



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**SAULO HENRIQUE DOS SANTOS ESTEVES**

**BALANÇO HÍDRICO NO SOLO CULTIVADO COM A CULTURA DA CUNHÃ**  
**(*Clitoria ternatea* L.) SOB RECARGA NATURAL**

**FORTALEZA**  
**2019**

SAULO HENRIQUE DOS SANTOS ESTEVES

BALANÇO HIDRICO NO SOLO CULTIVADO COM A CULTURA DA CUNHÃ (*Clitoria ternatea* L.) SOB RECARGA NATURAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

E84b Esteves, Saulo Henrique dos Santos.  
Balanço Hídrico no solo cultivado com a cultura da cunhã (*Clitoria ternatea* L.) sob recarga natural /  
Saulo Henrique dos Santos Esteves. – 2019.  
59 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa.

1. Drenagem. 2. Evapotranspiração. 3. *Clitoria ternatea* L. I. Título.

CDD 630

---

SAULO HENRIQUE DOS SANTOS ESTEVES

BALANÇO HIDRICO NO SOLO CULTIVADO COM A CULTURA DA CUNHÃ (*Clitoria ternatea* L.) SOB RECARGA NATURAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Aprovada em: 23/08/2019.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Alexandro Oliveira da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Rubens Sonsol Gondim  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)

A Deus, nosso Pai que nos protege, o Grande  
Engenheiro; Jesus Cristo, nosso Salvador; e ao  
Santo Espírito, consolador. Unos em intento!  
À minha amada esposa!

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Doutor Raimundo Nonato Távora Costa, pelo grande exemplo e zelo durante minha trajetória na Engenharia Agrícola. À colega Larissa Lopes, participe do experimento, grande guerreira! Sem ela, tudo teria sido muito mais difícil!

Aos professores da banca examinadora desta pesquisa, pelo tempo empregado e pela dedicação na revisão.

Aos demais professores, servidores e colegas do programa, pelos momentos de aprendizado e crescimento. Aos outros professores que tive, pela preparação para chegar até aqui.

Aos meus pais, demais familiares e amigos, seus apoios e atenção são imprescindíveis na minha vida!

“Águas escuras dos rios que levam a fertilidade ao sertão.

Águas que banham aldeias e matam a sede da população” (ARANTES, 1983).

## RESUMO

A cunhã (*Clitoria ternatea* L.) é uma leguminosa perene, cultivada como forrageira rica em proteínas e bem adaptada ao clima quente e semiárido. O balanço de água no solo é importante para determinar a disponibilidade hídrica e possibilitar a produção vegetal, racionalizando o uso de recursos. Objetivou-se quantificar e analisar os componentes do balanço hídrico para a cultura da cunhã em um modelo físico de campo, em área com declive e sob condições de recarga natural. Na parcela experimental foram instaladas duas baterias de tensiômetros em diferentes profundidades, para calcular os potenciais mátricos e totais, teor de umidade e percolação. Também foi monitorado o escoamento superficial. Utilizaram-se dados agrometeorológicos para a precipitação e cálculo da evapotranspiração de referência. A precipitação durante o experimento foi 365,2 mm. No período analisado, o movimento vertical de água no solo ocorreu sempre no sentido descendente. As saídas de água acumuladas foram: drenagem profunda (64,33 mm), escoamento superficial (76,1 mm) e a evapotranspiração (224,77 mm). Apesar de difícil medição, a drenagem profunda e superficial representou aproximadamente 40% das saídas de água do solo, evidenciando que não deve ser desconsiderada. As condições adotadas permitiram um escoamento superficial menor que a referência (30%), indicando menor erosão. A cunhã não sofreu com estresse por déficit hídrico, sendo a evapotranspiração a principal componente de saída. As demais componentes de saídas apresentaram-se percentualmente significativas, indicando que, se ignoradas, existe risco de sobre estimativa da água disponível no solo.

**Palavras-chave:** *Clitoria ternatea* L.. Drenagem. Evapotranspiração.

## ABSTRACT

The butterfly pea (*Clitoria ternatea* L.) is a perennial legume, grown as a protein rich forage and well adapted to the warm and semi-arid climate. Soil water balance is important for determining water availability and enabling crop production, streamlining the use of resources. The objective of this study was to quantify and analyze the water balance components for the butterfly pea crop in a physical field model, in sloping area and under natural recharge conditions. In the experimental plot two tensiometer batteries were installed at different depths to calculate the total and matric potentials, moisture content and percolation. Surface runoff was also monitored. Agrometeorological data were used for precipitation and calculation of reference evapotranspiration. Precipitation during the experiment was 365.2 mm. In the analyzed period, the vertical movement of water in the ground always occurred in the downward direction. The accumulated water outlets were: deep drainage (64.33 mm), runoff (76.1 mm) and evapotranspiration (224.77 mm). Although difficult to measure, deep and superficial drainage accounted for approximately 40% of soil water outlets, showing that it should not be disregarded. The adopted conditions allowed a smaller runoff than the reference (30%), indicating less erosion. The butterfly pea did not suffer from stress due to water deficit, with evapotranspiration being the main output component. The other components of outlets were percentage significant, indicating that if ignored, there is a risk of overestimation of available water in the soil.

**Keywords:** *Clitoria ternatea* L.. Drainage. Evapotranspiration.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Normais meteorológicas da temperatura e das precipitações na cidade de Fortaleza-CE .....	19
Figura 2 – Modelo físico para estudo de balanço hídrico no solo .....	31
Figura 3 – Variação dos potenciais totais de água no solo às profundidades de 0,30 e 0,50 m .....	42
Figura 4 – Variação da umidade no solo à profundidade de 0,40 m .....	43
Figura 5 – Variação do potencial mátrico às profundidades de 0,1 m; 0,3 m; 0,4 m e 0,5 m .....	44
Figura 6 – Variação das lâminas de água no solo durante o balanço hídrico .....	45
Figura 7 – Variação do gradiente de potencial total de água no solo à profundidade de 0,4 m .....	46
Figura 8 – Variação da densidade de fluxo com o tempo durante o balanço hídrico .....	47
Figura 9 – Relação entre escoamento superficial e precipitação .....	49
Figura 10 – Relação entre evapotranspiração de referência ETo e precipitação .....	50
Figura 11 – Evapotranspiração da cultura durante o período do experimento .....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos físico-hídricos do solo da área do experimento .....	32
Tabela 2 – Dados de precipitação durante a condução do experimento .....	41
Tabela 3 – Potenciais totais da água no solo (cm de água) nas profundidades de 0,30 m e 0,50 m .....	42
Tabela 4 – Valores de escoamento superficial registrados durante o experimento .....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	grau Celsius
A	armazenamento de água no solo; área
AC	ascensão capilar
ANA	Agência Nacional de Águas
Aw	Clima Tropical com Estação Seca
CAD	capacidade de água disponível
CC	capacidade de campo
CE	Ceará
CEa	condutividade elétrica da água de irrigação
cm	Centímetro
CO <sub>2</sub>	Gás Carbônico ou Dióxido de Carbono
col.	Coletor
d	diferencial (duas variáveis)
DP	drenagem profunda
dS	Decisiemens
e	densidade de fluxo de evapotranspiração
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ET	Evapotranspiração
ETc	evapotranspiração da cultura
ETo	evapotranspiração de referência
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> , Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FBN	fixação biológica de nitrogênio
h	Altura
hg	altura da coluna de mercúrio
Hg	Mercúrio
i	densidade de fluxo de irrigação; índice do termo inicial (no somatório)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
K	condutividade hidráulica do solo
Kc	coeficiente de evapotranspiração da cultura
km	Quilômetro

L	unidade linear
LE	lâmina de escoamento
m	Metro
mm	Milímetro
N	Nitrogênio
N <sub>2</sub> O	Óxido Nitroso
P	Precipitação
p	densidade de fluxo de precipitação
parc.	Parcela
PMP	ponto de murcha permanente
Prec.	Precipitação
Q <sub>L</sub>	quantidade de água que passa através do limite inferior do volume do solo
q	densidade de fluxo de drenagem profunda ou ascensão capilar
R	escoamento superficial
r	densidade de fluxo de escoamento superficial
superf.	Superficial
T	Transpiração
t	Tempo
UFC	Universidade Federal do Ceará
Z ou z	Profundidade

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
$\psi_T$	Potencial total de água no solo
$\psi_m$	Potencial mátrico
$\theta$	Umidade do solo
$\Delta$	Delta
$\Sigma$	Somatório
$\pm$	Mais ou menos
$\int$	Integral
$\delta$	Diferencial (várias variáveis)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
<b>2.1</b>	<b>Clima semiárido</b> .....	17
<b>2.2</b>	<b>Secas</b> .....	18
<b>2.3</b>	<b>Distribuição das chuvas durante o ano</b> .....	19
<b>2.4</b>	<b>Importância da água para a atividade agrícola</b> .....	19
<b>2.4.1</b>	<i>Efeito do estresse de déficit hídrico nas culturas agrícolas</i> .....	20
<b>2.5</b>	<b>Fatores relevantes para a produtividade agrícola</b> .....	21
<b>2.6</b>	<b>Agricultura de sequeiro</b> .....	25
<b>2.7</b>	<b>Forragicultura</b> .....	25
<b>2.8</b>	<b>Balanco hídrico no solo</b> .....	25
<b>2.8.1</b>	<i>Precipitações</i> .....	26
<b>2.8.2</b>	<i>Movimento vertical de água no solo</i> .....	26
<b>2.8.3</b>	<i>Escoamento Superficial</i> .....	27
<b>2.8.4</b>	<i>Evapotranspiração</i> .....	27
<b>2.8.4.1</b>	<i>Estimativas de evapotranspiração</i> .....	27
<b>2.8.5</b>	<b>Irrigação</b> .....	29
<b>2.8.5.1</b>	<i>Estratégias de irrigação</i> .....	29
<b>2.8.5.1.1</b>	Irrigação com déficit .....	29
<b>2.8.5.1.2</b>	Irrigação de salvação .....	29
<b>2.8.5.1.3</b>	Irrigação suplementar .....	30
<b>2.8.6</b>	<i>Armazenamento de água no solo</i> .....	30
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	31
<b>3.1</b>	<b>Caracterização da área do experimento</b> .....	31
<b>3.2</b>	<b>Modelo físico para estudo do balanço hídrico de cultura</b> .....	32
<b>3.3</b>	<b>O método do balanço hídrico</b> .....	33
<b>3.4</b>	<b>Componentes do balanço hídrico</b> .....	36
<b>3.4.1</b>	<i>Precipitação</i> .....	36
<b>3.4.2</b>	<i>Armazenamento de água</i> .....	36
<b>3.4.3</b>	<i>Potencial mátrico</i> .....	36
<b>3.4.4</b>	<i>Drenagem profunda ou ascensão capilar</i> .....	37

3.4.5	<i>Condutividade hidráulica</i> .....	38
3.4.6	<i>Gradiente de potencial total da água no solo</i> .....	38
3.4.7	<i>Escoamento superficial</i> .....	38
3.4.8	<i>Evapotranspiração de referência</i> .....	39
3.4.9	<i>Evapotranspiração da cultura</i> .....	40
3.4.10	<i>Coefficiente de cultura</i> .....	40
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	41
4.1	<b>Recarga natural</b> .....	41
4.2	<b>Análise de componentes do balanço hídrico</b> .....	41
4.2.1	<i>Potenciais totais da água no solo</i> .....	41
4.2.2	<i>Umidade do solo e potencial mátrico</i> .....	43
4.2.3	<i>Gradiente de potencial total da água no solo</i> .....	45
4.2.4	<i>Escoamento superficial</i> .....	47
4.2.5	<i>Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>)</i> .....	49
4.2.6	<i>Evapotranspiração da Cultura (ET<sub>c</sub>)</i> .....	50
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	52
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	53

## 1 INTRODUÇÃO

A presente pesquisa trata sobre uma análise dos diversos componentes de um balanço hídrico em uma área com declive em que se desenvolveu a cultura da cunhã (*Clitoria ternatea L.*) em regime de recarga natural de água (sequeiro). Neste primeiro capítulo, será apresentada a relevância, problematização, hipótese e objetivos deste estudo.

A cunhã (*Clitoria ternatea L.*) é uma leguminosa perene, sendo cultivada como forrageira rica em proteínas (26%). Possui boa palatabilidade e bom valor nutritivo, sendo bem adaptada ao clima quente e semiárido do Nordeste do Brasil, devido à sua adaptabilidade e resiliência sob condições de seca, e seu potencial de regeneração logo após o início do período chuvoso (ABREU *et al.*, 2014).

As culturas agrícolas possuem sua produtividade diretamente relacionada à quantidade de água disponível para elas, podendo sofrer estresse hídrico relacionado tanto à sua falta quanto ao seu excesso (MARCHIORETTO *et al.*, 2018). A qualidade da água também assume um papel fundamental na produção vegetal (HARTER; HARTER; MENEGHELLO, 2018).

Desta maneira, o conhecimento da dinâmica do solo e da planta pode influenciar a forma como o produtor rural trabalha, contribuindo para adoção de técnicas específicas e a racionalização do uso de recursos naturais ou de capital. O manejo antrópico influencia de forma substancial no desenvolvimento de culturas (BATISTA *et al.*, 2018), e, deste modo, o planejamento da irrigação interfere no uso de recursos e em diversos pontos do desenvolvimento, incluindo: sistema radicular, captação de nutrientes, dentre outros. Berk (2018) afirma que a atividade agropecuária quando bem administrada melhora a qualidade de vida de trabalhadores e produtores rurais, diminuindo o êxodo rural.

O balanço de água no solo e a estimativa de evapotranspiração são muito importantes para que se possa determinar a disponibilidade hídrica para possibilitar o desenvolvimento da produção vegetal (SILVA *et al.*, 2015).

A intervenção feita por produtores rurais interfere na demanda hídrica, mostrando que diversos aspectos que costumam ser ignorados por manuais de irrigação interferem na evapotranspiração, incluindo a poda de plantas para a diminuição do volume da copa (PEREIRA; CAMARGO; VILLA NOVA, 2011).

O termo balanço hídrico se refere à contabilidade de entradas e saídas de água num volume de controle de solo, num determinado intervalo de tempo. Dentre os diversos componentes que envolvem esse balanço, a percolação, representada pelas perdas de água

para além do limite da zona radicular da cultura e o escoamento superficial, têm sido desprezados em muitos estudos, pelas dificuldades que envolvem suas estimativas sob condições naturais de campo. A quantificação desses componentes do balanço hídrico é fundamental quanto ao fornecimento de subsídios a pesquisas envolvendo a lixiviação de elementos químicos no solo e poluição de água subterrânea.

Os custos incorridos para quantificar variáveis de entrada para modelos complexos baseados em processos disponíveis geralmente incentivam a busca de abordagens alternativas (GHARUN *et al.*, 2015). Desta forma, é necessário criar modelos simples de avaliação dos sistemas agrícolas e naturais.

Outro fator relevante é que, ao se conhecer melhor a dinâmica da água no solo, torna-se possível melhorar a eficiência dos sistemas de irrigação, possibilitando um uso mais adequado da água para o atendimento das demandas hídricas das culturas. Para a economia de água, é importante o foco na irrigação, pois os usos rurais consomem 61% da água do Brasil e, neste, quase 90% se dá para a irrigação. No mundo inteiro, mais de 70% da água consumida é para a agropecuária (ANA, 2015). As conclusões encontradas neste artigo também visam facilitar que o método do balanço hídrico no solo possa ser utilizado na agricultura irrigada.

Esta investigação tem como problematização a seguinte pergunta de partida: a complexidade da metodologia do balanço hídrico e o elevado número de variáveis envolvidas permitem uma estimativa aceitável para a componente de saída do modelo: a evapotranspiração da cultura? E este estudo parte da hipótese a seguir: os valores de evapotranspiração da cultura estimados pelo método do balanço hídrico permitem o cálculo do coeficiente de evapotranspiração da cultura para o período analisado.

A pesquisa teve como objetivo geral quantificar e analisar os componentes do balanço hídrico para a cultura da cunhã (*Clitoria ternatea L.*) em um modelo físico de campo em área com declive sob condições de recarga natural. Especificamente, teve os seguintes objetivos: - Analisar a influência do cultivo em linhas transversais ao fluxo de água, como ferramenta de atenuação da erosão hídrica; - Correlacionar a precipitação com outros fatores relacionados ao balanço hídrico.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda pesquisas realizadas por diversos autores sobre os temas abordados. Também demonstra o estado da arte em relação à seca, clima semiárido, distribuição de chuvas durante o ano, a importância da água para a atividade agrícola, tipos de agricultura e o balanço hídrico no solo. Serão abordados principalmente artigos científicos sobre os respectivos temas, buscando-se também apresentar as tendências relativas aos temas pesquisados. Em suma, é o subsídio teórico para a análise do balanço hídrico investigado neste trabalho.

### 2.1 Clima semiárido

Apesar do clima em Fortaleza-CE ser tropical úmido e não semiárido, alguns elementos meteorológicos são similares com o restante do Ceará, por exemplo, a distribuição de chuvas e a ocorrência de veranicos, podendo haver algumas inferências entre as pesquisas entre ambos os locais, pois são relevantes os estudos e discussões que auxiliem na convivência com o semiárido e seus períodos secos. No entanto, as precipitações médias em Fortaleza-CE são maiores e suas temperaturas mais amenas (INMET, 2019).

O clima semiárido apresenta longos períodos de estiagem ou de baixa intensidade pluviométrica, má distribuição das chuvas, temperaturas médias altas e sem grande amplitude térmica. Seus solos tendem a ter poucos nutrientes. O desenvolvimento vegetal nos ecossistemas semiáridos é bastante afetado pelos períodos de chuva e pela presença de água (BALDWIN *et al.*, 2013).

O semiárido ocupa 1.542.000 km<sup>2</sup>, cerca de 11% do território brasileiro, abrangendo os seguintes estados: Bahia, Ceará, Alagoas, Piauí, Paraíba, Pernambuco, Sergipe, Rio Grande do Norte e Minas Gerais. Seu bioma principal é a caatinga, com vegetação xerófila predominante. Em função da escassez hídrica, historicamente, sua atividade econômica (especialmente sua agropecuária) tem dificuldades, havendo uma relação entre esse fator e diversos problemas sociais, tais como: pobreza, analfabetismo, emigração, dentre outros. Além disso, a região também sofre ameaça de uma crescente desertificação, em função das mudanças climáticas e do manejo de sua terra (MARENGO *et al.*, 2018; VIEIRA *et al.*, 2015).

## 2.2 Secas

São constantes as notícias relacionadas às secas, elas envolvem diversos incômodos e ameaças para os afetados, extrapolando os limites da zona rural. Além das perdas de produções vegetais e animais pelas faltas de chuvas e seus prejuízos derivados, as cidades também sofrem riscos de desabastecimento e de racionamentos.

Acredita-se que a mudança climática aumentará a frequência e a intensidade das secas globalmente, com consequências significativas para as culturas agrícolas. Este fenômeno também faz alternar entre secas maiores e fortes chuvas. Por sensoriamento remoto, observaram-se maiores proporções de proporções de plantas C3 e C4 e menores proporções de vegetação lenhosa na paisagem local durante a seca e o contrário em períodos chuvosos (KATH *et al.*, 2019).

Shamshirband *et al.* (2015) alegam que análises de regiões secas precisam de dados históricos de longo prazo para garantir estimativas confiáveis de índices de seca. Vários índices têm sido usados para medir diferentes características de seca, dependendo dos objetivos da pesquisa. Ele usou três diferentes algoritmos, tendo verificado a utilidade dos métodos de agrupamento para a regionalização da seca.

Gharun *et al.* (2015) afirmam que o consumo da água das árvores é um componente importante do balanço hídrico em áreas de floresta semiárida, já que mais de 80% das precipitações podem ser usadas por árvores que ocupem maiores áreas.

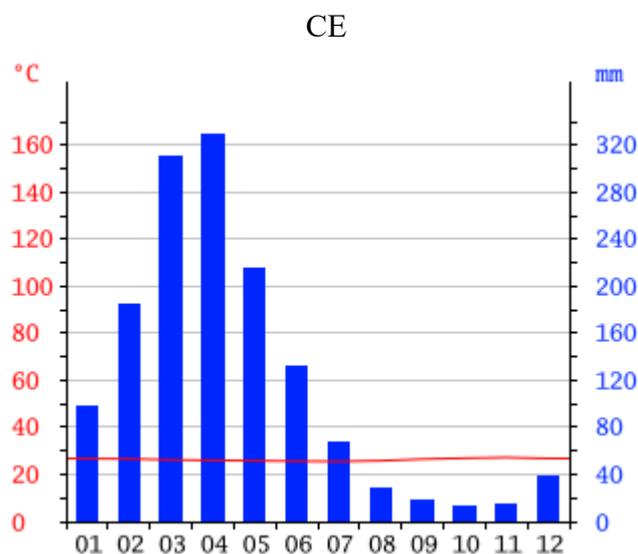
A seca é um dos desastres naturais mais caros, mas menos compreendidos. Índices integrados de seca baseados em sensoriamento remoto têm o potencial de descrever as condições de seca de forma abrangente, e a análise combinada de múltiplos critérios é cada vez mais usada para apoiar a avaliação da seca. No entanto, os métodos de combinação multicritério convencionais e a maioria dos índices de seca integrados existentes não representam adequadamente a variabilidade espacial. Um índice que pode ser amplamente usado para monitoramento de secas em todas as regiões climáticas seria de grande valor para o gerenciamento de ecossistemas (JIAO *et al.*, 2019).

Percebe-se que o fenômeno da seca demanda estudos continuados sobre sua ocorrência, seus desdobramentos e como é possível conviver com seus efeitos.

### 2.3 Distribuição das chuvas durante o ano

À semelhança do semiárido brasileiro, em Fortaleza-CE, as chuvas são irregulares ao longo do ano, apresentando um período chuvoso e outro seco bem definidos, cujo comportamento pode ser observado na figura 1 (INMET, 2019).

Figura 1 – Normais meteorológicas da temperatura e das precipitações na cidade de Fortaleza-CE



Fonte: adaptado de INMET (2019).

Silva *et al.* (2011a) apontam que há uma grande variabilidade pluviométrica entre as diversas cidades do semiárido brasileiro. E ainda: quanto menores os valores de precipitação, mais alto tende a ser o coeficiente de variação das intensidades de chuva. Nesta região, as precipitações são concentradas no primeiro semestre do ano, em sua maior parte. Apesar de alguns padrões percebidos, os coeficientes de autocorrelação revelam uma grande aleatoriedade no comportamento da precipitação pluvial no Nordeste do Brasil.

### 2.4 Importância da água para a atividade agrícola

Inicia-se este estudo com a apresentação de como fatores climáticos influenciam no contexto sócio-econômico de regiões agrícolas. Silva *et al.* (2018a) afirmam que parâmetros climáticos como a temperatura, a intensidade e a frequência das chuvas influenciam bastante a demanda de água para irrigação. Os eventos meteorológicos são ainda mais importantes em regiões cuja economia tem base agrícola. Deste modo, períodos de estiagem ou de excesso de chuva são prejudiciais para a atividade. Verificou-se que é

importante simular e planejar a demanda hídrica para a irrigação, visando que este recurso não falte e minimizar o impacto antrópico. Contudo, percebeu-se que, com o tempo, há uma tendência de diminuição da demanda de água para a irrigação.

A aplicação da água em culturas agrícolas não deve ser aleatória. É necessário atender adequadamente as demandas apresentadas para o desenvolvimento vegetal. Silva *et al.* (2018b) analisam a importância de dotar as plantas das lâminas corretas de água e em momentos adequados, sem deixar de considerar seu estado fenológico em todo o ciclo produtivo. Deste modo, a irrigação pode contribuir para a máxima produtividade. Foram aplicadas cinco lâminas de irrigação para a cultura do pimentão, sendo 50, 75, 100, 125 e 150% da evapotranspiração da cultura - ETC. Em todos os casos, o efeito da água aplicada na irrigação foi percebido, sendo possível encontrar uma parábola que correlaciona a lâmina aplicada com a produtividade.

A relação entre umidade do solo e produtividade de uma cultura poderia ser avaliada por meio de sensoriamento remoto com micro-ondas (WHITE *et al.*, 2019).

A água é um recurso importante para a agricultura, sendo necessário dar-lhe um manejo adequado, visando melhorar a produtividade agrícola e as condições socioeconômicas e minimizar o dano ambiental. Este último pode dificultar mais ainda o acesso a fontes hídricas.

#### **2.4.1 Efeito do estresse de déficit hídrico nas culturas agrícolas**

Não basta apenas dispor de água para as culturas se desenvolverem adequadamente, as lâminas de água devem ser aplicadas na quantidade e no momento correto. Tanto o excesso quanto a falta do recurso hídrico prejudicam o desenvolvimento das culturas agrícolas por meio do estresse hídrico.

Fleisher *et al.* (2015) avaliaram fatores de estresse hídrico na cultura da batata para mensurar a contribuição de cada um para melhorar a precisão do modelo de evapotranspiração. Comparações iterativas confrontadas com dados experimentais consistindo em tratamentos de irrigação diferentes. Os fatores incluídos foram: mudanças na alocação de carbono entre parte aérea e órgãos radiculares com base na disponibilidade de umidade do solo; resposta ao potencial hídrico da folha na expansão foliar e na condutância estomática; e aumento da força de dreno dos tubérculos. Foi observado que os fatores foliares foram os mais importantes para o modelo, contudo, os outros fatores também foram relevantes na melhoria da precisão e rendimento.

## 2.5 Fatores relevantes para a produtividade agrícola

A deposição de nitrogênio (N) desempenha um papel importante na regulação da produtividade florestal, da biomassa e atividades microbianas. Ela diminuiu a liberação de carbono e a sensibilidade à temperatura dos solos, levando a previsões de que eles podem auxiliar na mitigação dos efeitos do aquecimento futuro do clima nas próximas décadas (LI *et al.*, 2019a).

Kamimura *et al.* (2019) propõem um modelo simplificado, baseado em agentes, de avaliação de danos causados em plantas arbóreas por ventos fortes.

Öztürka, Bolat e Ergün (2015) afirmam que a temperatura do ar é um parâmetro meteorológico efetivo na fenologia foliar. A temperatura do solo também influencia no desenvolvimento das folhas.

Modelos empíricos podem ajudar a identificar os principais fatores da ocorrência de danos por tempestades, a fim de desenvolver medidas adaptadas localmente para minimizar os danos na vegetação. No entanto, há uma falta significativa de conhecimento sobre esses modelos em relação à correlação entre danos causados por tempestades e fluxo de ar de alto impacto próximo à superfície (ALBRECHT; JUNG; SCHINDLER, 2019).

Dürr *et al.* (2015) informam que a germinação é a primeira etapa essencial na produção agrícola e alimentar, bem como para o estabelecimento de árvores e regeneração de espécies silvestres. A temperatura e o potencial hídrico são os principais fatores ambientais que controlam a germinação em todas as espécies e afetam tanto a taxa quanto a porcentagem final de germinação. Ele sugere a criação de um banco de dados com as características das sementes para facilitar reflorestamentos e culturas agrícolas após o aquecimento global.

Modelar a taxa de desenvolvimento do arroz e a fenologia é crucial para uma previsão robusta de rendimento. Entretanto, existem incertezas originadas das funções de resposta de temperatura nos modelos de arroz. Nestes modelos, também deve ser considerada a existência de temperaturas limites durante o dia e como elas influenciam o desenvolvimento global da cultura (ZHANG; TAO, 2019).

As medições do clima são necessárias para monitorar a temperatura em que as culturas resistem sem maiores danos, contudo, os sensores atuais não são bons para o monitoramento em longos prazos (WILD *et al.*, 2019).

Zhao *et al.* (2015) advertem que uma resolução espacial precisa ser determinada antes de usar modelos para simular a produtividade das culturas em escala regional, mas existe um dilema no comprometimento entre diferentes demandas. Uma resolução espacial

precisa exige uma grande carga computacional para montagem de dados de entrada, execuções de modelo e análise de saída. Uma resolução espacial grosseira poderia resultar na perda de detalhes espaciais na variabilidade. Os autores observaram que a resolução espacial e a agregação de dados em áreas maiores tiveram variação das influências em função da topografia do local analisado, em locais planos poderiam ser utilizados dados mais agregados, com menor resolução. Os autores conseguiram desenvolver um modelo que indicaria uma resolução adequada para a análise em cada caso.

He *et al.* (2015) observaram em seu estudo que os rendimentos das culturas são influenciados pela duração dos períodos de crescimento, que são determinados pela temperatura e manejo agrônômico, como a data de semeadura e as mudanças nas cultivares. É essencial quantificar a interação entre as mudanças climáticas e o manejo das culturas na fenologia para entender a adaptação dos sistemas agrícolas às mudanças climáticas. As mudanças nos estágios e fases fenológicas foram significativamente negativamente correlacionadas com o aumento da temperatura no período do estudo. Deste modo, as cultivares adaptadas serviram como uma espécie de resposta para o aquecimento do clima.

A água não é o único fator que influencia nas culturas agrícolas. Outros parâmetros também precisam ser observados na produção vegetal.

As condições do solo e a forma de aplicação de nutrientes também influenciam no desenvolvimento vegetal. Costa *et al.* (2018) correlacionaram a aplicação de dose única ou o parcelamento da aplicação de fertilizantes de nitrogênio com a produtividade do trigo, tendo percebido que o parcelamento ou não da aplicação do nitrogênio depende das condições do solo. A qual varia em função de que cultura tinha sido aplicada anteriormente em um esquema de rotação de cultura. Isso evidencia que a aplicação de fertilizantes para atender as necessidades nutricionais da cultura deve considerar o estado nutricional do solo e também devem ser estudadas quais épocas mais pertinentes para a inserção dos nutrientes.

A salinidade assume importância central em atividades agrícolas, podendo até inviabilizar economicamente terras para atividades agrícolas. Ela é mais potencialmente mais danosa em regiões onde chove com menor intensidade e regularidade. Bezerra *et al.* (2018) avaliaram a influência da salinidade e da aplicação de doses de nitrogênio na cultura da goiabeira enxertadas em lisímetros em Pombal-PB. Foram adotados cinco graus de condutividade elétrica da água de irrigação - CEa (0,3; 1,1; 1,9; 2,7 e 3,5 dS/m) e quatro dosagens de nitrogênio (70, 100, 130 e 160% do recomendado para a cultura). Foi verificado que para uma salinidade da água de irrigação acima de 0,3 dS/m, diversos parâmetros fisiológicos da cultura foram afetados de forma negativa. Ocorreu uma interação relevante

entre a salinidade da água de irrigação e a aducação nitrogenada após 120 dias do transplântio. Contudo, as doses de nitrogênio não foram capazes de atenuar os efeitos negativos da salinidade em relação ao desenvolvimento da cultura.

Inoculadores para o aumento da fixação biológica de nitrogênio - FBN podem interferir em culturas agrícolas. Galindo *et al.* (2018) avaliaram a coinoculação de bradirrizóbios e *Azospirillum brasilense* em duas cultivares de soja no cerrado. Eles aumentaram a absorção de água e nutrientes. Isso aumentou a produtividade e a lucratividade da cultura.

Outro fator relevante para o desenvolvimento da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo. Araújo *et al.* (2018) aplicaram técnicas de Geoestatística e Estatística Descritiva em uma bacia experimental em Pernambuco, no semiárido brasileiro. A área da bacia é de 149 quilômetros quadrados. Foram coletadas amostras nas seguintes faixas do solo: 0-0,10 m e 0,10-0,20 m, com 35 pontos de coleta em uma malha irregular. Foram abrangidas três classes de solo representativas em regiões semiáridas. Foram verificados graus de dependência espacial de médio a forte em diversos aspectos, evidenciando que a Geoestatística representa bem os parâmetros do solo em função da dinâmica espacial, sendo esse o mesmo princípio utilizado em áreas que usam agricultura de precisão. Nela, os talhões são separados em funções de características similares do solo.

Regiões mais secas possuem sua atividade agrícola dificultada pelas condições naturais. Neste contexto, Neves *et al.* (2018) afirmam que, em regiões semiáridas, é necessário um uso mais eficiente dos recursos naturais para que a agricultura possa viabilizar-se. O estudo verificou a influência do uso de biofertilizante e de águas salinas na cultura Boa noite (*Catharanthus roseus*). Foram usadas cinco escalas de salinidade para a água de irrigação (0,5; 2,5; 5,0; 7,5 e 10 dS m<sup>-1</sup>), enquanto também foram variadas as frequências de aplicação da dose de 150 mL de biofertilizante bovino líquido (dividida em uma e cinco vezes). Os melhores resultados na análise sensorial foram obtidos para *Catharanthus roseus* de cor branca com uma água de irrigação salina com até 2,5 dS m<sup>-1</sup>. Contudo, a frequência de aplicação do biofertilizante não interferiu nos efeitos da salinidade, sendo mais interessante a aplicação de uma dose única deste.

Zhang *et al.* (2019) observaram que a produtividade do milho poderia ser melhorada com seu adensamento em sistemas que utilizem cobertura plástica, sendo importante estudos para determinar o ponto ótimo para o adensamento em cada caso.

Cobrir solos usando cobertura morta, palha morta ou cobertura plástica pode aumentar a produtividade das culturas na agricultura de sequeiro, mas também aumentam a

emissão de Óxido Nitroso -  $N_2O$ , sendo este um gás fortemente causador de efeito estufa. Os maiores aumentos de produtividade se deram com os tratamentos de palha morta ou cobertura plástica (CHEN *et al.*, 2019).

A cobertura morta é uma prática comum e eficaz para reduzir artificialmente a evaporação para fins de conservação da água em ecossistemas áridos/semiáridos. As técnicas de cobertura também aumentam a temperatura do solo, enquanto diminuem a energia disponível na superfície da terra. Os efeitos da cobertura na ET variaram com o desenvolvimento da folha e foram mais sensíveis durante os períodos caracterizados por um menor índice de área foliar (crescimento inicial e após o corte raso). Sem considerar os efeitos da cobertura, a ET seria superestimada e a disponibilidade de água no solo seria subestimada. A ET média foi reduzida em 11,6% com o uso da cobertura plástica (WANG *et al.*, 2019).

Em culturas perenes, a diferença de estados fenológicos cíclicos é influenciada pela mudança de temperatura no decorrer do ano. As mudanças climáticas podem alterar os períodos anuais desses estágios, sendo interessante o estudo desses impactos, especialmente em culturas de interesse agrícola (GUO, L. *et al.*, 2019).

Rao *et al.* (2015) observaram que os rendimentos médios de trigo para o período de 1980 a 2011 diminuíram em 7% na Índia em função do aumento contínuo da temperatura. Deste modo, seriam necessárias cultivares que fossem precoces, de alto rendimento e mais tolerantes ao calor.

Liu *et al.* (2019) observaram que, em uma condição de estresse hídrico, a cultura do tomate aumentou a eficiência do uso da água quando submetido a uma atmosfera mais rica em Dióxido de Carbono –  $CO_2$ .

As ligações entre condições meteorológicas e semeadura são bem reconhecidas para algumas espécies, mas em outras não. Algumas espécies e até cultivares são menos sensíveis à variação do clima. Essas informações viabilizam a estimativa de em que períodos ocorrem determinadas fases fenológicas em culturas perenes, por exemplo, floração ou frutificação (BOGDZIEWICZ *et al.*, 2019).

Pode-se perceber que devido à influência de outros fatores, mesmo que se use uma lâmina de água adequada, pode haver perdas de produtividade em culturas agrícolas, daí a importância de uma visão sistêmica a respeito da produção vegetal.

## 2.6 Agricultura de sequeiro

A agricultura de sequeiro costuma ser menos tecnificada do que a agricultura irrigada. É muito comum na agricultura familiar de subsistência do nordeste brasileiro. Ela depende inteiramente das precipitações naturais para suprir a demanda hídrica das culturas. Esse tipo de agricultura expõe o agricultor aos riscos de um período de seca, podendo este fenômeno climático inviabilizar a produção agrícola. Na agricultura de sequeiro, a produtividade agrícola também depende fortemente das condições do solo (SILVA, 2011b).

## 2.7 Forragicultura

Esta seção aborda a Forragicultura e sua relação com a Agricultura, indicando a como essa pesquisa se correlaciona com o que está sendo pesquisado sobre o tema. Mostra-se que esta pesquisa é pertinente aos estudos similares atuais.

Bergqvist *et al* (2018) afirmaram que a distribuição de forragem para animais é necessária para que haja o suprimento de energia para herbívoros de interesse comercial. Deste modo, é necessário o cultivo de forrageiras, especialmente em períodos e locais de menor disponibilidade vegetal, sendo particularmente importantes as forragens ricas em proteína.

Barbero *et al* (2017) avaliaram em sua pesquisa a integração rotativa entre o cultivo de soja e gramíneas, tendo conseguido aumentar a produtividade na propriedade rural abordada.

Vitória *et al* (2014) observaram que o manejo convencional do solo apresentou maior produtividade no cultivo de forrageiras do que o plantio direto e o cultivo mínimo.

Santos *et al* (2017) pesquisaram a suplementação das necessidades nutricionais no cultivo de pastagens, evidenciando a importância do estudo dos insumos para a forragicultura.

## 2.8 Balanço hídrico no solo

Considerando que a água é o principal fator para a produtividade agrícola, é muito importante que possam ser determinadas as entradas e saídas de água no solo. Com esse conhecimento, fica mais fácil atender de forma mais adequada as demandas hídricas das culturas. Jie *et al.* (2011) afirmam que, apesar de existirem muitas pesquisas sobre o tema, ainda é difícil quantificar a recarga de água no solo. Na prática, os diferentes métodos acabam

apenas servindo de referência um para o outro, contudo, sua combinação gera resultados considerados plausíveis. No entanto, os fatores regionais influenciam bastante nesse aspecto. Isso torna necessário verificar os métodos mais adequados para cada região, sem desprezar a sensibilidade de cada solo em reagir às recargas aplicadas.

Para o dimensionamento de sistemas de irrigação, alguns componentes do balanço hídrico são desprezados, tais como: percolação, escoamento superficial e ascensão capilar, pois eles costumam ser menores em lâmina e/ou muito difíceis de medir (FARIA *et al.*, 2000).

A interceptação em uma cultura também deveria ser observada. Ela varia durante os diversos estágios de desenvolvimento de uma determinada cultura, pois o formato da copa vai se alterando. Os processos de interceptação e *throughfall* deveriam ser estudados em diversas culturas, pois o conhecimento de diversos componentes de um balanço hídrico pode possibilitar que processos de irrigação lancem lâminas mais acuradas (DRASTIG *et al.*, 2019).

### **2.8.1 Precipitações**

As precipitações são particularmente importantes, pois, em grande parte do planeta, elas são a mais importante forma de recarga hídricas para usos antrópicos ou agrícolas. Contudo, outros componentes do ciclo hidrológico também podem assumir esse papel. Em função da importância das chuvas, há forte interesse no mecanismo de formação de nuvens e de precipitação, pois poderia facilitar a obtenção do suprimento hídrico de regiões áridas, semiáridas ou com chuvas irregulares (FRENCH *et al.*, 2018).

### **2.8.2 Movimento vertical de água no solo**

O movimento vertical de água no solo pode ocorrer no sentido ascendente ou descendente. A ascensão capilar é o movimento da água dos poros do solo verticalmente para cima, pelo gradiente da carga hidráulica e através da interface entre ar e água (BALDOVINO *et al.*, 2017). Por sua vez, a percolação é o movimento vertical descendente da água no solo. DZIOB *et al.* (2019) desenvolveram um equipamento de baixo custo com capacidade de medir o fenômeno dentro da mesma acurácia dos equipamentos tradicionais, mais onerosos.

### **2.8.3 Escoamento superficial**

O escoamento superficial é a componente do balanço hídrico que se desloca horizontalmente, indo para outros locais, fora da área de controle. Seu estudo é particularmente importante, pois é o mais relevante mecanismo natural de formação da erosão. Existe uma tendência de uso de meios digitais para a avaliação do escoamento superficial (SANTOS; LOLLO, 2016; SANTOS *et al*, 2014).

### **2.8.4 Evapotranspiração**

A evapotranspiração de referência é um fator hidrológico vital para as culturas. Sua variação de longo prazo é de grande interesse em estudos de mudança climática. O autor afirma que o controle da velocidade do vento pode reduzir a ETo (SHAN, 2015).

Entender a evapotranspiração da cultura (ETc) é importante para o manejo eficiente da irrigação. A técnica de covariância de vórtices turbulentos (CE) é útil para medir o fluxo de calor latente de dossel total de culturas de campo. No entanto, exige equipamentos caros e análise complexa de dados; portanto, é relevante apenas para pesquisa. Com o objetivo de desenvolver um método simples e de baixo custo, investigou-se o método de renovação de superfície. Este método foi eficaz com o uso de fatores de correção (HAYMANN; LUKYANOV; TANNY, 2019).

O fluxo de água e carbono entre a superfície do solo e a atmosfera é fortemente regulado pelo tipo de vegetação presente (LI *et al.*, 2019b).

#### **2.8.4.1 Estimativas de evapotranspiração**

A produtividade agrícola é bastante dependente da água, em função disso, é de grande importância a mensuração da água que sai do solo pela evapotranspiração. Logo, vários métodos são desenvolvidos para sua estimativa. Deste modo, essas técnicas serão estudadas neste tópico visando subsidiar melhor outras etapas desta pesquisa.

Para a avaliação da evapotranspiração de referência que servirá de base para a determinação da demanda hídrica das culturas, Adeboye *et al.* (2009) afirmam que é interessante a calibração dos diversos métodos em diferentes regiões para que possam ser usados de forma confiável. Ele estudou a região da bacia do Rio Ogun-Osun, tendo

recomendado o uso dos métodos de Jensen-Haise e Hargreaves, quando houver apenas uma pequena quantidade de dados meteorológicos.

Existem diferentes estratégias e métodos para a avaliação da evapotranspiração, por exemplo, Masri, Rahman e Dragoni (2019) propõem um método para o cálculo da ET por meio de sensoriamento remoto.

Jaksa e Sridhar (2015) afirmam que a evapotranspiração – ET é altamente variável no espaço e no tempo e sua quantificação, usando observações ou modelos, auxilia na irrigação, no manejo da água, hidrologia e sustentabilidade de ecossistemas. Em seu estudo, as mudanças de fatores meteorológicos foram consideradas para capturar os padrões de mudança nos componentes do balanço de energia superficial. O gasto energético foi alterado devido às atividades antropogênicas na bacia com aumento do fluxo de calor latente e redução do fluxo de calor sensível. A ET aumentou durante um período de trinta anos devido ao aquecimento do clima e as variáveis meteorológicas da camada limite indicaram arrefecimento induzido pela irrigação.

Shrestha e Shukla (2015) indicam que os modelos e métodos existentes relatam o coeficiente de cultura ( $K_c$ ) como uma função do tempo, mas não consideram as variações devido às condições da superfície, métodos de umedecimento, condições meteorológicas e outros fatores biofísicos. Estas limitações resultam em estimativas errôneas de evapotranspiração da cultura ( $E_{Tc}$ ), especialmente para condições não padronizadas, por exemplo, cobertura plástica. O autor apresentou um modelo que se retroalimentaria corrigindo suas expectativas de dados em função dos resultados anteriormente obtidos utilizando aprendizado estatístico, tendo o autor obtido valores mais próximos aos verificados em lisímetros do que a metodologia da FAO-56 e de outros modelos baseados em técnicas de inteligência artificial. Ele também recomenda que, para uma mesma cultura, o  $K_c$  deve ser determinado diferentemente em cada região, sugerindo seu modelo ser utilizado para este fim.

A transpiração da vegetação ( $T$ ) é o processo de perda de água das plantas através dos estômatos na superfície da folha e desempenha um papel fundamental no balanço energético e hídrico da superfície terrestre, especialmente com a densa cobertura vegetal. Até o momento, no entanto, a estimativa da escala ecossistêmica  $T$  ainda é bastante incerta, principalmente devido a erros na modelagem da resistência ou condutância do dossel, contudo, cada vez mais aperfeiçoam-se processos de avaliação da transpiração por meio de sensoriamento remoto, tendo-se obtido os melhores resultados para áreas cultivadas (SHAN *et al.*, 2019).

### 2.8.5 Irrigação

Quando aplicada, a irrigação é um dos componentes do balanço hídrico. Apesar do presente trabalho tratar sobre um experimento em regime de sequeiro, entende-se que o método do balanço hídrico também pode apresentar-se como uma ferramenta importante para a agricultura irrigada. Em função disso, é apresentada esta seção, pois se entende que, com o balanço hídrico, seria possível aplicar lâminas de irrigação mais adequadas às reais necessidades hídricas das culturas em cada caso, permitindo uma maior eficiência no uso da água, mais competitividade e um menor dano ambiental na atividade. Contudo, será dado foco apenas em estratégias de irrigação usadas em agricultura de sequeiro.

#### 2.8.5.1 Estratégias de irrigação

A irrigação é particularmente importante para viabilizar e potencializar a agricultura em regiões áridas e semiáridas, pois a demanda hídrica das culturas não seria bem atendida sem esta técnica. É importante conhecer os parâmetros agrometeorológicos locais, especialmente a evapotranspiração e a precipitação, pois a irrigação serviria para compensar a perda hídrica naquele solo. A estratégia de irrigação deve ser bem planejada, pois se tratam de regiões com esse recurso hídrico escasso (FARIA *et al.*, 2000).

##### 2.8.5.1.1 Irrigação com déficit

A irrigação com déficit tem por objetivo suprir apenas parcialmente a necessidade hídrica de uma cultura em função da ausência de água em uma região ou diminuição de custos de irrigação. Em alguns casos, estudam-se os períodos em que o déficit causaria menos prejuízos para a cultura agrícola. Contudo, deve explicitar-se que lâminas menores que a demanda hídrica diminuem a produtividade vegetal (VIVAN *et al.*, 2013).

##### 2.8.5.1.2 Irrigação de salvação

A irrigação de salvação é aquela em que se aplica uma lâmina d'água que se constitui um requisito mínimo para a sobrevivência das plantas de uma cultura agrícola, podendo ou não ser construídas barragens ou outras estruturas de Engenharia que auxiliem

nesse processo. Esse tipo de irrigação permite uma economia de recurso hídrico na produção vegetal (BRITO; CAVALCANTI, 2013).

Brito *et al.* (2012) apresentam uma experiência em que conseguiram expressivos aumentos de produtividade, nas culturas do milho e do feijão-caupi por meio da adubação orgânica e da irrigação de salvação no semiárido brasileiro.

#### 2.8.5.1.3 Irrigação suplementar

A irrigação suplementar tem por objetivo aplicar uma lâmina que complete a necessidade hídrica da planta, descontando o que é aplicado por meio de precipitações naturais. Diferentemente do presente estudo, alguns autores utilizam o termo irrigação suplementar como sinônimo de irrigação de salvação ou com déficit (PEGORARE *et al.*, 2009).

Gava *et al.* (2018) avaliaram a influência de diversas lâminas na produtividade deste grão, aplicadas por meio de pivô central. Foram aplicadas diversas lâminas, em 6 diferentes cultivares. Em todos os casos, o melhor resultado foi obtido com a aplicação de lâminas de 50% da ETc. Evidenciou-se também que as características genéticas das cultivares aplicadas influenciam significativamente na produtividade.

#### **2.8.6 Armazenamento de água no solo**

Ao fim do balanço hídrico, a água restante irá ou sairá do armazenamento do solo, por exemplo, sendo o solo o estoque regulador do balanço hídrico. A vegetação presente no solo interfere diretamente em seu balanço hídrico, potencializando ou atenuando os efeitos da variação do armazenamento de água no solo (TARGA *et al.*, 2017).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área do experimento

O experimento foi conduzido em um modelo físico de campo em área pertencente ao Laboratório de Hidráulica e Irrigação, do Departamento de Engenharia Agrícola, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, no município de Fortaleza-CE (Figura 2).

Figura 2 – Modelo físico para estudo de balanço hídrico no solo.



Fonte: autor.

O clima da região é tropical chuvoso com precipitação de verão-outono (fevereiro a abril), com temperatura média em todos os meses superior a 18 °C, e clima segundo Köeppen do tipo Aw'.

A precipitação média anual é de 1350 mm, com temperatura média anual de 26,5 °C e umidade relativa do ar média anual de 80%, segundo dados fornecidos pela Estação Agrometeorológica, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, situada próxima à área experimental.

O solo da área onde foi instalado o modelo físico é classificado como Argissolo Amarelo, conforme critérios do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS, H. *et al.*, 2018), constituindo-se no de maior expressão em termos de área no Estado do Ceará. Em conformidade com os atributos físico-hídricos do solo (tabela 1), se trata de um solo com textura leve em profundidade com predominância da fração granulométrica areia e capacidade de água disponível (CAD) de 43,56 mm até a profundidade de 0,40 m, limite inferior do perfil de solo utilizado para o cálculo do balanço hídrico.

Tabela 1 – Atributos físico-hídricos do solo da área do experimento.

Camada (m)	Análise Granulométrica				Classe textural	Densidade do solo (kg m <sup>-3</sup> )
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila		
I (0,00 a 0,20)	46	36	07	11	Areia-Franca	1430
II (0,20 a 0,40)	42	30	09	19	Franco-Arenoso	1600
III (0,40 a 0,60)	27	22	14	37	Argila-Arenosa	1500
IV (0,60 a 0,80)	22	18	20	40	Franco-Argiloso	1430
	Capacidade de campo – CC*			Ponto de murcha permanente – PMP*		
0,00 a 0,20	0,1955			0,0617		
0,20 a 0,40	0,1936			0,1096		

(\*) Valores de umidade do solo à base de volume ( $\theta$ ).

Fonte: elaborada pelo autor.

A umidade do solo e a condutividade hidráulica do solo do experimento são dadas pelas equações 01 e 02, respectivamente:

$$\Theta = 0,109 + \frac{0,479 - 0,109}{(1 + [0,693257 * \Psi_m]^{1,454428})^{0,31244}} \quad (01)$$

$$K(\Theta) = 0,00014e^{39,621\Theta} \quad (02)$$

### 3.2 Modelo físico para estudo do balanço hídrico de cultura

A parcela experimental é constituída por uma área com dimensões de 25,45 m x 2,0 m, circundada por um dique de alvenaria com altura de 0,30 m, apresentando uma declividade de 0,02 m m<sup>-1</sup> e interligada a dois coletores onde foram realizadas as coletas para

o cálculo do escoamento superficial de água. Na parcela experimental foram instaladas duas baterias de tensiômetros com manômetros de mercúrio às profundidades de 0,10 m, 0,30 m, 0,40 m e 0,50 m, com vistas ao cálculo dos potenciais mátricos e totais, além do teor de umidade via curva de retenção de água no solo.

A cultura estabelecida no experimento foi a cunhã (*Clitoria ternatea L.*), cuja semeadura foi realizada no dia 17 de abril de 2018 em linha corrida e espaçada de 0,40 m entre linhas na direção transversal ao escoamento predominante das águas. O desbaste ocorreu dez dias após a semeadura, deixando-se cinco plantas por metro linear. No estudo considerou-se como limite inferior do volume de solo a profundidade de 0,40 m para as determinações dos componentes do balanço hídrico, cujos dados foram obtidos diariamente às 07 h no período de 17 de abril a 30 de maio de 2018.

### 3.3 O método do balanço hídrico

Considerando um volume de solo de profundidade Z, de 0 a L, por um intervalo de tempo  $\Delta t$ , o método do balanço hídrico se baseia na lei de conservação das massas, implicando na soma algébrica dos fluxos durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , ser igual as variações da quantidade de água armazenada no mesmo intervalo, em uma camada de profundidade 0 a L (equação 03), portanto:

$$\int_{t_1}^{t_2} (p + i - e \pm q - r) dt = \pm \int_0^L \int_{t_1}^{t_2} [\partial \theta / \partial t] dt \cdot dz \quad (03)$$

Onde p, i, e, q e r são densidades de fluxos ( $L t^{-1}$ ), sendo:

p: densidade de fluxo de precipitação;

i: densidade de fluxo de irrigação;

e: densidade de fluxo de evapotranspiração;

q: densidade de fluxo de drenagem profunda ou ascensão capilar;

r: densidade de fluxo de escoamento superficial;

$\theta$ : conteúdo de água do solo em ( $cm^3$  de água  $cm^{-3}$  de solo).

Ressalte-se que na presente pesquisa, a recarga foi natural, não contendo, portanto a componente irrigação, conforme equação (04) e a representação de seus respectivos membros:

$$\int_{t_1}^{t_2} p dt \pm \int_{t_1}^{t_2} e dt \pm \int_{t_1}^{t_2} q_L dt \pm \int_{t_1}^{t_2} r dt = \pm \int_0^L \int_{t_1}^{t_2} \left[ \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] dt \cdot dz \quad (04)$$

Representando a quantidade de água no volume de solo estudado ( $Z = 0$ ), na forma de precipitação (P), descrita na equação 05.

$$\int_{t_1}^{t_2} p dt = P \quad (05)$$

O segundo termo (equação 06) se relaciona à quantidade de água que sai através da superfície do volume do solo ( $Z = 0$ ), sob a forma de evapotranspiração (ET).

$$\int_{t_1}^{t_2} e dt = \pm ET \quad (06)$$

O terceiro termo (equação 07) se refere à quantidade de água ( $Q_L$ ) que passa através do limite inferior do volume de solo ( $Z = L$ ), podendo ser drenagem profunda se negativo ou ascensão capilar se positivo.

$$\int_{t_1}^{t_2} q_L dt = \pm Q_L \quad (07)$$

O quarto termo (equação 08) indica parte da água que chega à superfície do solo, no caso sob forma de precipitação, mas não é infiltrada, escoando superficialmente, por isso, chamado de escoamento superficial (R). Sendo em função da capacidade de infiltração do solo, intensidade e quantidade de precipitação e da declividade do terreno.

$$\int_{t_1}^{t_2} r dt = R \quad (08)$$

O segundo membro da equação 04 (equação 09):

$$\pm \int_0^L \int_{t_1}^{t_2} \left[ \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] dt \cdot dz = \Delta A \quad (09)$$

Diz-se que o somatório das variações do conteúdo de água do solo ( $\theta$ ) em um intervalo de tempo ( $t^2 - t^1$ ), integrados ao longo da profundidade 0 a L, é igual a variação da quantidade de água armazenada no solo ( $\Delta A$ ) no mesmo intervalo de tempo (equação 10), podendo ser positivo ou negativo, dependendo dos outros termos da equação 04.

Reescrevendo a equação 04 na forma simples e usual e desdobrando o resultado da equação 07,  $Q^L$ , em seus componentes: drenagem profunda e ascensão capilar, podemos descrever a equação de armazenamento de água como sendo (equação 10):

$$\Delta A = P + AC - DP - R - ET \quad (10)$$

Em que:

$\Delta A$ : variação no armazenamento entre o início e o fim do intervalo de tempo;

P: precipitação;

AC: ascensão capilar;

DP: drenagem profunda;

R: escoamento superficial;

ET: evapotranspiração.

Todas as variáveis apresentadas cima estão em milímetros.

### 3.4 Componentes do balanço hídrico

#### 3.4.1 Precipitação

Os dados diários de chuva foram obtidos da Estação Agrometeorológica do Centro de Ciências Agrárias localizada em área vizinha ao experimento.

#### 3.4.2 Armazenamento de água

A umidade no solo foi obtida indiretamente pela curva de retenção de água no solo com tensiômetros instalados às profundidades de 0,10 m e 0,30 m na área experimental.

O cálculo do armazenamento de água no solo (A) foi realizado conforme a equação 11:

$$A = \left[ \frac{\sum_{i=1}^2 \theta_i}{2} \right] \times 400 \quad (11)$$

Em que:

A: armazenamento de água no solo, até  $z = 40$  cm, em mm.

A variação do armazenamento de água no solo foi obtida pela diferença entre os armazenamentos no intervalo de tempo considerado.

#### 3.4.3 Potencial mátrico

O potencial mátrico ( $\Psi_m$ ) expresso em - cm de coluna de água foi calculado através da equação 12:

$$\psi_m = -12.6hg + hc + z \quad (12)$$

Sendo:

hg: altura da coluna de mercúrio (cm);

hc: altura do nível de mercúrio na cuba, em relação à superfície do solo (cm);

z: profundidade de instalação do tensiômetro (cm).

Os potenciais mátricos de água no solo nas profundidades de 0,30 m e 0,50 m demonstram variações proporcionais e com amplitudes similares no período analisado, indicando assim que o potencial mátrico na profundidade de 0,40 m poderia ser representado de forma consistente pela média deste nas profundidades analisadas (Equação 13), evitando, portanto, outra medição neste ponto.

$$\Psi_{MÁTRICO}(0,4\text{ m}) = \frac{\Psi_{TOTAL}(0,3\text{ m}) + \Psi_{TOTAL}(0,5\text{ m})}{2} + 40 \quad (13)$$

#### 3.4.4 Drenagem profunda ou ascensão capilar

A estimativa de drenagem profunda ou ascensão capilar é bastante complexa, constituindo o termo do balanço hídrico mais difícil de ser estimado. No cálculo foi utilizada a equação 14, de Darcy-Buckingham, conforme Libardi (2018).

$$q_{40} = -K(\theta)_{40} \frac{\partial \psi_t}{\partial Z} \quad (14)$$

Sendo:

$K(\theta)$ : condutividade hidráulica do solo não saturado [ $L T^{-1}$ ] na profundidade de 0,40 m, como função da umidade do solo  $\theta$  [ $L^3 L^{-3}$ ];

$\frac{\partial \psi_t}{\partial Z}$  : gradiente de potencial total da água no solo [ $L L^{-1}$ ].

O gradiente de potencial total foi calculado com base nos valores dos potenciais totais às profundidades de 0,30 m e 0,50 m.

### 3.4.5 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica do solo não saturado foi estimada com base no método do perfil instantâneo. Conforme Libardi (2018), o método se aplica onde o lençol freático está ausente ou bem profundo, de tal maneira a não afetar o fluxo de água e onde o perfil de solo pode ser heterogêneo.

Na aplicação do método, foi utilizada uma parcela de solo circular com diâmetro de 3,0 m com o propósito de que os processos em seu centro não fossem afetados pelos seus limites. Foram adotados os valores obtidos no experimento de Valnir Jr.; Costa e Aguiar (2001) na mesma área.

### 3.4.6 Gradiente de potencial total da água no solo

O cálculo do gradiente de potencial total da água no solo na profundidade estudada (0,40 m) foi realizado através da expressão que representa a diferença de potenciais totais em duas profundidades consecutivas pela distância entre elas, conforme a equação 15:

$$\left[ \frac{\partial \psi_T}{\partial Z} \right] \approx \left[ \frac{\Delta \psi_T}{\Delta Z} \right]_{40} = \left[ \frac{\psi_T^{(c)} - \psi_T^{(b)}}{20} \right] \quad (15)$$

Sendo:

$\left[ \frac{\partial \psi_T}{\partial Z} \right]_{40}$ : gradiente de potencial total da água no solo ( $\text{cm cm}^{-1}$ );

$\psi_T^{(c)}$ : potencial total da água no solo à profundidade de 0,30 m (cm);

$\psi_T^{(b)}$ : potencial total da água no solo à profundidade de 0,50 m (cm);

$\Delta Z$ : distância vertical entre os tensiômetros (cm).

### 3.4.7 Escoamento superficial

O escoamento superficial depende de elementos inerentes à chuva, tais como: altura, duração, intensidade e pico de recarga, além de elementos característicos do solo como textura, cobertura, declividade, dentre outros. A lâmina de escoamento superficial foi medida

coletando-se a água escoada da área circundada pelo dique de alvenaria. O cálculo da lâmina de escoamento superficial foi efetuado conforme a equação 16:

$$LE_{\text{superf.}} = \frac{A_{\text{col.}}}{A_{\text{parc.}}} \cdot h_{\text{col.}} \quad (16)$$

Em que:

$LE_{\text{superf.}}$ : lâmina de escoamento superficial [L];

$A_{\text{col.}}$ : área da secção transversal do coletor de escoamento [L<sup>2</sup>];

$A_{\text{parc.}}$ : área da parcela com o dique [L<sup>2</sup>];

$h_{\text{col.}}$ : soma total das lâminas de água nos coletores [L].

### 3.4.8 Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi estimada pelo método de Penman-Monteith (FAO). Os dados climáticos necessários à estimativa da evapotranspiração de referência foram obtidos junto à Estação Agrometeorológica do Centro de Ciências Agrárias, ao lado do local do experimento, sendo usada a metodologia proposta por Alencar, Sedyama e Mantovani (2015). A equação 17 é referente ao cálculo da evapotranspiração de referência.

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (17)$$

Onde:

ET<sub>o</sub> - evapotranspiração de referência (mm d<sup>-1</sup>);

R<sub>n</sub> - saldo de radiação à superfície da cultura (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);

G - densidade do fluxo de calor do solo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);

T - temperatura do ar a 2 m de altura (°C);

u<sub>2</sub> - velocidade de vento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>);

e<sub>s</sub> - pressão de vapor de saturação (kPa);

e<sub>a</sub> - pressão parcial de vapor (kPa);

Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa °C<sup>-1</sup>), e

γ - coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>)

### **3.4.9 Evapotranspiração da cultura**

A evapotranspiração da cultura foi estimada a partir da equação geral do balanço hídrico, mediante o uso dos valores dos demais componentes do balanço hídrico anteriormente descritos. Este valor foi comparado com o valor de evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) estimado pela equação 18:

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (18)$$

Sendo:

ET<sub>c</sub>: Evapotranspiração máxima da cultura, em mm dia<sup>-1</sup>;

ET<sub>o</sub> : Evapotranspiração de referência, em mm dia<sup>-1</sup>;

K<sub>c</sub>: coeficiente de cultivo para cada fase de desenvolvimento da cultura.

### **3.4.10 Coeficiente de cultura**

Com os dados de ET<sub>o</sub>, obtidos pelo método de Penman-Monteith, de ET<sub>c</sub> calculados pelo balanço hídrico e reorganizando a equação 18, tem-se a equação 19 que permite o cálculo do coeficiente de cultivo – K<sub>c</sub> para a cultura da cunhã no período analisado.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (19)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Recarga natural

A precipitação acumulada (tabela 2) durante o período de realização do experimento foi de 365,2 mm, atingindo pico de 79,4 mm, evidenciando a característica da região de possuir elevadas precipitações nos primeiros meses do ano, em especial entre os meses de fevereiro e maio (MOURA *et al.*, 2015).

Tabela 2 – Dados de precipitação durante a condução do experimento.

Data	Prec. (mm)	Data	Prec. (mm)	Data	Prec. (mm)
17.04.18	65,4	02.05.18	0,8	17.05.18	1,8
18.04.18	0,5	03.05.18	0,0	18.05.18	54,4
19.04.18	0,0	04.05.18	8,2	19.05.18	0,0
20.04.18	0,9	05.05.18	0,0	20.05.18	0,0
21.04.18	0,2	06.05.18	28,4	21.05.18	0,0
22.04.18	0,4	07.05.18	18,6	22.05.18	19,6
23.04.18	0,0	08.05.18	0,0	23.05.18	0,0
24.04.18	25,2	09.05.18	12,0	24.05.18	0,0
25.04.18	0,0	10.05.18	79,4	25.05.18	5,2
26.04.18	2,2	11.05.18	4,2	26.05.18	5,4
27.04.18	0,6	12.05.18	3,4	27.05.18	0,0
28.04.18	0,0	13.05.18	0,0	28.05.18	0,0
29.04.18	0,4	14.05.18	0,8	29.05.18	0,0
30.04.18	16,8	15.05.18	0,0	30.05.18	0,0
01.05.18	10,4	16.05.18	0,0		

Fonte: elaborada pelo autor.

### 4.2 Análise de componentes do balanço hídrico

#### 4.2.1 Potenciais totais da água no solo

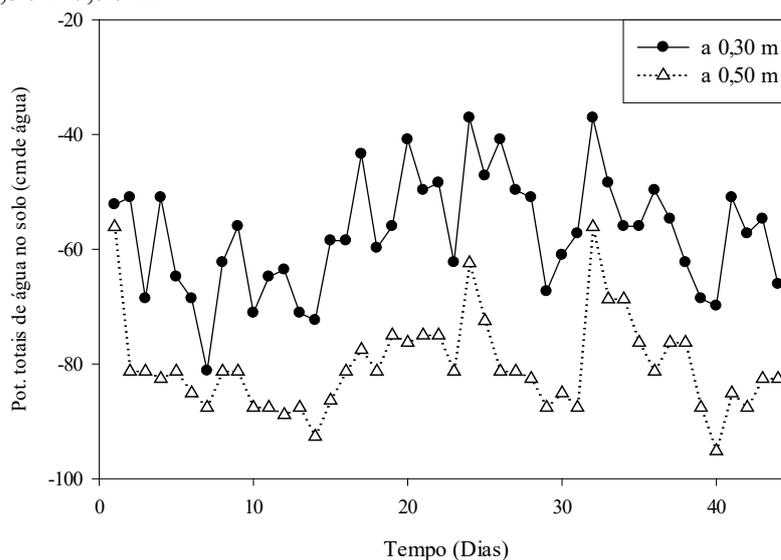
Os potenciais totais da água no solo foram calculados diariamente nas profundidades de 0,30 m e 0,50 m. Os dados estão apresentados na tabela 3 e em representação gráfica no tempo (figura 3).

Tabela 3 - Potenciais totais da água no solo (cm de água) nas profundidades de 0,30 m e 0,50 m.

Data	$\Psi_T$ a 0,30 m	$\Psi_T$ a 0,50 m	Data	$\Psi_T$ a 0,30 m	$\Psi_T$ a 0,50 m	Data	$\Psi_T$ a 0,30 m	$\Psi_T$ a 0,50 m
17.04.18	-52,22	-56,1	02.05.18	-58,52	-81,3	17.05.18	-57,26	-87,6
18.04.18	-50,96	-81,3	03.05.18	-43,4	-77,52	18.05.18	-37,1	-56,1
19.04.18	-68,6	-81,3	04.05.18	-59,78	-81,3	19.05.18	-48,44	-68,7
20.04.18	-50,96	-82,56	05.05.18	-56	-75	20.05.18	-56	-68,7
21.04.18	-64,82	-81,3	06.05.18	-40,88	-76,26	21.05.18	-56	-76,26
22.04.18	-68,6	-85,08	07.05.18	-49,7	-75	22.05.18	-49,7	-81,3
23.04.18	-81,2	-87,6	08.05.18	-48,44	-75	23.05.18	-54,74	-76,26
24.04.18	-62,3	-81,3	09.05.18	-62,3	-81,3	24.05.18	-62,3	-76,26
25.04.18	-56	-81,3	10.05.18	-37,1	-62,4	25.05.18	-68,6	-87,6
26.04.18	-71,12	-87,6	11.05.18	-47,18	-72,48	26.05.18	-69,86	-95,16
27.04.18	-64,82	-87,6	12.05.18	-40,88	-81,3	27.05.18	-50,96	-85,08
28.04.18	-63,56	-88,86	13.05.18	-49,7	-81,3	28.05.18	-57,26	-87,6
29.04.18	-71,12	-87,6	14.05.18	-50,96	-82,56	29.05.18	-54,74	-82,56
30.04.18	-72,38	-92,64	15.05.18	-67,34	-87,6	30.05.18	-66,08	-82,56
01.05.18	-58,52	-86,34	16.05.18	-61,04	-85,08			

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3 - Variação dos potenciais totais de água no solo às profundidades de 0,30 e 0,50 m.



Fonte: elaborado pelo autor.

Em todo o período analisado, o movimento de água no solo ocorreu no sentido descendente, na direção vertical. Não foi observada ascensão capilar em nenhum dos dias observados. As precipitações pluviométricas com maiores magnitudes em intervalos médios semanais certamente concorreram para esta dinâmica de água no solo, além do percentual de lâmina escoada em relação à lâmina precipitada.

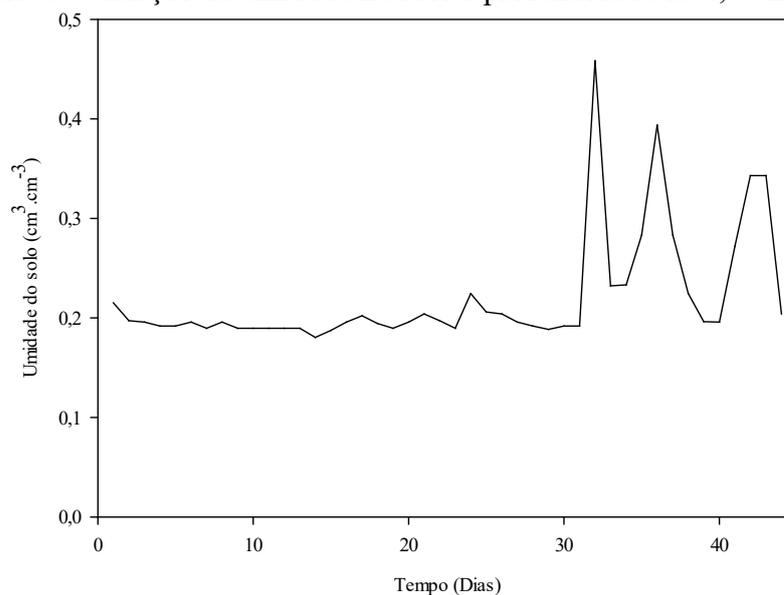
Para ocorrer o fenômeno da ascensão capilar, seria necessário que o potencial total do solo fosse menor no ponto do solo analisado mais elevado (0,30 m) do que no mais profundo (0,50 m), pois a massa se movimenta do ponto de maior para o de menor energia. Vale salientar que o maior potencial ocorre quando o módulo do potencial total de água no solo for menor, pois seu sinal é negativo (LIBARDI, 2018).

Para a ocorrência de ascensão capilar seria necessário um período onde o solo ficasse mais seco no ponto mais elevado de tal forma que a diferença de umidade causasse uma diferença de potencial que fizesse com que a diferença de potencial gravitacional fosse superada, fazendo com que a água tenha um movimento vertical (VALMIR JR; COSTA; AGUIAR, 2001).

#### 4.2.2 Umidade do solo e potencial mátrico

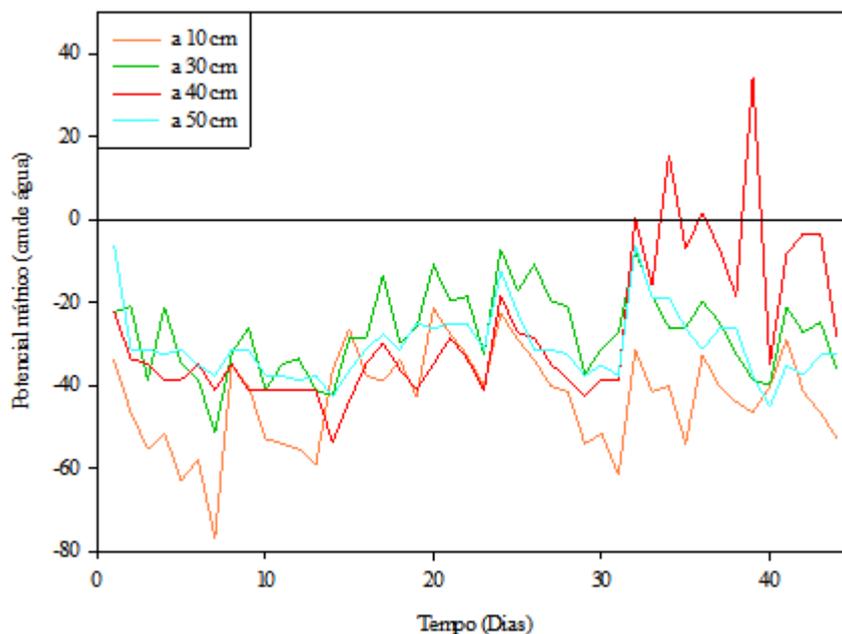
As figuras 4 e 5 demonstram, respectivamente, as variações de umidade no solo e potenciais mátricos às profundidades de 0,10 m; 0,30 m; 0,40 m e 0,50 m.

Figura 4 - Variação da umidade no solo à profundidade de 0,40 m.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 5 - Variação do potencial mátrico às profundidades de 0,1 m; 0,3 m; 0,4 m e 0,5 m.

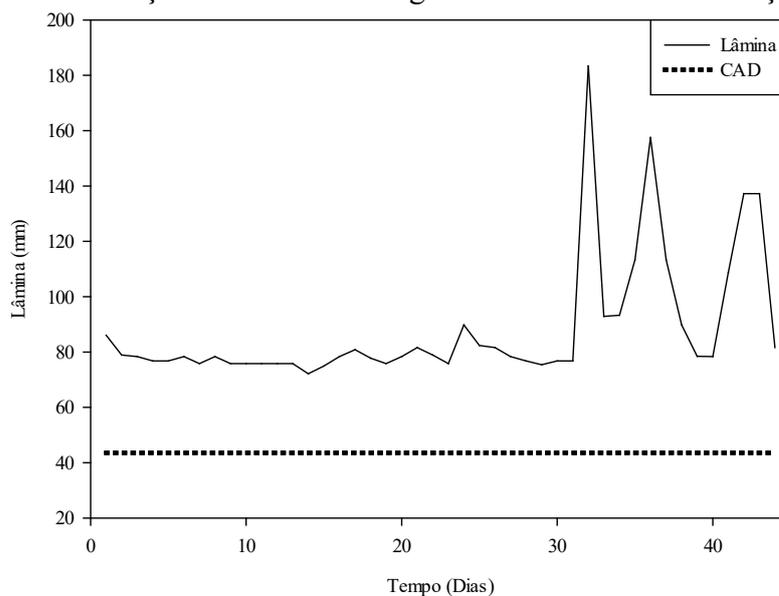


Fonte: elaborado pelo autor.

À medida que ocorreram variações na umidade do solo, em especial na sua elevação decorrente de chuvas de grande intensidade nos últimos dias do experimento, os potenciais mátricos também variavam, de modo que, menores teores de umidade no solo representaram potenciais mátricos mais negativos. Em experimento que visava observar o comportamento da umidade do solo em diferentes condições de cobertura, Menezes *et al.* (2013) concluíram que a evapotranspiração contribuiu para a redução da umidade do solo logo após eventos de precipitação, sendo o tipo de cobertura de grande importância para o perfil de retirada de água do solo, juntamente dos fatores climáticos da região.

O valor da capacidade de água disponível (CAD) até a profundidade de 0,40 m foi de 43,56 mm (figura 6). A umidade do solo foi calculada em função do potencial do solo na curva característica deste. A lâmina de água no solo no decorrer do experimento, porém, se manteve superior ao valor da CAD, sendo essa quantidade de água excedente não disponível para a cultura da cunhã.

Figura 6 - Variação das lâminas de água no solo durante o balanço hídrico.

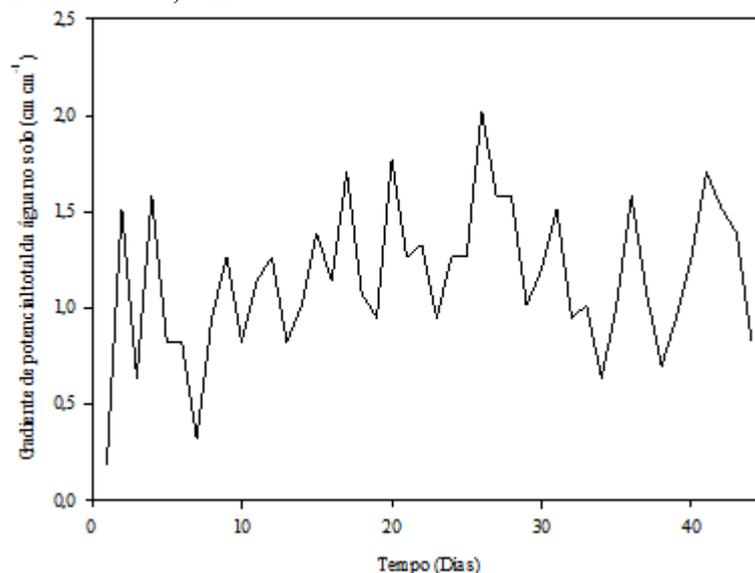


Fonte: elaborado pelo autor.

#### ***4.2.3 Gradiente de potencial total da água no solo***

Os valores de gradientes de potencial total da água no solo à profundidade de 0,40 m (figura 7) apresentaram valores positivos durante todo o período do experimento, demonstrando a ocorrência de fluxos no sentido descendente, cujos picos coincidiam com os períodos de maior precipitação, e posterior redução à medida que ocorria a redistribuição da água no solo.

Figura 7 - Variação do gradiente de potencial total de água no solo à profundidade de 0,4 m.

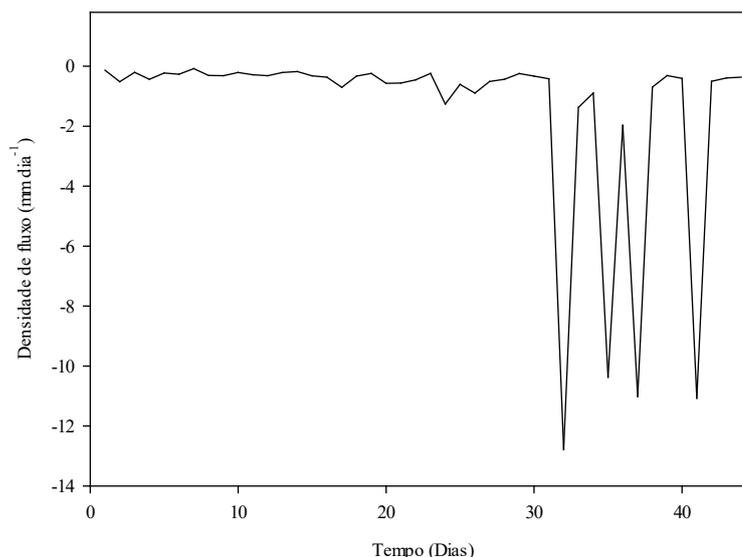


Fonte: elaborado pelo autor.

A figura 8 demonstra que durante o período que foi realizado o balanço hídrico não houve ascensão capilar, porém, pôde-se observar a ocorrência de drenagem profunda com maiores valores, em especial, no intervalo de maior quantidade de chuvas.

Diferentemente do estudo realizado por Valnir Jr., Costa, Aguiar (2001), o experimento não teve condições para a ocorrência da ascensão capilar. Baldovino *et al.* (2017) produziu ascensão capilar em condições laboratoriais artificiais e controladas, no entanto, mesmo assim, esse fenômeno é de difícil obtenção e esse movimento vertical para cima é limitado.

Figura 8 - Variação da densidade de fluxo com o tempo durante o balanço hídrico.



Fonte: elaborado pelo autor.

O acumulado da drenagem profunda foi de 64,33 mm, o que representa 17,65% das recargas, demonstrando que seu valor é significativo.

Contudo, majoritariamente, os autores que tratam sobre irrigação recomendam um modelo simplificado de movimentação hídrica no solo. Este teria apenas a irrigação e precipitação efetiva, como entradas, e possuiria a evapotranspiração como única saída, pois consideram as outras saídas pouco significativas ou de difícil medição (BERNARDO *et al.*, 2019; MANTOVANI, BERNARDO; PALARETTI, 2009).

Quando se ignora os outros fatores de saída de água do solo, promove-se superestimativas quanto ao seu armazenamento, induzindo a aplicação de lâminas de irrigação inferiores às demandas hídricas das culturas agrícolas. O atendimento parcial das demandas hídricas prejudica a produtividade rural, possuindo também consequências econômicas e sociais (BERK, 2018; VIVAN *et al.*, 2013).

#### 4.2.4 Escoamento superficial

Na tabela 4 são apresentados os valores de escoamento superficial ao longo do experimento. Nota-se que os valores de escoamento superficial seguem de maneira direta os valores das maiores precipitações registradas. É possível observar que o escoamento superficial representa 20,8% das maiores precipitações medidas, valor inferior de 30% obtido por outros autores e tomado como referência (LIMA *et al.*, 2015; SOUZA *et al.*, 2015), em

condições semelhantes, indicando que as linhas de semeadura ortogonais ao fluxo de água no solo atenuaram o risco de degradação do solo por erosão hídrica durante o experimento.

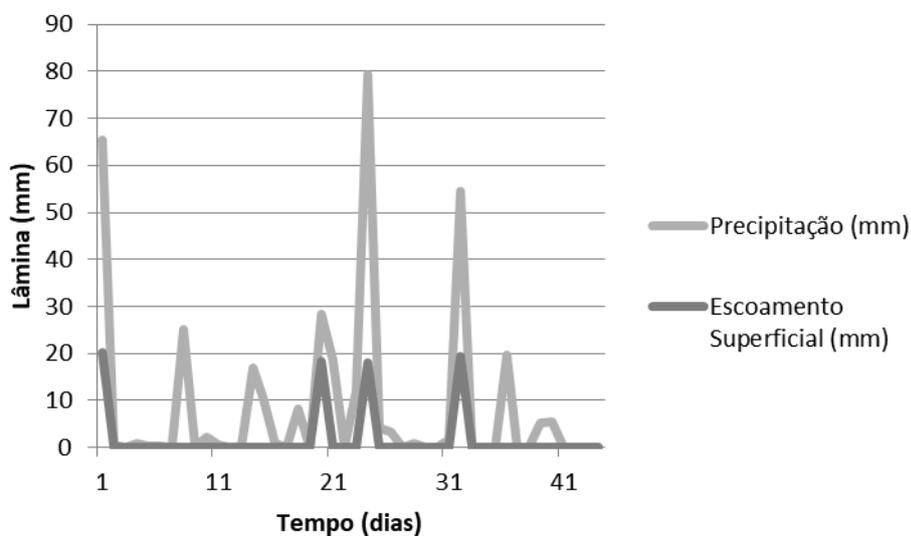
Costa *et al.* (2013) citam que os valores escoamento superficial em resposta às precipitações são passíveis de variações em razão do sistema de cultivo, declividade, física do solo e as intensidades das precipitações, sendo os solos com maior quantidade de camada superficial, seja cobertura morta ou vegetação, os que menos perdem água pelo escoamento superficial. Na figura 9 se visualiza o comportamento do escoamento superficial em relação à precipitação por ocasião do experimento.

Tabela 4 - Valores de escoamento superficial registrados durante o experimento.

<b>Data</b>	<b>Escoamento Superficial (mm)</b>	<b>Data</b>	<b>Escoamento Superficial (mm)</b>	<b>Data</b>	<b>Escoamento Superficial (mm)</b>
17.04.18	20,2	02.05.18	0	17.05.18	0
18.04.18	0	03.05.18	0	18.05.18	19,4
19.04.18	0	04.05.18	0	19.05.18	0
20.04.18	0	05.05.18	0	20.05.18	0
21.04.18	0	06.05.18	18,4	21.05.18	0
22.04.18	0	07.05.18	0	22.05.18	0
23.04.18	0	08.05.18	0	23.05.18	0
24.04.18	0	09.05.18	0	24.05.18	0
25.04.18	0	10.05.18	18,1	25.05.18	0
26.04.18	0	11.05.18	0	26.05.18	0
27.04.18	0	12.05.18	0	27.05.18	0
28.04.18	0	13.05.18	0	28.05.18	0
29.04.18	0	14.05.18	0	29.05.18	0
30.04.18	0	15.05.18	0	30.05.18	0
01.05.18	0	16.05.18	0		

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 9 – Comportamento do escoamento superficial em resposta à precipitação.

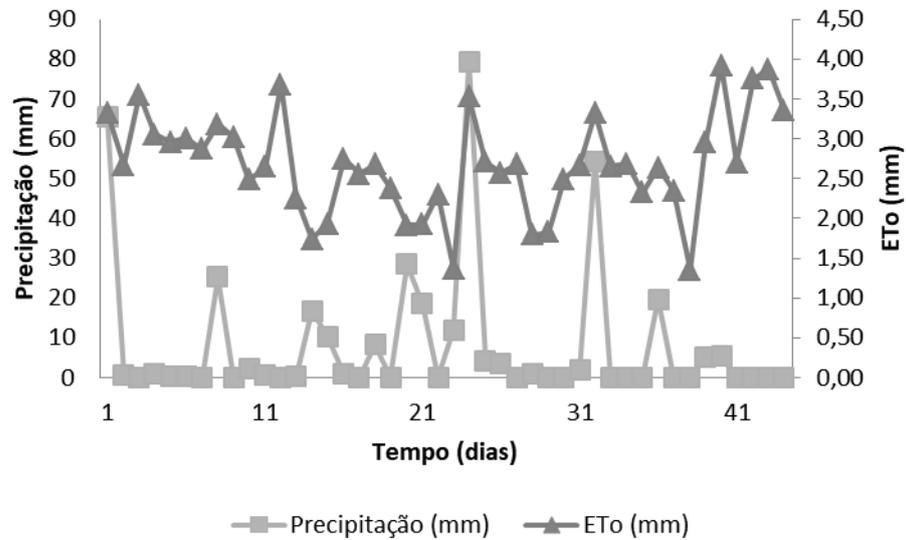


Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.2.5 Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>)

Na figura 10 se visualizam os menores valores de ET<sub>o</sub> para os mesmos períodos onde foram observadas chuvas de menor intensidade, e maiores para os dias sem precipitação, sendo que essa relação pode ser explicada pela variação da quantidade de água armazenada no solo que à medida que diminui, limita a condutividade hidráulica do solo, tornando o processo de redistribuição da água gradativamente menor (ZHANG *et al.*, 2004).

Figura 10 – Relação entre evapotranspiração de referência ETo e precipitação.

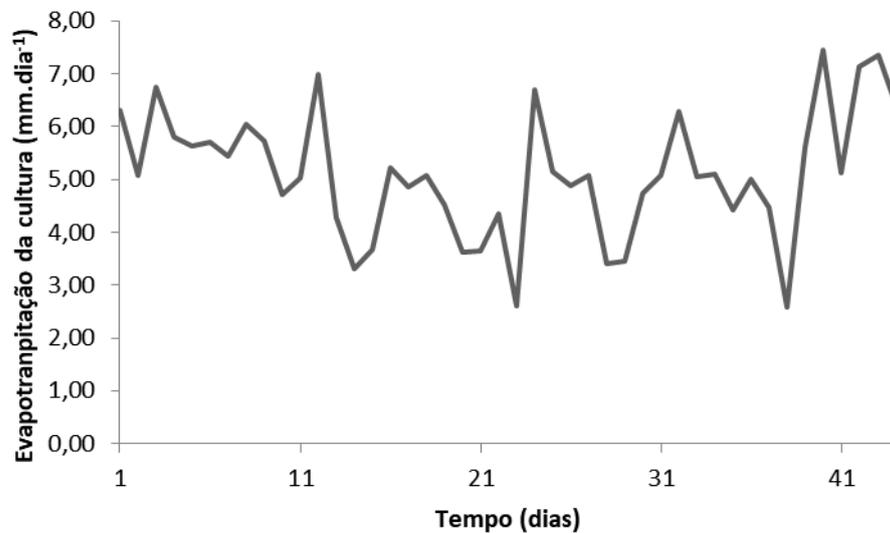


Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.2.6 Evapotranspiração da Cultura (ETc)

Na figura 11 se visualiza a variação da evapotranspiração da cultura (ETc) diária, para todo o período do experimento.

Figura 11 - Evapotranspiração da cultura durante o período do experimento.



Fonte: elaborado pelo autor.

Ao total, a evapotranspiração da cultura foi responsável pela retirada de

224,77 mm de água do sistema, equivalente a 61,55% das entradas.

A transpiração está relacionada à água transferida do solo para a planta por meio de seu sistema radicular. Parte desta água é utilizada durante o processo de fotossíntese. Nela, o recurso hídrico possibilita manter o crescimento e sobrevivência vegetal, sendo benéfico para a atividade agrícola e desenvolvimento de culturas vegetais para finalidades de interesse antrópico, por exemplo, cobertura vegetal. A evapotranspiração associa a evaporação da água do solo e a transpiração em sua estimativa, pois seria muito difícil calcular cada um de seus componentes de forma separada. Nestes termos, é de interesse da cultura que, em um balanço hídrico, seja máximo o uso da evapotranspiração, pois também maximizaria o desenvolvimento vegetal (GÜÇLÜ; SUBYANI; ŞEN, 2017).

Aplicando-se os dados coletados no balanço hídrico foi possível determinar para o período analisado um coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) igual a 1,9; valor este compatível com o obtido por Oliveira *et al.* (2013) para a fase de floração e para todo o ciclo da cunhã.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho, foi possível concluir que:

1. A drenagem profunda foi responsável pela retirada de 17,7% das recargas no período, mostrando-se considerável, caso não contabilizada, pode subestimar as saídas.

2. O coeficiente de escoamento superficial médio obtido foi de 21%, inferior ao valor de referência (30%) para as condições do experimento, demonstrando a importância da forma de estabelecimento da cultura no campo, a qual interceptando o fluxo de água constitui estratégia para minorar os efeitos de processos erosivos hídricos.

3. Durante a fase de crescimento estudada, não foi necessária a suplementação para a fase de desenvolvimento inicial, indicando que nas condições do experimento foi possível estabelecer a cultura da cunhã sem necessidade de irrigação, potencializando seu uso como cobertura vegetal.

4. A evapotranspiração se constituiu no maior componente de saída do balanço hídrico, atingindo aproximadamente 3/5 das entradas de água (61,55%) no solo. Apesar do que é comumente propagada na literatura sobre irrigação, ela não consumiu a totalidade das entradas, indicando que os outros valores de saída se apresentaram significativos, não devendo ser ignorados.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, M. *et al.* *Clitoria ternatea L. as a Potential High Quality Forage Legume. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences.* v. 27, n. 2, p. 169-178, fev. 2014
- AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil.** Brasília, 2015.
- ADEBOYE, O. *et al.* *Evaluation of FAO-56 Penman Monteith and Temperature Based Models in Estimating Reference Evapotranspiration. Agricultural Engineering International,* v. 9, n. 1291, 2009.
- ALBRECHT, A.; JUNG; C. SCHINDLER, D. *Improving empirical storm damage models by coupling with high-resolution gust speed data. Agricultural and Forest Meteorology,* v. 268, p. 23-31, abr. 2019.
- ALENCAR, L.; SEDIYAMA, G; MANTOVANI, E. Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Eng. Agríc.,** Jaboticabal, v. 35, n. 1, p. 39-50, fev. 2015.
- ARANTES, G. **Planeta água.** Rio de Janeiro: WEA/Elektra Records, p1981. 1 disco sonoro, 33 1/3 rpm, estéreo, 7 pol.
- ARAUJO, D. *et al.* *Spatial variability of soil attributes in an experimental basin in the semi-arid region of Pernambuco, Brazil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,* Campina Grande, v. 22, n. 1, p. 38-44, 2018.
- BALDOVINO, J. *et al.* Análise da ascensão capilar de um solo arenoso. In: SIMPÓSIO DA PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO-OESTE, 4., 2017, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ABMS, 2017. p. 699-703.
- BALDWIN, D *et al.* *Provisioning of bioavailable carbon between the wet and dry phases in a semi-arid floodplain. Oecologia,* v. 172. n.2, 2013.
- BARBERO, L. *et al.* Produção de Soja e de Forragem em Sistemas de Integração Agricultura e Pecuária. **Boletim de Indústria Animal,** v.74, n.2, p.229-236, 2017.
- BATISTA, S. *et al.* *Oxidizable fractions of soil organic carbon in Caatinga forest submitted to different forest managements. Ciência Rural,* Santa Maria, v. 48, n. 10, 2018.
- BERGQVIST, G. *et al.* *Forage availability and moose winter browsing in forest landscapes. Forest Ecology and Management,* v. 419–420, p. 170-178, jul. 2018.
- BERK, A. *Factors affecting the exit from farming of young farmers in Turkey: the case of Niğde province. Ciência Rural,* Santa Maria, v. 48, n. 8, 2018.
- BERNARDO, S. *et al.* **Manual de Irrigação.** 9 ed. Viçosa: Editora UFV, 2019.
- BEZERRA, I. *et al.* *Morphophysiology of guava under saline water irrigation and nitrogen fertilization. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,* Campina Grande, v.

22, n. 1, p. 32-37, 2018.

BOGDZIEWICZ, M. *et al.* *The effects of local climate on the correlation between weather and seed production differ in two species with contrasting masting habit.* ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 268, p. 109-115, abr. 2019.

BRITO, L. *et al.* Produtividade da água de chuva em culturas de subsistência no Semiárido Pernambucano. ***Engenharia Agrícola***, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 102-109, 2012.

BRITO, L.; CAVALCANTI, N. ***Irrigação de Salvação para a Produção de Alimentos***. Petrolina: Embrapa, 2013.

CHEN, H. *et al.* *Modeling impacts of mulching and climate change on crop production and N<sub>2</sub>O emission in the Loess Plateau of China.* ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 268, p. 86-97, abr. 2019.

COSTA, C. *et al.* Escoamento superficial em Latossolo Amarelo distrófico típico sob diferentes agroecossistemas no nordeste paraense. ***Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***, v. 17, n. 2, p. 162–169, 2013.

COSTA, J. *et al.* *Single and split nitrogen dose in wheat yield indicators.* ***Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***, Campina Grande, v. 22, n. 1, p. 16-21, 2018.

DRASTIG, K. *et al.* *Rainfall interception by winter rapeseed in Brandenburg (Germany) under various nitrogen fertilization treatments.* ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 268, p. 308-317, abr. 2019.

DÜRR, C. *et al.* *Ranges of critical temperature and water potential values for the germination of species worldwide: Contribution to a seed trait database.* ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 200, p. 222-232, jan. 2015.

DZIOB, D. *et al.* *A simplified experimental method to study conductivity percolation.* ***Review of Scientific Instruments***, v. 90, 2019.

FARIA, R. *et al.* Demanda de irrigação suplementar para a cultura do milho no estado de Minas Gerais. ***Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 46-50, 2000.

FLEISHER, D. *et al.* *Improving potato drought simulations: Assessing water stress factors using a coupled model.* ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 200, p. 144-155, jan. 2015.

FRENCH, J. *et al.* *Precipitation formation from orographic cloud seeding.* ***Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America***, v. 115(6), p. 1168-1173, fev. 2018.

GALINDO, F. *et al.* *Technical and economic viability of co-inoculation with *Azospirillum brasilense* in soybean cultivars in the Cerrado.* ***Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***, Campina Grande, v. 22, n. 1, p. 51-56, 2018.

GAVA, R. *et al.* *Water depths for different soybean cultivars in center pivot.* ***Revista***

**Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 1, p. 10-15, 2018.

GHARUN, M. *et al.* Mapping spatial and temporal variation in tree water use with an elevation model and gridded temperature data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 200, p. 249-257, jan. 2015.

GÜÇLÜ, S.; SUBYANI, A; ŞEN, Z. Regional fuzzy chain model for evapotranspiration estimation. **Journal of Hydrology**, v. 544, p. 233-241, 2017.

GUO, L. *et al.* Distribution margins as natural laboratories to infer species' flowering responses to climate warming and implications for frost risk. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 268, p. 299-303, abr. 2019.

HARTER, F.; HARTER, L.; MENEGHELLO, G. Rice Seed Production Under Conditions of Salinity Stres. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 48, n. 9, 2018.

HAYMANN, N. LUKYANOV, V.; TANNY, J. Effects of variable fetch and footprint on surface renewal measurements of sensible and latent heat fluxes in cotton. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 268, p. 63-73, abr. 2019.

HE, L. *et al.* Impacts of recent climate warming, cultivar changes, and crop management on winter wheat phenology across the Loess Plateau of China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 200, p. 135-143, jan. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Normais Climatológicas no Brasil. Disponível em:  
<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 15 maio 2019.

JAKSA, W.; SRIDHAR, V. Effect of irrigation in simulating long-term evapotranspiration climatology in a human-dominated river basin system. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 200, p. 109-118, jan. 2015.

JESUS, J. Estimativa do balanço hídrico climatológico e classificação climática pelo método de Thornthwaite e Mather para o município de Aracaju-SE. **Scientia Plena**, v. 11, n. 5, 2015.

JIAO, W. A new multi-sensor integrated index for drought monitoring. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 268, p. 74-85, abr. 2019.

JIE, Z. *et al.* Combination of soil-water balance models and water-table fluctuation methods for evaluation and improvement of groundwater recharge calculations. **Hydrogeology Journal**, v. 19, n. 8, p. 1487–1502, 2011.

KAMIMURA, K. *et al.* Agent-based modelling of wind damage processes and patterns in forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 268, p. 279-288, abr. 2019.

KATH, J. *et al.* Remotely sensed agricultural grassland productivity responses to land use and hydro-climatic drivers under extreme drought and rainfall. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 268, p. 11-22, abr. 2019.

- LI, H. *et al.* Growth stage-dependant variability in water vapor and CO<sub>2</sub> exchanges over a humid alpine shrubland on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 268, p. 55-62, abr. 2019b.
- LI, Q. *et al.* Nitrogen depositions increase soil respiration and decrease temperature sensitivity in a Moso bamboo forest. ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 268, p. 48-54, abr. 2019a.
- LIBARDI, P. **Dinâmica da água no solo**. 3 ed. São Paulo: Edusp, 2018.
- LIMA, C. *et al.* Agricultural practices in the cultivation of cassava and the relation to runoff, and soil and water loss. ***Revista Ciência Agrônômica***, v. 46, n. 4, p. 697–706, 2015.
- LIU, J. *et al.* CO<sub>2</sub> elevation modulates the response of leaf gas exchange to progressive soil drying in tomato plants. ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 268, p. 181-188, abr. 2019.
- MANTOVANI, E.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. **Irrigação: Princípios e Métodos**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2009.
- MARCHIORETTO, L. *et al.* Tolerance of apple rootstocks to short-term waterlogging. ***Ciência Rural***, Santa Maria, v. 48, n. 9, 2018.
- MARENGO, J. *et al.* Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. ***Anais da Academia Brasileira de Ciências***, Rio de Janeiro, v. 90, n. 2, supl. 1, p. 1973-1985, 2018.
- MASRI, B.; RAHMAN, A.; DRAGONI, D. Evaluating a new algorithm for satellite-based evapotranspiration for North American ecosystems: Model development and validation. ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 268, p. 234-248, abr. 2019.
- MENEZES, J. *et al.* Comportamento temporal da umidade do solo sob Caatinga e solo descoberto na Bacia Experimental do Jatobá, Pernambuco. ***Water Resources and Irrigation Management***, v. 2, n. 1, p. 45–51, 2013.
- MOURA, Í. *et al.* Caracterização dos períodos seco e chuvoso da cidade de Fortaleza (CE). ***Ciência e Natura***, v. 37, p. 03–07, 2015.
- NEVES, A. *et al.* Quantitative and qualitative responses of *Catharanthus roseus* to salinity and biofertilizer. ***Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***, Campina Grande, v. 22, n. 1, p. 22-26, 2018.
- OLIVEIRA, G. *et al.* Evapotranspiração e coeficiente de cultura da forrageira cunhã (*Clitoria ternatea* L.) para diferentes fases fenológicas e épocas do ano. ***Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável***, v. 8, n. 2, p. 203-209, 2013.
- ÖZTÜRKA, M.; BOLAT, İ.; ERGÜN, A. Influence of air–soil temperature on leaf expansion and LAI of *Carpinus betulus* trees in a temperate urban forest patch. ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 200, p. 185-191, jan. 2015.
- PEGORARE, A. *et al.* Irrigação suplementar no ciclo do milho “safrinha” sob plantio direto.

**Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 3, p. 262-271, 2009.

PEREIRA, A.; CAMARGO, M.; VILLA NOVA, N. *Coffee crop coefficient for precision irrigation based on leaf area index*. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, pp.946-951, 2011.

RAO, B. *et al.* *Spatial analysis of the sensitivity of wheat yields to temperature in India*. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 200, p. 192-202, jan. 2015.

SANTOS, F.; LOLLO, J. Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial visando ao planejamento urbano. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21 n. 4, out. 2016.

SANTOS, H. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília: EMBRAPA, 2018.

SANTOS, M. *et al.* Estudo do Escoamento Superficial na Bacia Hidrográfica do Rio Ivaí, Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14(3), 2014.

SANTOS, M. *et al.* Estrutura do Dossel e Características de Perfilhos em Pastos de Capim-Piatã Manejados com Doses de Nitrogênio e Períodos de Diferimento Variáveis. **Ciência Animal Brasileira**, v. 18. p. 1-13, 2017.

SHAMSHIRBAND, S. *et al.* *Clustering project management for drought regions determination: a case study in Serbia*. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 200, p. 57-65, jan. 2015.

SHAN, N. *Modeling canopy conductance and transpiration from solar-induced chlorophyll fluorescence*. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 268, p. 189-201, abr. 2019.

SHAN, N. *et al.* *Spatiotemporal trends of reference evapotranspiration and its driving factors in the Beijing–Tianjin Sand Source Control Project Region, China*. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 200, p. 322-333, jan. 2015.

SHRESTHA, N. E SHUKLA, S. *Support vector machine based modeling of evapotranspiration using hydro-climatic variables in a sub-tropical environment*. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 200, p. 172-184, jan. 2015.

SILVA, A. *et al.* Semeadura direta na produção do milho em agricultura de sequeiro na região Nordeste do Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 9, 2011b.

SILVA, G. *et al.* *Response of bell pepper crop subjected to irrigation depths calculated by different methodologies*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 1, p. 45-50, 2018b.

SILVA, K. *et al.* *Future irrigation water requirements in the Ijuí River basin, RS*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 1, p. 57-62, 2018a.

- SILVA, V. *et al.* Análise da pluviometria e dias chuvosos na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v, 15, n. 2, p. 131-138, 2011a.
- SILVA, V. *et al.* Métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em condições de sequeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v, 19, n. 5, p. 411-417, 2015.
- SOUZA, R. *et al.* Balanço hídrico em área de pastagem no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 449-445, 2015.
- TARGA, M. *et al.* *Evaluation of soil water storage in native forest and eucalyptus areas.* **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 6, nov./dez. 2017.
- VALMIR JR, M.; COSTA, R.; AGUIAR, J. Análise de componentes do balanço hídrico em cultura de caupi (*Vigna unguiculata* (L) Walp), sob condições de recarga hídrica natural. **Irriga**, v. 6, n. 3, p. 91-103, 18 dez. 2001.
- VIEIRA, R. *et al.* *Identifying areas susceptible to desertification in the brazilian northeast.* **Solid Earth**, v. 6, n. 1, p. 347-360, 2015.
- VITÓRIA, E. *et al.* *Productivity of forage plants soil management.* **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 5, p. 955-962, out. 2014.
- VIVAN, G. *et al.* Rendimento relativo da cultura da soja em função da lâmina de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 2, p. 282-292, 2013.
- WANG, P. *et al.* *Dynamical effects of plastic mulch on evapotranspiration partitioning in a mulched agriculture ecosystem: Measurement with numerical modeling.* **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 268, p. 98-108, abr. 2019.
- WILD, J. *et al.* *Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement.* **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 268, p. 40-47, abr. 2019.
- WHITE, J. *et al.* *Canola yield sensitivity to climate indicators and passive microwave-derived soil moisture estimates in Saskatchewan, Canada.* **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 268, p. 354-362, abr. 2019.
- ZHANG, F. *et al.* *Integrated model and field experiment to determine the optimum planting density in plastic film mulched rainfed agriculture.* **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 268, p. 331-340, abr. 2019.
- ZHANG, S.; TAO, F. *Improving rice development and phenology prediction across contrasting climate zones of China.* **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 268, p. 224-233, abr. 2019.
- ZHANG, Y. *et al.* *Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain.* **Agricultural Water Management**, v. 64, n. 2, p. 107-122, 15 jan. 2004.

ZHAO, G. *et al.* Demand for multi-scale weather data for regional crop modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 200, p. 156-171, jan. 2015.