação se elevam na medida em que se aproxima da superfície, conseqüência da elevada variabilidade térmica diária, de modo que as máximas foram registradas na profundidade de 5cm. Nesta profundidade, em determinados dias de ambos os anos, verifica-se que o coeficiente de variação chegou a ultrapassar os 20%. Em particular, no dia 262 (19 de setembro) do ano de 2011, a magnitude deste ultrapassou os 25%. Isto representa uma amplitude de variação, diferença entre a máxima diurna e a respectiva média diária, em torno dos 12°C. A amplitude média da variação diária da temperatura para esta profundidade foi de 7,11°C e 6,62°C para os anos de 2010 e 2011, respectivamente.

Conforme se avança em profundidade, visto que as temperaturas tendem a variar cada vez menos em torno das respectivas médias diárias, observa-se uma progressiva diminuição da magnitude do coeficiente de variação. De maneira geral, para ambos os anos de análise, a magnitude deste não ultrapassou os 11% e 7% para as profundidades de 15cm e 30cm, respectivamente. Com relação ao ano de 2010, a amplitude média da variação diária da temperatura foi de 3,32°C e 1,73°C para as profundidades de 15cm e 30cm, respectivamente. Para estas respectivas profundidades, as amplitudes referentes ao ano subsequente foi de 3,16°C e 1,74°C. Estes resultados estão de acordo com aqueles obtidos por Danelichen e Biudes (2011). A profundidade de 50cm, como já era esperado tendo em vista que as temperaturas dessa região permanecem quase que inalteráveis ao longo dos ciclos diários, é aquela que apresenta as mais baixas magnitudes do coeficiente de variação. Neste caso específico, para ambos os anos de análise, a magnitude deste não ultrapassou os 4%. A amplitude média da variação diária da temperatura para esta profundidade foi de 0,84°C e 0,88°C para os anos de 2010 e 2011, respectivamente.

Determinados fenômenos que ocorrem acima da superfície podem vir a alterar de maneira significativa o regime térmico diário do solo. Em geral, ainda com base na análise da Figura 10, verifica-se que a ocorrência da precipitação pluvial propicia a redução da variabilidade diária das temperaturas em todo o perfil vertical do solo (Diniz et al., 2013d). No entanto, não há uma relação direta entre o total pluviométrico e a magnitude do coeficiente de variação. A nebulosidade associada à precipitação impede que uma parcela significativa da energia solar incida na superfície, as nuvens absorvem e refletem boa parte desta energia, de modo que as variações diárias da temperatura do solo tendem a diminuir. A

água, em virtude da sua elevada capacidade calorífica, apresenta uma determinada resistência às mudanças de temperatura (HEWITT, 2011). Durante o período diurno esta absorve uma grande quantidade de calor sem exibir uma apreciável elevação de temperatura (na sua ausência esta energia seria em sua maioria utilizada para propiciar o aquecimento do solo), fazendo com que o este não se aqueça de maneira significativa. Durante o período noturno a água passa a fornecer calor para o solo, visto que as suas temperaturas permanecem elevadas (conseqüência da inércia térmica), de modo que o resfriamento deste é atenuado. Portanto, de acordo com o observado por Soares (2013), o solo com elevado teor de umidade apresenta uma variabilidade térmica diária inferior aquela que apresentaria estando seco. A nítida influência da precipitação pluvial no regime de temperatura do solo pode ser vista nos dias 168 e 123 dos anos de 2010 e 2011, respectivamente. Para todo o perfil vertical do solo verifica-se, mediante a análise da figura acima, uma significativa redução do coeficiente de variação. Portanto, para todo o perfil vertical, pode-se concluir que as temperaturas do solo permaneceram quase que inalteráveis ao longo destes ciclos diários.

#### **4.5 Difusividade térmica**

Os dados de temperatura foram utilizados para estimar a difusividade térmica diária média mensal do solo. Esta grandeza, mediante o emprego de métodos distintos, foi estimada para quatro camadas específicas do respectivo meio. Nas Tabelas 2 e 3 estão apresentados os valores obtidos a partir de dados coletados ao longo do ano de 2010 e 2011, respectivamente.

**Tabela 2.** Difusividade térmica diária média mensal do solo ( $\times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s), referente a quatro camadas específicas, estimada a partir de métodos distintos e de dados coletados ao longo do ano de 2010.

Mês	Método	Camadas (m)			
		0,05-0,15	0,15-0,30	0,30-0,50	0,05-0,50
Janeiro	Amplitude	0,75	2,57	2,51	1,80
	Arco Tangente	1,26	2,46	2,28	4,87
	Logarítmico	0,70	2,21	2,86	1,77
Fevereiro	Amplitude	0,83	2,72	3,56	2,16
	Arco Tangente	1,33	2,66	2,60	4,25
	Logarítmico	0,86	2,24	3,54	2,05
Março	Amplitude	0,76	2,68	2,80	1,90
	Arco Tangente	1,18	3,11	2,67	4,13
	Logarítmico	0,83	2,43	3,34	2,03
Abril	Amplitude	0,75	2,54	3,47	2,01
	Arco Tangente	1,30	2,53	2,26	4,79
	Logarítmico	0,70	2,46	3,70	1,99
Maio	Amplitude	1,02	2,47	2,65	2,01
	Arco Tangente	1,38	2,58	2,32	4,54
	Logarítmico	1,08	2,17	2,89	2,03
Junho	Amplitude	1,11	2,20	1,93	1,75
	Arco Tangente	1,98	2,61	1,72	4,83
	Logarítmico	1,09	1,96	2,07	1,73
Julho	Amplitude	1,00	2,49	3,12	2,13
	Arco Tangente	1,52	2,12	1,77	5,81
	Logarítmico	0,92	2,57	2,47	1,92
Agosto	Amplitude	1,09	2,59	3,19	2,24
	Arco Tangente	1,61	2,31	2,18	4,68
	Logarítmico	1,07	2,22	3,74	2,23
Setembro	Amplitude	0,87	2,54	3,15	2,05
	Arco Tangente	1,51	2,52	2,22	4,55
	Logarítmico	0,88	2,27	2,78	1,90
Outubro	Amplitude	0,59	2,05	2,88	1,62
	Arco Tangente	1,28	2,33	2,20	5,10
	Logarítmico	0,62	1,74	3,09	1,62
Novembro	Amplitude	0,92	2,91	3,04	2,15
	Arco Tangente	1,15	2,73	2,55	4,52
	Logarítmico	0,91	2,65	3,28	2,15
Dezembro	Amplitude	0,91	2,56	3,03	2,06
	Arco Tangente	1,53	2,78	2,27	4,29
	Logarítmico	1,01	2,28	3,17	2,09

**Tabela 3.** Difusividade térmica diária média mensal do solo ( $\times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s), referente a quatro camadas específicas, estimada a partir de métodos distintos e de dados coletados ao longo do ano de 2011.

Mês	Método	Camadas (m)			
		0,05-0,15	0,15-0,30	0,30-0,50	0,05-0,50
Janeiro	Amplitude	1,14	3,09	2,92	2,31
	Arco Tangente	1,59	2,70	1,91	4,79
	Logarítmico	1,17	2,88	2,99	2,30
Fevereiro	Amplitude	1,06	3,00	3,55	2,41
	Arco Tangente	1,66	2,54	1,97	4,74
	Logarítmico	1,07	2,46	4,04	2,38
Março	Amplitude	0,89	2,73	3,70	2,24
	Arco Tangente	1,97	2,75	1,83	4,53
	Logarítmico	1,05	2,46	4,00	2,35
Abril	Amplitude	1,03	2,66	4,09	2,42
	Arco Tangente	1,73	2,75	1,79	4,83
	Logarítmico	1,17	2,40	4,93	2,59
Maio	Amplitude	0,98	3,02	3,43	2,33
	Arco Tangente	1,63	2,48	1,50	5,98
	Logarítmico	1,13	2,38	3,87	2,36
Junho	Amplitude	0,92	2,74	4,21	2,37
	Arco Tangente	1,49	2,66	1,93	4,90
	Logarítmico	0,85	2,70	4,48	2,34
Julho	Amplitude	0,97	2,64	4,35	2,41
	Arco Tangente	1,66	2,74	1,33	6,31
	Logarítmico	0,94	2,45	3,14	2,08
Agosto	Amplitude	1,06	2,49	2,87	2,10
	Arco Tangente	1,89	3,02	1,34	5,67
	Logarítmico	1,05	2,23	2,67	1,97
Setembro	Amplitude	0,95	2,95	2,67	2,08
	Arco Tangente	1,72	3,21	2,19	3,97
	Logarítmico	0,96	2,60	2,65	2,00
Outubro	Amplitude	0,94	3,19	2,79	2,15
	Arco Tangente	1,71	3,40	2,33	3,76
	Logarítmico	0,99	2,81	2,83	2,13
Novembro	Amplitude	0,95	3,87	3,07	2,36
	Arco Tangente	1,55	3,42	2,22	3,99
	Logarítmico	0,89	3,54	3,15	2,28
Dezembro	Amplitude	0,74	4,04	3,28	2,23
	Arco Tangente	1,39	3,55	2,53	3,81
	Logarítmico	0,76	3,83	3,35	2,24

As estimativas da difusividade térmica do solo, expostas nas Tabelas 2 e 3, condizem com aquelas obtidas em demais pesquisas. Rao (1966), ao estudar o comportamento térmico de um solo arenoso vermelho com base em medições horárias oriundas de diferentes profundidades, obteve uma difusividade térmica média de  $0,58 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Williams e Gold

(1976), para solos argilosos e arenosos, obtiveram uma difusividade térmica variando de  $0,1 \times 10^{-6}$  a  $1,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Horton et al. (1983), para uma camada estendendo-se desde 0,01 até 0,10 metros de profundidade, obtiveram uma difusividade térmica variando de  $0,37 \times 10^{-6}$  a  $0,92 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Santos (1987), para uma camada estendendo-se desde 0,05 até 0,15 metros de profundidade, obteve uma difusividade térmica média igual a  $0,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Hinkel (1997), segundo o método da amplitude, obteve para duas localidades distintas uma difusividade térmica igual a  $1,5 \times 10^{-6}$  e  $2,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Silans et al. (1999), utilizando diferentes métodos, obtiveram uma difusividade térmica entre  $0,27 \times 10^{-6}$  a  $1,40 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Rao et al. (2005), para uma camada estendendo-se desde 0,05 até 0,50 metros de profundidade, obtiveram uma difusividade térmica igual a  $0,55 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Diniz et al. (2013e), para uma camada estendendo-se desde 0,1 até 0,2 metros de profundidade, obtiveram a partir dos métodos da amplitude e logarítmico uma difusividade térmica média igual a  $0,63 \times 10^{-6}$  e  $0,54 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente.

No que diz respeito à camada-1, com base na análise das Tabelas 2 e 3, verifica-se que as mais elevadas magnitudes da difusividade térmica são aquelas oriundas do método do arco tangente. Neste caso específico, de acordo com o observado por Rao et al. (2005), apresentaram-se bastante semelhantes as estimativas provenientes dos métodos da amplitude e logarítmico. Para todo o ano de 2010, ainda com relação à camada-1, observa-se que as mais elevadas magnitudes são aquelas associadas ao mês de Junho. Portanto, comparados aqueles referentes aos demais meses deste ano, pode-se concluir que os ciclos diários pertencentes a este mês possuíram em média maior capacidade de conduzir calor através desta camada particular do solo. Este resultado é consequência da elevada precipitação pluvial registrada neste mês (159,8 milímetros), o espaço poroso do solo passa então a ser preenchido por água, propiciando a esta maior capacidade de condução (vale ressaltar que a condutividade térmica da água é bastante superior a do ar). Uma vez que este fenômeno não foi observado nas camadas adjacentes, pode-se deduzir que a água não infiltrou de maneira considerável através do perfil vertical do solo.

Com relação à camada-2, para ambos os anos de análise, verifica-se que as mínimas magnitudes da difusividade térmica são aquelas oriundas do método do logarítmico. Não se pode destacar entre os demais métodos, visto que não há uma expressiva predominância, aquele que fornece as máximas magnitudes para esta camada. As estimativas referentes a esta, obtidas a partir dos métodos da amplitude e arco tangente, mostraram-se bastante semelhantes em determinados meses de ambos os anos. De maneira geral, em consequência do elevado

total pluviométrico, as mais elevadas magnitudes desta grandeza estão associadas ao ano de 2011. Com relação a este ano, ao contrário do que se esperava levando em consideração o total pluviométrico, as máximas não estiveram associadas ao mês de Maio (a precipitação deste superou significativamente a registrada nos demais meses). De acordo com Prevedello (1996), a difusividade térmica do solo eleva-se com o aumento do teor de umidade do solo, até alcançar certo valor máximo. A partir desse momento, a condutividade térmica do solo não mais se eleva com o aumento da umidade do solo e, por conseguinte, a difusividade térmica decresce.

Ao analisar as estimativas associadas à camada-3, para grande parte dos meses de ambos os anos, constata-se que as mais elevadas magnitudes são aquelas provenientes do método do logarítmico. Segundo os métodos da amplitude e logarítmico, ao comparar com as demais camadas, esta é a que apresenta maior capacidade de conduzir calor através de seu perfil vertical. No caso específico da camada-4, de modo similar a camada-1, as magnitudes mais elevadas são aquelas oriundas do método do arco tangente. No entanto, estas magnitudes são superiores as obtidas para as demais camadas a partir do emprego deste método. Por uma questão de lógica, visto que neste caso está sendo considerado todo o perfil vertical do solo, esperava-se que estas estivessem entre aquelas oriundas das demais camadas. Este aspecto é observado ao examinar as estimativas provenientes dos demais métodos. Portanto, com base na análise dos resultados, pode-se constatar que não são satisfatórias as estimativas obtidas a partir do método do arco tangente para a camada-4. O fato de está sendo considerada uma camada de espessura apreciável, visto que nas demais este se adéqua a estimativa desta grandeza, deve ser a principal causa deste erro. Bellaver (2010), ao estimar a difusividade térmica para uma camada mais espessa que as demais (estendendo-se desde 0,01 até 0,30 metros de profundidade), verificou que o método do arco tangente passou a superestimar a magnitude desta grandeza para todos os ciclos diários em estudo. Outro aspecto que merece destaque é o fato de que as estimativas associadas à camada-3 e camada-4, obtidas a partir do emprego dos métodos da amplitude e logarítmico, são novamente bastante semelhantes.

Em uma primeira análise das referidas tabelas, com exceção do caso particular associado à camada-4, não se pode determinar com exatidão o método que menos se adéqua a estimativa desta grandeza física. Uma maneira eficaz de determinar a precisão dos métodos empregados consiste em, fazendo uso das estimativas da difusividade térmica, simular as temperaturas para diferentes horários e profundidade do solo a partir da equação (40). Temperaturas próximas daquelas mensuradas indica que o método se adéqua a estimativa desta grandeza

física. As ferramentas estatísticas utilizadas, como mencionado anteriormente na metodologia, têm como objetivo indicar o quanto as temperaturas mensuradas se aproximam daquelas estimadas. As magnitudes destas, para cada profundidade e método empregado, são expostas na Tabela-4.

**Tabela 4.** Resultados obtidos a partir do emprego das seguintes ferramentas estatísticas: coeficiente de correlação “r”, índice de concordância “d” e índice de confiança “c”

Método	Ferramenta Estatística	Profundidade			
		05cm	15cm	30cm	50cm
Amplitude	r	0,9547	0,9757	0,9683	0,9752
	d	0,9763	0,9461	0,9796	0,9834
	c	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
Arco Tangente	r	0,9548	0,9754	0,9685	0,9883
	d	0,9769	0,9470	0,9797	0,9912
	c	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
Logarítmico	r	0,9548	0,9762	0,9757	0,9715
	d	0,9765	0,9465	0,9843	0,9812
	c	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo

Verifica-se, a partir da análise da Tabela 4, que as temperaturas simuladas estão fortemente correlacionadas aquelas mensuradas. Em particular, fazendo uso das estimativas oriundas do método do arco tangente para a profundidade de 50cm, obteve-se uma correlação superior a 98%. De acordo com o índice “d”, similarmente ao verificado por Otunla e Oladiran (2013), há uma concordância quase que perfeita entre as temperaturas simuladas e aquelas mensuradas. A concordância entre ambas, com exceção da profundidade de 15cm, encontra-se acima de 97%. Portanto, ambos os índices estatísticos indicam que as temperaturas simuladas são significativamente semelhantes aquelas mensuradas. Estes resultados, visto que a única variável necessária para simular as temperaturas são as magnitudes da difusividade térmica, demonstra que os métodos utilizados forneceram excelentes estimativas. O desempenho da equação (40), de acordo com o índice de confiança, é ótimo para a simulação da temperatura do solo. Portanto, mesmo sendo uma das maneiras mais simples de representar o regime térmico diário do solo para diferentes profundidades, mostrou-se bastante eficaz o emprego desta equação.

## 5. CONCLUSÕES

1. Verifica-se, para o período análise, uma variabilidade espaço-temporal bem definida das condições térmicas do solo;
2. A amplitude térmica diária do solo apresenta expressiva correlação com a ocorrência da precipitação pluvial;
3. O método do arco tangente, para o caso específico da camada compreendida entre 05 e 50cm de profundidade, não é adequado para a estimativa da difusividade térmica do solo;
4. As temperaturas simuladas, obtidas utilizando-se as estimativas da difusividade térmica do solo, são bastante semelhantes aquelas mensuradas em todas as profundidades.



## **6. RECOMENDAÇÕES**

1. Em trabalhos futuros deve-se utilizar uma maior amostra de dados, a fim de propiciar uma maior consistência e confiabilidade dos resultados;
2. De acordo com os resultados, para uma camada compreendida entre 05 e 50cm de profundidade, o método do arco tangente não deve ser empregado na estimativa da difusividade térmica;
3. Empregar na estimativa da difusividade térmica o método da condução-convecção, este engloba a transferência de calor mediante os processos de condução e convecção, com o objetivo de verificar se este fornece resultados mais satisfatórios;
4. Correlacionar a amplitude térmica diária do solo com a nebulosidade diurna ou transmitância atmosférica.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-HAMDEH, N. H. Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content. **Biosystems Engineering**, v. 86, n. 1, p. 97-102, 2003.

ALAM, M. M.; TOROFDER, G. S.; NAHAR, S. Influence of mulch under no-tillage on growth and yield of maize in slopes of Chittagong Hill tract. **Bangladesh Journal of Botany**, v. 22, p. 203-208, 1993.

ARAÚJO, T. S. **Influência de elementos meteorológicos sobre o desenvolvimento da alface em diferentes ambientes**. 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2008.

ARAÚJO, T. S.; FIDELES FILHO, J.; KUMAR, K. K.; RAO, T. V. R. Crescimento da alface-americana em função dos ambientes, épocas e graus-dias. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.5, n.4, p.441-449, 2010.

AZEVEDO, T. R.; GALVANI, E. Ajuste do ciclo médio mensal horário da temperatura do solo em função da temperatura do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n.2, p. 123-130, 2003.

AZOOZ, R. H.; LOWERY, B.; DANIEL, T. C. Tillage and residue management on corn growth. **Soil & Tillage Research**, v. 33, p. 215-227, 1995.

BELLAVER, V. **Difusividade térmica do solo em área monodominante de cambará no norte do Pantanal Matogrossense**. 2010. 70 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá. 2010.

BUSSIERE, F.; CELLIER, P. Modification of the soil-temperature and water content regimes by a crop residue mulch - experiment and modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 68, p. 1-28, 1994.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, p. 89-97, 1997.

CANECCHIO FILHO, V. **Administração técnica agrícola**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973.

CARNEIRO, R. G.; MOURA, M. A. L.; SILVA, V. P. R.; SILVA JUNIOR, R. S.; ANDRADE, A. M. D; 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.

CASTRO, O. M. **Preparo do solo para a cultura do milho**. Campinas: Fundação Cargill, 1989.

CENGEL, Y. A. Heat Transfer: A Practical Approach. 2<sup>a</sup> Ed. Boston: McGraw-Hill, 2002.

DANELICHEN, V. H. M.; BIUDES, M. S. Avaliação da difusividade térmica de um solo no norte do Pantanal. **Ciência e Natura**, v. 33, n. 2, p. 227-240, 2011.

DINIZ, J. M. T.; ALVINO, F. C. G.; SOUSA JÚNIOR, J. R.; WANDERLEY, J. A. C.; SOUSA, E. P.; MARACAJÁ, P. B. Características térmicas do solo de João Pessoa-PB. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 9, p. 69-74, 2013a.

DINIZ, J. M. T.; ARANHA, T. R. B. T.; SOUSA, E. P.; WANDERLEY, J. A. C.; SOUSA, E. P.; MARACAJÁ, P. B. Avaliação da difusividade térmica do solo de Campina Grande-PB-Brasil. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 9, p. 55-60, 2013b.

DINIZ, J. M. T.; CARNEIRO, R. G.; ALVINO, F. C. G.; SOUSA, E. P.; SOUSA, E. P.; SOUSA JÚNIOR, J. R. Avaliação do comportamento térmico diário do solo de Campina Grande-PB. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 9, p. 77-82, 2013c.

DINIZ, J. M. T.; RAFAEL, R. A.; FIDELES FILHO, J.; SOUSA JÚNIOR, J. R.; FERNANDES, A. A. Características térmicas do solo observadas em cidades distintas do estado da Paraíba. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 8, p. 117-126, 2013d.

DINIZ, J. M. T.; SOUSA, E. P.; WANDERLEY, J. A. C.; FIDELES FILHO, J.; MARACAJÁ, P. B. Variabilidade diária da temperatura do solo: Um estudo de caso. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 8, p. 01-06, 2013e.

DWYER, L. M.; HAYHOE, H. N.; CULLEY, J. L. B. Tillage effects on soil-temperature, shoot drymatter accumulation and corn grain yield. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 5, p. 85-99, 1995.

EVETT, S. R.; MATTHIAS, A. D.; WARRICK, A. W. Energy balance model of spatially variable evaporation from bare soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 6, p. 1604–1611, 1994.

FAROUKI, O. T. **Thermal properties of soils**. California: Trans Tech Publications, 1986.

FIDELES FILHO, J. **Estrutura térmica de solos do Nordeste do Brasil**. 1988. 85 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 1988.

FURLANI, C. E. A.; GAMERO, C. A.; LEVIEN, R.; SILVA, R. P.; CORTEZ, J. W. Temperatura do solo em função do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 375-380, 2008.

GAJRI, P. R.; ARORA, V. K.; CHAUDHARY, M. R. Maize growth responses to deep tillage, straw mulching and farmyard manure in coarse textured soils of NW India. **Soil Use and Management**, v. 10, p. 15-20, 1994.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; PEREIRA, A. B. Balanço de radiação e fluxo de calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado com pepineiro. **Bragantia**, v. 60, n.2, p. 139-147, 2001.

GAO, Z.; WANG, L.; HORTON, R. Comparison of six algorithms to determine the soil thermal diffusivity at a site in the Loess Plateau of China. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 6, p. 2247–2274, 2009.

GARDNER, C. M. K.; LARYEA, K. B.; UNGER, P. W. **Soil physical constraints to plant growth and crop production**. Rome: Land and Water Development Division, FAO, 1999.

GASPARIM, E.; RICIERI, R. P.; SILVA, S. L.; DALLACORT, R.; GNOATTO, E. Temperatura no perfil do solo utilizando duas densidades de cobertura e solo nu. **Acta Scientiarum**, v. 27, p. 107-115, 2005.

GEIGER, R. **Manual de micrometeorologia**. Lisboa: Calouste Gulbenkian, 1980.

GONCALVES, A. O.; FAGNANI, M. A.; PERES, J. G. Efeitos da cobertura do solo com filme de polietileno azul no consumo de água da cultura da alface cultivada em estufa. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 622-631, 2005.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 7<sup>a</sup> Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

HANKS, R. J. **Applied Soil Physics: Soil Water and Temperature Applications**. New York: Springer-Verlag, 1992.

HEWITT, P. G. **Física conceitual**. São Paulo: Bookman, 2011.

HILLEL, D. **Computer Simulation of Soil-Water Dynamics**. Ottawa: International Development Research Centre, 1977.

HILLEL, D. **Fundamentals of Soil Physics**. New York: Academic Press, 1980.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Massachusetts: Elsevier Science, 2004.

HINKEL, M. H. Estimating seasonal values of thermal diffusivity in thawed and frozen soils using temperature time series. **Cold Regions Science and Technology**, v. 26, n. 1, p. 1-15, 1997.

HOLMAN, J. P. Heat transfer. 10<sup>a</sup> Ed. Boston: McGraw-Hill, 2010.

HORTON, R.; WIERENGA, P. J.; NIELSEN, D. R. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, n. 1, p.25-32, 1983.

JACOMINE, P. K. T. **Solos sob caatingas: características e uso agrícola**. In: ALVAREZ, V. V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996.

JOHNSON, M. D.; LOWERY, B. Effect of three conservation tillage practices on soil temperature and thermal properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, p. 1547-1552, 1985.

LAL, R.; SHUKLA, M. K. **Principles of soil physics**. New York: Marcel Dekker, 2004.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

MOTA, F. S. **Meteorologia agrícola**. São Paulo: Nobel S/A, 1983.

MOURA, M. A. L.; QUERINO, C. A. S. Variação sazonal do fluxo de calor no solo dentro de um manguezal tropical. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 296-302, 2010.

NERPIN, S. V.; CHUDNOVSKII, F. **Physics of the soil**. Jerusalem: Keter Press. 1967.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

OLIVEIRA, M. L.; RUIZ, H. A.; COSTA, L. M.; SCHAEFER, C. E. G. R. Flutuações de temperatura e umidade do solo em resposta à cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 535-539, 2005.

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**, v. 27, n. 2, p. 179-189, 2010.

OTUNLA, T. A.; OLADIRAN, E. O. Evaluation of soil thermal diffusivity algorithms at two equatorial sites in West Africa. **Annals of Geophysics**, v. 56, n. 1, p. 1-12, 2013.

PEDRON, F. A. **Mineralogia, morfologia e classificação de saprolitos e neossolos derivados de rochas vulcânicas no Rio Grande do Sul**. 2007. 160 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2007.

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

RAO, T. V. R. **Heat flow into the soil**. 1966. 123 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia e Oceanografia) - Andhra University, Waltair. 1966.

RAO, T. V. R.; SILVA, B. B.; MOREIRA, A. A. Características térmicas do solo em Salvador, BA. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 554-559, 2005.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004.

SANTOS, R. C. **Propriedades térmicas do solo: um estudo de casos**. 1987. 133 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1987.

SAUER, T. J. **Heat flux density**. Soil Science Society of America: Madison, 2002.

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

SILANS, A. M. B. P.; MONTENY, B. A.; LHOMME, J. P. Apparent soil thermal diffusivity, a case study: Hapex-Sahel experiment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 81, n. 3-4, p. 201-216, 1999.

SILANS, A. P.; SILVA, F. M.; BARBOSA, F. A. R. Determinação in loco da difusividade térmica num solo da região de caatinga (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 41-48, 2006.

SOARES, W. A. Análise Comparativa do Fluxo de Calor no Solo em Profundidade e na Superfície. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 665-679, 2013.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. São Paulo: Makron Books, 1993.

TITO, G. A.; CHAVES, L. E. G.; CARVALHO, H. O.; AZEVEDO, N. C. Aplicação de bentonita em um regossolo eutrófico. II. Efeitos sobre as propriedades químicas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.1, p.25-27, 1997.

VAN BAVEL, C. H. M. **Composition of soil atmosphere**. In: **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965.

VAN BAVEL, C. H. M.; HILLEL, D. **A simulation study of soil heat and moisture dynamics as affected by a dry mulch**. San Francisco: Simulation Councils, 1975.

VAN BAVEL, C. H. M.; HILLEL, D. Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat. **Agricultural Meteorology**, v. 17, n. 6, p. 453-476, 1976.

VAN WIJK, W. R. **Physics of plant environment**. Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1963.

WILLIAMS, G. P.; GOLD, L. W. **Ground temperatures**. Ottawa: Canadian Building Digest, 1976.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.8995-9005, 1985.

ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; SANTOS, M. R. Modelagem da infiltração em solos com encrostamento superficial. Parte II: Condutividade hidráulica variando no tempo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 471–479, 2012.