

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

RAMON AMARO DE SALES

**PARAMETRIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP
PARA A CULTURA DO YACON**

ALEGRE – ES

2018

RAMON AMARO DE SALES

**PARAMETRIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP
PARA A CULTURA DO YACON**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito à obtenção do título de *Magister Scientiae* em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier

ALEGRE – ES

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Sul, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

S163p Sales, Ramon Amaro de, 1992-
Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura do
yacon. – 2018.
73 f. : il.

Orientador: Alexandre Cândido Xavier.

Coorientador: Evandro Chaves de Oliveira.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Modelagem. 2. Meteorologia agrícola. 3. Simulação
(Computadores). 4. Yacon. I. Xavier, Alexandre Cândido. II. Oliveira,
Evandro Chaves de. III. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 63

Bibliotecária: Lizzie de Almeida Chaves – CRB-6 ES-000871/O

RAMON AMARO DE SALES

**PARAMETRIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP
PARA A CULTURA DO YACON**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal na linha de pesquisa Recursos Hídricos e Geoprocessamento em Sistemas Agrícolas.

Aprovada em 01 de agosto de 2018

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier
Univ Federal do Espírito Santo
(Orientador)



Prof. Dr. Evandro Chaves de Oliveira
Instituto Federal do Espírito Santo
(Coorientador)



Prof. Dr. Edvaldo Fialho dos Reis
Univ. Federal do Espírito Santo

A minha mãe Terezinha, por todo sacrifício que fez em sua vida em prol do meu sucesso;

A minha irmã Flávia, por acreditar e apoiar meu sonho;

Aos meus sobrinhos Alan e Sofia, meus melhores e maiores presentes;

A toda a minha família e amigos.

DEDICO

Mil cairão ao teu lado, e dez mil à tua direita, mas não chegará a ti.
Somente com os teus olhos contemplarás, e verás a recompensa dos ímpios.
Porquanto fizeste do Senhor o teu refúgio, e do Altíssimo a tua habitação.
Nenhum mal te sucederá, nem praga alguma chegará à tua tenda.

Salmos 91:7-10

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades e por ter iluminado meu caminho até hoje.

Aos meus familiares, principalmente minha mãe Zinha, a qual lutou muito para que eu pudesse concluir mais esta etapa em minha vida.

Ao Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier e Prof. Dr. Evandro Chaves de Oliveira, pelas suas orientações, apoio e confiança.

Ao Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES), pela oportunidade de fazer o curso e pela contribuição à minha formação acadêmica.

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do CCAUE- UFES (PPGPV), pela oportunidade de estudo.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo.

A toda a minha família, que sempre esteve junto comigo e se disponibilizou a me ajudar de todas as formas possíveis.

Agradeço aos professores Evandro Chaves de Oliveira e Sávio da Silva Berilli, pelo incentivo a ingressar na carreira acadêmica e por fim, agradeço a todos que contribuíram de forma direta e indiretamente para esta conquista.

Obrigado!

RESUMO

Sales, Ramon Amaro de. **Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura do yacon**. 2018. 73 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. Orientador: Alexandre Cândido Xavier. Coorientador: Evandro Chaves de Oliveira.

A cultura do yacon (*Smallanthus sonchifolius*) tem ganhado notoriedade nos últimos anos, devido seus benefícios proporcionados à saúde humana, difundindo cada vez mais no mundo. Nas últimas décadas, as mudanças climáticas têm afetado diversas regiões do mundo, e com isso, exercendo pressão sobre a produção agrícola, que é altamente dependente dos elementos meteorológicos. No Brasil, com a atual escassez de água em diversas regiões, melhorar gerenciamento desse recurso natural e esgotável se torna vital, especialmente nas regiões nordeste e sudeste brasileiras. Para avaliar os efeitos do déficit hídrico no rendimento ou produtividade das culturas e na previsão de rendimentos, estão sendo utilizados cada vez mais os modelos de simulação, os quais são ferramentas úteis para análises técnicas e econômicas. Atenta a isso, a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) desenvolveu o modelo de simulação AquaCrop, que fornece previsões alternativas de respostas de culturas a diferentes estratégias de irrigação. Desse modo, o objetivo do presente estudo foi calibrar e validar o modelo AquaCrop para a cultura do yacon em clima tropical. O estudo foi desenvolvido com base em dados fenológicos de experimentos de campo, realizados em três épocas de plantio (Outono, Inverno e Primavera) no ano de 2013, conduzidos no município de Ibatiba, estado do Espírito Santo. Determinaram-se as temperaturas basais inferior e superior para a cultura do yacon, sendo estes dados de entrada no modelo AquaCrop. Posteriormente, realizou-se a calibração e a validação do modelo AquaCrop. Os valores de temperatura basal inferior determinados para o yacon foi de 12,5 °C nos dois subperíodos estudados e a temperatura basal superior 34,0 °C. Em geral, o modelo da FAO AquaCrop predisse o rendimento de raiz, biomassa total e índice de colheita com uma precisão aceitável, com desvios abaixo de 6% para biomassa total e de raiz. O modelo também pode ser utilizado para mitigar os efeitos decorrentes do clima, otimizando o tempo de plantio em diferentes épocas de plantio.

Palavras-Chave: *Smallanthus sonchifolius*, simulação de produção, modelagem, agrometeorologia.

ABSTRACT

Sales, Ramon Amaro de. **Parameterization and validation of the AquaCrop model for yacon**. 2018. 73 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. Advisor: Alexandre Cândido Xavier. Co-advisors: Evandro Chaves de Oliveira.

The culture of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) has gained notoriety in recent years, due to its benefits provided to human health, spreading more and more in the world. In recent decades, climate change has affected several regions of the world, and with it, putting pressure on agricultural production, which is highly dependent on the weather elements. In Brazil, with the current scarcity of water in several regions, improving management of this natural and exhaustible resource becomes vital, especially in the northeast and southeast of Brazil. In order to evaluate the effects of water deficit on crop yield and yield prediction, simulation models are increasingly being used, which are useful tools for technical and economic analysis. In view of this, the United Nations Food and Agriculture Organization (FAO) has developed the AquaCrop simulation model, which provides alternative predictions of crop responses to different irrigation strategies. Thus, the objective of the present study was to calibrate and validate the AquaCrop model for yacon in tropical climate. The study was developed based on phenological data from field experiments conducted in three planting seasons (autumn, winter and spring) in 2013, conducted in the municipality of Ibatiba, state of Espírito Santo. The lower and upper basal temperatures were determined for yacon culture, these data being input to the AquaCrop model. Subsequently, the calibration and validation of the AquaCrop model was performed. The lower basal temperature values determined for yacon were 12.5 °C in the two subperiods studied and the upper basal temperature 34.0 °C. In general, the FAO AquaCrop model predicted root yield, total biomass and harvest index with acceptable accuracy, with deviations below 6% for total and root biomass. The model can also be used to mitigate the effects of the climate, optimizing the time of planting at different planting times.

Keywords: *Smallanthus sonchifolius*, Simulation of production, modeling, agrometeorology.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1. Atributos da camada de 0 a 20 cm do solo de Ibatiba-ES, na região Sul do Espírito Santo.	38
Tabela 2. Valores de temperaturas máximas, mínimas, médias e precipitação acumulada durante o período de emergência até a maturação, em diferentes épocas de plantio do yacon, em Ibatiba, ES.	43

CAPÍTULO II

Tabela 1. Atributos da camada de 0 a 20 cm do solo de Ibatiba-ES, na região Sul do Espírito Santo.	59
Tabela 2. Propriedades do solo utilizadas como entrada no modelo AquaCrop para simulação do yacon em Ibatiba-ES.	59
Tabela 3. Variáveis da cultura selecionadas e valores para calibração do AquaCrop para o yacon.	62
Tabela 4. Porcentagem de desvio para o Índice de colheita, Biomassa total e rendimento de raiz simulado e observado para a cultura do yacon ao final do experimento, para três épocas de plantio, na região de Ibatiba, ES, 2013.	65
Tabela 5. Resultado da raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE) e Bias para a biomassa total e rendimento de raiz observado e simulado para três épocas de plantio, na região de Ibatiba, ES, 2013.	67

LISTA DE FIGURAS

REVISÃO DE LITERATURA

- Figura 1.** Esquema de simulação do AquaCrop com indicação das 4 principais etapas e processos contabilizados..... 19
- Figura 2.** Representação esquemática do desenvolvimento do dossel durante o crescimento exponencial e as fases de declínio exponencial. 21
- Figura 3.** Variação da cobertura do dossel (CC) ao longo do ciclo da cultura sob condições não limitantes. CCo e CCx são a cobertura inicial e máxima, respectivamente. 22

CAPÍTULO I

- Figura 1.** Localização geográfica do estado do Espírito Santo, com destaque para o município de Ibatiba. 37
- Figura 2.** Temperatura basal inferior para as fases de desenvolvimento emergência maturação (EME-MAT) e início da tuberização e maturação (IT-MAT), obtida pelos métodos de desvio padrão (graus-dia) e desenvolvimento relativo (DR), para a cultura do yacon..... 45
- Figura 3.** Temperatura basal inferior para as fases de desenvolvimento emergência maturação (EME-MAT) e início da tuberização e maturação (IT-MAT), obtida pelos métodos de desvio padrão (graus-dia) e desenvolvimento relativo (DR), para a cultura do yacon..... 46
- Figura 4.** Determinação da temperatura basal superior do durante o período que compreende a emergência e a maturação (EME-MAT) do yacon pelos métodos de desvio padrão e coeficiente de variação, ambos em graus-dia. 47
- Figura 5.** Relação entre a temperatura média e o fotoperíodo com a soma térmica durante o período que compreende a emergência - início da tuberização (EME-IT), nas três datas de plantio do yacon..... 48

Figura 6. Duração da fase emergência-início da tuberização (EME-IT) e início da tuberização e maturação (IT-MAT) em graus-dia acumulados nas três datas de plantio (20/04/2013-Outono; 20/07/2013-Inverno e 20/09/2012-Primavera) do yacon.....	49
Figura 7. Relação entre a duração do período e rendimento seco de raiz (kg ha^{-1}) com a temperatura média do ar durante o período correspondente entre a emergência e a maturação, nas três datas de plantio do yacon.....	50

CAPÍTULO II

Figura 1. Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação durante as três épocas de plantio: Outono (a), Inverno (b) e Primavera (c). Linha contínua inferior e superior referem-se as temperaturas basais inferior (Tb) e superior (TB), respectivamente.....	57
Figura 2. Janela que ilustra o sistema de banco de dados para a simulação do modelo AquaCrop.	61
Figura 3. Relação entre os valores observados e simulados para rendimento de raiz do yacon nos plantios de Outono (a), Inverno (b) e primavera (c).....	66

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1. Características gerais do yacon e sua importância	14
2.2. Água como fator limitante à produção	16
2.3. Modelo AquaCrop	18
2.3.1. Expansão do dossel.....	20
2.3.2. Transpiração	22
2.3.3. Produtividade da água	23
2.4. Parametrização e validação do Modelo AquaCrop	24
REFERÊNCIAS	25
CAPÍTULO I - TEMPERATURA BASAL, DURAÇÃO DO CICLO E CONSTANTE TÉRMICA PARA A CULTURA DO YACON.....	35
RESUMO	35
INTRODUÇÃO.....	35
MATERIAL E MÉTODOS.....	37
RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS	51
CAPÍTULO II - CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO FAO-AQUACROP PARA ESTIMAR A BIOMASSA TOTAL E RENDIMENTO DE RAIZ DO YACON	55
RESUMO	55
INTRODUÇÃO.....	55
MATERIAL E MÉTODOS.....	56
RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
CONCLUSÃO.....	67
REFERÊNCIAS	68

1. INTRODUÇÃO

O yacon (*Smallanthus sonchifolius*) é uma tuberosa que pertence à família Asteraceae, o qual apresenta grande potencial de adaptação aos fatores edafoclimáticos, podendo atrelar algumas dessas adaptabilidades à grande quantidade de carboidratos alocada em seus órgãos de reservas (VILHENA et al., 2000; SANTANA e CARDOSO, 2008).

A distribuição dessa espécie ocorre por toda a Cordilheira dos Andes, Equador e Noroeste da Argentina, em altitudes que variam de 900m e 3.500m acima do nível do mar, sendo introduzida no Brasil no início dos anos 90 (ROBINSON, 1997; GUSSO et al., 2015). O yacon possui como principais características atrativas sua polpa crocante, sabor adocicado, além de ser “diet”, visto que sua energia é armazenada na forma de frutooligosacarídeos (FOS), um carboidrato do subgrupo da inulina classificado como fibra solúvel, tornando-o um alimento funcional (GUSSO et al., 2015; BRANDÃO et al., 2014).

Na literatura, nota-se um crescente aumento das pesquisas relacionadas à yacon, uma vez que esta cultura possui propriedades físico-químicas importantes à saúde humana. Dentre os benefícios, podemos citar o efeito imunostimulatório, efeito protetor contra o câncer de cólon, além do controle de pressão arterial, dos níveis de colesterol e diabetes (VIGNALE; GURNI, 2005; YASUDA et al., 2012; MOURA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2013).

Fatores como interação edafoclimática, cultivar e variedade interferem significativamente na produção agrícola. Nesse sentido, a disponibilidade de água no solo rege a produção vegetal, e em locais que não possuem sistemas de irrigação, esta disponibilidade de água é governada pelas condições climáticas, no qual a distribuição das chuvas é o responsável pelo armazenamento de água no solo (MAULE et al., 2001).

As necessidades hídricas para o yacon podem variar de 650 a 1000 mm ao ano no Peru (SEMINARIO et al., 2003), que devem ser distribuídas de maneira uniforme durante o período de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo. Segundo Alencar (2014), a necessidade de aumentar a produção agrícola de diversas culturas tem criado uma enorme pressão sobre a demanda de água pela agricultura, e em locais onde a chuva não é suficiente para suprir o consumo da planta, faz-se necessário a utilização de mecanismos tecnológicos, como a irrigação.

Além da disponibilidade hídrica da região, outro elemento meteorológico que afeta diretamente a produtividade agrícola é a temperatura do ar. Devido o yacon ser plantado em regiões de alta altitude, o desenvolvimento da cultura ocorre em temperaturas mais amenas, tendo o seu ótimo desenvolvimento em temperaturas que variam de 18 à 25 °C (GRAU; REA, 1997).

Atualmente, o uso de modelos de simulação tem se tornado uma ferramenta altamente eficiente e complementar às pesquisas experimentais, visto que a variabilidade climática é algo incontornável e que possui capacidade de afetar drasticamente a produtividade de uma cultura. A modelagem agrometeorológica é uma ferramenta que visa desenvolver estratégias de irrigação, estimar as condições hídricas da cultura durante seu ciclo e sua função de produção de água permitindo maior aproveitamento dos recursos naturais (BLUM, 2009; GEERTS; RAES, 2009).

O modelo AquaCrop, desenvolvido recentemente por Raes et al. (2009) e Steduto et al. (2009a), visa estimar a resposta das culturas à necessidade hídrica de forma simples e com precisão. O modelo utiliza poucas variáveis de entrada quando comparado a outros modelos, sendo essas variáveis obtidas por meio de experimentos em campo (ALENCAR, 2014).

Mesmo em condições limitantes de déficit hídrico, o AquaCrop faz a predição da produtividade, a necessidade de água e a eficiência do uso da água (RAES et al., 2009). A capacidade do AquaCrop para simular rendimentos para diferentes culturas tem sido amplamente testada por vários pesquisadores em todo o mundo sendo o modelo parametrizado e validado para as culturas do milho (HSIAO et al., 2009; HENG et al., 2009), algodão (FARAHANI et al., 2009; GARCIA-VIA et al., 2009), batata doce (RANKINE et al., 2015), cana-de-açúcar (ALENCAR, 2014), girassol (TODOROVIC et al., 2009), trigo (ANDARZIAN et al., 2011), tomate (DARKO et al., 2016).

Desse modo, este trabalho foi dividido em dois capítulos, sendo o primeiro a determinação das temperaturas basais inferior, superior e constante térmica do yacon, sendo dados de entrada do modelo AquaCrop e o segundo a calibração e a validação do modelo para a cultura do yacon em clima tropical, comparando assim os dados obtidos em campo com os dados simulados, de modo a torná-lo aplicável na avaliação da produtividade.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Características gerais do yacon e sua importância

O *Smallanthus sonchifolius*, conhecida popularmente como yacon, é uma batata pertencente à família Asteraceae, tendo seu centro de origem nos vales andinos da Bolívia, Equador, Argentina, Colômbia e Peru, em altitudes que variam de 2.000 a 3.100 metros, sendo domesticada e cultivada pelos antigos povos dessa região (VILHENA et al., 2000). Nos Andes, seu cultivo era tradicionalmente usado pelos agricultores como um alimento refrescante, devido à sua suculência (VANINI et al., 2009).

Apesar de ser encontrada em muitas regiões da Cordilheira dos Andes, essa cultura é cultivada principalmente por agricultores familiares, em quantidade suficiente para a subsistência, e poucas vezes são cultivadas para a comercialização (GRAU; REA, 1997; VANINI et al., 2009). Essa espécie foi introduzida na Europa há mais de 50 anos, com a finalidade de produzir álcool etílico, mas foi apenas a partir de 1982 que se tornou conhecido os benefícios que o yacon proporciona à saúde humana, tornando-se conhecida mundialmente.

A introdução desta cultura no Brasil ocorreu por volta de 1989 e, apesar dos notórios benefícios, seu cultivo comercial está restrito principalmente ao estado de São Paulo (VILHENA et al., 2000; SANTANA; CARDOSO, 2008). No Espírito Santo, o yacon ainda é pouco difundido, apesar de estar ganhando destaque no município de Santa Maria do Jetibá onde o cultivo é intensificado (PIMENTA et al., 2009).

Apesar de sua origem andina, essa espécie possui alta adaptabilidade quanto ao clima, à altitude e aos tipos de solo, tendo altas produções mesmo em países de clima quente, como o Brasil. Sua maturidade fisiológica pode ser obtida entre 180 a 300 dias após o plantio, no desabrochar das flores, sendo dependente do clima da região onde é cultivada (SANTANA; CARDOSO, 2008).

O yacon é uma planta perene, herbácea com altura que pode variar de 1 a 3 metros de altura (MALDONADO et al., 2008). Sua forma de propagação é vegetativa, por meio de seus rizomas, um órgão subterrâneo ramificado que pode ser dividido em 6 a 14 propágulos, e sua polpa, possui cores que podem variar de amarelo, branco, creme, branco com estrias roxas, roxo e rosa (MANRIQUE et al., 2005; VANINI et al., 2009). Sua casca possui também uma enorme variação de cores, sendo as mais comuns marron, creme ou branco-marfim e, após a colheita, a casca é retirada com facilidade, sendo que com o passar do tempo, a casca do tubérculo endurece e torna-se mais difícil de remover (POLREICH, 2003; BUTLER; RIVERA, 2004).

As folhas brotam de gemas do caule aéreo e possuem posição opostas, com bordas lobuladas formando uma ala de cada lado do pecíolo (NATIONAL RESEARCH CONCIL, 1989; MONTIEL, 1996). Elas também apresentam estruturas secretoras, como os tricomas, idioblastos e hidatódios, no qual secretam compostos secundários do grupo dos terpenos (DIP et al., 1996; GRAU; REA, 1997).

O yacon possui ótimo desenvolvimento em temperaturas de 18 à 25 °C, sendo que suas folhas toleram altas temperaturas, e é sensível a baixas temperaturas com uma tolerância mínima de 4-5 ° C (GRAU; REA, 1997). Apesar de essa planta sobreviver a longos períodos de seca, é uma cultura que necessita de uma boa demanda de água, sendo necessário entre 650 e 1000 mm de chuvas anuais para ótimas produções (SEMINARIO et al., 2003; FERNÁNDEZ et al., 2006). Solos que apresentam alta umidade podem ocasionar danos às raízes, provocando fissuras e podridão, o que causa prejuízo na qualidade externa do produto, diminuindo seu valor de mercado (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1989).

Segundo Delgado et al. (2013), o consumo dessa tuberosa geralmente ocorre descascado e fresco, preparado como uma salada de frutas, junto com bananas, laranjas. Além disso, também pode ser cozido no forno ou consumido sob a forma de uma bebida refrescante extraindo seu suco. Os autores relatam que o peso das raízes podem variar de 200 a 500 g cada, e cada planta produz grupos de 5 a 20 unidades, com uma média de 5 kg por planta.

Administrado como suplemento dietético, o yacon é bem tolerado e não produz resposta negativa, toxicidade ou efeitos nutricionais adversos (DELGADO et al., 2012). Além disso, por possuir baixo teor de glicose e alta concentração de fruto-oligossacarídeos, é estudado no controle de doenças metabólicas em pacientes com diabetes e síndrome metabólica (GENTA et al., 2005).

Estudos recentes mostraram que, nutricionalmente, o yacon oferece vários benefícios para a saúde. Podemos citar, por exemplo, níveis reduzidos de colesterol e glicose no sangue (ZAPAROLLI et al., 2013), propriedades imunoestimuladoras (VAZ-TOSTES et al., 2014), efeitos prebióticos (CAMPOS et al., 2012) proteção contra o câncer de colon (MOURA et al., 2012). Além disso, extratos fenólicos de folhas de yacon foram capazes de reduzir a produção de glicose em hepatócitos de ratos, aumentando a expressão de mRNA da glucoquinase (VALENTOVÁ et al., 2007).

Como antioxidantes naturais, os compostos de polifenóis são de grande importância para a saúde humana, particularmente na proteção de membranas celulares

contra danos causados por radicais de oxigênio (DELGADO et al., 2013). Além disso, esses compostos podem desempenhar um papel nas doenças cardiovasculares e câncer (NEVES; SILVA, 2007; PÉREZ-JIMÉNEZ et al., 2009). O extrato etanólico de folhas de yacon demonstrou exercer atividade antioxidante e efeitos citoprotectores contra hidróperóxido de terc-butilo em um modelo de dano oxidativo em hepatócitos de ratos (SIMONOVSKA et al., 2003). Os ensaios em seres humanos também relataram a atividade antioxidante dos compostos fenólicos presentes nas folhas de yacon, atuando para prevenir doenças crônicas, como a aterosclerose, uma doença que envolve radicais livres em seu desenvolvimento (VALENTOVÁ et al., 2005).

Além dos benefícios já mencionados sobre a saúde, outras vantagens também são encontradas tanto para os produtores quanto para o ambiente, como a alta produtividade, a adaptabilidade ao solo e clima, e a boa durabilidade pós-colheita se armazenado adequadamente, além de auxiliar no controle da erosão, tornando-o uma cultura importante no meio agrícola (GRAU; REA, 2002).

2.2. Água como fator limitante à produção

Um dos principais fatores limitantes à produção agrícola no mundo está atrelado à disponibilidade de água, onde as chuvas muitas vezes não são suficientes ou são mal distribuídas. Com o aumento da população, principalmente em países pobres e em desenvolvimento, existe uma grande necessidade de melhorar a eficiência do uso da água na produção agrícola (HSIAO et al., 2009). A quantidade de água utilizada pela planta proporciona uma variação em sua produtividade e na qualidade do produto.

A produtividade está condicionada especialmente à água utilizada pelo cultivo, no qual todas as outras variáveis são intrínsecas à produtividade em seu nível ótimo (FRIZZONE e SOARES, 2005). O suprimento hídrico também é responsável pela taxa de assimilação de CO₂ (STEDUTO et al., 2007). Para Rosa et al. (1991), a diminuição na taxa de assimilação de CO₂ durante o déficit hídrico é dada, sobretudo, à diminuição da abertura estomática em resposta à menor disponibilidade no solo, ocasionando a redução de fotoassimilados que conseqüentemente reduz o rendimento.

Apesar da boa adaptação do yacon a períodos de seca, sua produtividade pode ser afetada substancialmente, podendo se tornar inviável seu cultivo, sendo necessário em média 800 mm para que a cultura complete seu ciclo sem reduzir sua produção (SEMINARIO et al., 2003). Não obstante, o excesso de chuvas também podem ocasionar baixas em sua produção, visto que alta umidade do solo provoca fissuras em suas raízes,

além de torná-las mais suscetíveis à ocorrência de podridão, sendo esta a parte comercial da cultura (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1989).

Nesse sentido, percebe-se que o manejo de água adequado e estratégico é um aspecto muito importante, que visa melhorar o planejamento da irrigação e, conseqüentemente, aumentar a eficiência de uso da água no sistema de produção (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). Os autores Moraes et al. (1998) afirmam que as relações entre parâmetros climatológicos e produção agrícola são bastante complexas, nos quais os fatores ambientais podem afetar o crescimento, o desenvolvimento, e a produção das plantas sob diferentes formas nas diversas fases do ciclo da cultura.

A quantificação da produtividade em função da água disponível para a cultura durante o ciclo de produção é caracterizada por Bernardo (2006) como função de produção “água-cultura”, que é uma representação gráfica ou matemática dessa relação. O autor define ainda que função de produção é a relação técnica entre um conjunto específico de fatores envolvidos num processo produtivo qualquer e a produtividade física possível de se obter com a tecnologia existente.

Portanto, a função de produção “água-cultura” típica é quando se relaciona à lamina de água aplicada durante o ciclo da cultura versus à produtividade comercial. Moraes et al. (1998) relatam que modelos agrometeorológicos relacionados com crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas fornecem dados que possibilitam o setor agrícola na tomada de decisões, como o melhor planejamento do uso do solo, adaptação de culturas, monitorar e simular previsões de safras em decorrência do clima, além do controle de pragas e doenças e estratégia de pesquisa e planejamento.

Os autores Martins et al. (2015) afirmam que esses modelos são utilizados desde a década de 1950 e, mais recentemente, são aplicados em programas de monitoramento agrícola de inúmeros países, que avaliam o potencial da produção de acordo com as condições meteorológicas e ainda com foco na situação de segurança alimentar. Os modelos possibilitam pressupor situações futuras, embasando decisões que podem diminuir os custos e atingir maiores produtividades, podendo assim orientar épocas para plantio, estimar de perdas de produção, usando sempre como referência parâmetros de clima, solo, cultivar, manejo, entre outras, tornando o plantio de determinada cultura economicamente viável para o produtor (HAMID; ABDULLAH, 2008; SALES et al., 2016).

2.3. Modelo AquaCrop

Segundo Loomis et al. (1979), a definição dos modelos são, em geral, a simplificação ou abstração de um sistema real. Esse é particularmente o caso dos modelos de sistemas biológicos, como culturas, no qual são diversas as variáveis que interagem sobre uma ampla gama de níveis de organização (SINCLAIR; SELIGMAN, 1996). Existem na literatura diversos modelos com a finalidade de prever a produtividade, sendo o modelo AquaCrop desenvolvido pela Food and Agricultural Organization - FAO um desses, no qual vem se destacando pelo seu equilíbrio entre precisão, simplicidade e robustez.

O modelo AquaCrop avalia o efeito da água no rendimento das culturas, ou seja, a água possui função substancial no modelo, no qual é denominado “*water-driven model*” (ALENCAR, 2014). Ele adota a equação original de Doorenbos e Kassam (1979) como princípio e se desenvolve a partir dela por meio do cálculo da biomassa, baseando-se na quantidade de água que é transpirada.

O conceito original entre o consumo de água pela planta em relação à produtividade de uma cultura pelo modelo AquaCrop foi um aperfeiçoamento a partir da abordagem de Doorenbos e Kassam (1979), no qual o modelo de evapotranspiração da cultura (ETc) é separado em transpiração da cultura (Tr) e evaporação da água do solo (E) para que não se confunda o efeito do uso improdutivo do consumo de água pela evaporação (STEDUTO et al., 2009a). Com a separação do processo de evapotranspiração da cultura, torna-se possível introduzir ligações funcionais com base em processos fisiológicos subjacentes.

A produção de biomassa (B) é obtida a partir da transpiração real da cultura, por meio da produtividade da água (WP). As Eq. 1 e 2 são as principais representações do modelo de crescimento do AquaCrop.

$$B = WP \cdot \sum Tr \quad (\text{Eq. 1})$$

$$Y = B \cdot HI \quad (\text{Eq. 2})$$

em que:

WP - Produtividade da água ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$);

Tr - Transpiração da cultura (mm);

Y - Produção final (kg);

HI - Índice de colheita (%).

Os autores Raes et al. (2009) e Steduto et al. (2009a) introduziram o AquaCrop para simular a produção potencial de herbáceas em função de várias condições hídricas e sua produtividade final é estimada basicamente por 4 etapas (Figura 1), conforme descrito: desenvolvimento do dossel, transpiração da cultura, acúmulo de biomassa, produtividade final.

Dentre as características que diferenciam o AquaCrop dos demais modelos agrometeorológicos, tais como DSSAT, APSIM, CROPWAT, podemos citar: a) uso da escala de tempo com medidas diárias, para maior aproximação da resposta da cultura ao déficit hídrico, b) não há separação de biomassa entre os vários órgãos da planta, c) uso da cobertura do dossel (CD) para expressar o desenvolvimento da folhagem da cultura, uma vez que a CD introduz uma simplificação significativa na simulação, consolidando o crescimento expansivo da folha, ângulo e distribuição para uma função de crescimento global, o que permite ao usuário inserir valores observados da CD, e d) padronização da produção de biomassa em relação ao uso da água (WP) para demanda evaporativa atmosférica e concentração de CO_2 , conferindo ao modelo uma ampla capacidade de adaptação podendo conferir seu uso em diferentes condições climáticas, com possibilidade de inclusão de cenários futuros (STEDUTO et al., 2009a).

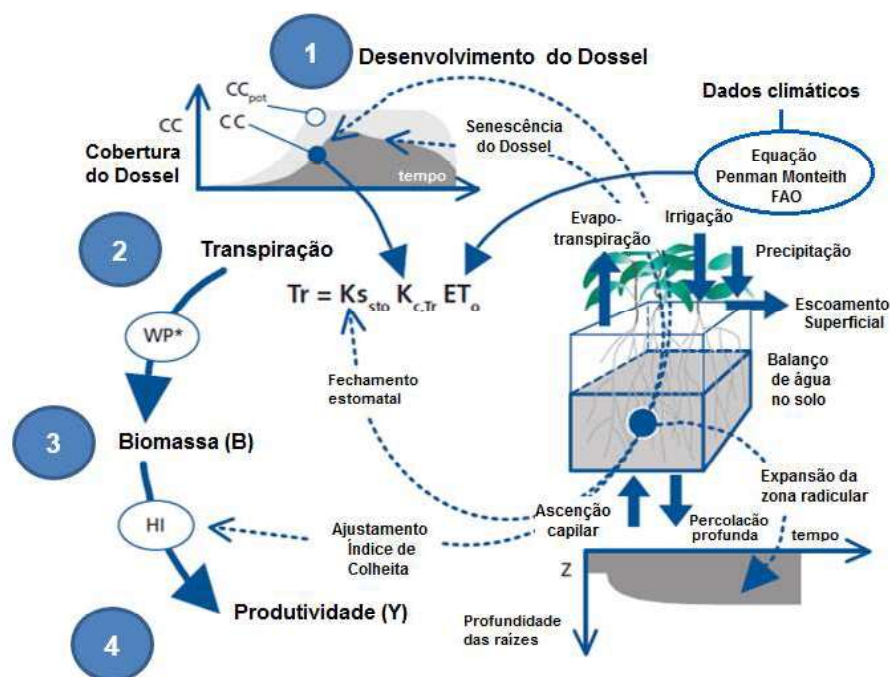


Figura 1. Esquema de simulação do AquaCrop com indicação das 4 principais etapas e processos contabilizados.

Fonte: Martins (2017), adaptado de Raes et al. (2011).

2.3.1. Expansão do dossel

O modelo AquaCrop se distingue de outros modelos agrometeorológicos em vários parâmetros exclusivos. A expansão do dossel é um desses parâmetros, que é simulada em termos de cobertura de dossel verde (Canopy Cover (CC)), ao invés de utilizar o índice da área foliar (FOSTER et al., 2017).

A cobertura do dossel representa a fração da superfície do solo que está coberta pelo dossel, que varia de zero na sementeira até um valor máximo obtido em geral, na metade do ciclo (MARTINS, 2017), sendo sua variação decorrente da cultura em análise, da densidade de plantas, do clima e solo. O uso dessa característica tem a vantagem de que os dados de saída do modelo podem ser relacionados a dados obtidos por sensoriamento remoto, devido à forte correlação da cobertura de copa verde com os índices de vegetação, permitindo o uso destes para calibrar e validar as saídas de simulação do AquaCrop rapidamente em grandes áreas cultivadas (CALERA et al., 2001; JIANG et al., 2006; JOHNSON e TROUT, 2012; KIM; KALUARACHCHI, 2015).

Para o desenvolvimento do dossel, é esperado um crescimento exponencial, utilizado desde a emergência até alcançar a metade do desenvolvimento máximo do dossel (Figura 2). Após a metade da cobertura máxima do dossel ser atingida, as plantas começam a sombrear mais o solo e ocorre uma queda exponencial, até alcançar a cobertura máxima apresentada na Eq. 3 (STEDUTO et al., 2009b).

$$CC = CC_x - (CC_x - CC_o) \cdot e^{-t \cdot CGC} \quad (\text{Eq. 3})$$

em que:

CC - cobertura do dossel no tempo t (fração cobertura do solo);

CC_o - cobertura inicial do solo no tempo t = 0 (fração cobertura do solo), com 90% de emergência;

CGC - coeficiente de crescimento do dossel (aumento da fração da cobertura do solo por dia ou graus-dia);

t - tempo (dias ou graus-dia);

CC_x - é a cobertura máxima dossel (expressa como fração do solo).

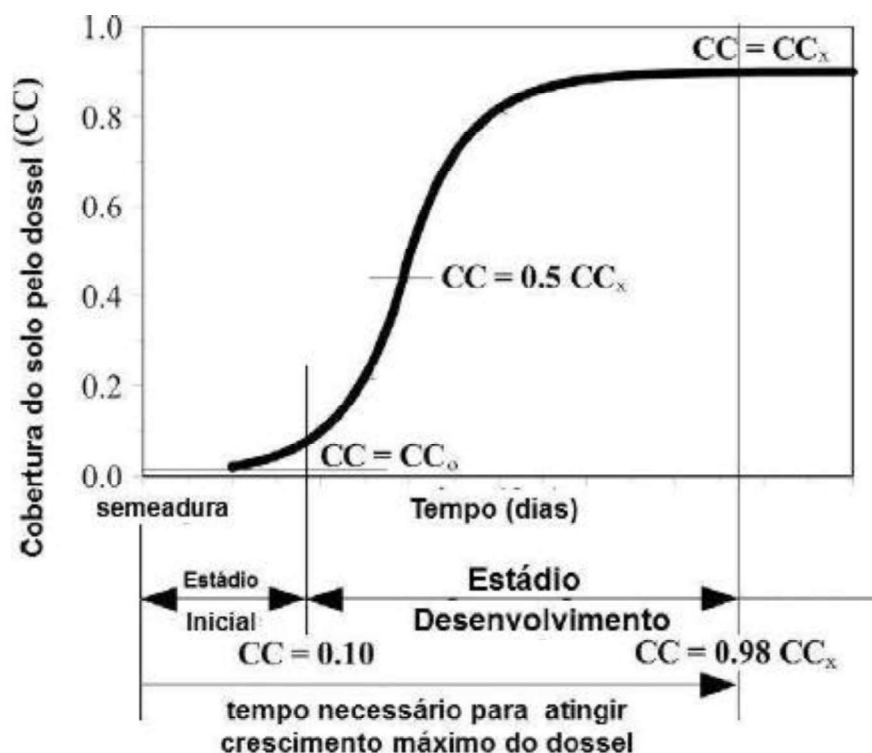


Figura 2. Representação esquemática do desenvolvimento do dossel durante o crescimento exponencial e as fases de declínio exponencial.

Fonte: Alencar (2014), adaptado de Steduto et al. (2009a).

Após total desenvolvimento do dossel e a maturação, tendo como responsável principalmente o tempo e a cultura cultivada, inicia-se assim o declínio do dossel (Figura 3), por meio da senescência foliar, podendo ser representado pela Eq. 4

$$CC = CC_x \cdot \left[1 - 0,05 \cdot \left(\frac{CDC}{e^{CC_x}} t - 1 \right) \right] \quad (\text{Eq. 4})$$

em que:

CC - cobertura do solo pelo dossel no tempo t (fração da cobertura do solo), com 90% de emergência;

CC_x - cobertura máxima do solo pelo dossel no início da senescência ($t = 0$) (fração da cobertura do solo);

CDC - coeficiente de declínio do dossel ($\% \text{ dia}^{-1}$ ou graus-dia^{-1}), usado para descrever a fase de declínio foliar;

t - tempo (dias ou graus-dia).

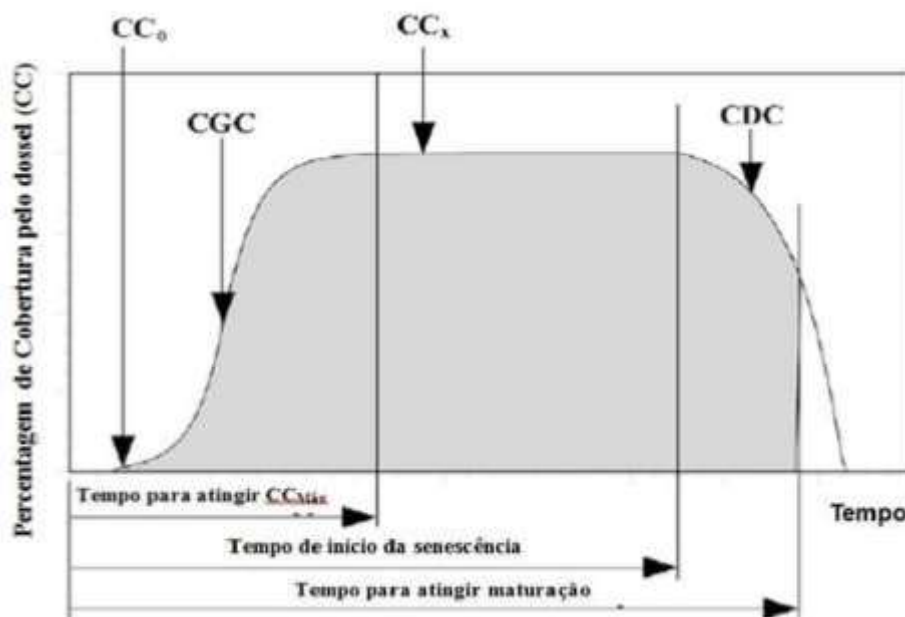


Figura 3. Variação da cobertura do dossel (CC) ao longo do ciclo da cultura sob condições não limitantes. CC_0 e CC_x são a cobertura inicial e máxima, respectivamente.

Fonte: Alencar (2014), adaptado de Raes et al. (2011).

O efeito do estresse hídrico pode provocar efeitos negativos na expansão do dossel, acelerando a senescência foliar das plantas a fim de reduzir a perda de água. Devido a tais circunstâncias, o modelo AquaCrop simula essa redução por meio do ajuste do coeficiente de declínio do dossel (CDC) e do coeficiente de estresse hídrico para senescência ($K_{s_{sen}}$), apresentado na Eq. 5.

$$CDC_{ajus} = 1 - K_{s_{sen}} \cdot CDC \quad (\text{Eq. 5})$$

em que:

CDC_{ajus} - coeficiente de declínio do dossel ajustado em decorrência do estresse hídrico;

$K_{s_{sen}}$ - coeficiente de estresse hídrico relacionado à senescência do dossel;

CDC - coeficiente de declínio do dossel ($\% \text{ dia}^{-1}$ ou graus-dia^{-1}) usado para descrever a fase de declínio foliar.

2.3.2. Transpiração

A transpiração de uma cultura é um processo biofísico mediado por diversos fatores nos quais a água passa pela planta e é perdida em forma de vapor, auxiliando no

controle da temperatura e na incorporação do CO₂ atmosférico. À medida que ocorre o crescimento do dossel, a simulação da transpiração (Tr) é feita separadamente da evaporação do solo (E), visto que a transpiração é a base para a produção de biomassa (Eq. 1). O modelo busca fornecer estimativas precisas de Tr, considerando a extensão do crescimento do dossel, os efeitos da microadvecção nas entrelinhas e os efeitos proporcionados pela abertura estomática (STEDUTO et al., 2009b). Nesse sentido, devido aos efeitos ocasionados pela microadvecção e pela cobertura parcial do solo pela cultura, é necessário um ajuste na percentagem de cobertura do solo pelo dossel (CC*), conforme a Eq. 6.

$$CC^* = 1,172.CC - CC^2 + 0,3.CC^3 \quad (\text{Eq. 6})$$

Quando não há estresse hídrico pelas plantas, a transpiração no AquaCrop é proporcional à CC* (Eq. 7).

$$Tr = (CC^* K_{CTRX}) ETo \quad (\text{Eq. 7})$$

em que:

K_{CTRX} - é o coeficiente de transpiração máxima da cultura.

2.3.3. Produtividade da água

No modelo, o dossel verde representa a fonte de transpiração, que é transformada em certa quantidade proporcional de biomassa, produzida por meio da produtividade da água normalizada (WP). A normalização da WP (Eq. 8) para o clima é baseada na demanda evaporativa, representada pela ETo e pela concentração de dióxido de carbono na atmosfera. O objetivo da normalização é fazer com que a produtividade da água da biomassa (WP) no modelo possa ser utilizada em diferentes localidades e épocas do ano, além da concentração de CO₂ que auxilia o modelo a simular cenários climáticos futuros.

$$WP = \left[\frac{B}{\sum \frac{Tr}{ETo}} \right] [CO_2] \quad (\text{Eq. 8})$$

em que:

B - Biomassa total (g.m⁻²), kg de biomassa por m⁻² ;

WP - Parâmetro produtividade da água (g.m^{-2}), kg de biomassa por m^{-2} por mm de água transpirada ou kg de biomassa por m^{-3} de água transpirada;

Tr - Transpiração do cultivo (mm);

ET_o - Evapotranspiração de referência (mm);

CO₂ - Concentração de CO₂ na atmosfera (ppm).

O uso do somatório indica intervalos de tempo sequenciais apresentando o período em que a biomassa (B) é produzida. Já o emprego do [CO₂], indica a normalização para um ano específico, com a concentração de CO₂ média da época analisada, sendo o ajuste da WP descrito por Raes et al. (2009). A produtividade da água normalizada para a biomassa (WP) é um parâmetro fundamental que confere o funcionamento do modelo e tem se mostrado quase constante para diferentes demandas evaporativas (RAES et al., 2009; RAES et al., 2012).

Apesar de o modelo AquaCrop utilizar o índice de colheita (HI) como parâmetro chave, o mesmo não calcula a partição de biomassa no diferentes órgãos das plantas. Essa escolha evita lidar com a complexidade dos processos associadas ao particionamento, uma vez que eles são muito difíceis de modelar (STEDUTO et al., 2009b).

2.4. Parametrização e validação do Modelo AquaCrop

Em geral, a modelagem é realizada por meio de equações matemáticas, sendo descritas em programas computacionais a fim de representar adequadamente o comportamento de um determinado sistema (SCORZA JÚNIOR, 2006). O modelo AquaCrop é dividido em dois grupos, de acordo com seus parâmetros, sendo um grupo formado pelas características que apresentam poucas alterações em decorrência do clima e condições locais, tais como a produtividade hídrica – WP, índice de colheita – HI e transpiração, denominados parâmetros conservativos, e o segundo grupo é representado pelos parâmetros que mudam de acordo com o ambiente e com as características da cultivar, denominados parâmetros específicos da cultura (MARTINS, 2017).

Devido às alterações que os parâmetros menos conservativos sofrem em decorrência do manejo da cultura, das condições do solo e do clima, são necessários determinados ajustes a fim de se obter respostas plausíveis dos modelos em determinadas situações, como em variedades específicas e condições do ambiente local

(HSIAO et al., 2009; HENG et al., 2009). Desse modo, são feitas simulações com os dados de entrada do modelo, comparando as estimativas com os dados reais da cultura obtidas em campo e, posteriormente, realizando o ajuste dos parâmetros.

Após a parametrização do modelo, ocorre o processo de validação, realizado por meio de testes do modelo parametrizado em outros locais ou/e épocas em conjunto com estatísticas a fim de determinar se tal calibração é representativa. Segundo Rykiel Júnior (1996), a validação é a comprovação de que um modelo dentro de seu domínio de aplicabilidade representa de forma compatível e satisfatória os resultados esperados pelo modelo. Nesse contexto, em modelos de crescimento, como o AquaCrop, a validação testa assim a habilidade do modelo em simular tanto flutuações a curto prazo no crescimento quanto em produzir corretas estimativas no final do ciclo da cultura (ALENCAR, 2014).

REFERÊNCIAS

ALENCAR, L. P. D. **Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar**. 117f. Tese para obtenção do título de *doctor scientiae* (Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

ANDARZIAN, B.; BANNAYAN, M.; STEDUTO, P.; MAZRAEH, H.; BARATI, M. E.; BARATI, M. A.; RAHNAMA, A. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran, **Agricultural Water Management**, v. 100, n. 1, p. 1-8, 2011.

BERNARDO, S. Manejo da irrigação na cana-de-açúcar. In: XVI Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, Goiás, GO. **Anais....** p. 1-11, 2006. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Cana_irrigada_producao_000fizvd3t102wyiv802hvm3jlwle6b8.pdf>. Acesso 18/08/2017.

BLUM, F. A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. **Field crops research**, v. 112, n. 2-3, p. 119-123, 2009.

BRANDÃO, C. C.; ASQUIERI, E. R.; ATTARAN, S.; DAMIANI, C. Study of the aging of fermented of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and sensory profile and acceptance. **Food Science and Technology**, v. 34, n. 2, p. 332-340, 2014.

BUTLER, G.; RIVERA, D. Innovations in peeling technology for yacon. **Project Report International Potato Center**, p. 2004-1127, 2004.

CALERA, A.; MARTÍNEZ, C.; MELIA, J. A procedure for obtaining green plant cover: relation to NDVI in a case study for barley. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 17, p. 3357-3362, 2001.

CAMPOS, D.; BETALLELUZ-PALLARDEL, I.; CHIRINOS, R.; AGUILAR-GALVEZ, A.; NORATTO, G.; PEDRESCHI, R. Prebiotic effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl), a source of fructooligosaccharides and phenolic compounds with antioxidant activity. **Food Chemistry**, v. 135, n. 3, p. 1592-1599, 2012.

DARKO, R. O.; SHOUQI, Y.; HAOFANG, Y.; LIU, J.; ABBEY, A. Calibration and validation of AquaCrop for deficit and full irrigation of tomato. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 9, n. 3, p. 104-110, 2016.

DELGADO, G. T. C.; THOMÉ, R.; GABRIEL, D. L.; TAMASHIRO, W. M. D. S. C.; PASTORE, G. M. Yacon (*Smallanthus sonchifolius*)-derived fructooligosaccharides improves the immune parameters in the mouse. **Nutrition Research**, v. 32, n. 11, p. 884-892, 2012.

DELGADO, G. T. C.; TAMASHIRO, W. M. D. S. C.; JUNIOR, M. R. M.; PASTORE, G. M. Yacon (*Smallanthus sonchifolius*): a functional food. **Plant foods for human nutrition**, v. 68, n. 3, p. 222-228, 2013.

DIP, M. R.; MACHADO, M. R.; OLIVEIRA, D. M. T. Estruturas secretoras de órgãos vegetativos de yacon (*Polymnia sonchifolia* – Asteraceae). In: Congresso Latino Americano de Raízes Tropicais I e Congresso Brasileiro de Mandioca, 9, São Pedro, 1996.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrigation and drainage paper**, v. 33, p. 257, 1979.

FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; OWEIS, T. Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. **Agronomy journal**, v. 101, n. 3, p. 469-476, 2009.

FERNÁNDEZ, E. C.; VIEHMANNOVÁ, I.; LACHMAN, J.; MILELLA, L. Yacon [*Smallanthus sonchifolius* (Poepping & Endlicher) H. Robinson]: a new crop in the Central Europe. **Plant Soil and Environment**, v. 52, n. 12, p. 564, 2006.

FOSTER, T.; BROZOVIĆ, N.; BUTLER, A. P.; NEALE, C. M. U.; RAES, D.; STEDUTO, P.; FERERES, E.; HSIAO, T. C. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. **Agricultural water management**, v. 181, p. 18-22, 2017.

FRIZZONE, J. A.; SOARES A. J. **Planejamento de irrigação: análise de decisão de investimento**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 627, 2005.

GARCIA-VIA, M.; FERERES, E.; MATEOS, L.; ORGAZ, F.; STEDUTO, P. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. **Agronomy journal**, v. 101, n. 3, p. 477-487, 2009.

GRAU, A.; REA, J. Yacon *Smallanthus sonchifolius* (Poepp. & Endl.) H. ROBINSON. In: HERMANN, M.; HELLER, J. (Eds.). Andean roots and tubers: Ahipa, arracacha, maca and yacon. **Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops**. Rome: IPK, Gatersleben / IPGRI, p. 199- 256, 1997.

GRAU, A.; REA, J. **Yacón: *Smallanthus sonchifolius* (Poepp. & Endl.) H. ROBINSON**. Tucuman (Argentina): Universidad Nacional de Tucumán, Laboratorio de Investigaciones Ecológicas de los Yungas. 2002.

GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural water management**, v. 96, n. 9, p. 1275-1284, 2009.

GENTA, S. B.; CABRERA, W. M.; GRAU, A.; SÁNCHEZ, S. S. Subchronic 4-month oral toxicity study of dried *Smallanthus sonchifolius* (yacon) roots as a diet supplement in rats. **Food and chemical toxicology**, v. 43, n. 11, p. 1657-1665, 2005.

GUSSO A. P; MATTANNA P; RICHARDS N. Yacon: benefícios à saúde e aplicações tecnológicas. **Ciência Rural**, v. 45, n. 5, p. 912-919, 2015.

HAMID, M. N.; ABDULLAH, M. Y. Contribution of mathematical model for the development of sustainable agriculture. **Malaysian Journal of Mathematical Sciences**, v. 2, n. 2, p. 83-91, 2008.

HSIAO, T. S.; HENG, L.; STETUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E. The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 448-459, 2009.

HENG, L. K.; HSIAO, T.; EVELT, S.; HOWEL, T.; STETUTO, P. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, 488-498, 2009.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugar cane and response to water deficits. **Field Crops Research**. v. 92, p. 185-202, 2005.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; CHEN, J.; CHEN, Y.; LI, J.; YAN, G.; ZHANG, X. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. **Remote sensing of environment**, v. 101, n. 3, 366-378, 2006.

JOHNSON, L. F.; TROUT, T. J. Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. **Remote Sensing**, v. 4, n. 2, p. 439-455, 2012.

KIM, D.; KALUARACHCHI, J. Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional crop information. **Agricultural Water Management**, v. 149, p. 143-155, 2015.

LOOMIS, R. S.; R. RABBINGE, E. N. G. Explanatory models in crop physiology. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 30, n. 1, p. 339-367, 1979.

MALDONADO, S.; PIZARRO, P. L.; MARTÍNEZ, V.; VILLATARCO, M.; SINGH, J. Producción y comercialización de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) en comunidades rurales del Noroeste argentino. **Agroalimentaria**, v. 13, n. 26, p. 119-125, 2008.

MANRIQUE, I.; PÁRRAGA, A.; HERMANN, M. Conservación y uso de la biodiversidad de raíces y tubérculos andinos: Una década de investigación para el desarrollo (1993-2003). **Lima: International Potato Center**, p. 40, 2005.

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; GIAROLLA, A.; ALVARÁ, R. C. S.; ANDRADE, C. L. T. Calibração do modelo AquaCrop para estimativa de rendimento de milho no Semiárido do Brasil. In: XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Lavras, MG. **Anais...** 2015.

MARTINS, M. A. **Estimativa da produtividade da cultura do milho no semiárido brasileiro, com base no modelo aquacrop e previsão climática sazonal**. 115p. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA J. R.; G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 295-301. 2001.

MONTIEL, V. N. El cultivo de yacón. Lima, Perú: Instituto Nacional de Investigación Agraria – **Boletín Técnico**, n. 35, p.19-20, 1996.

MORAES, A. V. C.; CAMARGO, M. B. P.; MASCARENHAS, H. A. A.; MIRANDA, M. A. C.; PEREIRA, J. C. V. N. A. Teste e análise de modelos agrometeorológicos de

estimativa de produtividade para a cultura da soja na região de Ribeirão Preto. **Bragantina**, v. 57, n. 2, p. 393-406, 1998.

MOURA N. A.; CAETANO B. F.; SIVIERI K.; URBANO L. H.; CABELLO C.; RODRIGUES M. A.; BARBISAN L. F. Protective effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) intake on experimental colon carcinogenesis. **Food and Chemical Toxicology**, v. 50, n. 8, p. 2902-2910, 2012.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Lost crops of the incas**: little-known plants of the Andes with promise for worldwide cultivation. Washington: Academy Press, p. 415, 1989.

NEVES, V. A.; SILVA, M. A. Polyphenol oxidase from yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 55, n. 6, p. 2424-2430, 2007.

OLIVEIRA, G. O.; BRAGA, C. P.; FERNANDES, A. A. H. Improvement of biochemical parameters in type 1 diabetic rats after the roots aqueous extract of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). **Food and Chemical Toxicology**, v.59, p.256-260, 2013.

PÉREZ-JIMÉNEZ, J.; SERRANO, J.; TABERNERO, M.; ARRANZ, S.; DÍAZ-RUBIO, M. E.; GARCÍA-DIZ, L.; GOÑI, I.; SAURA-CALIXTO, F. Bioavailability of phenolic antioxidants associated with dietary fiber: plasma antioxidant capacity after acute and long-term intake in humans. **Plant foods for human nutrition**, v. 64, n. 2, p. 102-107, 2009.

PIMENTA, A. R. O.; SALOMÃO, K. C.; SILVA, A. G.; RIBEIRO, L. F. Plantar sem matar para comer sem morrer – o cultivo orgânico de plantas medicinais em Santa Maria de Jetibá, Espírito Santo, sudeste do Brasil. **Natureza online**, v. 7, n. 1, p. 43-50, 2009.

POLREICH S. **Establishment of a Classification Scheme to structure the Post-Harvest Diversity of Yacon Storage Roots (*Smallanthus sonchifolius* (Poepp. &**

Endl.) H. Robinson). 58 p. Tese. University of Kassel: Faculty of Agriculture, International Rural Development and Environmental Protection, 2003.

RAES, D.; STEDUTO P.; HSIAO T. C.; FERERES E. AquaCrop –The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 438-447, 2009.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. Calculation procedures. **Reference manual AquaCrop version**, v. 4, 2012.

RANKINE, D. R.; COHEN, J. E.; TAYLOR, M. A.; COY, A. D.; SIMPSON, L. A.; STEPHENSON, T.; LAWRENCE, J. L. Parameterizing the FAO AquaCrop model for rainfed and irrigated field-grown sweet potato. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 1, p. 375-387, 2015.

ROBINSON, H. Studies in the Heliantheae (Asteraceae). XII. Re-establishment of the genus *Smallanthus*. **Phytologia**, v. 39, n. 1, p. 47-53, 1997.

ROSA, L. M.; DILLENBURG, L. R.; FORSETH, I. N. Responses of soybean leaf angle, photosynthesis and stomatal conductance to leaf and soil water potential. **Annals of Botany**, v. 67, n. 1, p. 51-8, 1991.

RYKIEL JÚNIOR, E. J. Testing ecological models: the meaning of validation. **Ecological modelling**, v. 90, n. 3, p. 229-244, 1996.

SALES, R. A.; LOUZADA, J. M.; OLIVEIRA, E. C.; PINHEIRO, M. A. B.; SALES, R. A. Estimativa das necessidades hídricas do milho cultivado nas condições edafoclimáticas de São Mateus – ES. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13 n. 23, p. 598-609, 2016.

SANTANA, I.; CARDOSO, M. H. Raiz tuberosa de yacon (*Smallanthus sonchifolius*): potencialidade de cultivo, aspectos tecnológicos e nutricionais. **Ciência Rural**, v. 38, n. 3, p. 898–905, 2008.

SCORZA JÚNIOR, R. P. Modelagem matemática e simulação de sistemas: uma importante ferramenta na pesquisa agropecuária. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. (Org.). **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, p. 63-74, 2006.

SEMINARIO, J.; VALDERRAMA, M.; MANRIQUE, I. **El yacon: fundamentos para el aprovechamiento de un recurso promisorio**. Lima, Peru: Centro Internacional de la Papa (CIP), Universidad Nacional de Cajamarca, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), 2003. 60p.

SILVA, D. M. N. **Cultivo de yacon em duas condições edafoclimáticas e épocas de plantio no Sul do Espírito Santo**. 86 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias. 2015.

SIMONOVSKA, B.; VOVK, I.; ANDRENŠEK, S.; VALENTOVÁ, K.; ULRICHOVÁ, J. Investigation of phenolic acids in yacon (*Smallanthus sonchifolius*) leaves and tubers. **Journal of chromatography A**, v. 1016, n. 1, p. 89-98, 2003.

SINCLAIR, T. R.; SELIGMAN, N. G. Crop modelling: From infancy to maturity. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 5, p. 698-704, 1996.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. **Irrigation Science**, v. 25, n. 3, p. 189–207, 2007.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009a.

STEDUTO, P.; RAES, D.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; HENG, L. K.; HOWELL, T. A.; EVETT, S. R.; ROJAS-LARA, B. A.; FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; OWEIS, T. Y.; WANI, S. P.; HOOGEVEEN, J.; GEERTS, S. Concepts and applications of AquaCrop: the FAO crop water productivity model. **Crop Modeling and Decision Support**, 175-191, 2009b.

TODOROVIC, M.; ALBRIZIO, R.; ZIVOTIC, L.; ABI SAAB, M.; STWCKLE, C.; STEDUTO, P. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 509–521, 2009.

VALENTOVÁ, K.; TRUONG, N. T.; MONCION, A.; WAZIERS, I.; ULRICHOVÁ, J. Induction of glucokinase mRNA by dietary phenolic compounds in rat liver cells in vitro. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 55, n. 19, p. 7726-7731, 2007.

VALENTOVÁ, K.; ŠERŠEŇ, F.; ULRICHOVÁ, J. Radical scavenging and anti-lipoperoxidative activities of *Smallanthus sonchifolius* leaf extracts. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 53, n. 14, p. 5577-5582, 2005.

VANINI, M.; BARBIERI, R. L.; CEOLIN, T.; HECK, R. M.; MESQUITA, M. K. A relação do tubérculo andino yacon com a saúde humana. **Ciência, Cuidado e Saúde**, v. 8, p. 92-96, 2009.

VAZ-TOSTES M. D.; VIANA M. L.; GRANCIERI, M.; LUZ T. C. S.; PAULA, H.; PEDROSA, R. G.; COSTA, N. M. B. Yacon effects in immune response and nutritional status of iron and zinc in preschool children. **Nutrition**, v. 30, n. 6, p. 666-672, 2014.

VIGNALE, N. D.; GURNI, A. A. Identificación micrográfica de las hojas de *Smallanthus sonchifolius* (Poepp. & Endl.) H. Robinson (Asteraceae). **Acta Farmaceutica Bonaerense**, v. 24, n. 1, p. 96-98, 2005.

VILHENA, S. M. C.; CÂMARA, F. L. A.; KAKIHARA, S. T. O cultivo de yacon no Brasil. **Horticultura Brasileira**, v. 18, n. 1, p. 5-8, 2000.

YASUDA, A.; INOUE, K.; SANBONGI, C.; YANAGISAWA, R.; ICHINOSE, T.; TANAKA, M.; YOSHIKAWA, T.; TAKANO, H. Dietary supplementation with fructooligosaccharides attenuates allergic peritonitis in mice. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, v. 422, p. 546–550, 2012.

ZAPAROLLI, M. R.; NASCIMENTO, N. C.; BAPTISTA, D. R.; VAYEGO, A. S.
Alimentos funcionais no manejo da diabetes mellitus. **Revista Ciência Saúde**, v. 6, n.
1, p. 12-17, 2013.

CAPÍTULO I - TEMPERATURA BASAL, DURAÇÃO DO CICLO E CONSTANTE TÉRMICA PARA A CULTURA DO YACON

RESUMO

O yacon é uma planta herbácea, perene, de ocorrência natural na América do Sul, cultivada em altitudes que variam de 900 a 3.500 m acima do nível do mar. A cultura surge como alternativa de produção, destacando-se pelo seu potencial produtivo em climas mais amenos e pelos benefícios proporcionados à saúde humana. Objetivou-se, com este trabalho, determinar as temperaturas, bem como a duração do ciclo e a constante térmica para a cultura do yacon. O estudo foi desenvolvido com base em dados fenológicos e das condições meteorológicas dos experimentos de campo, realizados em três épocas de plantio (Outono, Inverno e Primavera) no ano de 2013, em uma área experimental localizada no município de Ibatiba, estado do Espírito Santo. A temperatura basal inferior foi determinada pelos métodos do menor desvio-padrão em dias e graus-dia, desenvolvimento relativo e coeficiente de variação em graus-dia para dois subperíodos: emergência-maturação e início da tuberização e maturação. A temperatura basal superior foi determinada pelos métodos de desvio-padrão e coeficiente de variação, ambos em graus-dia e a determinação da relação dos elementos meteorológicos com o início da tuberização. Os valores de temperatura basal inferior determinados para o yacon foi de 12,5 °C nos dois subperíodos estudados e a temperatura basal superior 34,0 °C. A produtividade de raízes tuberosas foi maior no plantio de outono, em decorrência do maior ciclo, em vista da menor temperatura e menor fotoperíodo. Por sua vez, foi necessário maior soma térmica para iniciar a tuberização com o atraso do plantio.

INTRODUÇÃO

Pertencente à família Asteraceae e originária dos vales andinos na América do Sul em altitudes que variam de 900 a 3.500 m acima do nível do mar (BORGES et al., 2012), a cultura do yacon (*Smallanthus sonchifolius*) surge com grande potencial na medicina popular, uma vez que sua raiz oferece vários benefícios para a saúde humana, tais como a redução dos níveis de colesterol e glicose no sangue (ZAPAROLLI et al.,

2013), propriedades imunoestimuladoras (VAZ-TOSTES et al., 2014), efeitos prebióticos (CAMPOS et al., 2012) proteção contra o câncer de colon (MOURA et al., 2012), entre outros. É uma cultura tuberosa capaz de tolerar temperaturas mínima de até 4 a 5 °C, entretanto seu desenvolvimento ótimo ocorre em temperaturas de 18 à 25 °C (GRAU & REA, 1997).

Dentre as principais características da cultura, está sua adaptabilidade às condições edafoclimáticas, facilidade nos tratos culturais e boa produtividade, sendo observados no Brasil rendimentos entre 45 até 100 ton ha⁻¹ no estado de São Paulo (KAKIHARA et al., 1996; GRAU & REA, 2002; OLIVEIRA & NISHIMOTO, 2004). Apesar das boas características apresentadas tornando-a uma cultura importante no meio agrícola, o yacon ganhou notoriedade mundialmente por ser uma grande fonte de componentes bioativos como frutooligossacarídeos (FOS) e compostos fenólicos (DUARTE et al., 2008; OJANSIVU et al., 2011), sendo observado seu consumo de maneira significativamente, desde meados dos anos 2000 (ERLACHER et al., 2016).

No Brasil, o cultivo foi iniciado em 1989 e início de 1990 no Estado de São Paulo, na região de Capão Bonito por imigrantes japoneses e recentemente em áreas de montanha no Estado do Espírito Santo e Rio de Janeiro, com cultivos pouco expressivos (MOSCATTO et al., 2004 ; SANTANA; CARDOSO, 2008 ; MAIER, 2012). Por esse motivo, os estudos no país são restritos e a busca de informações pode auxiliar no desenvolvimento produtivo dessa cultura. Entre as diversas informações ecofisiológicas necessárias, o efeito da temperatura do ar sobre o desenvolvimento do yacon pode explicar adequadamente o desenvolvimento dessa espécie bem como sua adaptação a novas áreas de cultivo (MARTINS et al., 2012; SOUZA; MARTINS, 2014), uma vez que esse elemento meteorológico é uma das principais causas nas alterações do desenvolvimento das culturas.

Um dos conceitos mais utilizados que avalia o efeito da temperatura do ar e o grau de desenvolvimento de uma espécie é a soma térmica ou graus-dia, no qual existem temperaturas basais que controlam o crescimento e desenvolvimento da cultura (PILAU et al., 2011; FARIAS et al., 2015). Desse modo, o conceito graus-dia é uma forma simples de quantificar a energia que esteve à disposição da planta, no qual existem temperaturas mínima e máxima que quando a planta esta submetida, seu desenvolvimento cessa, podendo ainda ocasionar distúrbios aos tecidos vegetais.

Depois de determinada as temperaturas basais, obtém-se a soma térmica do ciclo, sendo essa informação de grande importância para fins de planejamento na agricultura

(PILAU et al., 2011). Não foram encontrados resultados na literatura indicando a soma térmica necessária para a cultura do yacon, nem o efeito da temperatura da época de plantio visando maior produtividade e sua relação com elementos meteorológicos (temperatura do ar, fotoperíodo) durante o período de crescimento da cultura.

Dessa forma, diante da importância crescente do yacon na produção agrícola brasileira e da escassez de parâmetros climáticos e fenológicos que auxiliem no planejamento e manejo da cultura, o objetivo deste trabalho foi determinar a temperatura basal inferior para os subperíodos da emergência-maturação e início da tuberação e maturação, bem como a duração do ciclo e a constante térmica para a cultura do yacon.

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos de campo foram instalados e conduzidos em área agrícola, no município de Ibatiba ($20^{\circ}17'S$ $41^{\circ}37'O$ 837m), Estado do Espírito Santo (Figura 1), em um delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições.

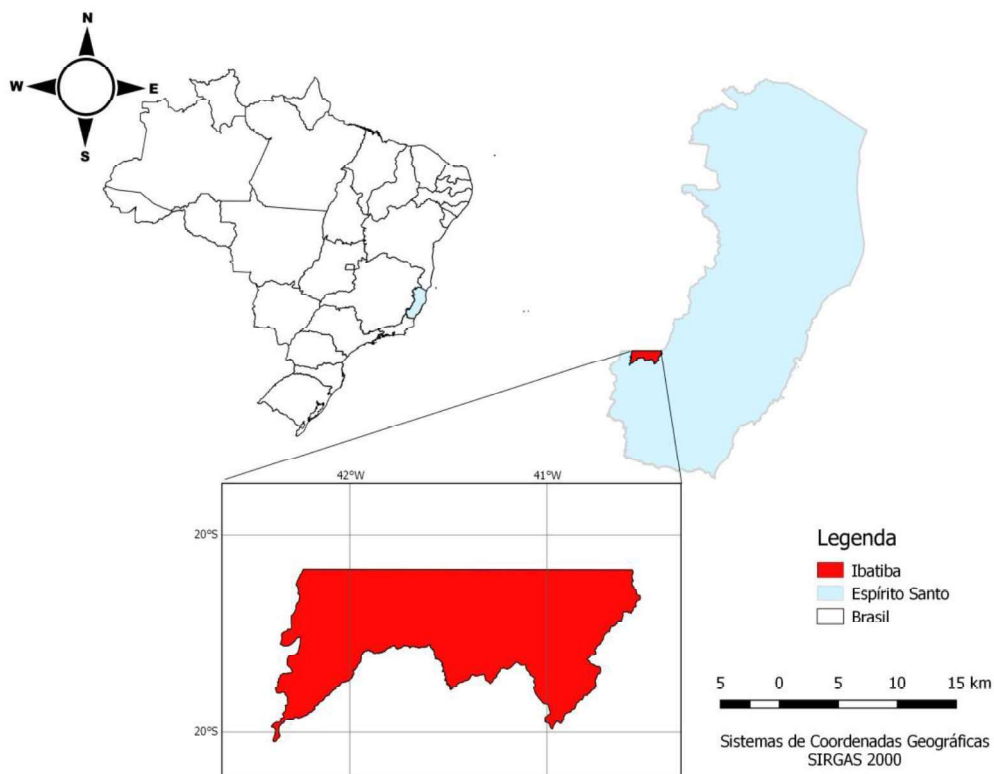


Figura 1. Localização geográfica do estado do Espírito Santo, com destaque para o município de Ibatiba.

Os tratamentos foram constituídos por três épocas de plantio do yacon realizadas em 2013: Outono (20 de abril), Inverno (20 de julho) e Primavera (20 de setembro). Para o monitoramento das condições meteorológicas, utilizou-se uma estação meteorológica pertencente ao Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural - INCAPER localizada próximo à área experimental.

O solo foi preparado por meio de aração a 30 cm de profundidade seguido de gradagem. O sistema de plantio foi manual, realizado em sulcos utilizando-se rizóforos de aproximadamente 35 g a uma profundidade de 10 cm, obedecendo o espaçamento desejado. Foram colocados 180 g de esterco bovino curtido por planta. O esterco bovino continha os seguintes nutrientes: 14,21 g kg⁻¹ de N; 4,75 g kg⁻¹ de P; 5,28 g kg⁻¹ de K; 4,29 g kg⁻¹ de Ca e 1,92 g kg⁻¹ de Mg. Ao longo do ciclo de cultivo foi realizado irrigação por aspersão convencional, mantendo a cultura sempre na capacidade de campo. O solo, de ambos os locais, foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, textura média (EMBRAPA, 2006), cuja amostra foi submetida ao laboratório de solos do CCAE/UFES para análises química e física (Tabela 1).

A unidade experimental foi constituída de cinco linhas de plantio de 8 m, espaçadas de 1,0 m entre linhas e 0,5 m entre plantas, totalizando 16 plantas de yacon por linha de plantio. Os dados de massa da matéria seca de raiz foram obtidas em estufa com circulação forçada de ar a 70 ± 5°C até massa constante, e foram convertidos para biomassa por área de terreno, considerando a densidade de plantas de cada parcela (2 plantas m⁻²).

Tabela 1. Atributos da camada de 0 a 20 cm do solo de Ibatiba-ES, na região Sul do Espírito Santo

Atributos do solo	Unidade	Teor
pH (água)	-	6,20
Fósforo Mehlich 1	mg.dm ⁻³	53,99
Potássio	mg.dm ⁻³	80,00
Cálcio	cmol _c .dm ⁻³	2,12
Magnésio	cmol _c .dm ⁻³	0,87
Alumínio	cmol _c .dm ⁻³	0,00
Soma de bases	cmol _c .dm ⁻³	3,24
CTC efetiva	cmol _c .dm ⁻³	3,24
Saturação por bases	%	64,10
Carbono orgânico total	%	1,83
Nitrogênio total	%	0,15
Areia	%	68
Silte	%	4

Foram determinadas as temperaturas basais do yacon em duas fases fenológicas, assumindo-se como data de emergência (EME) o momento em que 50% das plantas emergiram acima do solo; o início da tuberização (IT) quando começaram-se a formar o tubérculo e a maturação fisiológica (MAT) ocorrida ao fim do experimento. As diferentes épocas de plantio utilizadas proporcionaram as plantas diferentes condições ambientais, principalmente de temperatura e fotoperíodo, a fim de determinar a influência dessas variáveis sobre o IT e o crescimento das raízes tuberosas.

Para a estimativa da temperatura basal inferior (T_b), é necessário que se calcule primeiro os graus-dia, sendo proposto por Arnold (1960) e descrito na Equação 1:

$$GD_i = \frac{(TM + Tm)}{2} - T_b \quad (\text{Eq. 1})$$

em que:

GD_i - graus-dia ($^{\circ}\text{C}$ dia);

TM - temperatura máxima diária do ar ($^{\circ}\text{C}$);

Tm - temperatura mínima diária do ar ($^{\circ}\text{C}$);

T_b - temperatura basal inferior.

Para o cálculo do GD, foi utilizada uma série de T_b variando de 5 a 15 $^{\circ}\text{C}$, em intervalos de 0,5 $^{\circ}\text{C}$. Os graus-dia acumulados ou a soma térmica foi obtida a partir da emergência de cada época, pelo somatório do GD_i (Equação 2):

$$GD = \sum_{i=1}^n GD_i \quad (\text{Eq. 2})$$

Foram utilizadas as metodologias propostas por Arnold (1959) e Yang et al. (1995) para a estimativa da T_b por meio de quatro métodos: desvio padrão em graus-dia (DP_{gd}), desvio padrão em dias (DP_d), coeficiente de variação em graus-dia (CV_{gd}) e desenvolvimento relativo (DR).

No método DP_{gd} considera-se como a T_b de cada planta como aquela que resulta no menor desvio padrão em graus-dia usando diferentes épocas de plantio (Yang et al., 1995), sendo a fórmula descrita na Equação descrita 3:

$$DP_{gd} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (GD_i - MGD)^2}{n-1}} \quad (\text{Eq. 3})$$

em que:

DP_{gd} - desvio padrão em graus-dia;

GD_i - graus-dia acumulados na i -ésima época de plantio utilizando uma série de T_b ;

MGD - média dos graus-dia acumulados para todas as i -ésimas épocas de plantio;

n - número de épocas de plantio.

Para o método de menor desvio padrão, em dias (DP_d), foram selecionadas previamente T_b candidatas, idênticas as do método anterior, no qual Arnold (1959) sugeriu a determinação da temperatura base pelo método de menor desvio padrão em dias entre as diferentes épocas de plantio (Equação 4):

$$DP_d = \left(\frac{DP_{gd}}{\bar{x} - T_b} \right) \quad (\text{Eq.4})$$

em que:

DP_d = desvio padrão em dia;

DP_{gd} = desvio padrão em graus-dia utilizando uma série de T_b ;

\bar{x} = temperatura média do ar de todas as i épocas ($^{\circ}\text{C}$);

T_b = temperatura base inferior ($^{\circ}\text{C}$).

O coeficiente de variação em graus-dia foi obtido pela relação entre DP_{gd} e GD acumulados médio de todos os plantios (MGD), considera o valor de T_b , como aquele que apresentar o menor coeficiente de variação com relação aos graus-dia necessários para atingir determinada fase do desenvolvimento, seguindo a Equação 5 adaptado por Yang et al. (1995):

$$CV_{gd} = \left(\frac{DP_{gd}}{MGD} \right) 100 \quad (\text{Eq.5})$$

em que:

DP_{gd} = desvio padrão em graus-dia utilizando uma série de T_b ;

MGD - média dos graus-dia acumulados para todas as i-ésimas épocas de plantio.

O desenvolvimento relativo baseia-se na relação linear entre a Tmed durante a fase de desenvolvimento em estudo e os valores do DR da espécie/cultivar, utilizando-se a Equação 6 (MÜLLER et al., 2009):

$$DR = a.Tmed + b, \text{ sendo } DR = \frac{100}{N} \quad (\text{Eq.6})$$

em que:

a = coeficiente angular da regressão linear;

b = coeficiente linear;

100 = valor arbitrário de ponderação;

N = número de dias de duração da fase de desenvolvimento em cada época de plantio.

Por meio do valor do desenvolvimento relativo, a Tb é a que resulta de um desenvolvimento relativo nulo proveniente do prolongamento da regressão linear simples entre o DR da cultivar em função da Tmed, ou seja, $Tb = -b/a$.

A temperatura máxima basal (TB) foi determinada de modo similar à Tb, utilizando os métodos de menor desvio padrão e coeficiente de variação, ambos em graus-dia, sendo considerado como TB quando o Tb tornou-se constante. Foram utilizadas para esta estimativa as temperaturas de uma variação de 1 em 1 grau, compreendidos de 21 a 35 °C. A caracterização das exigências térmicas da figueira foi feita utilizando-se da metodologia proposta por Ometto (1981), cujas variações são apresentadas abaixo:

Caso 1: $TB > TM > Tm > Tb$

$$GD = \frac{(TM - Tm)}{2} + (Tm - Tb) \quad (\text{Eq. 7})$$

Caso 2: $TB > TM > Tb \geq Tm$

$$GD = \frac{(TM - Tb)^2}{2 * (TM - Tm)} \quad (\text{Eq. 8})$$

Caso 3: $TB > Tb > TM > Tm$

$$GD = 0 \quad (\text{Eq. 9})$$

Caso 4: $TM > TB > Tm > Tb$

$$GD = \frac{2 \cdot (TM - Tm) \cdot (Tm - Tb) + (TM - Tm)^2 - (TM - TB)}{2 \cdot (TM - Tm)} \quad (\text{Eq. 10})$$

Caso 5: $TM > TB > Tb > Tm$

$$GD = 0.5 \cdot \frac{(TM - Tb)^2 - (TM - TB)}{(TM - Tm)} \quad (\text{Eq. 11})$$

em que:

GD = graus-dia;

TM = temperatura máxima do dia;

Tm = temperatura mínima do dia;

Tb = temperatura basal inferior;

TB = temperatura basal superior.

Após a determinação da temperatura basal inferior pelos diferentes métodos, utilizou-se a média aritmética entre os diferentes métodos para determinar a temperatura basal inferior, sendo utilizado posteriormente para a soma térmica. Foram ajustadas equações a fim de determinar quais os fatores meteorológicos que mais interferiram na duração do ciclo e no subperíodo emergência-início da tuberação, sendo utilizado o Excel e o programa de código aberto R (*R Core Team*, 2016) para organização e manipulação dos dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O cultivo do yacon em diferentes épocas de plantio no campo possibilitou as plantas se desenvolverem em condições meteorológicas distintas durante seu ciclo, as quais foram importantes na estimativa da temperatura basal inferior. Durante o período

correspondente entre a emergência das plantas até a maturação, a maior temperatura observada foi encontrada nos plantios de Outono e Inverno, com valor de 33,2 °C, valor este observado no dia 23 de Setembro de 2013 (Tabela 2). Entretanto, quando avaliado a média das temperaturas máximas ao longo do ciclo, observa-se que o plantio que ocorreu na Primavera apresentou maior média das temperaturas máximas, com valor de 28,4 °C, seguido pelos plantios de Inverno e Outono com valores de 27,7 e 25,5 °C, respectivamente.

Desse modo, percebe-se que a média das temperaturas máximas diárias para as três épocas de plantio estavam na faixa de temperatura ideal para a produção de yacon de 18-25 °C de acordo com Grau e Rea (1997), com o plantio de Primavera superestimando em apenas 0,4 °C à temperatura ideal, embora as temperaturas máximas mais altas registradas em cada época de plantio tenham excedido o alcance ótimo.

Com relação às temperaturas mínimas, a menor registrada foi 6,5 °C no dia 6 de julho de 2013, encontrado no plantio de Outono sendo observado que nesta mesma época de plantio ocorreu a menor média das temperaturas mínimas durante o período de emergência até a maturação com 15,5 °C. Segundo Grau e Rea (1997), quando submetido à alta radiação solar e temperaturas abaixo de 10-12 °C, é observado na cultura do yacon danos de arrefecimento nas folhas, entretanto, na condução deste experimento não foram observados tais danos apesar da temperatura ter chegado a 6,5 °C no plantio de Outono.

Tabela 2. Valores de temperaturas máximas, mínimas, médias e precipitação acumulada durante o período de emergência até a maturação em diferentes épocas de plantio do yacon, em Ibatiba, ES

Época de plantio	T. Máxima absoluta	Média T. Máxima	T. Mínima absoluta	Média T. Mínima	T. Média
-----°C-----					
Outono	33,2	25,5	6,5	15,5	20,5
Inverno	33,2	27,7	10,3	17,5	22,5
Primavera	32,8	28,4	13,0	17,9	23,1

Outono (plantio 20 de Abril e emergência 60 dias após), Inverno (plantio 20 de Julho e emergência 60 dias após) e Primavera (plantio 20 de Setembro e emergência 30 dias após).

As temperaturas médias durante o ciclo do yacon nas três épocas de plantio foram de 20,5, 22,5 e 23,1 °C para os plantios de Outono, Inverno e Primavera, respectivamente. As diferenças entre as condições meteorológicas vigentes durante as três épocas de plantio também influenciaram na duração da fase de desenvolvimento da cultura, apresentando tendência de diminuição da duração com o avanço da época de plantio.

Observam-se variações nos valores de T_b entre os quatro métodos utilizados (Figura 2 e 3), o que também foi verificado por Pilau et al. (2011) para a cultura do crambe, e Luz et al. (2012) para a canola e Souza e Martins (2014) para duas cultivares de oliveira. Pode-se visualizar na Figura 2 (a) e (b), que os valores obtidos entre a relação de Desenvolvimento Relativo e temperatura média do ar, durante o ciclo de cada época de semeadura, resultaram em coeficiente linear “a” de -0,821 e coeficiente angular “b” de 0,0628, com valor de “ R^2 ” de 0,84 para o subperíodo EME-MAT, enquanto que para o subperíodo IT-MAT o valor do coeficiente linear “a” foi de -0,7842 e coeficiente angular “b” de 0,0600, com valor de “ R^2 ” de 0,79. Aplicando-se a equação de T_b , obtemos o valor de 13,1 °C, correspondente a EME-MAT e valor de 13,1 °C para o IT-MAT. No método do DP_{gd} o valor de T_b encontrado para o subperíodo emergência-maturação (EME-MAT) e para o subperíodo início da tubertura e maturação (IT-MAT) foi de 13,5 °C (Figura 2 (c) e (d)).

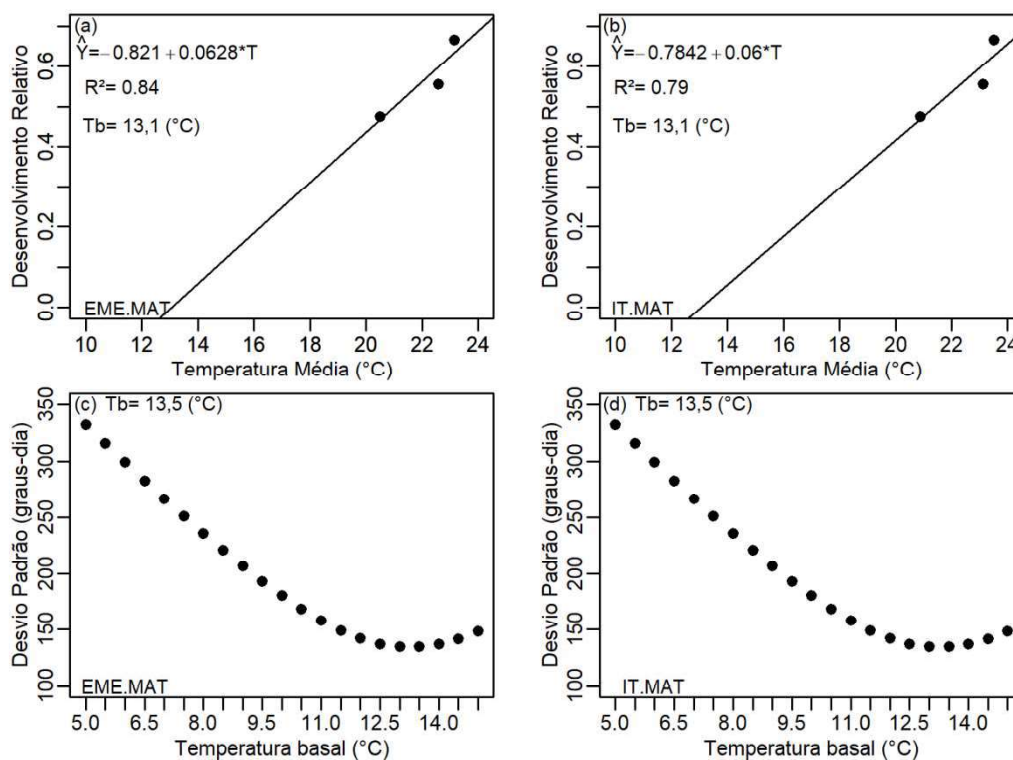


Figura 2. Temperatura basal inferior para as fases de desenvolvimento emergência-maturação (EME-MAT) e início da tuberização-maturação (IT-MAT), obtida pelos métodos de desvio padrão (graus-dia) e desenvolvimento relativo (DR), para a cultura do yacon.

Os resultados obtidos por este experimento estão próximos aos encontrados por Douglas et al. (2007), que ao determinar a temperatura basal do yacon em Nova Zelândia, obtiveram valor R^2 de 0,81 com uma temperatura basal de 12,0 °C. Os valores de T_b pelo método de DR apresentam valores ligeiramente diferentes daqueles obtidos pelo método do DP_{gd} , indicando que os métodos de estimativa são semelhantes para determinação da temperatura basal inferior do yacon, com diferenças menores que 1 °C entre os métodos. Determinando a temperatura basal inferior para duas cultivares de oliveira, com base nos mesmos métodos adotados no trabalho, Souza e Martins (2014) obtiveram valores de T_b próximos, com variação de 0,5 °C para a oliveira cv. Maria da Fé.

Ao avaliar o método de desvio padrão em dias (DP_d) na Figura 3, observaram-se valores de T_b inferiores daqueles obtidos pelo método do DP_{gd} e DR, com valor de 12,0 °C para os subperíodos EME-MAT e IT-MAT (Figura 3 (a) e (b)). Segundo STRECK et al. (2005), é muito importante determinar a T_b ao longo do ciclo determinando seus subperíodos, todavia, neste estudo, só foram observadas diferenças nos subperíodos quando determinado a T_b pelo método do coeficiente de variação (graus-dia) para a cultura do yacon, com diferença de 0,5 °C. As plantas podem apresentar diferentes valores de T_b para cada subperíodo de desenvolvimento, sendo observado nas mais variadas espécies e materiais genéticos, como em experimentos realizados por Pilau et al. (2011) e Farias et al (2015), apesar do yacon ter apresentado pouca variação entre suas fases.

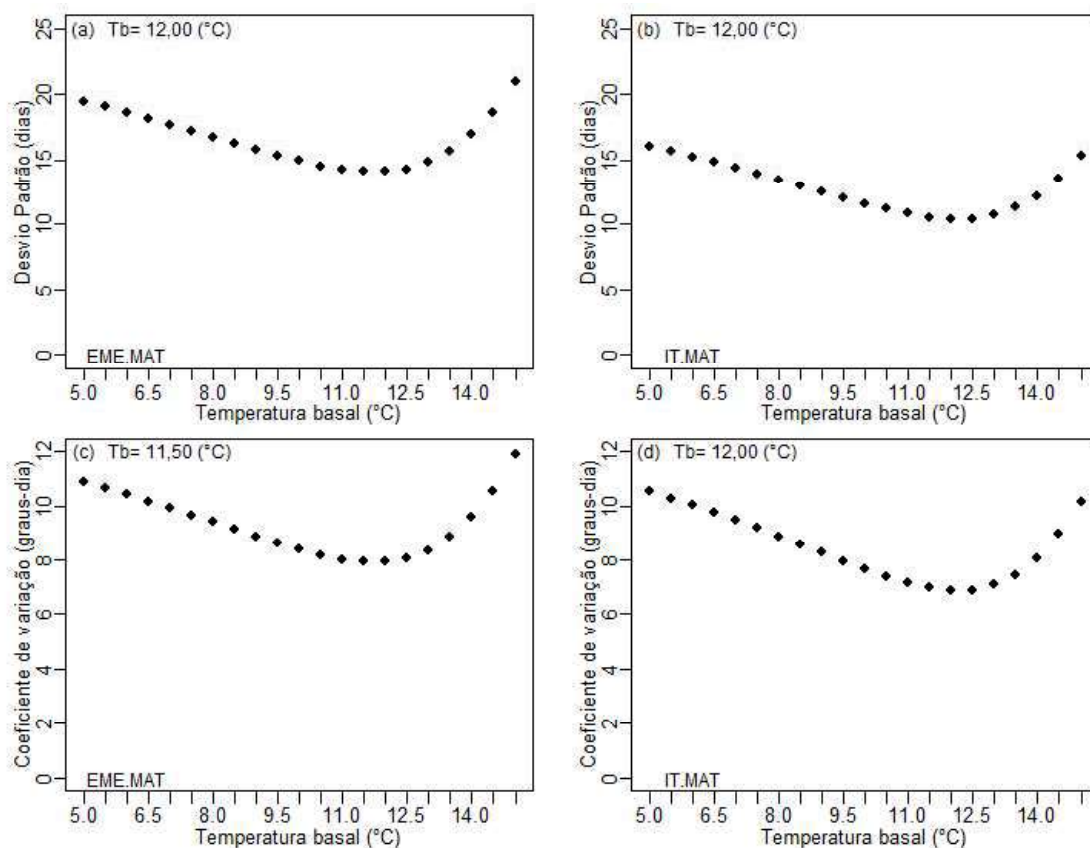


Figura 3. Temperatura basal inferior para as fases de desenvolvimento emergência-maturação (EME-MAT) e início da tuberização-maturação (IT-MAT), obtida pelos métodos de desvio padrão (graus-dia) e desenvolvimento relativo (DR), para a cultura do yacon.

Na literatura, encontram-se diversos trabalhos sobre temperatura basal inferior, pois são conduzidos em locais onde dificilmente se atinge a temperatura basal superior (TB) (FARIAS et al., 2015). Entretanto, esse parâmetro é muito importante para a cultura, uma vez que temperaturas acima da TB podem ocasionar certos distúrbios às plantas, prejudicando seu desenvolvimento normal. Nas condições climáticas da região onde foi conduzido este experimento, é possível observar que a TB (Figura 4) obtida pelos métodos de desvio padrão e coeficiente de variação, ambos em graus-dias, apresentaram valores de 34,0 °C. Esses valores estão abaixo da temperatura máxima absoluta encontrada nas três épocas de plantio (Tabela 2).

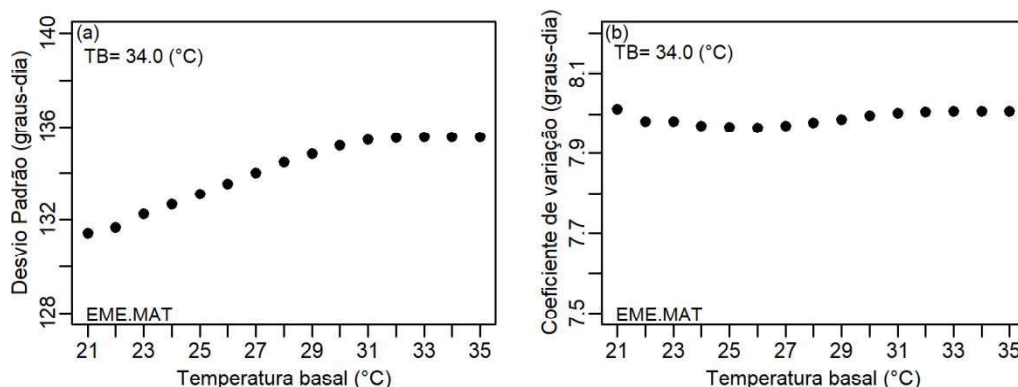


Figura 4. Determinação da temperatura basal superior durante o período em que compreende a emergência e a maturação (EME-MAT) do yacon pelos métodos de desvio padrão e coeficiente de variação, ambos em graus-dia.

Na Figura 5, tem-se a relação da temperatura média do ar e do fotoperíodo com a soma térmica durante a fase que compreende a emergência e o início da tuberização (EME-IT) com suas respectivas equações de estimativa e coeficientes de determinação. Foi utilizado como temperatura basal inferior para fins de cálculo da soma térmica 12,5 °C, sendo a média aritmética obtida entre os diferentes métodos, utilizado para todo o ciclo do yacon, visto que houve pouca variação entre as fases analisadas.

Como observado pelo valor do coeficiente de determinação (Figura 5), 92% da variância do período correspondente entre a emergência ao início da tuberização é explicada pela variância do fotoperíodo, enquanto que 99% da variância entre a emergência ao início da tuberização é explicada pela temperatura média. Segundo Araldi et al. (2011), a temperatura é um fator ambiental muito importante na tuberização, no qual temperaturas altas inibem a formação do tubérculo, e temperaturas baixas promovem o crescimento do mesmo.

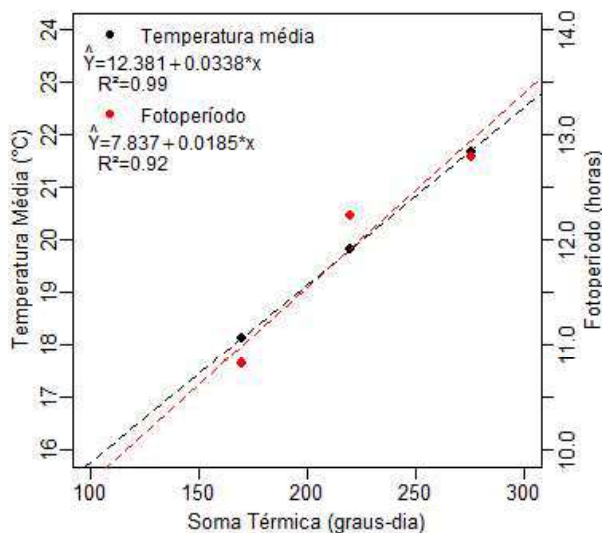


Figura 5. Relação entre a temperatura média e o fotoperíodo com a soma térmica, durante o período que compreende a emergência-início da tuberização (EME-IT), nas três datas de plantio do yacon.

Apesar de a fase EME-IT ter respondido ao fotoperíodo, alguns autores relatam que os tubérculos do yacon (*Polymnia sonchifolia*) são indiferentes ao fotoperíodo (ITAYA et al., 2002), sendo necessário assim pesquisas mais aprofundadas para saber se essa tuberosa responde ao comprimento do dia, visto que o fotoperíodo apresentou o mesmo comportamento da temperatura média do ar nesse subperíodo em questão.

A duração da fase EME-IT em graus-dia acumulados (Figura 5) apresentou diferença entre as datas de plantio, sendo que ao utilizar a equação de estimativa, observam-se maiores valores no plantio que ocorreu na Primavera, com duração de 275,4 graus-dia acumulados, seguido pelo plantio de Inverno e Outono, com os valores em graus-dia acumulados de 220,3 e 169,5 respectivamente. A hipótese para explicar esse resultado é o fotoperíodo médio do período entre emergência e o início da tuberização, que variou de 10,8 a 12,8 nas três datas e apresentou relação linear positiva com a soma térmica acumulada ($R^2=0,92$) (Figura 5), ou seja, à medida que aumentou o fotoperíodo, maior foi a soma térmica necessária para atingir o início da tuberização, estando este resultado de acordo com Erpen et al. (2013), para a cultura da batata-doce.

Outra possível causa para a maior necessidade de graus-dia acumulados para o início da tuberização no plantio de primavera pode estar atrelada ao aumento da temperatura média no subperíodo EME-IT (Figura 5), visto que com o aumento da temperatura média, houve aumento da soma térmica, enquanto foi observado o inverso

no plantio de Outono. Todavia, apesar do yacon necessitar de maior soma térmica acumulada para iniciar a tuberização, o mesmo efeito não foi observado no subperíodo que compreende o início da tuberização à maturação (IT-MAT), no qual o plantio de inverno apresentou maior soma térmica para ocorrer a maturação fisiológica do yacon, com valor de 1596 graus-dia (Figura 6), seguido pelos plantios do Outono e da Primavera, com respectivos valores de 1526 e 1323 graus-dia acumulados.

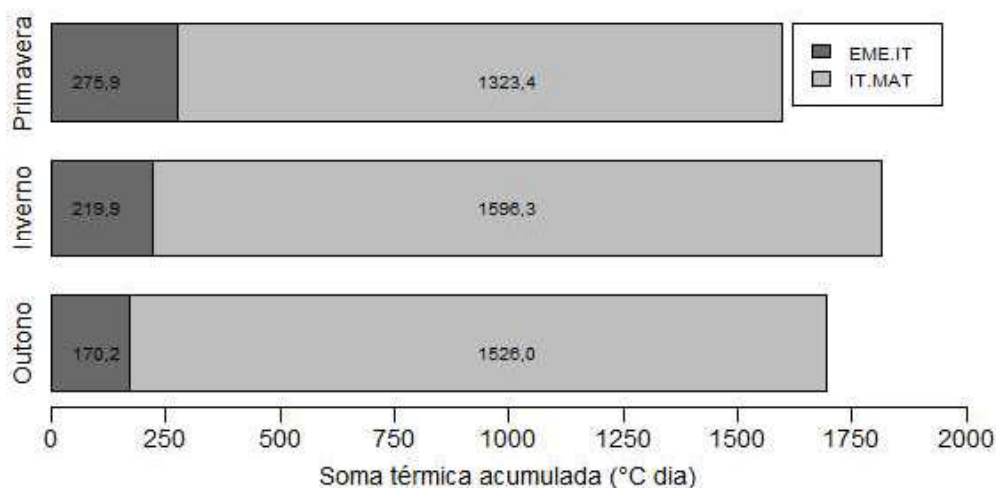


Figura 6. Duração da fase emergência-início da tuberização (EME-IT) e início da tuberização e maturação (IT-MAT) em graus-dia acumulados, nas três datas de plantio (20/04/2013-Outono; 20/07/2013-Inverno e 20/09/2012-Primavera) do yacon.

É observada na Figura 7 a relação entre duração do período e o rendimento da raiz (matéria seca) com a temperatura média do ar durante a emergência até a maturação, com suas respectivas equações de estimativa e coeficientes de determinação. Observa-se uma equação linear decrescente para a duração do plantio, podendo inferir que 90% da variância do período que corresponde do plantio até a emergência é explicado pela temperatura do ar, ou seja, à medida que a temperatura média do ar aumentou durante o ciclo da cultura, reduziu-se o tempo necessário para que ocorra a maturação.

O mesmo é observado para o rendimento seco de raiz, no qual, com o aumento médio da temperatura do ar durante o referido período avaliado, ocorrem decréscimos na produção de raiz. Segundo Araldi et al. (2011), o aumento da temperatura do ar promove a inibição de tubérculos, enquanto baixas temperaturas promovem o crescimento do tubérculo. Todavia, as temperaturas obtidas durante a condução dos três plantios do yacon foram suficientes para que ocorresse a tuberização, apesar de que o

aumento da temperatura promoveu aumento da soma térmica necessário para o início da tuberização.

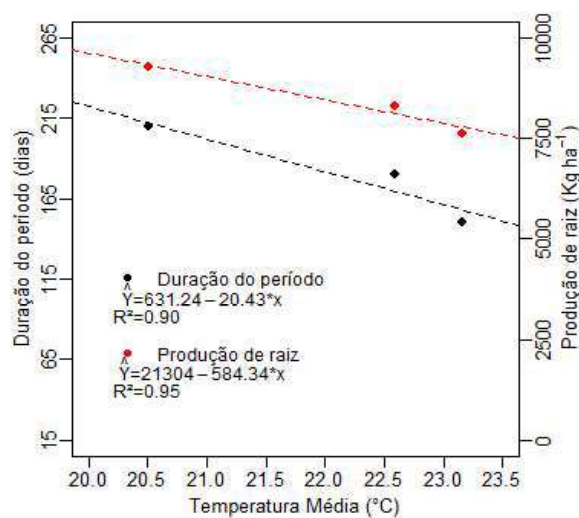


Figura 7. Relação entre a duração do período e rendimento seco de raiz (kg ha⁻¹) com a temperatura média do ar, durante o período correspondente entre a emergência à maturação, nas três datas de plantio do yacon.

Desse modo, o aumento da temperatura média durante o ciclo do yacon promoveu redução do tempo gasto em dias para completar seu ciclo, bem como reduziu a produção de raiz. Em contrapartida, temperaturas mais amenas ao longo do ciclo parecem favorecer o rendimento de raiz, apesar da necessidade de maior quantidade de dias para concluir seu ciclo. Como observado por Paula et al. (2005), com o aumento do ciclo da batata, maior será seu rendimento de raiz, visto que o aumento do ciclo de desenvolvimento resultará em um aumento da duração de área foliar verde, contribuindo para o aumento da fotossíntese e garantindo maior produção de fotoassimilados que serão direcionados para enchimento dos tubérculos.

CONCLUSÃO

Os valores de temperaturas basais para os subperíodos analisados ficaram próximos, sendo determinado como temperatura basal inferior a 12,5 °C para as respectivas fases de emergência-maturação e início da tuberização-maturação, e a temperatura basal superior durante a emergência-maturação foi de 34,0 °C.

A soma térmica para as fases emergência-maturação e início da tuberação-maturação do yacon variou em função da época de plantio, o que limita sua utilização para representar tempo biológico desta cultivar, sendo necessário maior soma térmica para iniciar a tuberação com o aumento da temperatura do ar.

As condições de temperatura e fotoperíodo modificaram a duração da fase EME-IT em cada época de plantio, indicando que fotoperíodos curtos e temperaturas mais baixas aceleram o IT.

Na região estudada, a época de Outono foi mais favorecida, com maior duração do ciclo da cultura, que coincide com os períodos de menor temperatura média e fotoperíodos mais curtos, favoráveis ao crescimento e desenvolvimento do yacon.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes, pela bolsa de mestrado, à FAPES, pela bolsa pesquisador capixaba do autor Fábio Luiz de Oliveira e ao INCAPER, pela concessão dos dados climáticos.

REFERÊNCIAS

ARALDI, R.; TANAKA, A.; SILVA, I.; JÚNIOR, J.; ONO, E.; RODRIGUES, J. Controle da tuberação: fatores do meio e os hormônios vegetais. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v. 10, n. 20, 2011.

BORGES, J. T. S.; PIROZI, M. R.; PAULA, C. D.; GONÇALVES, J.; VIDIGAL, N. A. D. S.; SILVA, F. R. B. C. Yacon na alimentação humana: aspectos nutricionais, funcionais, utilização e toxicidade. **Scientia Amazonia**, v. 1, n. 3, p. 3-16, 2012.

CAMPOS, D.; BETALLELUZ-PALLARDEL, I.; CHIRINOS, R.; AGUILAR-GALVEZ, A.; NORATTO, G.; PEDRESCHI, R. Prebiotic effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl), a source of fructooligosaccharides and phenolic compounds with antioxidant activity. **Food Chemistry**, v. 135, n. 3, p. 1592-1599, 2012.

DOUGLAS, J. A.; FOLLETT, J. M.; DOUGLAS, M. H.; DEO, B.; SCHEFFER, J. J. C.; LITTLER, R. A.; MANLEY-HARRIS, M. Effect of environment and time of planting on the production and quality of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) storage roots. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, v. 35, n. 1, p. 107-116, 2007.

DUARTE, M. R.; WOLF, R.; PAULA, B. G. *Smallanthus sonchifolius* (Poepp.) H. Rob. (yacón): identificação microscópica de folha e caule para o controle de qualidade farmacognóstico. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 44, n. 1, p. 157-164, 2008.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

ERLACHER, W. A.; OLIVEIRA, F. L.; FIALHO, G. S.; SILVA, D.; CARVALHO, A. H. Models for estimating yacon leaf area. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n. 3, p. 422-427, 2016.

FARIAS, V. D. S.; COSTA, D. L. P.; SOUZA, P. J. O. P; TAKAKI, A. Y; LIMA, M. J. A. temperaturas basais e necessidade térmica para o ciclo de desenvolvimento do feijão-caupi. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11 n. 21, p. 1781-1791, 2015.

GRAU, A.; REA, J. Yacon *Smallanthus sonchifolius* (Poepp. & Endl.) H. ROBINSON. In: HERMANN, M.; HELLER, J. (Eds.). Andean roots and tubers: Ahipa, arracacha, maca and yacon. **Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops**. Rome: IPK, Gatersleben / IPGRI, 1997. p. 199- 256.

GRAU, A.; REA, J. **Yacón: *Smallanthus sonchifolius* (Poepp. & Endl.) H. ROBINSON**. Tucuman (Argentina): Universidad Nacional de Tucumán, Laboratorio de Investigaciones Ecológicas de los Yungas. 2002.

KAKIHARA, T. S.; CÂMARA, F. L. A.; VILHENA, S. M. C.; RIERA, L. Cultivo e industrialização de yacon (*Polymnia sonchifolia*): uma experiência brasileira. In:

Congresso latino americano de raízes tropicais 1 e congresso brasileiro de mandioca 9, São Pedro. **Anais...** Botucatu: Centro de Raízes Tropicais, Sociedade Brasileira de Mandioca, 1996. s.p.(resumo 148).

LUZ, G. L.; MEDEIROS, S. L. P.; TOMM, G. O.; BIALOZOR, A.; AMARAL, A. D.; PIVOTO, D. Temperatura base inferior e ciclo de híbridos de canola. **Ciência Rural**, v. 42, n. 9, 2012.

OJANSIVU, I.; FERREIRA, C. L.; SALMINEN, S. Yacon, a new source of prebiotic oligosaccharides with a history of safe use. **Trends in Food Science & Technology**, v. 22, n. 1, p. 40-46, 2011.

OLIVEIRA, M. A.; NISHIMOTO, E. K. Avaliação do desenvolvimento de plantas de yacon (*Polymnia sonchifolia*) e caracterização dos carboidratos de reservas em HPLC. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 7, n. 2, p. 215-220, 2004.

MARTINS, F. B.; REIS, D. F.; PINHEIRO, M. V. M. Temperatura base e filocrono em duas cultivares de oliveira. **Ciência Rural**, v. 42, n. 11, p. 1975-1981, 2012.

MAIER R. J. 2012. **Informações à Imprensa: Assessoria de Comunicação - Ceasa-ES**. Disponível em: <http://www.faes.org.br/noticias_detalhe.php?Cod_Noticia=2283> Acesso em 15/02/2018.

MOSCATTO, J. A.; PRUDÊNCIO, S. H.; HAULY, M. C. O. Farinha de yacon e inulina como ingredientes na formulação de bolo de chocolate. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 24, n. 4, p. 634-40, 2004.

MOURA, N. A.; CAETANO, B. F.; SIVIERI, K.; URBANO, L. H.; CABELLO, C.; RODRIGUES, M. A.; BARBISAN, L. F. Protective effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) intake on experimental colon carcinogenesis. **Food and Chemical Toxicology**, v. 20, p. 2902-2910, 2012.

PAULA, F. L. M.; STRECK, N. A.; HELDWEIN, A. B.; BISOGNIN, D. A.; PAULA, A. L. D.; DELLAI, J. Soma térmica de algumas fases do ciclo de desenvolvimento da batata (*Solanum tuberosum* L.). **Ciência Rural**, v. 35, n. 5, p. 1034-1042, 2005.

PILAU, F. G.; BATTISTI, R.; SOMAVILLA, L.; SCHWERZ, L. Temperatura basal, duração do ciclo e constante térmica para a cultura do crambe. **Bragantia**, v. 70, n. 4, 2011.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em 01/02/2018.

SANTANA, I.; CARDOSO, M. H. Raiz tuberosa de yacon (*Smallanthus sonchifolius*): potencialidade de cultivo, aspectos tecnológicos e nutricionais. **Ciência Rural**, v. 38, n. 3, p. 898–905, 2008.

SOUZA, P. M. B.; MARTINS, F. B. Estimativa da temperatura basal inferior para as cultivares de oliveira Grappolo e Maria da fé. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 2, p. 307-313, 2014.

STRECK, N. A.; TIBOLA, T.; LAGO, I.; BURIOL, G. A.; HELDWEIN, A. B.; SCHNEIDER, F. M.; ZAGO, V. Estimativa do plastocrono em meloeiro (*Cucumis melo* L.) cultivado em estufa plástica em diferentes épocas do ano. **Ciência Rural**, v. 35, n. 6, p. 1275-1280, 2005.

VAZ-TOSTES M. D.; VIANA M. L.; GRANCIERI, M.; LUZ T. C. S.; PAULA, H.; PEDROSA, R. G.; COSTA, N. M. B. Yacon effects in immune response and nutritional status of iron and zinc in preschool children. **Nutrition**, v. 30, n. 6, p. 666-672, 2014.

ZAPAROLLI, M. R.; NASCIMENTO, N. C.; BAPTISTA, D. R.; VAYEGO A. S. Alimentos funcionais no manejo da diabetes mellitus. **Revista Ciência Saúde**, v. 6, p. 12-17, 2013.

CAPÍTULO II - CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO FAO-AQUACROP PARA ESTIMAR A BIOMASSA TOTAL E RENDIMENTO DE RAIZ DO YACON

RESUMO

Com a atual escassez de água no mundo, melhorar o uso desse recurso natural e esgotável na agricultura é vital, contribuindo para aumento da produção e sustentabilidade agrícola. Nesse sentido, diversos modelos de simulação de crescimento de culturas foram desenvolvidos para prever os efeitos edafoclimáticos no rendimento das culturas. Esses modelos são calibrados e validados para uma determinada região usando os dados gerados a partir de experiências de campo. Desse modo, o objetivo do presente estudo foi calibrar e validar o modelo AquaCrop para a cultura do yacon em clima tropical. O experimento foi conduzido em uma área experimental localizada no município de Ibatiba, estado do Espírito Santo durante os anos de 2013 e 2014. A calibração foi feita utilizando o plantio de Outono e a validação com os plantios de Inverno e Primavera. Para a análise estatística, foram utilizados o coeficiente de determinação, índice de concordância de Willmott, Bias para o erro sistemático, a raiz do erro quadrado médio e o erro absoluto médio para testar o desempenho do modelo. Em geral, o modelo da FAO AquaCrop predisse o rendimento de raiz, biomassa total e índice de colheita com uma precisão aceitável, com desvios inferiores a 6% para biomassa total e de raiz. O plantio tardio do yacon mostrou redução na produtividade, bem como da biomassa total.

INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos demanda estudos minuciosos, visto que a água doce é um recurso natural indispensável e esgotável, com papel fundamental no desenvolvimento dos seres vivos (ABEDINPOUR et al., 2012; SANTOS et al., 2017). Nesse contexto, muitos modelos agrometeorológicos têm sido desenvolvidos a fim de auxiliar no planejamento dos recursos hídricos e na tomada de decisão, sendo utilizado por diversos pesquisadores em diversas partes do mundo.

Dentre eles, podemos citar o CropWat (SALES et al., 2016), DSSAT (OLIVEIRA et al., 2012), AquaCrop (MONTROYA et al., 2016), CropSyst (SUÁREZ-REY et al., 2016) entre outros, sendo muito utilizado para fins de zoneamento agroclimático e manejo de irrigação, uma vez que o manejo e o uso correto que vise complementar ou suplementar à demanda hídrica da cultura pode resultar em maiores produtividades (ÁVILA et al., 2010; SALES et al., 2017). Desse modo, o uso de modelos de crescimento de culturas é crucial para a otimização das práticas agrícolas e, ainda mais importante, para modelar as variações de cobertura vegetal a uma escala anual (TROMBETTA et al., 2016).

O modelo AquaCrop, desenvolvido pela FAO, fornece um bom equilíbrio entre a robustez, simplicidade e precisão da saída, podendo ser usado para uma grande variedade de culturas (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009) utilizando poucos parâmetros de entrada. Embora seja encontrado na literatura estudos sobre batata (CASA et al., 2013; MONTROYA et al., 2016; PATEL et al., 2008), ainda são escassas informações sobre modelagem com o yacon.

O yacon é uma planta produtora de raízes tuberosas originária dos Andes, que armazenam os carboidratos na forma de frutooligossacarídeos. Esta é uma das razões pelas quais o yacon é considerado um alimento funcional com alto potencial nutracêutico (SANTANA; CARDOSO, 2008).

A demanda hídrica da cultura tem sido apontada como o fator mais determinante à produção das raízes tuberosas (FERNÁNDEZ et al., 2006). Portanto, o uso de modelos agrometeorológicos, visando auxiliar no planejamento dos recursos hídricos e a tomada de decisão para a suplementação da demanda hídrica da cultura, pode resultar em maiores produtividades. Todavia, antes do uso direto de qualquer modelo, calibrações são necessárias a fim de satisfazer às necessidades de cada cultura ou variedade, a fim de representar de maneira eficiente seu desenvolvimento em climas adversos.

A validação é realizada por meio de testes com modelo calibrado em outros locais ou/e épocas para testar a habilidade do modelo em simular as flutuações climáticas. Desse modo, o objetivo do presente estudo foi calibrar e validar o modelo AquaCrop para a cultura do yacon em clima tropical.

MATERIAL E MÉTODOS

Características climáticas do experimento

O experimento de campo foi instalado e conduzido por Silva (2015), em área agrícola, no município de Ibatiba, ES, a 20°17' S e 41°37' W e altitude de 837 metros, com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por três épocas de plantio realizadas em 2013: Outono (20 de abril), Inverno (20 de julho) e Primavera (20 de setembro). Para o monitoramento das condições meteorológicas, utilizou-se uma estação meteorológica pertencente ao Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural - INCAPER (20°21'S; 41°33'W; 758 m) localizada próximo à área experimental. O comportamento das temperaturas máximas e mínimas do ar, bem como a precipitação ocorrida ao longo do ciclo da cultura em seus respectivos plantios pode ser observado na Figura 1.

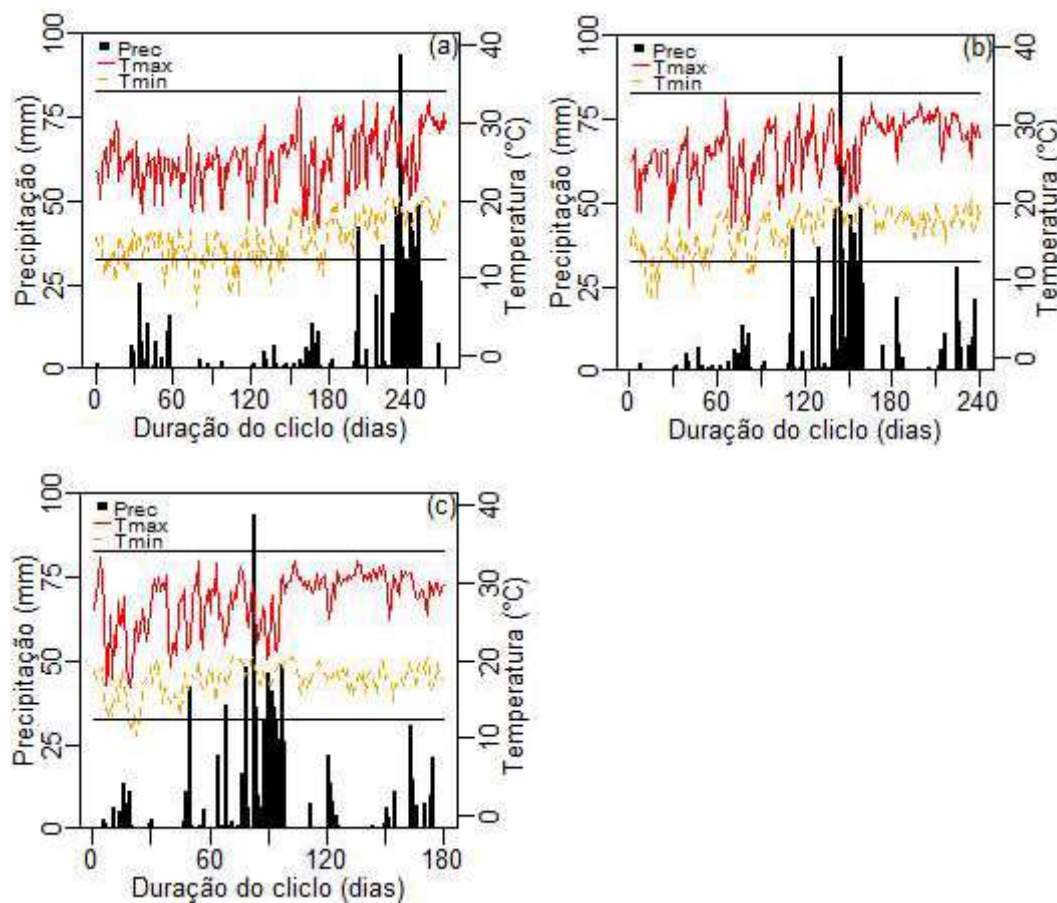


Figura 1. Temperaturas máximas e mínimas do ar e precipitação durante as três épocas de plantio: Outono (a), Inverno (b) e Primavera (c). Linha contínua inferior e superior referem-se às temperaturas basais inferior (T_b) e superior (T_B), respectivamente.

Utilizando os dados diários de temperaturas máxima e mínima do ar, foi calculado a evapotranspiração potencial pelo método de Thornthwaite (1948) em escala mensal,

uma vez que este utiliza apenas dados de temperatura média do ar como dados de entrada, sendo inseridas no modelo AquaCrop, de acordo com as Equações 1, 2, 3, 4, 5 e 5.

$$ETP = 16 \cdot \left(10 \frac{T_i}{I} \right)^a \quad 0 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T_i \leq 26 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$ETP = 415,85 + 32,24 \cdot T_i - 0,43 \cdot T_i^2 \quad T_i > 26 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que:

ETP é a evapotranspiração Potencial (mm mês^{-1});

T_i é a temperatura do ar média mensal ($^\circ\text{C}$);

I é o índice térmico imposto pelo regime climático local, calculado por:

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 \cdot T_i)^{1,514} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (\text{Eq. 4})$$

em que:

i representa o mês do ano ($i=1$, janeiro; ...; $i=12$, dezembro).

Após obter o valor de ETP, foi realizada a correção em função do número real de dias e do fotoperíodo do mês por meio das Equações 5 e 6.

$$ETP = ETP \cdot \text{Cor} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\text{Cor} = \left(\frac{\text{ND}}{30} \right) \cdot \left(\frac{\text{N}}{12} \right) \quad (\text{Eq. 6})$$

em que, sendo ND o número de dias do mês em questão, e N é o fotoperíodo médio daquele mês.

Experimento em campo e práticas da cultura

O solo foi preparado por meio de aração a 30 cm de profundidade seguido de gradagem. O sistema de plantio foi manual, realizado em sulcos utilizando-se rizóforos de aproximadamente 35 g a uma profundidade de 10 cm, obedecendo o espaçamento desejado. Foram colocados 180 g de esterco bovino curtido por planta. O esterco bovino

continha os seguintes nutrientes: 14,21 g kg⁻¹ de N; 4,75 g kg⁻¹ de P; 5,28 g kg⁻¹ de K; 4,29 g kg⁻¹ de Ca e 1,92 g kg⁻¹ de Mg. Ao longo do ciclo de cultivo, foi realizado irrigação por aspersão convencional, mantendo a cultura sempre na capacidade de campo. O solo, de ambos os locais, foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, textura média (EMBRAPA, 2006), cuja amostra foi submetida ao laboratório de solos do CCAE/UFES para análises química e física (Tabela 1).

Tabela 1. Atributos da camada de 0 a 20 cm do solo de Ibatiba-ES, na região Sul do Espírito Santo

Atributos do solo	Unidade	Teor
pH (água)	-	6,20
Fósforo Mehlich 1	mg.dm ⁻³	53,99
Potássio	mg.dm ⁻³	80,00
Cálcio	cmol _c .dm ⁻³	2,12
Magnésio	cmol _c .dm ⁻³	0,87
Alumínio	cmol _c .dm ⁻³	0,00
Soma de bases	cmol _c .dm ⁻³	3,24
CTC efetiva	cmol _c .dm ⁻³	3,24
Saturação por bases	%	64,10
Carbono orgânico total	%	1,83
Nitrogênio total	%	0,15
Areia	%	68
Silte	%	4
Argila	%	28

Para estimar as variáveis do solo, foram utilizadas funções de pedotransferência - FPT's, obtendo assim a umidade de saturação, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e condutividade hidráulica saturada requeridos para simulação pelo modelo AquaCrop. Utilizando a metodologia proposta por Tomasella et al (2003), foram derivados as variáveis para o solo da região do presente estudo, e apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades do solo utilizadas como entrada no modelo AquaCrop para simulação do yacon em Ibatiba-ES

Camadas	Profundidade m	PMP -----%-----	CC	Saturação	K _{sat} mm dia ⁻¹
1	0,00-0,20	11,0	26	53	280,8
2	0,20-0-50	11,0	26	53	280,0

Ponto de murcha permanente (PMP), capacidade de campo (CC), saturação e condutividade hidráulica saturada (Ksat).

A unidade experimental foi constituída de cinco linhas de plantio de 8 m, espaçadas de 1,0 m entre linhas e 0,5 m entre plantas, totalizando 16 plantas de yacon por linha de plantio, sendo feito avaliações a cada 30 dias após a emergência. Os dados de massa de matéria seca total e de raiz foram obtidas em estufa com circulação forçada de ar a $70 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante, e foram convertidos para biomassa por área de terreno, considerando a densidade de plantas de cada parcela (2 plantas m^{-2}).

Breve descrição do modelo AquaCrop

O modelo AquaCrop relaciona seus componentes solo-planta-atmosfera por meio de dados referentes ao solo, atmosfera, características da cultura, e o manejo da cultura (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009). O modelo calcula o balanço hídrico diário e separa sua evapotranspiração em evaporação e transpiração, sendo que a transpiração da cultura está atrelada à cobertura do dossel (proporcional à extensão da cobertura do solo), enquanto a evaporação é proporcional à área de solo descoberto (ARAYA et al., 2010).

O AquaCrop simula a produção diária de biomassa e o rendimento das culturas em função da demanda hídrica da cultura e ao manejo agrônômico (VANUYTRECHT et al., 2014). Os detalhes dos processos simulados são fornecidos em um conjunto de três artigos (STEDUTO et al., 2009; RAES et al., 2009; HSIAO et al., 2009), que foram publicados pelo documento *Irrigation and Drainage* N°. 66 'Resposta de rendimento da cultura à água' e no manual de referência (RAES et al., 2012). Abaixo na Figura 2 apresenta-se a interface do modelo AquaCrop versão 6.0 utilizado.

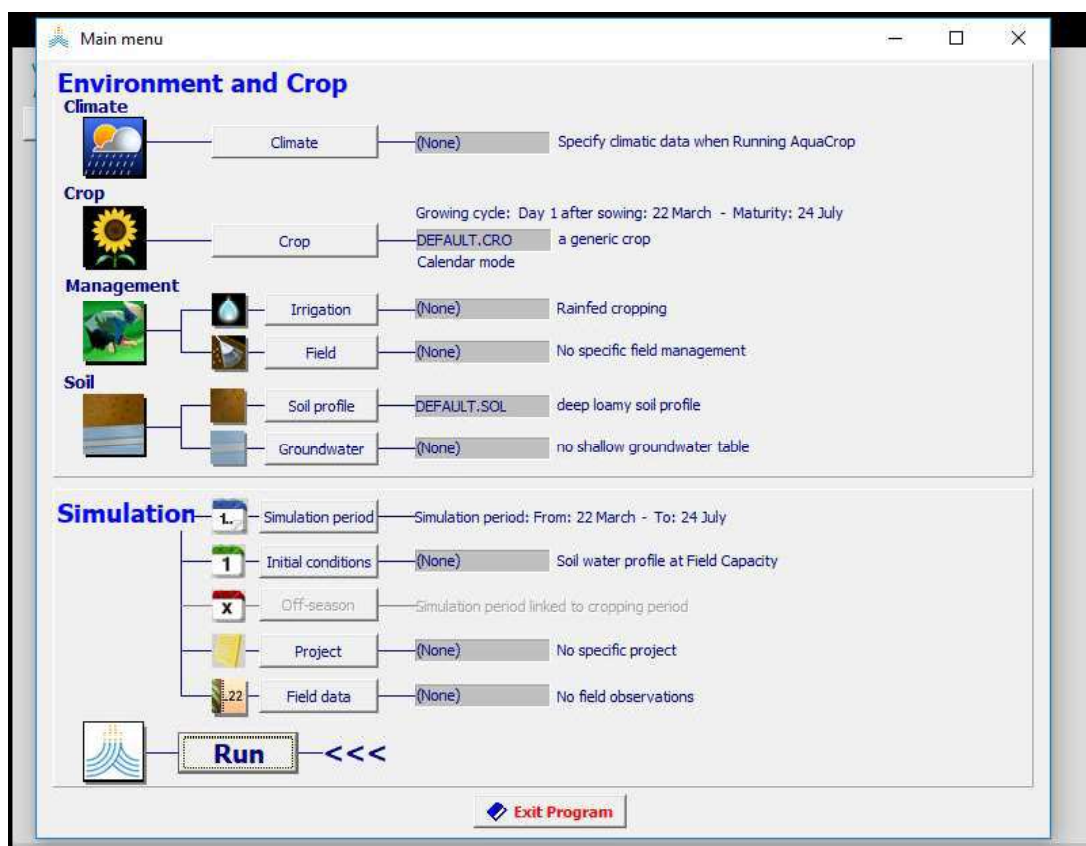


Figura 2. Janela que ilustra o sistema de banco de dados para a simulação do modelo AquaCrop.

Ajuste de parâmetros da cultura

O desenvolvimento do dossel foi medido em termos de fases de crescimento, por meio da área foliar, biomassa total e biomassa de raiz em base mensal após a emergência de 80% das plantas. As variáveis do yacon utilizados para a calibração do modelo AquaCrop são apresentados na Tabela 3. Os mesmos valores desse conjunto de variáveis foram utilizados para avaliar o desempenho e a robustez do AquaCrop nos plantios de Inverno e Primavera.

Tabela 3. Variáveis da cultura selecionados e valores para calibração do AquaCrop para o yacon

Variáveis	Valor
Temperatura base (°C)	12,5
Temperatura superior (°C)	34,0
Cobertura relativa de ervas daninha (%)	5
Coefficiente de crescimento do dossel CGC (% d ⁻¹)	8,5
Coefficiente de declínio do dossel CDC (% d ⁻¹)	1,08
Fator de depleção de água do solo para expansão do dossel, limite superior	25,0
Fator de depleção de água do solo para expansão do dossel, limite inferior	55,0
Fator de forma para o coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel	3,0
Fator de depleção de água do solo para controle estomático	0,50
Fator de forma para coeficiente de estresse hídrico para controle estomático	3,0
Fator de depleção de água do solo para a senescência do dossel precoce	0,55
Estresse por frio (°C)	5,0
Produção de água normalizada WP* (g.m ⁻²)	15
Índice de colheita (%)	56
Densidade da planta (plantas ha ⁻¹)	20000
Capa de cobertura inicial CCo (%)	0,10
Crescimento máximo do dossel (%)	83,0
Tempo até a cobertura máxima do dossel (GD)	1135
Tempo para a senescência (GD)	1767
Tempo até à maturidade (GD)	1862
Profundidade de raiz máxima efetiva (m)	0,35

Parametrização e validação do modelo

Para determinar o desempenho do ajuste realizado no modelo na parametrização e na validação, foram comparados os valores observados de biomassa seca total, rendimento de raiz e índice de colheita observados no campo, com aqueles simulados pelo modelo. Os resultados são apresentados e discutidos por épocas de plantio

(Outono, Inverno e Primavera) em que foram comparados valores simulados e observados de biomassa acumulada, rendimento de raiz e índice de colheita.

A calibração do AquaCrop foi realizada por meio de um processo iterativo que introduziu os valores que melhor simulavam as variáveis de crescimento primário da safra, como cobertura do dossel, índice de colheita, conteúdo de matéria seca total e conteúdo de matéria seca de raiz ocorrida no plantio de Outono. A validação do AquaCrop foi realizada por plantios ocorridos no Inverno e Primavera. Além disso, após os parâmetros calibrados para a safra de Outono, os parâmetros conservadores e não conservadores, que dependem da cultivar da cultura, foram considerados constantes.

Os índices estatísticos utilizados foram: análise de regressão linear e determinado o coeficiente de determinação (R^2) (Eq. 7), o índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT et al., 1985) (Eq. 8), o viés (BIAS) para o erro sistemático (Eq. 9), a raiz do erro quadrado médio (RMSE) (Eq. 10) e o erro absoluto médio (MAE) (Eq. 11).

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n [(\hat{y}_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{x}_i)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}} \right)^2 \quad (\text{Eq. 7})$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}_i - \bar{y}_i| + |y_i - \bar{y}_i|)^2} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$\text{Bias} = n_d^{-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (\text{Eq. 9})$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (\text{Eq. 11})$$

Em que, y , \hat{y} , \bar{y} e \bar{x} representam, respectivamente, os valores observados em campo, simulados pelo AquaCrop, e a média dos valores observados e simulados pelo AquaCrop, n é o número de observações n_d é o número de pares de dados. Todo o

procedimento estatístico foi realizado com o auxílio do programa R (*R core team*, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4, são apresentados os desvios obtidos entre os valores observados e simulados pelo modelo AquaCrop para as três épocas de plantio região Ibatiba-ES, obtidos ao final do experimento. Observa-se que o valor calibrado no plantio de Outono apresentou desvio de -8,6 % para o IC, enquanto que os plantios de inverno e primavera, épocas utilizadas para validar o modelo apresentaram 7,6 e -1,4 % de desvio, respectivamente.

Os valores de índice de colheita (HI) obtidos nos testes de campo foram semelhantes aos obtidos por outros autores (STRUIK, 2011; QUIROZ, 2012; RAES et al., 2012) para a cultura da batata comum (*Solanum tuberosum*). Os valores acima de 7% no índice de colheita para os plantios de Outono e Inverno devem-se às mudanças climáticas como a temperatura, visto que em ambas as datas, houve maiores frequências de temperaturas mínimas abaixo da temperatura basal inferior. Como observado por Hanks (1983) e Struik e Ewing, (1995), o HI é sensível a grandes mudanças no clima, nas quais a temperatura e o fotoperíodo são os principais fatores climáticos que afetam a taxa de acumulação de biomassa, bem como a partição da biomassa entre as folhas, hastes, raízes e tubérculos.

O valor de biomassa total apresentou um desvio de 3,5 % na calibração (Outono). O modelo ajustado apresentou resultados satisfatórios nos respectivos plantios de Inverno e Primavera, com desvios de -3,9 e 2,0 %, respectivamente. É notório que os plantios de Outono e Primavera apresentaram valores finais de biomassa total superestimando o valor simulado, sendo corroborado pelo bias (Tabela 5), com respectivos valores de 0,64 e 0,21 ton ha⁻¹ para os plantios do Outono e da Primavera.

Quando avaliado o rendimento de raiz, observa-se valor negativo para o desvio obtido no plantio do Outono. Esses valores são corroborados pelo erro sistemático (Tabela 5), apresentando valor de -0,47 ton ha⁻¹. Entretanto, os desvios obtidos ao final do experimento foram bons, com valores abaixo de 6,0 % para todas as simulações.

Tabela 4. Porcentagem de desvio para o Índice de colheita, Biomassa total e rendimento de raiz simulado e observado para a cultura do yacon ao final do experimento, para três épocas de plantio, na região de Ibatiba, ES, 2013

Plantio	IC			Biomassa total			Rendimento de raiz		
	Obs	Sim	Desvio %	Obs	Sim	Desvio % ---ton ha ⁻¹ ---	Obs	Sim	Desvio % ---ton ha ⁻¹ ---
Outono	0,52	0,56	-8,67	17,85	17,21	3,59	9,27	9,74	-5,08
Inverno	0,61	0,56	7,65	13,54	14,04	-3,97	8,30	7,97	3,92
Primavera	0,55	0,56	-1,43	13,63	13,91	2,03	7,61	7,60	0,17

IC: Índice de Colheita; Obs e Sim se referem aos valores observados em campo e simulados pelo modelo AquaCrop.

Apesar de ser observada maior quantidade de dias com valores de temperatura mínima abaixo da temperatura basal inferior (Figura 1) nos plantios do Outono e do Inverno, a produção de ambas apresentou valores maiores que o plantio da Primavera. Isso pode ser explicado pelo aumento da duração do ciclo do yacon durante essas épocas de plantio (Outono e Inverno), visto que a temperatura média ocorrida durante todo o ciclo foi menor que o plantio da Primavera, resultando em um aumento da duração de dias requerido para o término do ciclo e, conseqüentemente, da área foliar verde (PAULA et al., 2005). O modelo conseguiu responder com precisão a esse aumento no rendimento de raiz em função do aumento da duração do ciclo da cultura.

Na Figura 3, é observada graficamente a análise de regressão para o rendimento de raiz observado e simulado durante o ciclo, bem como seu coeficiente de determinação e índice de concordância nas diferentes épocas de plantio. De acordo com a análise de regressão, o modelo AquaCrop superestimou os valores de biomassa seca de raiz em todas as épocas de plantio, quando comparado todo o conjunto de dados ao longo do ciclo, com baixa dispersão dos dados e apresentando valores de $R^2 > 0,92$.

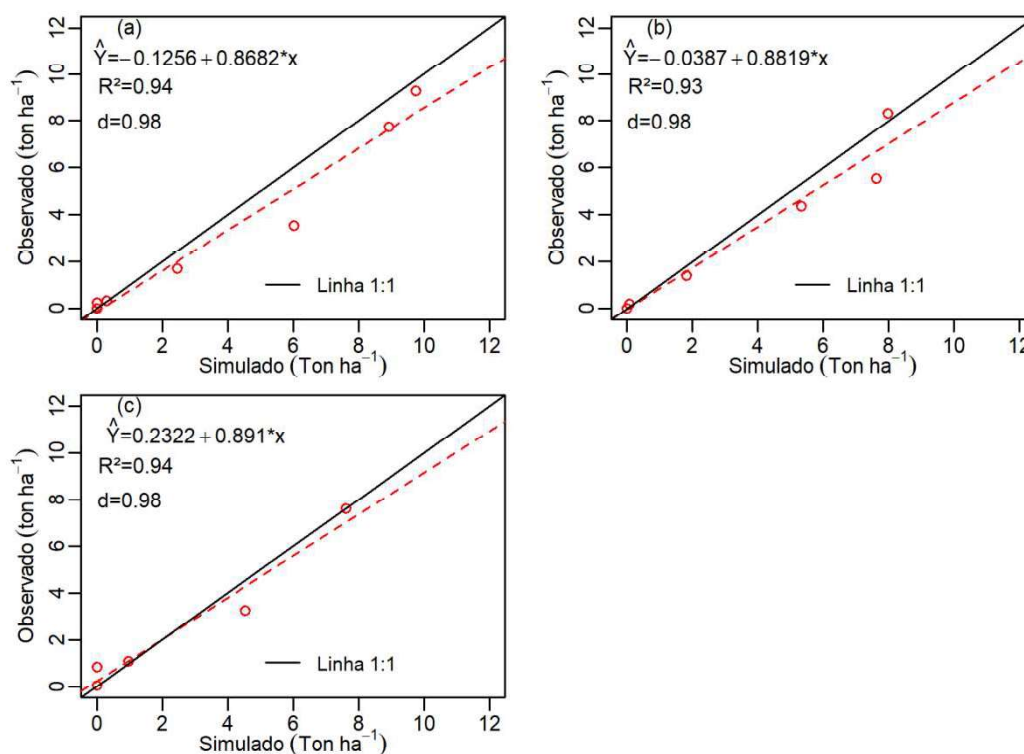


Figura 3. Relação entre os valores observados e simulados para rendimento de raiz de yacon nos plantios de Outono (a), Inverno (b) e primavera (c).

Isso mostra que mais de 92% da variabilidade dos dados observados no campo foi explicado pela simulação do modelo. Além disso, houve alta concordância entre os dados, com $d = 0,98$ em todas as épocas de plantio. A boa parametrização do modelo se deve à disponibilidade de dados de cobertura do solo, a qual possibilitou ao modelo uma boa resposta para a biomassa total do yacon (Tabela 4). A taxa transpiratória de uma cultura é afetada pela cobertura e, conseqüentemente, ao acúmulo de biomassa, desse modo, a simulação correta dessa variável contribui para o melhor desempenho do AquaCrop (FARAHANI et al., 2009).

Para as análises de erro obtidas neste experimento, observa-se na calibração (Outono) valor de 2,5 e 2,4 ton ha^{-1} para o RMSE e o MAE, respectivamente, para biomassa total (Tabela 5). Todavia, para rendimento de raiz, esses erros são reduzidos para 1,2 e 0,74 ton ha^{-1} para o RMSE e MAE, respectivamente.

A validação do modelo apresentou menores erros que a calibração, com valor de 0,82 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ de biomassa total (RMSE) e 0,71 ton ha^{-1} de rendimento de raiz para o plantio de Primavera. Esses resultados estão próximos aos encontrados por Montoya et al. (2016) para batata (*Solanum* sp.) irrigada mantendo 100% da capacidade de campo, com RMSE de 1,32 ton ha^{-1} . Apesar de as estatísticas métricas expressarem o erro de

predição do modelo, as diferenças entre os valores de RMSE e MAE se devem pelo aumento da penalização obtida pelo erro RMSE quando se tem maiores diferenças entre os valores observados e simulados.

Tabela 5. Resultado da raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE) e Bias para a biomassa total e rendimento de raiz observado e simulado para três épocas de plantio na região de Ibatiba, ES, 2013

Plantio	Biomassa total			Rendimento de Raiz		
	RMSE	Bias -----ton ha ⁻¹ -----	MAE	RMSE	Bias -----ton ha ⁻¹ -----	MAE
Outono	2,50	0,64	2,39	1,22	-0,47	0,74
Inverno	1,30	-0,53	1,18	0,89	0,32	0,60
Primavera	0,82	0,21	0,79	0,71	0,01	0,59

De um modo geral, o modelo AquaCrop apresentou bons resultados para simular o rendimento de raiz na região de Ibatiba, Espírito Santo. Ao executar o modelo sob diferentes épocas de plantio, é possível otimizar a data de plantio do yacon, tornando-o uma ferramenta promissora para previsão de produção do yacon cultivada fora de época em Ibatiba, bem como a necessidade de irrigação.

CONCLUSÃO

O AquaCrop versão 6.0 simulou adequadamente o índice de colheita, bem como a biomassa total e rendimento de raiz do yacon em diferentes épocas de plantio, com desvios inferiores a 6% para biomassa total e de raiz.

O modelo pode ser usado para mitigar os efeitos decorrentes do clima, otimizando o tempo de plantio em diferentes épocas de plantio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes, pela bolsa de mestrado, à FAPES, pela bolsa pesquisador capixaba do autor Fábio Luiz de Oliveira e ao INCAPER, pela concessão dos dados climáticos.

REFERÊNCIAS

ABEDINPOUR, M.; SARANGI, A.; RAJPUT, T. B. S.; SINGH, M.; PATHAK, H.; AHMAD, T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 110, p. 55-66, 2012.

ARAYA, A.; HABTU, S.; HADGU, K. M.; KEBEDE, A.; DEJENE, T. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). **Agricultural Water Management**, v.97, n. 11, p. 1838-1846, 2010.

ÁVILA, M. R.; BARIZÃO, D. A. O.; GOMES, E. P.; FEDRI, G.; ALBRECHT, L. P. Cultivo de feijoeiro no Outono/inverno associado à aplicação de bioestimulante e adubo foliar na presença e ausência de irrigação. **Scientia Agraria**, v. 11, n. 3, p. 221-230, 2010.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CASA, A.; OVANDO, G.; BRESSANINI, L.; MARTÍNEZ, J. Aquacrop model calibration in potato and its use to estimate yield variability under field conditions. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 3, n. 3, p. 397-407, 2013.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; OWEIS, T. Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. **Agronomy journal**, v. 101, n. 3, p. 469-476, 2009.

FERNÁNDEZ, E. C.; VIEHMANNOVÁ, I.; LACHMAN, J.; MILELLA, L. Yacon [*Smallanthus sonchifolius* (Poeppig & Endlicher) H. Robinson]: a new crop in the Central Europe. **Plant Soil Environ**, v. 52, p. 564-570, 2006.

HSIAO, T. C.; HENG, L.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 448-459, 2009.

HANKS, R. J. Yield and water-use relationships: an overview. In: TAYLOR, H. M.; JORDAN, W. R.; SINCLAIR, T. R. (Eds.), **Limitations to Efficient Water Use in Crop Production**. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, USA, p. 393–411, 1983.

MONTOYA, F.; CAMARGO, D.; ORTEGA, J. F.; CÓRCOLES, J. I.; DOMÍNGUEZ, A. Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 267-280, 2016.

OLIVEIRA, E. C. D.; COSTA, J. M. N.; PAULA JÚNIOR, T. J.; FERREIRA, W. P. M.; JUSTINO, F. B.; NEVES, L. D. O. The performance of the CROPGRO model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield simulation. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 34, n. 3, p. 239-246, 2012.

PATEL, N.; KUMAR, P.; SINGH, N. Performance evaluation of AquaCrop in simulating potato yield under varying water availability conditions. **Indian Agricultural Research Institute**, New Delhi-110012, 2008.

QUIROZ, R. Potato. IN: STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. (Eds.), **Crop Yield Response to Water. Irrigation and Drainage Paper 66**. FAO, Roma, Italy, p. 184–191, 2012.

R Core Team. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em 20/06/2017.

RAES, D.; STEDUTO P.; HSIAO T. C.; FERERES E. AquaCrop –The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p.438–447, 2009.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **AquaCrop Reference Manual, AquaCrop version 4.0**. 2012.

Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>>. Acesso em 05/08/2017.

RAZZAGHI, F.; ZHOU, Z.; ANDERSEN, M. N.; PLAUBORG, F. Simulation of potato yield in temperate condition by the AquaCrop model. **Agricultural Water Management**, v. 191, p. 113-123, 2017.

SALES, R. A.; LOUZADA, J. M.; OLIVEIRA, E. C.; PINHEIRO, M. A. B.; SALES, R. A. Estimativa das necessidades hídricas do milho cultivado nas condições edafoclimáticas de São Mateus – ES. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13 n. 23, p. 598-609, 2016.

SALES, R. A.; AMBROZIM, C. S.; POSSE, R. P.; OLIVEIRA, E. C.; POSSE, S. P. Índice de satisfação das demandas de água e produtividade do feijão em diferentes lâminas de irrigação em Colatina-ES. **Energia na Agricultura**, v. 32. n. 1, 81-87, 2017.

SANTANA, I.; CARDOSO, M. H. Raiz tuberosa de yacon (*Smallanthus sonchifolius*): potencialidade de cultivo, aspectos tecnológicos e nutricionais. **Ciência Rural**, v. 38, n. 3, p. 898–905, 2008.

SANTOS, R. A.; SANTOS, E. P.; SALES, R. A.; SANTOS, R. L. Estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Feira de Santana (BA). **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 4, p. 1617-1626, 2017.

SILVA, D. M. N. **Cultivo de yacon em duas condições edafoclimáticas e épocas de plantio no Sul do Espírito Santo**. 88f, Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias, 2015.

SUÁREZ-REY, E. M.; ROMERO-GÁMEZ, M.; GIMÉNEZ, C.; THOMPSON, R. B.; GALLARDO, M. Use of EU-Rotate_N and CropSyst models to predict yield, growth and water and N dynamics of fertigated leafy vegetables in a Mediterranean climate and to determine N fertilizer requirements. **Agricultural Systems**, v. 149, p. 150-164, 2016.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009.

STRUİK, P. C.; EWING, E. E. Crop physiology of potato (*Solanum tuberosum*): responses to photoperiod and temperature relevant to crop modelling. In: HAVERKORT, A. J.; MACKERRON, D. K. L. (Eds.), *Potato Ecology and Modelling of Crops under Conditions Limiting Growth*. **Kluwer Academic Publishers**, Dordrecht, The Netherlands, p. 19–41, 1995.

STRUİK, P. C. Responses of the potato plant to temperature. In: **Potato Biology and Biotechnology**, p. 367-393, 2007.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y. A.; CRESTANA, S.; RAWLS, W. J. Comparison of two approximation techniques to develop pedotransfer functions for Brazilian soil. **Soil Science Society of American Journal**, v. 67, p. 1085-1092, 2003.

TROMBETTA, A.; IACOBELLIS, V.; TARANTINO, E.; GENTILE, F. Calibration of the AquaCrop model for winter wheat using MODIS LAI images. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 304-316, 2016.

THORNTHWAITE, C. W. Na approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55- 94, 1948.

VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; HENG, L. K.; VILA, M. G.; MORENO, P. M. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 351-360, 2014.

WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for evaluations and comparisons of models. **Journal of Geophysical**, v. 90, n. 65. p. 8995-9005, 1985.