

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**UTILIZAÇÃO DA MODELAGEM SISTÊMICA PARA ANALISAR O
EFEITO DA VARIAÇÃO CLIMÁTICA NO PARÂMETRO
PRODUTIVIDADE DA ÁGUA NA LARANJA NATAL (*Citrus sinensis*
L. Osbeck) NO ESTADO DE SÃO PAULO**

FRANCISCA FRANCIANA SOUSA PEREIRA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Campus de
Botucatu, para obtenção do Título de Doutora
em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU – SP

Agosto – 2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**UTILIZAÇÃO DA MODELAGEM SISTÊMICA PARA ANALISAR O
EFEITO DA VARIAÇÃO CLIMÁTICA NO PARÂMETRO
PRODUTIVIDADE DA ÁGUA NA LARANJA NATAL (*Citrus sinensis*
L. Osbeck) NO ESTADO DE SÃO PAULO**

FRANCISCA FRANCIANA SOUSA PEREIRA

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Máximo Sánchez Román

Co-orientadora: Dra. Alba María Guadalupe Orellana González

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Câmpus de
Botucatu, para obtenção do Título de Doutora
em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU – SP

Agosto – 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO- BOTUCATU (SP)

P436u Pereira, Francisca Franciana Sousa, 1981-
Utilização da modelagem sistêmica para analisar o efeito da variação climática no parâmetro produtividade da água na laranja Natal (*Citrus sinensis* L. Osbeck) no Estado de São Paulo / Francisca Franciana Sousa Pereira. - Botucatu : [s.n.], 2015
x, 106 f. : ils. color., grafs. color., tabs.

Tese(Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2015

Orientador: Rodrigo Máximo Sánchez Román

Coorientador: Alba María Guadalupe Orellana González

Inclui bibliografia

1. Modelos matemáticos. 2. Recursos hídricos. 3. Produtividade agrícola. 4. Mudanças climáticas. I. Sánchez Román, Rodrigo Máximo. II. Orellana González, Alba María Guadalupe. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu. IV. Título.



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: UTILIZAÇÃO DA MODELAGEM SISTÊMICA PARA ANALISAR O EFEITO DA VARIÇÃO CLIMÁTICA NO PARÂMETRO PRODUTIVIDADE DA ÁGUA NA LARANJA NATAL (*Citrus sinensis* L. Osbeck) NO ESTADO DE SÃO PAULO

AUTORA: FRANCISCA FRANCIANA SOUSA PEREIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. ALBA MARIA GUADALUPE ORELLANA GONZÁLEZ

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN
Dep de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

Prof. Dr. EDSON EIJI MATSURA
Água e Solo / Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. SERGIO NASCIMENTO DUARTE
Engenharia Rural / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Usp

Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD
Dep de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

Prof. Dr. JOAO LUIS ZOCOLER
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Data da realização: 11 de agosto de 2015.

"Como posso perder a fé na justiça da vida, se os sonhos dos homens que dormem em colchão de penas não são mais bonitos do que os sonhos dos homens que dormem no chão".

Dostoiévski

"O Senhor é o meu pastor: nada me faltará.

Deitar-me faz em verdes pastos, guia-me mansamente a águas tranqüilas.

Refrigera a minha alma; guia-me pelas veredas da justiça, por amor do teu nome.

Ainda que eu andasse pelo vale da sombra da morte, não temeria mal algum, porque tu estás comigo; a tua vara e o teu cajado me consolam.

Preparas uma mesa perante mim na presença dos meus inimigos, unges a minha cabeça com óleo, o meu cálice transborda.

Certamente que a bondade e a misericórdia me seguirão todos os dias da minha vida e habitarei na casa do Senhor por longos dias".

Salmo 23

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Maria Francisca e Francisco Pereira pela amizade, amor e pelo incentivo constante durante toda minha vida, mas principalmente por me ensinarem que com trabalho, dignidade e amor no coração se consegue os sonhos que outrora eram considerados impossíveis.

Às minhas irmãs Luciana, Luciete, Graciete, Lusiane, Natália e ao meu irmão Maique, pelo amor que temos uns pelos outros.

Vocês são o meu tesouro.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e pela graça que tem posto no meu coração, por guiar os meus passos e por estar sempre presente.

À Faculdade de Ciências Agronômicas, campus de Botucatu e ao Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pela oportunidade de realizar o doutorado, pela competência e responsabilidade com que os professores que compõem o quadro desempenham seu trabalho.

Ao meu orientador, professor Dr. Rodrigo Máximo Sánchez Román, sempre presente com sua dedicação e compromisso, agradeço a você e a Dra. Alba María Orellana González, minha co-orientadora, pela orientação, ensinamentos, pelo apoio, e votos de confiança no decorrer da orientação; ambos contribuíram para o meu crescimento profissional.

Ao professor Dr. Antônio de Pádua Sousa, meu orientador no período inicial do doutorado, por ter me recebido com muito carinho, além do apoio e amizade em todos os momentos.

Aos funcionários e amigos da Biblioteca Prof. Paulo de Carvalho Mattos pelo atendimento impecável. Vocês são incríveis.

Aos funcionários do departamento de Engenharia Rural, sempre atenciosos, bem humorados e eficientes.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos e por possibilitar o intercâmbio acadêmico-científico com a Universidade de La Habana, através do projeto CAPES-MES/Cuba 177/2012. Agradeço especialmente a equipe de professores e estudantes de pós-graduação da Facultad de Geografía da Universidade de La Habana, pela receptividade, troca de experiências e por todo o conhecimento transferido durante o estágio sanduíche.

À Citrosuco por ceder os dados necessários para a realização de parte deste estudo.

A minha família, por serem tão presentes e marcantes na minha vida, pela alegria com que todos galgam seus ideais e pela união. Obrigada pela paciência com a minha ausência constante. Vocês são o motivo do meu despertar todo amanhecer.

Aos meus eternos amigos: Kleiton, José Raimundo, Lindamara, Cristina, Conan, Adriana, Camila Arantes, Rosa Helena e Carmel, tão distantes e ao mesmo tempo tão presentes, vocês sempre estarão no meu coração.

Aos meus amigos: Thais, Vânia e Rafael, os quais Deus me fez tê-los como irmãos, a minha jornada durante o mestrado e o doutorado sem vocês não seria tão leve, vocês foram tesouros que Deus me deu o privilégio de encontrar em Campinas, obrigada por me encorajarem, por me ouvirem, por compartilharem suas maravilhosas famílias comigo.

À Angélica, grande amiga, não há palavras para descrever o quanto sou grata pela tua amizade. Obrigada por tudo.

Em cada momento de nossas vidas Deus nos presenteia com encontros marcantes. Agradeço a vocês, meninas da casa onde morei esses quatro anos, pela amizade construída e pelo lar de paz. Agradeço à Angélica, Deise, Gabi, Regininha, Melling e Laís, por serem gentis, pelos sorrisos francos e descontrações. Morar bem torna o trabalho diário mais agradável; todas vocês fizeram da minha estadia nessa cidade mais leve e saudável.

Ao amigo João Gabriel Thomaz Queluz, foi um prazer trabalhar com você no início do doutorado.

Aos colegas e amigos da pós-graduação, Natália Soares, Clescy, Mel, Cícero, Marcos, Ana Cláudia, Aline Matoso, Gabriel, Cris, Ana Paula, Renata, Emerson, Joselina, Géssica, Rai e Bruna Soldeira. Agradeço cada minuto de convivência e troca de experiência, agradeço imensamente pelos momentos de entusiasmo e de alegria compartilhados em conjunto.

Aos amigos-irmãos, com os quais me encontrava aos finais de semana, e a inestimável família Mirian, Ronaldo, Guilherme e Rafael, por todas as brincadeiras e por tudo que fizeram por mim.

Agradeço a DEUS por ter proporcionado encontros tão especiais, por ter dado a mim o privilégio de conhecer todos os que foram citados e os muitos que não estão referidos, mas que são fundamentais em minha vida.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO	1
SUMMARY	3
1. INTRODUÇÃO.....	5
2. HIPÓTESE GERAL.....	8
3. OBJETIVO GERAL.....	8
3.1 Objetivos específicos:.....	8
4. REVISÃO DE LITERATURA	9
4.1 Mudanças Climáticas e Agricultura	9
4.2 Impacto da variabilidade climática na agricultura irrigada: A água como fator de produtividade nos cultivos agrícolas	15
4.3 Concentração de CO ₂ e reflexos na agricultura	21
4.4 Condições agroclimática para o cultivo dos citros	26
4.5 O clima e a influência na assimilação de CO ₂ nas laranjeiras	27
4.6 Citricultura no Estado de São Paulo: Importância da variabilidade climática no manejo	30
4.7 O pensamento sistêmico, a dinâmica de sistemas e a modelagem no contexto agrícola	33
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	42
5.1 Caracterização da área de estudo.....	42
5.1.1 Local	42
5.1.2 Clima	44
5.1.3 Fonte de dados	44
5.2 Desenvolvimento do modelo.....	46
5.2.1. Etapa de conceitualização.....	47
5.2.1.1 Definição do modelo	48
5.2.1.2 Diagrama de influência ou círculo de casualidade	50
5.2.2. Etapa de Formalização.....	51
5.2.2.1 Diagrama de estoque e fluxo	52

5.2.2.2 Descrição matemática do modelo.....	55
ii) Estrutura.....	55
ii) Escala temporal.....	56
iii) Parâmetro produtividade de água.....	57
iv) Passos para o cálculo do parâmetro produtividade da água - WP	59
v) Cálculo da transpiração	62
vi) Normalização do parâmetro produtividade da água com as concentrações de CO ₂	64
vii) Normalização do parâmetro produtividade da água à Temperatura do ar	66
5.2.3 Validação do modelo matemático	68
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
6.1 Modelo de verificação da eficiência do uso da água pela laranjeira Natal.....	70
6.2 Etapa de verificação, simulação e aplicação do modelo desenvolvido	72
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
8. CONCLUSÕES	86
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXO	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relações que existem entre as variáveis nos diagramas causais ou círculos de influências.....	37
Figura 2 - Diagrama conceitual do processo de formação do rendimento.	49
Figura 3 - Diagrama de influências do modelo desenvolvido.	51
Figura 4 - Diagrama de estoques e fluxos	54
Figura 5 - Modelo conceitual da formação da biomassa e parâmetro produtividade da água mediado pela concentração de CO ₂	56
Figura 6 - Modelo conceitual do rendimento, evolução do AquaCrop a partir da função de produção.	58
Figura 7 - Esquema de cálculo em AquaCrop para transpiração da cultura (Tr)	62
Figura 8 - Resultados simulados pelo modelo desenvolvido com temperatura média do ar igual à 25°C: 1- Produtividade da água (envolvendo todas as variáveis constituintes do modelo), 2- Produtividade da água (Parâmetro produtividade da água obtido com os dados reais fornecidos pela Citrosuco), 3- Produtividade da água (Parâmetro produtividade da água em função apenas do CO ₂), 4- Parâmetro produtividade da água em função da transpiração, 5- Transpiração.	73
Figura 9 - Resultados simulados pelo modelo desenvolvido com temperatura média do ar igual à 25°C: 1- Produtividade da água (envolvendo todas as variáveis constituintes do modelo), 2- Concentrações futuras (SUST) de CO ₂ na atmosfera projetadas pelo IPCC, 3- Déficit hídrico na brotação baseado no estudo realizado por Marengo (2006a), 4- Lâmina total equivalente à Precipitação mais irrigação, 5- Lâmina de irrigação, média dos dados disponibilizados pela Citrosuco).	74
Figura 10 - Parâmetro produtividade da água obtido em cada um dos cenários estudados na condição não irrigada nas temperaturas 25°C, 30°C e 40°C, cenários de A à I. Parâmetro produtividade da água obtido em cada um dos cenários estudados na condição irrigada nas temperaturas 25°C, 30°C e 40°C cenários de J à R.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lâmina de irrigação total em cada ano.....	43
Tabela 2 - Projeções das Emissões de CO ₂ para o período estudado de 2010 à 2100 fornecidas pelo IPCC.....	46
Tabela 3 - Coeficiente de cultivo utilizado para obtenção da Transpiração.....	64
Tabela 4 - Taxa de assimilação anual de CO ₂ em função da temperatura do ar	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Características da composição para uma execução do modelo desenvolvido ...	76
Quadro 2 - Cenários propostos e avaliados no estudo.....	77
Quadro 3 - Parâmetro produtividade da água da laranjeira Natal obtidos em cada cenário	80

UTILIZAÇÃO DA MODELAGEM SISTÊMICA PARA ANALISAR O EFEITO DA VARIAÇÃO CLIMÁTICA NO PARÂMETRO PRODUTIVIDADE DA ÁGUA NA LARANJA NATAL (*Citrus sinensis* L. Osbeck) NO ESTADO DE SÃO PAULO, Botucatu, 2015.106 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Autor: FRANCISCA FRANCIANA SOUSA PEREIRA

Orientador: RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN

Co-orientadora: DRA. ALBA MARÍA GUADALUPE ORELLANA GONZÁLEZ

RESUMO

O objetivo principal da pesquisa foi desenvolver um modelo de simulação dinâmica fundamentado nos princípios da Dinâmica de Sistemas auxiliado pelo software STELLA. A hipótese do estudo foi que: as variações no clima, mais especificamente as concentrações de dióxido de carbono (CO_2) e as alterações na temperatura do ar, gerarão diferentes efeitos no parâmetro de produtividade da água, aumento ou diminuição na eficiência e uso da água pela laranjeira Natal (*Citrus sinensis* L. Osbeck). O modelo foi desenvolvido através de uma análise sistêmica dos fatores que interferem no processo de formação da biomassa das culturas. Foram determinadas as principais variáveis como: CO_2 , temperatura do ar, transpiração, precipitação, déficit hídrico, lâmina de irrigação, volume de copa e suas respectivas inter-relações. A estrutura foi representada no diagrama causal e a partir deste foi elaborado o diagrama de estoques e fluxos. Por meio do diagrama de estoques e fluxos se estabeleceu o modelo matemático que possibilitou a simulação numérica. A escala temporal utilizada para as simulações e aplicação do modelo foi determinada pelo ciclo da cultura e permitiu simulações de 2010 até 2100. Buscou-se aderir ao sistema as variáveis mais importantes que tivessem possibilidade de serem quantificadas, objetivando resultados que se aproximassem à realidade. De modo geral os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido mostram que a elevação das concentrações de CO_2 na atmosfera combinadas com temperatura do ar, maiores, menores ou iguais às que geralmente ocorrem em ambiente natural, promoverão maior eficiência do uso água pela laranjeira. Outros fatores foram adicionados, como a deficiência hídrica no solo, e verificou-se que, o parâmetro produtividade da água na condição não irrigada será consideravelmente inferior a situação irrigada em 2100. Na área irrigada o modelo desenvolvido apresenta valores maiores do parâmetro de produtividade da água em todas

as quantidades de CO₂ projetadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC e também nas taxas de redução da assimilação de CO₂ mediadas pela temperatura. Concluiu-se que o modelo desenvolvido é apto para determinar a influência do clima, principalmente das futuras concentrações de CO₂ na atmosfera previstas pelo relatório do IPCC, assim como possíveis elevações, ou o abaixamento da temperatura no comportamento do parâmetro de produtividade da água da laranjeira Natal. O modelo aqui proposto pode ser utilizado em qualquer localidade com a disponibilidade de dados para o propósito ao qual o mesmo foi desenvolvido. A elevação das concentrações de CO₂ na atmosfera influenciará positivamente na assimilação do CO₂ pela laranjeira e, portanto aumento de gramas por milímetro de água transpirada da laranjeira, no entanto esse efeito positivo poderá ser mascarado por outros efeitos de tal elevação, vinculados principalmente à temperatura e ao déficit de pressão de vapor.

Palavras chaves: Dinâmica de sistemas, recursos hídricos, produção agrícola, variabilidade climática

DYNAMIC SYSTEM MODELING SYSTEMIC TO ANALYZE THE EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON NATAL ORANGE WATER PRODUCTIVITY IN SÃO PAULO STATE, Botucatu, 2015. 106 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Author: FRANCISCA FRANCIANA SOUSA PEREIRA

Advisor: RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN

Co- advisor: Dra. ALBA MARÍA GUADALUPE ORELLANA GONZÁLEZ

SUMMARY

The main objective of the research was to develop a model based on dynamic systems aided by STELLA software. The study hypothesis was that: the climate variations, specifically CO₂ concentrations and changes in air temperature will produce different effects on the water productivity parameter, increasing or decreasing water use efficiency by the Natal orange. The model was developed through a systematic analysis of the factors that interfere in the formation of crop biomass. It was determined as main variables: CO₂, air temperature, transpiration, precipitation, water deficit, irrigation water depth, canopy cover and their interrelations. The structure was represented in a causal diagram and from this, it was developed the stocks and flows diagram. The later established the mathematical relationships between the model's variables enabling numerical simulation. The time step used for the simulations and applied was determined by the crop cycle, allowing a time frame from 2010 to 2100. The model has all the variables that are being able to be quantified, pursuing results closer to reality. In general, the results of the developed model showed that the rising of CO₂ concentrations in the atmosphere combined with higher temperatures will promote greater efficiency of water use by this orange variety. Other factors were added such soil water deficit; it was verified that a reduction in the water productivity parameter for non-irrigated condition will be considerably higher than the irrigated condition by 2100. In the irrigated area the model presents, on all quantities of CO₂ projected by the Intergovernmental Panel on Climate Changes - IPCC, higher values for water productivity parameter and it also in the reduction rates of CO₂ assimilation as a function of air temperature. It was concluded that the model, here presented, was able to determine the influence of climate, especially future CO₂ concentrations in air temperature changes in the water productivity parameter for Natal orange. It may be used in any

location with the availability of data requested by it. Rising CO₂ concentrations in the atmosphere will influence positively the assimilation of CO₂ by the Natal orange and, therefore, a increase in gram per millimeter transpired by the orange tree. However this positive effect may be masked by the effects of other variables such as air temperature and water vapor pressure deficit.

Keywords: System Dynamics, water resources, agricultural production and climate variability

1. INTRODUÇÃO

A humanidade está cada dia mais ciente da complexidade da realidade em que vive, são muitos os problemas que necessitam ser amenizados neste novo milênio, dentre eles, fome, pobreza, degradação ambiental, guerras e a falta d'água, este último de forma direta ou indireta intensifica ainda mais os problemas antes listados.

Além do uso desordenado da água, sendo esta uma das principais maneiras da degradação dos recursos hídricos, as alterações no clima, têm proporcionado aumento considerável na escassez hídrica. As inconstâncias climáticas têm trazido sérios problemas aos cultivos agrícolas por aumentar o período de estiagem em algumas regiões proporcionando déficit hídrico e diminuindo o rendimento dos cultivos, e em regiões que já são áridas, intensifica os problemas relacionados à seca.

A produção agrícola sofre, portanto, interferência de fatores como, água, clima e solo. Essas questões que envolvem o crescimento e por fim a produção dos cultivos agrícolas são amplas e complexas, não devendo ser estudadas isoladamente por serem interconectadas e interdependentes. Cada um desses fatores se caracteriza como sistema, e funciona de maneira dinâmica podendo atuar algumas vezes como subsistema, quando interconectados, formando juntos um sistema ainda mais complexo.

Atualmente se dispõe de uma grande quantidade de informações oriundas de investigações referentes à estes processos envolvidos na formação do rendimento e na produção dos cultivos, assim como suas relações com a utilização da água. No entanto no ambiente acadêmico, a maioria dos estudos são pontuais e trazem respostas importantes da utilização da água pelos principais cultivos agrícolas. Na metodologia da

Dinâmica de Sistemas estes resultados pontuais servem como elo para uma cadeia maior, logo, devem ser bem fundamentados e concretos, pois serão a base para os estudos de modelagem e para implementar cenários futuros.

Buscar, portanto, entender as interligações existentes entre cultivo, clima, água e solo é tarefa bastante complexa, pois são temas que instigam a pensá-los de maneira interconectada. Fundamenta-se assim, a realização de estudos que possam trazer informações sobre a situação atual e as perspectivas futuras da utilização da água; estes estudos poderão sustentar tomadas de decisão quanto à intervenção e gestão desse bem. Considerando o objetivo central desta pesquisa, como análise dos mecanismos do sistema solo-planta-atmosfera, priorizando a variabilidade climática e sua influência na produtividade agrícola da laranjeira Natal na região Norte do Estado de São Paulo, torna-se necessário, em essência, um método abrangente que interligue tanto os fatores climáticos quanto o comportamento nos rendimentos ao longo dos anos.

A justificativa para a utilização da citricultura e mais especificamente a cultivar Natal nos estudos sobre mudança climática e a produção agrícola, fundamenta-se por ser essa uma das principais culturas e a cultivar mais utilizada nas áreas citricolas do estado de São Paulo, representado forte influência no uso dos recursos hídricos.

No levantamento apresentado pela Organização para a Agricultura e a Alimentação (FAO) em 2014, o Brasil ocupa o posto de maior produtor mundial de citros com produção superior a 18 milhões de toneladas, seguido dos Estados Unidos, China, Índia, México e Espanha. O Estado de São Paulo, por sua vez, detém quase 80% da produção nacional de laranja e possui uma área equivalente à 464,4 mil ha com produtividade média de 1,4 caixas por pé (BRASIL, 2013). Reuther citado por Ortolani et al. (1991), comenta que laranjais adultos irrigados necessitam de 762 a 1.245 mm ano⁻¹, bem distribuídos, para um bom desenvolvimento e produção, o que evidencia a importância na utilização dos recursos hídricos do estado pela atividade citrícola.

Uma pesquisa que envolve dióxido de carbono (CO₂), o clima de forma geral, o desenvolvimento e rendimento de uma cultura, o manejo da irrigação visando principalmente melhor utilização dos recursos hídricos é vista como ciência integrada e multidisciplinar e, portanto se enquadra perfeitamente dentro da metodologia que aborda o Pensamento Sistêmico e a Dinâmica de Sistemas. A dinâmica de sistemas realiza uma abordagem mais ampla por analisar de maneira integrada as cadeias de eventos

circulares existentes na natureza, expressando-os mais adequadamente. Segundo Capra (1996) e Griffith (2001) o isolacionismo, o ato de “neutralizar”, a disjunção e a separação do homem versus natureza, foi um paradigma que tornou cada vez mais difícil estabelecer as ligações necessárias para o entendimento do funcionamento dos ecossistemas.

O Pensamento Sistêmico, a Dinâmica de Sistemas e o Enfoque Sistêmico constituem uma metodologia que permite ir além dos estudos de caso e das teorias descritas, contextualizam as partes, procurando influências entre as mesmas para entender o funcionamento do todo. É uma metodologia que não se limita apenas a sistemas lineares e pode fazer pleno uso das características não lineares dos sistemas. O enfoque sistêmico articula e integra de forma coerente diferentes metodologias, visões, estudos anteriores, tudo isso para por exemplo, efetuar a leitura da realidade buscando o desenvolvimento de soluções para problemas atuais. Como ferramenta complementar, porém não menos fundamental para a avaliação das causas e efeitos dentro da dinâmica de sistemas, tem-se a modelagem; os modelos são estruturas robustas que servem de suporte dentro da dinâmica de sistemas. A utilização da metodologia sistêmica e a computação permitem simulações eficazes de sistemas complexos.

Dessa forma, é adequado o estudo e aplicação de metodologias que interliguem as principais características envolvidas direta (adubação, irrigação, cultivar, manejo e tratos culturais) ou indiretamente (solo, clima) no rendimento desta cultivar de laranja. No presente estudo foi desenvolvido um modelo de simulação, baseado na dinâmica de sistemas utilizando o software STELLA, com objetivo de analisar o efeito da variação climática no parâmetro produtividade da água da laranja Natal no norte do estado de São Paulo, mediante a temperatura atmosférica e as concentrações de CO₂ na atmosfera, estas concentrações indicadas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).

2. HIPÓTESE GERAL

As variações no clima, mais especificamente as concentrações de CO₂ e alterações na temperatura, gerarão diferentes efeitos no parâmetro produtividade da água, aumento ou diminuição na eficiência e uso da água pela laranjeira Natal.

3. OBJETIVO GERAL

- Estudar os efeitos das Mudança Climática/Variabilidade Climática e sua implicação no uso eficiente da água pela citricultura na região norte do estado de São Paulo, mediado principalmente por alterações nas concentrações de CO₂ e variações de temperatura do ar.

3.1 Objetivos específicos:

- Incorporar métodos quantitativos na análise de dados climáticos e previsões climáticas vinculadas a impactos sobre a produção da cultivar de laranjeira Natal na Região Norte do Estado de São Paulo.

- Formular diferentes cenários para a análise dos impactos das mudanças climática/variabilidade climática na cultivar de laranjeira Natal, utilizando para isto a Dinâmica de Sistemas e a modelagem temporal dos dados.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Mudanças Climáticas e Agricultura

Dentre os vários conceitos sobre mudanças climáticas, o que será referenciado aqui é o de Gondim, Cavalcante e Beltrao (2010). Os autores afirmam que Mudanças Climáticas caracterizam-se como um conjunto de alterações no estado do clima, podendo ser identificadas tanto por variações nas médias como na variabilidade das propriedades do clima; tais alterações persistem por um período extenso, tipicamente décadas ou mais. Segundo esses autores as mudanças ou alterações no clima são devidas a processos internos e/ou forçantes externas.

Existem divergências com relação à fonte do aquecimento global e das mudanças climáticas. Interroga-se se o aumento evidenciado na temperatura do planeta e todos esses eventos climáticos extremos têm origem a partir das atividades antrópicas ou são ocasionados por forçantes naturais (SILVA; RIBEIRO, 2012). Na verdade nos trabalhos de Molion (2007a, 2007b e 2008) há o questionamento sobre a existência de mudanças climáticas ou não.

De acordo com Molion (2008) o clima do Planeta é resultante de tudo o que ocorre no Universo e não resultante das atividades humanas, exemplificando para melhor compreensão, que se a poeira densa, de uma estrela, que explodiu há 15 milhões de anos, adentrasse o Sistema Solar, o Planeta resfriaria, pois diminuiria a radiação solar incidente. No entanto, neste mesmo artigo o autor enfatiza que existindo aquecimento do planeta ou não, ou independente de qualquer que seja a fonte de elevação dos gases do

efeito estufa, de origem natural e não antropogênica, não significa que o homem deva continuar a degradar o meio ambiente, e nesse ponto há concordância entre as duas distintas correntes de pesquisadores. Ao contrário, o autor sugere, considerando que o aumento populacional é inevitável no futuro, que a humanidade faça uso do bom senso, buscando a adoção de políticas de conservação ambiental bem elaboradas, destituídas de dogmatismos, e mudanças nos hábitos de consumo, visando a sobrevivência da humanidade e buscando que as gerações futuras possam dispor dos recursos naturais que dispomos hoje.

São vários os autores que fazem parte da outra linha de pensamento, os que afirmam que além da existência certa das mudanças climáticas, estas são originadas sim pelas atividades humanas, pelo uso intenso de todos os recursos naturais do planeta. Para Climate (1992) e nos relatórios do IPCC (1999, 2001, 2007, 2014), é evidente que o clima do planeta Terra começou a mudar, o autor faz uma listagem das evidências dessas alterações, as quais: a temperatura da superfície dos oceanos tem aumentado em 0,5°C; a concentração do vapor de água acima dos trópicos tem aumentado na troposfera; a quantidade de calor latente liberado nas camadas médias da troposfera tropical tem tido um aumento; o gradiente de temperatura entre o equador e os pólos tem aumentado; a média da velocidade dos ventos tem crescido; os sistemas de baixa pressão quase estacionários acima do Atlântico Norte e no norte do Oceano Pacífico aumentaram em profundidade. A lista de trabalhos e autores que defendem esta linha de pensamento é extensa e tem crescido ano após ano (sugere-se ver os relatórios do painel intergovernamental de mudanças climáticas desde de 1999 até 2014).

Mesmo tendo conhecimento de que existem divergências entre pesquisadores que defendem a existência das mudanças climáticas e aqueles que discordam de que o clima está mudando, nesta pesquisa o foco principal são as atuais evidências de eventos climáticos extremos e a influência destes na disponibilidade hídrica para produção agrícola. Segundo Moraes et al. (2011) a Terra sempre passou por ciclos naturais de aquecimento e resfriamento, assim como períodos de intensa atividade geológica. No entanto, a partir dos trabalhos de um grande número de pesquisadores, a atividade industrial e as demais atividades dos seres humanos estão afetando o clima terrestre na sua variação natural (MARENGO et al., 2008a, 2008b; COX et al., 2008; IPCC 2001, 2003, 2007 e 2014). Nestes trabalhos os autores procuram entender as interações entre o sistema natural do clima, os ecossistemas, os seres humanos, as sociedades e as

atividades humanas. Busca-se compreender os impactos biofísicos da mudança climática nos setores e regiões, fazendo uso de simulações e de modelagens matemáticas, sendo que a interação entre o clima natural, o homem e as influências de todas as atividades humanas no clima terrestre estão no topo do destaque das pesquisas desde longa data.

De acordo com Solomon et al. (2007), em regiões onde a escassez hídrica já existe, as alterações climáticas antropogênicas poderão exasperar questões relacionadas com a água, por exemplo, através de aumento das temperaturas, variação nos regimes de chuvas, além do derretimento das geleiras. Todos estes processos poderão se constituir em problemas, e estes combinados com o crescimento populacional já projetado e o aumento dos conflitos sócio-econômicos, promoverão um impacto negativo significativo sobre a disponibilidade de água no futuro (Parry et al., 2007), porém o resultado mais sério e que deve ser a principal fonte de preocupação é a influencia negativa de todos estes processos na segurança alimentar mundial.

Atualmente mesmo com alimentos em quantidade suficiente para toda a população mundial, cerca de 2 bilhões de pessoas passam fome em todo o mundo (FAO, 2010) e de acordo com Beddington et al. (2011), a situação será cada vez mais crítica pois a ineficácia das cadeias de abastecimento de alimentos têm um impacto negativo sobre o meio ambiente. Os mesmos autores afirmam que as práticas agrícolas atuais, incluindo o desmatamento e o uso ineficaz de fertilizantes e resíduos orgânicos, tornam a agricultura um contribuinte significativo das emissões de gases com efeito de estufa no planeta e este fato somado ao aumento da procura global para se cultivar alimentos, culturas para forragem e bioenergia, estão exaurindo os recursos hídricos.

As consequências das mudanças climáticas são mais sensíveis e mais visíveis que as causas, é mais fácil para a população sentir alterações nas condições de temperatura ou na ocorrência de secas ou enchentes do que perceber os processos que levam a esses acontecimentos. Climate (1992) destacou que as percentagens nas emissões de CO₂ de cada setor é diferente e sofre modificações ao longo do tempo. O setor dos transportes na década de 90 segundo o autor, já era o principal responsável pela grande emissão de CO₂ na atmosfera, e como está previsto continuar crescendo tanto o consumo de energia como a quantidade de transportes em circulação em todo o mundo, as emissões por este setor será cada vez maior. A agricultura que é a atividade que mais sofre diretamente com as alterações no clima também foi destacada como responsável por uma parcela representativa nas emissões deste gás, cerca de 15% nessa categoria é devida ao

desmatamento, o qual seria uma das principais responsáveis pela emissão de CO₂ no setor agrícola, outras atividades como revolvimento dos solos e todo o manejo necessário para os cultivos (queimadas em várias localidades do planeta) acentuam ainda mais esse percentual.

Pela percepção de eventos climáticos extremos e da elevação das concentrações dos gases do efeito estufa, mais acentuadamente o CO₂, além da sensibilidade das variações nos principais elementos climáticos, principalmente temperatura e precipitação, a Organização das Nações Unidas para o Meio Ambiente (United Nations Environment Programme – UNEP) e a Organização Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization-WMO) instituíram em 1988 o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change) – IPCC. Este foi criado com o objetivo de realizar estudos e avaliações contínuas e regulares sobre as mudanças climáticas. Os estudiosos que fazem parte deste painel estavam focados principalmente em entender como os seres humanos e suas atividades provocavam alterações no clima terrestre, buscavam entender também as conexões estabelecidas entre a variabilidade climática e a atividade antrópica, além de identificar quais outros fatores intensificam, influenciam e/ou proporcionam tais mudanças no clima (Marengo, 2001; Marengo e Valverde, 2007 b).

De acordo com os relatórios do IPCC de 2013 e 2014, o volume de literatura disponível para avaliar impactos, adaptação, vulnerabilidade das mudanças climáticas tem crescido significativamente. As mudanças climáticas podem representar sérias consequências econômicas, sociais e ambientais e toda essa problemática oriunda das mudanças nas condições climáticas tem despertado interesse da comunidade científica e de toda a população, constituindo um dos temas mais polêmicos e preocupantes da atualidade. Em texto sobre mudanças climáticas publicado no documento “Diretrizes para a formulação de políticas públicas em Mudanças Climáticas no Brasil” no ano de 2009 Biderman (2009) relatara que é preciso urgência para lidar com a questão, e reforça que a hora do mundo tomar as medidas necessárias para combater os piores impactos das mudanças no clima é agora, e que quanto mais se adiar este momento, piores devem ser as consequências para todos os seres vivos.

No quarto relatório do IPCC publicado em 2007, os cientistas afirmaram que eventos climáticos extremos envolvendo altas temperaturas, secas, enchentes, ondas de calor e frio, furacões e tempestades tinham afetado diferentes partes

do planeta, alguns destes eventos já ocorreram e estão ocorrendo com certa frequência no Brasil trazendo sérias consequências sociais, econômicas, ecológicas e até perdas de vida.

Neste mesmo documento do IPCC de 2007, os estudiosos afirmaram que a população mundial estaria com o passar do tempo, mais vulnerável as inconstâncias do clima se medidas sérias não fossem tomadas. Os exemplos seguintes mostram o poder de influência do clima sobre as atividades humanas, o furacão Catarina, em 2004, atingindo principalmente o estado de Santa Catarina; a seca na Amazônia, em 2005, além das secas já observadas no Sul do Brasil em 2004, 2005 e 2006 (MARENGO e VALVERDE, 2007 b; MARENGO et al., 2008 a, 2008 b) e a mais recente escassez hídrica no estado de São Paulo e em toda a região Sudeste nos anos de 2013 e 2014, (MANSUR, 2015), são eventos que trouxeram reflexos na geração de energia nas hidrelétricas e impactos relevantes na agricultura.

Os estudos realizados por MARENGO et al. (2008 a, 2008 b) e COX et al. (2008) relatam que a presença de secas nas diferentes bacias do Brasil, em nível anual, são oriundas da variabilidade interanual do clima associada aos fenômenos de El Niño ou La Niña no Oceano Pacífico Tropical ou à variabilidade na temperatura da superfície do mar do Atlântico Tropical ao norte e sul da linha equatorial. Segundo estes autores estes eventos podem gerar anomalias climáticas conducentes a grandes secas, como os registrados em 1877, 1983 e 1998 no Nordeste, 2004-2006 no Sul do Brasil, 2001 no centro oeste e sudeste e em 1926, 1983, 1998 e 2005 na Amazônia.

Mediante aos efeitos provocados pelas mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil, especialistas em Zoneamento de Riscos Climáticos buscaram compreender como o clima atinge a agricultura. Os pesquisadores envolvidos nesses estudos conseguiram elaborar um zoneamento com o qual se pode antever quais áreas seriam menos suscetíveis a esses problemas, de modo a aproveitá-las para o plantio. De acordo com Deconto (2008) nas próximas décadas, as mudanças do clima devem ser intensas a ponto de mudar a geografia da produção agrícola nacional. Os autores afirmam que Municípios que hoje são grandes produtores poderiam não ser mais em 2020 (MARENGO et al., 2008 a e 2008 b; COX et al., 2008; DECONTO, 2008; MEEHL et al., 2007).

De acordo com o relatório do IPCC, publicado em 2001, a primeira cultura avaliada no Brasil dentro desse âmbito de efeitos das alterações climáticas nos cultivos agrícolas foi o café arábica, e os resultados das pesquisas já mostravam que as

alterações no clima, principalmente os efeitos oriundos do aquecimento global na precipitação e nas oscilações de temperatura poderiam alterar a geografia da produção de café, deslocando seu cultivo para o Sul (DESCONTO 2008), depois destas, muitas outras projeções foram feitas, por exemplo, no estudo realizado por Assad e Pinto (2008) sobre aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola, afirmaram que as alterações no clima poderão comprometer até o ano de 2070 os níveis de produção proporcionando perdas de cerca de 14 bilhões para o setor de alimentos; outra verificação feita neste estudo é que dentre as diversas culturas a soja será a mais afetada no que se refere à geografia de sua produção.

Outras culturas também foram estudadas no Brasil modelando seus rendimentos em função dos cenários de aumento de temperatura e elevação de CO₂ na atmosfera projetados e apresentados nos relatórios do IPCC desde 2001 até 2014. Marin e Nassif (2013) pesquisaram quais seriam as influências das mudanças climáticas na fisiologia e rendimento da cana-de-açúcar. Neste artigo os autores realizaram um levantamento bibliográfico de vários experimentos em condições controladas de CO₂ e temperatura, e concluíram que mesmo sendo recentes os estudos que abordam este aspecto, os resultados permitem inferir que para projeções climáticas, considerando principalmente elevação de CO₂ e temperatura é benéfico com relação às relações hídricas solo-planta-atmosfera, reduzindo o efeito do principal fator de estresse para a cultura, afirmaram que a cana-de-açúcar será influenciada positivamente com a elevação do CO₂, apresentando maiores rendimentos.

No Brasil que é um país que exporta commodities, a população poderá sentir de modo mais pronunciado do ponto de vista econômico e social as alterações no clima (Marin e Nassif, 2013). Para a citricultura a previsão de alteração é de certa forma incerta, por ser uma cultura de ciclo longo, portanto mais suscetível às intempéries climáticas, e se as condições forem, alto déficit de pressão de vapor (DPV) e temperaturas elevadas, os citros de modo geral diminuem a assimilação de CO₂, além da ocorrência de redução da abertura estomática (MEDINA, MACHADO e PINTO 1998; MEDINA, MACHADO e GOMES 1999; MACHADO, MEDINA e GOMES, 1999; MEDINA et al., 2002; RIBEIRO et al., 2003; 2004; MACHADO et al., 2005). Já pelos estudos realizados por Khairi e Hall (1976 a e 1987 b) e Habermann et al. (2003), o aumento do déficit da pressão de vapor de 1 para 2 kPa, e conseqüentemente o aumento de temperatura, pode proporcionar quedas de até 50% na taxa fotossintética em mudas de

laranjeiras ‘Valência’ sobre limoeiro ‘Cravo’, refletindo posteriormente no crescimento das plantas.

A agricultura é, portanto, uma atividade altamente dependente dos recursos naturais e dos fatores climáticos, dessa forma é de extrema importância entender como a disponibilidade dos recursos hídricos irá se comportar mediante aos cenários futuros de emissões de CO₂ além dos comprovados aumentos na demanda evaporativa das várias culturas.

4.2 Impacto da variabilidade climática na agricultura irrigada: A água como fator de produtividade nos cultivos agrícolas

Não se faz necessário enfatizar que a água é o mais essencial dos recursos naturais do mundo (VÖRÖSMARTY et al., 2010) e que a diminuição de sua disponibilidade promoverá aumento dos conflitos sócio-econômicos. Muitos trabalhos apontam a redução tanto da qualidade da água, pelo uso intenso e inadequado, quanto da quantidade desse recurso em escala mundial e o fator apontado como responsável, no geral, são as atividades humanas que promovem as mais variadas alterações (IPCC 2014; WHITE; TANTON; RYCROFT, 2014; MARENGO 2008 a e 200 b). Nos trabalhos publicados por Marengo em 2008 o autor afirma que a variabilidade e a disponibilidade do recurso hídrico tanto em qualidade quanto em quantidade suficiente, podem ser afetadas pela mudança ou variação no clima.

Segundo Shiklomanov et al. (2000) o Brasil encontra-se em condição privilegiada no mundo no que se refere a disponibilidade dos recursos hídricos com cerca de 12% de todo o contingente hídrico mundial. No entanto, pela distribuição das reservas brasileiras de água doce ser desuniforme, caracteriza-se índice de aridez e de semi-aridez em algumas regiões do país, como é o caso da região Nordeste que mesmo incluindo grande parte da bacia do rio São Francisco, possui apenas 4% dos recursos hídricos do país e abriga 35% da população brasileira. A maior parte da reserva de água doce do Brasil, cerca de 80%, concentra-se na região Amazônica, e as regiões Sul e Sudeste, que juntas abrigam 60% da população brasileira, contavam no passado com amplas reservas de recursos hídricos, no entanto, em decorrência do crescimento econômico e da urbanização acelerada, hoje essas áreas enfrentam ameaças crescentes de escassez hídrica, local ou generalizada, trazendo assim preocupação mediante o

aprimoramento da gestão da quantidade e da qualidade da água (MARENGO, TOMASELLA, NOBRE, 2010).

O clima e suas variações em diferentes escalas de tempo é que determinam a disponibilidade hídrica do Brasil. Em vários estudos sobre a caracterização e o entendimento do clima no Brasil realizados por Marengo et al. (2008a, 2008b) e Cox et al. (2008), os autores afirmaram que os eventos extremos de chuva, especialmente no verão, podem estar associados a enchentes e têm impacto direto sobre a população, outra afirmação encontrada nestes estudos é que a agricultura e a geração de energia hidrelétrica podem sofrer grandes impactos se por acaso ocorrer um atraso na estação chuvosa.

Marengo (2007a), Marengo et al (2007b), Marengo, Tomasella e Nobre (2010) destacam que os riscos oriundos das mudanças climáticas e/ou da variabilidade no clima, sejam estes naturais ou de origem antropogênica, têm alcançado destaque, levando à preocupação nos círculos científicos e do governo. O setor de recursos hídricos por ser um dos mais impactados pelas alterações no clima tem despertado maior atenção, isto porque já é sentido na atualidade a escassez em quantidade e qualidade desse recurso em algumas regiões do país. Na abordagem climática feita por Marengo e Dias (2006b), Cox et al. (2008), Marengo et al. (2008a, 2008b), e Tundisi (2008) é notória a vulnerabilidade do Brasil à variabilidade climática. Este assunto é enfatizado em estudo sobre os recursos hídricos no futuro, problemas e soluções, realizado pelo Professor Tundisi (2008, p. 11) onde afirma que “Alterações climáticas terão papel relevante no ciclo hidrológico e na quantidade e qualidade da água. Essas alterações podem promover inúmeras mudanças na disponibilidade e na qualidade da água e na saúde da população humana”. O autor destaca ainda que a intensidade das mudanças ocorrerá de acordo com as especificidades locais, pois como as bacias hidrográficas possuem características peculiares, irão responder de forma distinta às alterações climáticas.

Os efeitos diretos e/ou indiretos das alterações do clima sobre os recursos hídricos foram alvos de vários estudos (PARRY et al., 2007; BATES, 2008, MARENGO, 2007a; 2007b e 2007c; TUNDISI, 2008; MARENGO, TOMASELLA e NOBRE 2010). O Brasil, segundo Salati et al. (2007), terá influência direta dos efeitos adversos das mudanças climáticas, visto ter uma economia fortemente dependente dos recursos hídricos e ligada ao clima, tanto a agricultura quanto a geração de energia.

Percebe-se que é direta a relação do clima e de suas alterações tanto com a dinâmica dos recursos hídricos quanto com a produção agrícola. É visível a

interferência direta da agricultura irrigada na disponibilidade de água numa bacia hidrográfica (GONDIM et al., 2011), essa interferência é ainda mais sensível em regiões onde essa atividade é intensa, portanto, o conhecimento local sobre o impacto de mudanças climáticas na demanda da água para irrigação fornecerá diretrizes para o desenvolvimento de políticas visando redução dos impactos e vulnerabilidades. De acordo com White et al. (2014) a relação entre irrigação e disponibilidade de água está projetada para sofrer alterações.

No relatório do IPCC publicado em 2001 foram apresentadas relações entre o aumento de temperatura e a intensificação da evapotranspiração, dez anos após foi confirmado por Gondim et al. (2011). Estes autores em estudo sobre metodologia para avaliação do impacto das mudanças climáticas na demanda da água para a agricultura irrigada afirmaram que as temperaturas mais elevadas em função das alterações no clima intensificam a evapotranspiração e por consequência a demanda de água para a irrigação.

Em estudo realizado por Rodrigues Díaz et al. (2007) sobre os impactos da mudanças climáticas nos requerimentos de água para irrigação, os autores verificaram que o aumento da superfície irrigada na bacia do rio Guadalquivir, na Espanha, no último século trouxe reflexo no presente déficit hídrico, tornando a situação difícil de ser sustentada, e afirmam também que mediante as mudanças no clima preditos pelos cenários 2050-A2 e 2050-B2 no relatório do IPCC (1999), aumentos adicionais em torno de 20 e 16% no requerimento de água para irrigação são preditos para 2050. No Brasil de acordo com Bombardi & Carvalho (2008), principalmente na Região Centro-Oeste, ocorrerão com maior frequência eventos climáticos extremos, tanto maior volume de chuva e estas cada vez mais intensas nos anos chuvosos quanto secas severas e prolongadas nos anos de menor precipitação. Para culturas de ciclo longo, cana-de-açúcar e os citros este cenário de maior fragilidade climática é especialmente importante, pois quanto mais prolongado for o ciclo da cultura mais exposta ao riscos climáticos ela estará.

Estabelecendo uma ligação mais direta da utilização da água pelos cultivos agrícolas, Delgado et al. (2010) afirmaram que a produtividade de uma cultura agrícola está condicionada a vários fatores referentes ao solo, à planta e ao clima e destaca dentre estes a água, a qual é um item essencial e seu manejo racional é fundamental na otimização da produção agrícola. A água, em função da quantidade utilizada, proporciona variação na produtividade da cultura e na qualidade do produto. Para Frizzone e Soares (2005) a produtividade é condicionada principalmente pela água utilizada pelo cultivo, e

todas as outras variáveis são inerentes à produtividade em seu nível ótimo. A diminuição da disponibilidade hídrica no solo à um ponto de ser sentida pela planta, proporciona queda no potencial da água na folha diminuindo a turgidez celular, a condutância estomática e a transpiração (SHALHEVET, 1993; RAY e SINCLAIR, 1997).

O suprimento hídrico condiciona também a taxa de assimilação de CO₂ (STEDUTO, HSIAO e FERERES 2007). De acordo com Rosa, Dillenburg e Forseth (1991) a redução na taxa de assimilação de CO₂ durante o déficit hídrico é atribuída, principalmente, à diminuição da abertura estomática em resposta à redução da disponibilidade de água no solo, ocasionando a diminuição de fotoassimilados e por fim reduzindo o rendimento. Segundo Frizzone e Soares (2005), a resposta das culturas à irrigação é determinada mediante a combinação de fatores e de como esses atuam no crescimento, por exemplo, tipos de solos, clima e também em decorrência da quantidade e frequência de aplicação de água.

Na citricultura, segundo Medina et al. (2005), o déficit hídrico parece ser o principal fator promotor da floração dos citros nas regiões de clima tropical, onde a temperatura não é suficientemente baixa para estimulá-la. No estudo de Abbott (1935) e Danveport (1990) citados por Medina et al. (2005), os autores observaram que as gemas não se desenvolvem durante o período do déficit, mas somente após o reumedecimento, ou seja, a resposta dos citros ao déficit hídrico, está diretamente relacionado à quebra da dormência das gemas com o reumedecimento do solo. Nos trabalhos relatados por Medina et al. (2005), os autores analisaram a ocorrência de chuvas e o florescimento dos citros em diversas regiões tropicais do mundo e verificaram que a floração sempre ocorria após períodos de secas seguidos de reumedecimento por chuva ou irrigação.

Percebe-se, portanto que são vários os fatores que condicionam o desenvolvimento adequado das culturas. Conforme Hexem e Heady (1978) quando se deseja obter o rendimento ótimo, deve-se utilizar as doses adequadas desses fatores. Isso se caracteriza como funções de respostas. As funções de respostas são quase sempre utilizadas para estimar o rendimento de uma cultura mediante a utilização de determinadas doses dos fatores de produção, assim como para estimar as doses ótimas dos fatores e o rendimento respectivo (Palacios, 1981). De acordo com Barros et al. (2002) as funções de respostas dão base a tomada de decisão, visando a obtenção de maiores produções com reduzidos custos em determinadas condições de clima, solo, irrigação e adubação.

A utilização de funções de produção é bastante difundida, isso porque os modelos que simulam e avaliam os efeitos da água sobre o rendimento das culturas são ferramentas importantes e consideráveis para o manejo da água assim como na irrigação (Delgado et al., 2010).

Analisando os estudos realizados por Doorenbos e Kassan, (1979), Steduto et al. (2009) e Raes et al. (2009) percebe-se que o entendimento das relações do rendimento dos cultivos e o armazenamento de água no solo melhorou acentuadamente, o foco sempre esteve voltado para diminuir a demanda de água no processo de produção de alimentos. Como meio de lidar com a escassez hídrica e visando melhorar ainda mais a produtividade da água, a FAO reavaliou e reestruturou o boletim 33, e a partir de então foi elaborado um novo modelo chamado AquaCrop, desenvolvido pela Land and Water Division da FAO, utilizado nesta pesquisa para obtenção do parâmetro produtividade da água. O AquaCrop é um modelo de crescimento das culturas impulsionado pela água, converte diretamente a transpiração diária em biomassa e para isso faz uso da evapotranspiração de referência diária, como resultado tem-se a produção de biomassa padronizada em relação ao uso da água, ou seja, parâmetro produtividade da água (WP), parâmetro específico para cada espécie vegetal (STEDUTO et al., 2009; RAES et al., 2009).

Raes et al. (2009) explica toda a evolução de uma das principais funções de produção existente, elaborada pela FAO e apresentada no boletim número 33 (DOORENBOS e KASSAN, 1979), a qual avalia de maneira prática o rendimento das culturas relacionado à água. Nessa época a produtividade, por sua vez, calculada em (1), dependia do balanço entre Precipitação-Evapotranspiração, da fenologia dos cultivos abordados e da capacidade do solo em armazenar água.

$$\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} = k_y \frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que:

Y_x e Y_a : rendimento máximo (Y_x) e atual (Y_a) (g ou Kg);

ET_x e ET_a : evapotranspiração máxima (ET_x) e atual (ET_a) (mm);

Ky: é o fator de proporcionalidade entre a redução relativa de rendimento e a redução relativa da evapotranspiração, (adimensional).

Koo (1958) afirmou que a evapotranspiração de culturas do tipo arbóreas como é o caso dos citros é geralmente um parâmetro difícil de ser medido e dessa forma é bastante comum a utilização de valores estimados. As estimativas geralmente são feitas por modelos mais ou menos complexos. Os modelos agrometeorológicos de Penman (1948), Thornthwait (1948) e de Thornthwait e Mather (1955) foram os primeiros para a estimativa da evapotranspiração. Depois começaram a serem desenvolvidos evaporímetros mais simples como o tanque classe A. No entanto todos esses resultados precisam ser ajustados fazendo uso do coeficiente de cultura (Kc), este segundo Angelocci (2000) é uma das opções mais práticas para determinação de exigência hídrica de frutíferas.

Como outros modelos que fornecem o rendimento e o crescimento dos cultivos mediante a utilização de água, AquaCrop simula o rendimento estruturando de maneira contínua as relações existentes entre os parâmetros acima mencionados solo-planta-atmosfera, o solo com seu balanço de água, a planta com seu crescimento, desenvolvimento, transpiração e processo produtivo (RAES et al., 2009).

O AquaCrop progrediu separando a Evapotranspiração em Transpiração (Tr) e Evaporação (E), e tratando o Rendimento final (Y) como uma função da Biomassa final e o Índice de Colheita, como mostra a Equação (2), tornando-se, portanto modelo de avaliação da produtividade da água que simula a resposta de rendimento da água pelas culturas, sendo particularmente adequado para situações onde a água é o fator limitante para o desenvolvimento (STEDUTO 2003; STEDUTO e ALBRÍZIO, 2005; BITRI et al., 2014; STEDUTO et al., 2009; RAES et al., 2009):

$$B = WP * \sum Tr \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

B: Biomassa (g m^{-2} ou Kg m^{-2});

WP: Parâmetro produtividade da água ($\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$);

Σ Tr: Transpiração do cultivo (mm).

O AquaCrop simula de maneira dinâmica a relação existente entre solo-planta-atmosfera e, de acordo com Bitri et al. (2014), esse modelo é uma ferramenta

complementar para uma ampla gama de usuários e aplicações que permite entre outras atribuições, prever rendimentos agrícolas sobre cenários de mudanças climáticas. Com o estudo realizado por Steduto, Hsiao, Fereres (2007) é possível utilizar esse modelo para verificar o comportamento dos cultivos mediante as concentrações atmosféricas de CO₂, permitindo, portanto simular o impacto no rendimento através de diversos cenários de mudança climática, nas variáveis de Evapotranspiração, Evaporação e Transpiração (ETr, E, Tr) e concentrações de CO₂ (STEDUTO et al., 2009, RAES et al., 2009).

4.3 Concentração de CO₂ e reflexos na agricultura

A principal consequência das mudanças climáticas é a elevação considerável da temperatura geral da superfície do globo terrestre, chamada de “aquecimento global”, o qual, de acordo com os estudos relatados pelo IPCC (1990, 1993, 2007 e 2014) sofrerá elevação continuada. No relatório do IPCC publicado em 1990, os autores explicaram detalhadamente como acontece esse aquecimento. A Terra intercepta a radiação solar (inclusive as ondas curtas visíveis) refletindo cerca de um terço do que é refletido; o resto é absorvido pelos diferentes componentes do sistema climático (atmosfera, oceanos, gelo, e a biota da Terra). A energia absorvida a partir da radiação solar é equilibrada, em longo prazo, pela saída da radiação tanto da Terra quanto da atmosfera, essa radiação toma a forma de ondas longas convertendo-se em energia invisível infravermelha e a magnitude desse processo é mediada e/ou determinada pela temperatura do sistema atmosférico terrestre.

Ainda nessa exposição geral, feita pelos autores contribuintes desse relatório (IPCC, 1990), foram apresentados os vários fatores naturais que intervêm, podendo inclusive mudar o balanço entre a energia absorvida pela Terra e a emitida sob a forma de radiação infravermelha de onda longa, os quais: força radiativa, gases com efeito de estufa (o citado como mais importante), aerossóis e variabilidade natural do clima. De acordo com o IPCC (2007) o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e vapor d'água (H₂O) são os principais gases que absorvem radiação eletromagnética emitida pelos corpos terrestres, causando o efeito estufa, já descrito.

Como o presente estudo é referente especificamente às alterações nas concentrações do CO₂ e suas possíveis influências na produtividade agrícola, a abordagem será voltada para esta linha. A concentração dos gases com efeito de estufa tem

aumentado consideravelmente na atmosfera, o CO₂ aumentou em cerca de 40% no período entre 1750 a 2011, saindo de 270 ppm em 1750 para 390,5 ppm em 2011, no mesmo período de tempo o CH₄ teve um aumento de 150% de 722 ppb para 1803 ppb e o N₂O 20%, 271 ppb para 324,2 ppb. É evidente que as concentrações atuais de CO₂, CH₄ e N₂O excederam qualquer nível medido pelo menos nos últimos 800 mil anos. As análises para verificação das concentrações nesse período foram feitas em blocos de gelo, (IPCC, 2014).

É de extrema importância dentro do ambiente acadêmico e científico a compreensão das causas e consequências como também de todas as relações existentes em decorrência das mudanças no clima, mas relacionar especificamente uma, ou algumas dessas variáveis com a produtividade agrícola é ainda mais significativo do ponto de vista científico, para tanto se abrirá um parêntesis para compreender como essa injeção de CO₂ na atmosfera irá influenciar a agricultura.

De acordo com alguns estudos realizados por Streck e Alberto (2006) e Streck (2005), esse aumento continuado de CO₂ na atmosfera terrestre é tido como positivo para a agricultura, pois causa aumento da taxa de crescimento, visto que o CO₂ é o substrato primário para a fotossíntese, processo pelo qual ocorre a fixação do CO₂ e o mesmo é convertido em carboidratos pelo ciclo de Calvin (TAIZ e ZEIGER, 2004). Outra característica apontada como positiva é que altas concentrações de CO₂ fazem com que os estômatos se fechem parcialmente, reduzindo a transpiração; quando os estômatos se abrem para permitir a entrada de CO₂ durante o processo fotossintético, perdem inevitavelmente água para a atmosfera pela transpiração, no ambiente em que as concentrações de CO₂ se encontram elevadas os estômatos reduzem a condutância estomática e, portanto a perda de água, esse comportamento é comum tanto em plantas C3 como em plantas C4 (KIMBALL e IDSO, 1983; MORISON, 1987).

Os efeitos positivos das maiores concentrações de CO₂ foram evidenciados no passado por Warrick (1988), o qual estudando sobre CO₂, mudança climática e agricultura, concluiu que o acréscimo de CO₂, também chamado de efeito de fertilização por CO₂, é benéfico e aumenta a resposta fotossintética das plantas. Lloyd e Farquhar (2008) em seu estudo sobre efeitos do aumento da temperatura e CO₂ sobre a fisiologia das florestas tropicais também explicam sobre algumas das vantagens da elevação do CO₂ na atmosfera. De acordo com Syvertsen e Lloyd (1994) quase toda biomassa acumulada numa planta durante seu crescimento origina-se no processo fotossintético de fixação de carbono atmosférico. Para Morison (1993), o crescimento das

plantas na sua forma mais simples é o uso da energia solar para reduzir o CO₂, evitando a perda de quantidades excessivas de água, e como a concentração de CO₂ está aumentando, pode-se esperar um aumento no crescimento talvez até associado a menores perdas de água, essas foram algumas afirmações do autor no estudo sobre a resposta das plantas a concentração de CO₂ conduzidas em condições limitadas de água.

Em outro trabalho desenvolvido pelo autor referente à resposta dos estômatos ao aumento da concentração de CO₂ (MORISON, 1998) estão citadas as duas principais razões do porquê de se estudar a resposta dos estômatos à concentração de CO₂ na atmosfera. A primeira razão é que o estômato parece responder a concentração intercelular de CO₂ confirmando os resultados encontrados por Mott (1988) e isso é determinado por ambas concentrações na superfície foliar e na taxa de assimilação de CO₂ pelo mesófilo. Portanto a concentração de CO₂ é vista como um sinal que liga a abertura dos estômatos à demanda de CO₂ pelo mesófilo. A segunda razão exposta pelo autor é que o funcionamento dos estômatos já deve ter sido afetado pelo aumento nas concentrações de CO₂ que ocorreram na revolução industrial (MANSFIELD et al., 1990) e que, portanto, serão ainda mais afetados pelo aumento futuro predito dessas concentrações. Neste trabalho o autor concluiu que os estudos ainda eram ineficientes para responder com propriedade se a elevação de CO₂ aumentava o rendimento das plantas, mesmo com indício que isso acontecia sim (MORISON 1998).

De acordo com os trabalhos de Fagundes et al. (2010); Streck, (2005) e Streck et al. (2005), a atual concentração de CO₂ no ambiente é insuficiente para saturar a enzima ribulose 1-5 bifosfato carboxilase-oxigenase (Rubisco), responsável pela carboxilação primária, que é o processo metabólico que governa a fotossíntese em plantas C₃, evidenciando dessa forma que em grandes concentrações haverá maior carboxilação. As plantas de modo geral, respondem de forma diferente ao aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, as plantas com metabolismo C₃ são mais beneficiadas do que as plantas com metabolismo C₄. As plantas C₄ não assimilam o CO₂ na mesma quantidade que as plantas de metabolismo C₃, isso porque essas possuem um mecanismo que aumenta a eficiência fotossintética na utilização do CO₂, já para as plantas C₄ o mecanismo de fixação do CO₂ é governado pela enzima fosfoenolpiruvato carboxilase a qual não responde da mesma forma em produção de carboidratos sobre a elevação da concentração de CO₂ (SIQUEIRA et al., 2001; TAIZ e ZEIGER, 2004; STRECK, 2005).

No estudo realizado por Zang e Dang (2005), os resultados encontrados pelos autores sustentam a teoria de que elevada concentração CO_2 atmosférico estimula a fotossíntese, promovendo a carboxilação na Rubisco e suprime a fotorrespiração. Outros trabalhos também enfatizam a relação positiva do aumento do CO_2 atmosférico com as taxas fotossintéticas. Wand et al. (1999) estudando sobre as respostas de espécies gramíneas C_3 e C_4 à elevadas concentrações de CO_2 verificaram aumento na fotossíntese de ambas as classes C_3 e C_4 . Ainsworth e Long (2005) realizaram uma revisão de literatura sobre o que se tem aprendido em 15 anos de livre enriquecimento de carbono na atmosfera, neste estudo os autores fizeram um apanhado geral e verificaram que quando as plantas foram cultivadas em maiores concentrações de CO_2 apresentaram redução de cerca de 20% na taxa de condutância estomática e aumento na eficiência do uso da água em até 50%. Para esses autores as maiores taxas fotossintéticas combinadas com a melhoria nas relações hídricas observadas nas plantas cultivadas nas maiores concentrações de CO_2 refletem normalmente no crescimento percentual da biomassa, além de maior altura de plantas. Souza (2007) também verificou aumento na taxa fotossintética na cana-de-açúcar mediante o aumento de CO_2 atmosférico.

Kimball; Kobayashi; Bindi (2002) realizaram uma revisão de literatura sobre as respostas das culturas agrícolas ao enriquecimento do ar com CO_2 e verificaram que elevadas concentrações de CO_2 estimulam a biomassa em gramíneas C_3 em torno de 12%, em trigo e arroz 15%, e na produção de tubérculos de batata em cerca de 28%. Nos trabalhos realizados por Streck e Alberto, (2006), Streck (2005) e Amthor, (2001) os autores também relacionaram positivamente condutância dos estômatos e aumento na eficiência do uso da água nas plantas conduzidas em ambientes enriquecidos com CO_2 . Para Amthor (2001) os atuais níveis de CO_2 limitam a assimilação de CO_2 nas plantas C_3 e o aumento de 800 para 1000 ppm na atmosfera estimulam a fotossíntese, já de acordo com o estudo feito por PINTO, ASSAD e ZULLO (2004), os níveis próximos de 1000 ppm são excessivos e passam a causar fitotoxicidade.

Entender as relações entre a transpiração e a assimilação de CO_2 durante o processo fotossintético é um trabalho complexo. Steduto, Hsiao, Fereres (2007), em estudo sobre o comportamento conservador da produtividade hídrica da biomassa, fizeram um esclarecimento detalhado de como acontecem a assimilação de CO_2 e o fluxo de transpiração, ambos mediados pela existência na atmosfera do dióxido de carbono. No trabalho os autores mostram que o parâmetro produtividade fotossintética da água (WP) ao

nível de folha é a razão da assimilação líquida de CO₂ e a transpiração foliar, ambos expressos como fluxos e taxas sobre a superfície foliar. Continuando, explicam que, nos processos de trocas gasosas entre a folha e seu ambiente, tanto o CO₂ como o vapor d'água compartilham a mesma via entre as grandes quantidades de massa atmosféricas e o espaço aéreo intracelular. Enquanto o vapor de água completa o caminho, o CO₂ tem como se mover em fase líquida a partir das paredes celulares para os locais de carboxilação (plantas C₃). Este é um dos trabalhos que serviram de fonte para a execução do atual estudo, onde se utilizou a base matemática para a relação das concentrações de CO₂ atmosférico e a obtenção do parâmetro produtividade da água.

De acordo com Zang e Dang (2005) a resposta fotossintética das plantas à elevação da concentração de CO₂ na atmosfera pode variar com outras condições do meio ambiente. Para Rogers et al. (1998), as plantas têm baixa regulação fotossintética quando cultivadas em estresse nutricional. Outro fator ambiental de grande importância para o crescimento e alocação de carbono nas plantas é a temperatura, segundo Magalhães Filho et al. (2009) o processo fotossintético nas laranjeiras é tão sensível à temperatura do solo quanto à temperatura do ar.

As respostas das culturas à elevação do dióxido de carbono na atmosfera não é sempre positiva, isto porque toda a composição ambiental (todos os fatores ambientais) interfere e/ou influencia essa resposta. Para Taiz e Zeiger (2004) se o aumento da concentração de CO₂ for acompanhado de aumento da temperatura do ar, principalmente se o aumento na temperatura ocorrer durante a noite, poderá não haver aumento no crescimento e rendimento das culturas, principalmente em razão do encurtamento do seu ciclo de desenvolvimento e elevação da respiração (fotorrespiração e fase escura da respiração) do tecido vegetal (TAIZ, ZEIGER, 1991; STRECK, 2005, SIQUEIRA et al., 2001). Allen Jr., Baker e Boote (1996) afirmam que os efeitos positivos descritos anteriormente podem ser facilmente cobertos pelos efeitos negativos do aumento de temperatura oriundos da elevação do CO₂ na atmosfera. Allen e Vu (2009), nas conclusões do seu estudo sobre o efeito do dióxido de carbono e altas temperaturas no rendimento dos citros, reuniram vários outros trabalhos que relacionaram o aumento do CO₂ à diminuição de rendimento dos citros, por conta de que essa elevação traz danos que cobrem os efeitos positivos do ganho de biomassa fotossintético (SALVUCCI, CRAFTS BRANDNER, 2004; IDSO, KIMBAL, 1991; BRAKKE, ALLEN JR, 1995).

Nas conclusões do estudo realizado por Fagundes et al. (2010) sobre o aquecimento global e seus efeitos no crescimento, desenvolvimento e na produtividade da batata, os autores sintetizam que o aumento do CO₂ seguido de aumento na temperatura do ar, promoverá, de maneira geral, menor crescimento, diminuição no ciclo de desenvolvimento, menor produtividade e aumento da incidência de doenças nessa cultura.

Os estudos e grande parte dos resultados obtidos até os tempos atuais indicam grande variação nas projeções futuras da concentração de CO₂ na atmosfera, e essas variações estão associadas com as incertezas das respostas da biosfera terrestre às condições climáticas (STICH et al., 2008), portanto serão sempre bem vindos estudos que trazem respostas de como as culturas serão influenciadas em seus parâmetros às concentrações futuras de CO₂, projetadas nos mais variados estudos, para administrar com melhor qualidade os recursos que servem atualmente e que servirão de base para a produção agrícola.

4.4 Condições agroclimática para o cultivo dos citros

O cultivo comercial de citros é extremamente bem sucedido em áreas subtropicais onde a chuva é sazonal, bem como no semi-árido e regiões áridas. Enquanto a irrigação é necessária nessas condições, as características de uso de água pelos citros constitui um fator importante para a sua produção bem sucedida nestas regiões (BRAKKE e ALLEN, 1995).

Os principais parâmetros que compõem as condições climáticas e que, portanto são chave no processo produtivo, não poderiam deixar de serem abordados. A temperatura, a chuva, a radiação solar e o vento agem diretamente sobre a laranjeira, condicionando o desenvolvimento das plantas quanto, ao crescimento dos ramos, o tamanho das folhas, a emissão das flores, a frutificação e pegamento dos frutos, o tamanho, a forma, a coloração e o sabor dos frutos. Todos esses fatores e suas influências no rendimento dos citros estão muito bem explicados em Sentelhas (2005) e Medina et al. (2005).

O ambiente de luz em que a planta se desenvolve, por exemplo, é de fundamental importância, visto que a adaptação a este ambiente depende do ajuste do aparelho fotossintético das plantas, buscando sempre que a luminosidade do ambiente seja

utilizada de maneira mais eficiente possível. O resultado destas adaptações será refletido no crescimento da planta como um todo, proporcionando inclusive maior produtividade. Na citricultura a influência da radiação solar tem efeito direto por mediar a taxa de assimilação de CO₂ e indireto por condicionar o regime térmico do ambiente, (Pompeu Júnior et al., 2005). De acordo com Taiz e Zeiger (2004), a disponibilidade de radiação solar é um dos fatores de maior importância para o crescimento e desenvolvimento das plantas, sendo esta a fonte de toda energia necessária para a realização da fotossíntese, processo que transforma o CO₂ atmosférico em energia metabólica. Para Reuther (1973) citado por Pompeu Júnior et al. (2005), a temperatura do ar exerce influência sobre todas as fases de desenvolvimento das plantas cítricas, desde a germinação e crescimento das mudas até a maturação dos frutos.

No que se refere às chuvas, Ortolani, Pedro Junior e Alfonsi (1991) citam que a maioria das regiões de produção de citros no mundo dispõem de precipitações anuais entre 1.000 a 2.000 mm, com sazonalidade, apresentando normalmente uma estação seca. Em muitos casos o volume de água oriundo das chuvas não atende a demanda hídrica dos cultivos, o que proporciona déficits hídricos ocasionais, havendo, portanto a necessidade do uso da técnica da irrigação.

Doorenbos e Kassan (1979), Ortolani, Pedro Junior e Alfonsi (1991) e Reuther (1973) abordam que a disponibilidade hídrica para os citros depende essencialmente, do balanço entre a evapotranspiração e a precipitação pluvial ao longo do ciclo fenológico, que corresponde às fases de indução floral ou pré-florescimento, estabelecimento, crescimento e maturação do fruto e crescimento vegetativo. De acordo Doorenbos e Kassan (1979), são muitos os fatores que refletem em melhores produtividades das culturas e estes devem ser considerados na ocasião do manejo, a variedade utilizada, o sistema de irrigação e as características de clima e solo.

4.5 O clima e a influência na assimilação de CO₂ nas laranjeiras

De acordo com Goldschmidt (1999) o crescimento, desenvolvimento e por fim a produtividade de um pomar é resultado da interação de uma complexa cadeia de eventos e estes eventos sob efeitos do clima, influenciando principalmente a assimilação de CO₂, ou seja, a carboxilação e/ou produção fotossintética, o crescimento da copa, a indução e a intensidade de florescimento, a fixação dos frutos e a

massa final de frutos maduros colhidos, além da eficiência do uso da água e de nutrientes. Para Ribeiro e Machado (2007) e Ribeiro et al. (2009) se as condições de disponibilidade hídrica forem adequadas os fatores que terão maiores influências ao longo do ano sob a fotossíntese das laranjeiras serão: as variações da temperatura do ar e do solo, o comprimento do dia e obviamente a fase de desenvolvimento da planta.

Syverstsen e Lloyd (1994), afirmam que quase toda a matéria orgânica acumulada numa planta durante sua formação tem origem no processo de fotossíntese, processo de fixação de carbono atmosférico, o que consiste em cerca de 95% de toda a fitomassa seca da planta.

No estudo de Ribeiro e Machado (2007) sobre alguns aspectos da ecofisiologia dos citros, os autores enfatizaram que as variações no ambiente causam alterações significativas nos processos fisiológicos, pois estas variações têm influência importante no desenvolvimento das plantas e como as laranjeiras são árvores sempre verdes e mantêm sua capacidade fotossintética durante o ano todo, são submetidas à variação sazonal da disponibilidade de água, temperatura do ar e do solo, déficit de pressão de vapor e todas as demais variações do ambiente, podendo, portanto haver queda na fotossíntese em qualquer fase do desenvolvimento das laranjeiras (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck).

De acordo com Medina, Machado e Gomes (1999), nas áreas que são cultivadas com citros no Brasil, ocorrem limitações à expressão da produtividade potencial das laranjeiras porque é comum a ocorrer deficiência hídrica no solo associada à elevados déficits de pressão de vapor. A redução da taxa fotossintética mediada por tais fatores já está consolidada em trabalhos publicados anteriormente (SYVERSTSEN, LLOYDE, 1994; MEDINA, MACHADO, PINTO, 1998; MEDINA, MACHADO, GOMES, 1999)

O Estado de São Paulo caracteriza-se, de maneira geral, com clima de verão úmido, com níveis de energia solar típico do trópico e um período de inverno seco precipitações reduzidas e temperaturas amenas. Outra característica do clima do Estado é que no momento da transição do verão para o inverno tanto a intensidade do fluxo de energia radiante quanto o comprimento do dia, assim como a temperatura do ar decaem, proporcionando a queda da temperatura do solo, tais condições são propícias ao repouso vegetativo e normalmente ocorrem de julho a agosto. Em setembro as condições térmicas e hídricas são favoráveis ao florescimento, após esse período, mais especificamente na

primavera e verão as condições ambientais no Estado são intensidade da radiação solar, dias mais longos, temperaturas mais altas e, normalmente, há boa disponibilidade de água, favorecendo, portanto, altos valores de fotossíntese, no verão a produção de fotoassimilados, influenciada por essas condições climáticas, mantém o fornecimento de carboidratos para o crescimento da planta e acúmulo de reservas (GOLDSCHIMIDT, KOCH, 1996; SYVERSTSEN, LLOYDE, 1994; ROLIM et al., 2007).

A temperatura é uma das variáveis que mais influencia a assimilação de CO₂ pelas laranjeiras. Nos trabalhos de Machado et al. (2002); Ribeiro e Machado, (2007); Ribeiro et al. (2009) verificaram que a fotossíntese máxima dos citros de modo geral, ocorre na primavera e no verão, estações caracterizadas por maiores temperaturas e com umidade relativa do ar mais elevadas e decai progressivamente nos meses de inverno, secos e frios alcançando valores mínimos nesta estação. Nestes estudos os autores determinaram a produção fotossintética diária e verificaram que em um dia claro de verão essa produção chega a ser 2,9 vezes maior que a produção fotossintética que ocorre no inverno.

A temperatura ideal para a fotossíntese das espécies citrícolas foram apresentadas em estudos realizados por Medina et al. (2002), Ribeiro et al. (2004), Ribeiro et al. (2009) e Magalhães Filho et al. (2009), no geral, as temperaturas favoráveis à taxa máxima fotossintética para esta cultura está entre 25 e 30°C, temperaturas abaixo ou acima deste intervalo reduzem consideravelmente a produção de fotoassimilados pelas laranjeiras. Outros estudos relatam que a temperatura ideal para a condutância máxima em citros está ao redor de 30°C enquanto que a fotossíntese máxima ocorre entre 22°C e 25°C (KRIEDMANN 1971; KHAIRI, HALL 1976; MACHADO et al., 2002).

Segundo Ribeiro et al. (2009) o decréscimo da produção fotossintética das laranjeiras no inverno em relação ao verão é decorrência da redução das temperaturas do solo juntamente com a redução das temperaturas noturnas do ar. Os autores afirmam que, como conseqüência, as baixas temperaturas causariam decréscimo da condutância estomática reduzindo a eficiência de carboxilação da rubisco, enzima responsável pela assimilação do CO₂.

Para Kaufmann e Levy (1976), Sinclair e Allen (1982), Vu e Yelenosky (1988) o fechamento dos estômatos nos citros em resposta ao aumento da diferença de umidade da folha para o ar resulta em baixa, muitas vezes quase constante taxa de transpiração. Downton; Grant; Loveys (1987), Kriedemann (1971) ao fazerem

comparações dos citros com outras plantas lenhosas perenes, observaram que a resposta da taxa de assimilação líquida de CO₂ nos citros sob condições de alta temperatura, alta demanda evaporativa, e baixa disponibilidade de água no solo é muito baixa. A taxa líquida de CO₂ de citros não estressados é baixa quando comparados com outras plantas lenhosas perenes e essa taxa apresenta, frequentemente, uma depressão do meio-dia (SINCLAIR e ALLEN, 1982; VU e YELENOSKY, 1988). Allen e Vu (2009) ao realizarem um estudo sobre os efeitos do dióxido de carbono e altas temperaturas no crescimento de árvores de laranja em ambiente úmido e subtropical, concluíram que no âmbito da citricultura uma limitação para o transporte de água parece ser comum, a qual em condição de alto déficit de saturação de vapor resulta no fechamento dos estômatos, buscando o ponto de estabilização da água na árvore inteira, transporte com concomitante redução na folha e no dossel.

Um importante resultado, e que certamente deve ser referenciado aqui, é o apresentado no estudo de Brakke e Allen (1995) em que a maior assimilação líquida do CO₂ do ambiente foi obtida pela menor relação entre temperatura e déficit de pressão de vapor (29°C/2.4 kPa) combinado com umidade do solo superior a 50% da CAD. No período diurno as taxas de assimilação de CO₂ pela copa decresceram quando a relação entre temperatura e déficit de pressão de vapor foi elevada (37°C/3.6 kPa), também ocorreu decréscimo da assimilação de CO₂ quando foi alta a relação entre temperatura e déficit de pressão de vapor, mesmo em elevada disponibilidade hídrica no solo. No estudo realizado por Machado et al. (2005) sobre as respostas de três espécies de citros a fatores ambientais, os autores apresentaram como conclusões que as taxas máximas de assimilação de CO₂ nas três espécies são diferentes em função de alterações na condutância estomática e na eficiência instantânea de carboxilação, a temperatura foliar afeta a taxa de assimilação de CO₂ por efeitos causados na condutância estomática e na eficiência de carboxilação e a queda da taxa de assimilação de CO₂ com o aumento do déficit de pressão de vapor é maior em função do aumento da temperatura foliar.

4.6 Citricultura no Estado de São Paulo: Importância da variabilidade climática no manejo

Antes da abordagem da relação direta das concentrações de dióxido de carbono vinculados ao uso da irrigação pelos citros, cabe uma descrição da planta

cítrica, assim como seu histórico de cultivo no Brasil e no estado de São Paulo. De acordo com Kriedemann e Barrs (1981), esta planta tem origem em sub-bosques de florestas asiáticas com clima úmido, apresenta grande área foliar, sistema radicular pouco desenvolvido, com pêlos radiculares atrofiados e baixa condutividade hidráulica. Essas condições não são favoráveis às plantas de citros se elas forem conduzidas sob alta demanda hídrica na atmosfera, característica comum à climas mais quentes e secos. Essa descrição ajuda a assimilar os resultados verificados por Medina, Machado e Pinto (1998), Machado, Medina e Gomes, (1999), Medina et al. (2002), Ribeiro, Machado e Oliveira (2004) e Ribeiro et al. (2003), os quais afirmaram em seus estudos que nos citros sob alto déficit de pressão de vapor e temperaturas elevadas, há redução na abertura dos estômatos e queda significativa na assimilação de CO₂.

Neves et al. (2011) fazem uma exposição da abrangência da citricultura em todo o globo e o histórico da evolução dos pomares citrícolas no Brasil. Segundo os autores, o comércio entre as nações no passado possibilitou a expansão do cultivo dos citros, a laranja foi levada à Europa na Idade Média pelos árabes e trazida a América por Cristovão Colombo, nos anos de 1500. No Brasil, foi introduzida logo na colonização e aqui encontrou condições propícias para vegetar e produzir. A citricultura destacou-se em vários Estados, porém, esse destaque foi mais acentuado a partir da década de 1920, quando foi criado o primeiro núcleo citrícola nacional nos arredores de Nova Iguaçu no Estado do Rio de Janeiro. Após essa fase inicial e adicionalmente os problemas com a cafeicultura ocorridos na época, a cultura da laranja tornou-se uma opção para substituir o café, expandindo-se por toda a região do Vale do Paraíba na década de 1940, e a partir daí seguiu para Limeira, posteriormente chegou a Araraquara em 1950 e em Bebedouro no final dessa década, quando definitivamente ganhou espaço nas novas fronteiras ao norte e noroeste do Estado de São Paulo.

Dentre as variedades comerciais cultivadas no Estado de São Paulo, as laranjas doces que existem em maior número são a 'Pêra', 'Valência', 'Natal' e 'Hamlin'. De acordo com Pompeu Júnior. et al. (2001) em 2000 a laranja 'Pêra' representava em torno de 38% do total de laranjas doces existentes, Natal 24%, seguida pela 'Valência' com 21 % e 'Hamlin' com 6% do total.

A variedade Natal, utilizada no trabalho, é a segunda variedade cítrica brasileira de maior importância, sua origem é desconhecida e acredita-se que essa variedade seja uma mutação ou clone da laranja Valência, com a qual mantém muitas

similaridades. A laranja Natal foi melhorada no Instituto Agronômico de Campinas (IAC) e tornou-se uma das variedades mais cultivadas pelos citricultores do Estado de São Paulo, principalmente por apresentar excelente produção e boa qualidade dos frutos (DONADIO, FIGUEIREDO e PIO, 1995). A planta da laranjeira Natal é caracterizada como de grande porte e vigorosa, alguns estudos sobre o porte e desenvolvimento dessa variedade comparada às outras mostram que o volume de copa e outros aspectos, inclusive relativos a produção, torna essa variedade superior à “Valência” e a “Folha-Murcha”. (STUCHI e DONADIO, 1999; DONADIO et al., 2000).

A atividade citrícola no Estado de São Paulo é de extrema importância para balança comercial brasileira. De acordo com Neves et al. (2011) de todo o suco de laranja consumido no mundo, metade é produzido no Brasil e 53% do total da produção mundial de laranjas está no Estado de São Paulo, com área ocupada equivalente à 464,4 mil há, cuja produtividade média é de 1,4 caixas por pé (BRASIL, 2013). Em observação feita nos boletins publicados pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) percebe-se uma redução considerável tanto na área ocupada pela cultura quanto na produtividade dos pomares no Estado de São Paulo, em 2010/2011 a área ocupada era de 620 mil ha com produtividade média de 1,7 caixas por pé (BRASIL, 2011). Nos relatos das condições climáticas nas principais regiões de cultivo do Estado, onde em quase todo o semestre a abertura das flores foi seguida de períodos de sol intenso e pouca chuva, trouxe prejuízos ao pegamento da florada de 2013/2014 e ao tamanho do fruto, o qual foi bastante comprometido pela estiagem, diminuindo a produtividade (BRASIL, 2013).

Nas atuais circunstâncias, de grande elevação das concentrações de CO₂ na atmosfera e busca por melhor utilização dos recursos hídricos pelos cultivos agrícolas, este seria um fator a mais a ser estudado, principalmente se houver a possibilidade de conseguir maior eficiência do uso da água nos pomares citrícolas do Estado de São Paulo em condições de maiores concentrações de dióxido de carbono. Alguns estudos têm sido conduzidos como o objetivo de entender o comportamento dos citros mediante o enriquecimento de CO₂ na atmosfera vinculado a outras condições ambientais (KAUFMANN e LEVY, 1976; SINCLAIR e ALLEN, 1982; VU e YELENOSKY, 1988; KIMBAL, KOBAYASHI e BINDI, 2002). De acordo com Fuhrer (2003) os efeitos das elevadas concentrações de CO₂ dependem do clima e mais especificamente da temperatura.

Boa parte dos trabalhos citados acima sugeriu que o aumento nas concentrações de CO₂ só teriam efeitos significativos em condições 'ideais' de cultivo, nas quais as plantas fossem cultivadas em temperaturas ótimas, sem estresse hídrico, de luz ou de nutrientes e mantidos livres de doenças e poluentes. Existe na atualidade a possibilidade de reunir todos os fatores inerentes ao processo produtivo, utilizando, um novo modo de pensar, denominado “pensamento sistêmico” ou “pensamento de sistema”, a técnica do pensamento sistêmico e a dinâmica de sistemas, esta originada do pensamento sistêmico, se fundamentam no pensamento em termos de relações, união e contexto (GUNTER, 1999). Nesta metodologia a interdependência é um dos principais motores, onde mudanças em qualquer um dos componentes de um determinado sistema, direta ou indiretamente estão associados e afetarão os demais componentes (SENGE, 2009; GUNTER, 1999).

Adicionalmente essa metodologia faz uso de softwares e trabalha com programação orientada a objetos. Nesse contexto, Montoya et al. (2009) relatam que a capacidade de processamento dos computadores atuais auxiliam o procedimento por permitirem que o conhecimento, por exemplo, sobre a relação clima-solo-planta, acumulado durante anos de investigação, possa ser modelado através de modelos dinâmicos que simulam o crescimento e a produção dos cultivos em diferentes situações ambientais.

4.7 O pensamento sistêmico, a dinâmica de sistemas e a modelagem no contexto agrícola

O pensamento sistêmico é definido por Senge (1997) como um marco conceitual, e funciona como um conjunto de conhecimentos e ferramentas desenvolvido para elucidar os padrões de comportamento de um sistema, os quais podem ser alterados caso haja necessidade. O autor descreve as ferramentas que são a base da dinâmica de sistema, os diagramas causais ou de influência e os modelos, que possibilitam estabelecer claramente inter-relações embasadas no conceito teórico dos processos de retroalimentação dentro dos sistemas.

Quando se faz uso da Dinâmica de Sistemas (DS) para realizar estudos nas mais variadas áreas deve-se lembrar que os passos iniciais foram dados pelo engenheiro eletricista Jay Forrester com os estudos desenvolvidos na década 1950, e na década seguinte, quando publicou o livro “*Industrial Dynamics*” se tornando o marco

conceitual da disciplina que hoje é conhecida como Dinâmica de Sistemas. A partir de então outros pesquisadores utilizando esta metodologia contribuíram para a evolução da qualidade da mesma. Senge na década de 1970, sob orientação de Jay Forrester, trabalhou na execução de seminários com executivos para a utilização na prática da metodologia sistêmica dinâmica em grandes instituições, e em 1990 Senge lançou o livro, “A Quinta Disciplina”, o qual explica que o pensamento sistêmico utiliza toda a base de ferramentas metodológicas desenvolvidas por Forrester.

De acordo com Capra (1996), a metodologia da dinâmica de sistemas pode ser considerada como uma nova forma de expressar as cadeias de eventos cíclicos existentes na natureza, analisando-os sempre de maneira integrada. Pelos estudos deste autor o mesmo afirma que o paradigma da disjunção e separação acabou por desvincular o sujeito do conhecimento do objeto do conhecimento, pois separam-se as disciplinas, as ciências, as técnicas, tornando-se cada vez mais difícil estabelecer ligações. Para Senge (1990) o ato de separar, de desmembrar os problemas, torna as tarefas aparentemente mais administráveis, mas em troca se perde a noção intrínseca da conexão com o todo.

O sistema é definido como uma interação de partes que interatuam com cada uma das outras para funcionar como um todo, por exemplo, o conjunto de elementos que tem relação com o problema de estudo e possibilita inicialmente explicar o comportamento observado junto com as relações entre eles, formam o sistema (KAUFFMAN, DRAPER, 1980). Capra (1996) afirmou que quanto mais forem pesquisadas as questões relacionadas ao meio ambiente, maior será a compreensão de que essas questões por serem sistêmicas, interconectadas e interdependentes, não podem ser compreendidas isoladamente. Senge (1990) relata que a maioria dos problemas que a humanidade enfrenta hoje é fruto do descaso e desconhecimento humano, que cada vez mais não consegue entender e controlar sistemas com maior grau de complexidade.

Segundo Villela (2007), a DS por intermédio da modelagem, fazendo uso de diversos tipos de diagramas (causais, estoque e fluxo) possibilita expressar graficamente um sistema, e a partir de então ver com mais clareza a complexidade dinâmica das relações entre as partes do mesmo. A visão sistêmica, de acordo com Pinheiro (2000), tem adentrado em várias áreas do conhecimento: física, biologia e a agrícola. Nas ciências agrárias, mas especificamente na agricultura, o enfoque sistêmico tem se tornado ainda mais necessário, como causa da crescente complexidade dos sistemas

manejados neste ambiente pelo homem, outra justificativa é o surgimento do conceito de sustentabilidade, o qual dá abertura para a utilização de todos os recursos, porém de maneira sustentável.

A partir da DS é possível trabalhar numa lógica diferente, indo além do clássico emprego da pesquisa operacional no qual os problemas são bem definidos. Além disso, o foco central dessa metodologia é entender como os objetos de um sistema interagem entre si, visto que tanto as pessoas em um sistema quanto os objetos interagem através de vínculos que na visão sistêmica são chamadas de laços de retroalimentação, onde uma mudança em uma variável afeta as demais e essas modificações com o passar do tempo, promovem alterações na variável original e assim consecutivamente (SENGE 1990, RICHARDSON 1991, ARACIL 1986). Para Senge (1990), a capacidade de entender e analisar sistemas complexos ajudaria na obtenção de soluções para os muitos problemas que se dão na atualidade. O autor frisa que através da DS os modelos mentais, transformam-se em processos computacionais e podem decifrar as consequências da interação entre as diversas partes de um sistema.

Segundo Ford (1999) nós usamos modelos o tempo todo, principalmente os modelos informais; as imagens que carregamos na mente são representações de sistemas complexos, os quais segundo o autor são chamados de “modelos mentais”. O autor destaca ainda que usamos constantemente os modelos mentais para representar o mundo à nossa volta sem percebermos que estamos fazendo-o. Os modelos matemáticos são frequentemente divididos em duas categorias: os modelos estáticos e os modelos dinâmicos. Os modelos estáticos nos ajudam a aprender sobre sistemas em repouso, como exemplo pode-se citar os modelos para calcular as forças necessárias para manter um objeto em repouso, já os modelos dinâmicos são completamente diferentes, eles nos ajudam a pensar sobre como os sistemas mudam ao longo tempo (FORD, 1999).

A Dinâmica de Sistemas está projetada para o entendimento de problemas complexos e dinâmicos, essa metodologia permite expressar mais adequadamente problemas que incluem quantidades que variam em função do tempo e que apresentam relações de retroalimentação (feedback), sendo que a característica principal da DS é o fato de que a estrutura do modelo não está definida pelo formulador do mesmo (RICHARDSON, 1991, ARACIL, 1986). Segundo Aracil (1986) o principal objetivo da DS é evidenciar o funcionamento e performance do sistema no tempo. A DS faz uso de

ferramentas denominadas de círculos de casualidades ou diagrama de influência para representar esquemas mentais, estes são constituídos por relações de causa-efeito entre as variáveis principais de um sistema (FORD, 1999; ANDERSON e JOHNSON, 1997; SENGE, 1990).

Segundo Villela (2007), Senge (1997 e 1990) e Richardson (1991), o pensamento sistêmico é uma disciplina preocupada por ver totalidades e faz uso de ferramentas que permitem estabelecer de forma clara as inter-relações embasadas no conceito teórico dos processos de retroalimentação. Essas ferramentas são: os diagramas causais ou de influência, arquétipos e ou modelos. Os círculos de casualidades ou diagramas influência são usados, segundo Senge (1990 e 1997), para representar nossos modelos mentais, e se constituem de relações de causa-feito entre as variáveis principais de um sistema. O diagrama causal é a ferramenta que possibilita representar graficamente o comportamento ao longo do tempo das diversas variáveis envolvidas numa dada questão, ou num dado problema estudado. Nos diagramas causais as variáveis são denominadas como palavras ou frases curtas que servem para descrever uma situação problema a partir da forma de pensar do observador.

Os diagramas causais ou círculos de influências são apontados por Griffith e Toy (2005) como o ponto de partida para a construção de modelos de simulação dinâmica e são a principal ferramenta do pensamento sistêmico. Senge (1990) e Anderson e Johnson (1997) explicam que os círculos de casualidade são constituídos de variáveis que podem aumentar e diminuir com o passar do tempo, estes círculos transcrevem as relações de causa-efeito dentro dos sistemas. As variáveis são interligadas por conectores (arcos com setas) que indicam a direção e o sentido de casualidade. As duas relações possíveis existentes entre as variáveis são apresentadas na Figura 1.

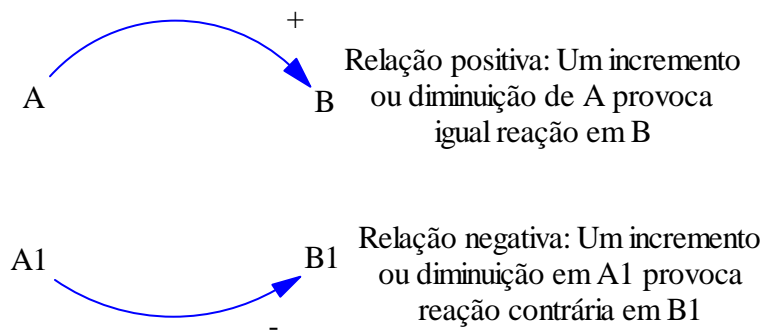


Figura 1 - Relações que existem entre as variáveis nos diagramas causais ou círculos de influências.

Fonte: Adaptado de Senge (1995).

Na primeira relação, uma variável aumenta (ou diminui) enquanto a outra também aumenta (ou diminui). Em contrapartida, na segunda relação uma variável aumenta (ou diminui) enquanto a outra também diminui (ou aumenta), na primeira situação o sinal é positivo (+), na segunda o sinal é negativo (-).

Para Orellana González (2010) o círculo de causalidade desenvolvido para um sistema permite a visualização do conjunto de inter-relações entre todos os aspectos que o compõem. Santos (1982) destaca que o princípio fundamental da dinâmica de sistemas, é o da conectividade, o autor destaca que o sistema é entendido como um conjunto de elementos com ligações entre si e o ambiente que o circunda. Os sistemas constituem-se de subsistemas e todos fazem parte de um sistema maior. Villela (2007) afirma que os diagramas causais são especialmente positivos para representar qualitativamente as relações de causa e efeito que ocorrem em um sistema complexo. No entanto, quando existe a necessidade de quantificar estas mesmas relações de causa e efeito, os modelos causais tornam-se inadequados e para este fim, usam-se os Modelos de Estoque e Fluxo, estes são semelhantes aos modelos causais diferindo no aspecto de que as relações são expressas por fórmulas lógico-matemáticas.

Segundo Sánchez-Román et al. (2010) o pressuposto fundamental da Dinâmica de Sistemas é que o comportamento simulado por um modelo emerge da estrutura causal que lhe é subjacente. De acordo com Senge (1997 e 1990) e Forrester (1961) citados por Orellana Gonzalez (2010), a Dinâmica de Sistemas apresenta essencialmente três princípios fundamentais:

- 1) Existências de laços de retroalimentação ou feedbacks: a retroalimentação é um conceito básico para a compreensão do comportamento dinâmico de um determinado sistema. Richardson (1991) afirma que a retroalimentação é a transmissão e retorno da informação, ocasionando dois tipos de sistemas, os sistemas abertos e os sistemas fechados. O autor explica resumidamente que, quando os resultados influem nos insumos que geraram esses resultados, diz-se que este é um sistema fechado, do contrário, quando os resultados não promovem nenhuma influência nos insumos que os geraram, tem-se um sistema aberto.
- 2) A existência da não linearidade entre as variáveis do sistema: a visão clássica linear, que se caracteriza em focar a atenção nas relações causa-efeito entre as variáveis não se aplica na Dinâmica de Sistemas, nessa metodologia, em contraposição tem-se uma visão holística da forma como as variáveis se relacionam entre si. O enfoque sistêmico busca ter uma visão global da realidade.
- 3) A existência de atrasos nas relações entre as variáveis. Em sistemas dinâmicos podem existir retardos materiais ou de informações. De acordo com Forrester (1961) a existências desses atrasos ou demoras significa que as decisões tomadas não vão produzir efeitos de forma imediatas e dificulta a verificação das relações de causa-efeito.

Os passos para a construção de um modelo, propostos por Ford (1999) e Forrester (1961), apresentam riquezas de forma detalhada além de conhecimentos em todas as etapas para desenvolver um modelo. De forma resumida, é possível apresentá-las em três etapas principais: i) etapa de conceitualização; ii) etapa de formalização e, por fim, iii) etapa de avaliação e exploração (simulação).

Para Orellana González (2006) a Dinâmica de Sistema, além de evidenciar as interdependências existentes em um sistema, permite identificar também soluções alternativas e as possibilidades de aplicá-las a um determinado assunto; em contrapartida possibilita observar se as decisões tomadas geram consequências indesejáveis em outras áreas do sistema estudado. A autora enfatiza que o grande potencial da DS é exatamente o fato de se tratar de uma modelagem dinâmica, podendo verificar as consequências das decisões tomadas, que podem produzir-se em curto, médio e longo prazo.

Para Sánchez-Román et al. (2010), os modelos de simulação dinâmica são descrições abstratas da realidade e possibilitam representar problemas complexos caracterizados por sua dinâmica, não-linearidade, retroalimentação e

defasagens em tempo e espaço, os autores enfatizam ainda que existem diversas formas de utilizar os modelos de simulação dinâmica para focar um problema e quando estes modelos não existem é preciso criá-los e, a partir do processo de criação, participando de todas as etapas da construção, a compreensão do problema particular que está sendo modelado é maior. Os modelos são ferramentas fundamentais na dinâmica de sistemas.

O pensamento sistêmico e a Dinâmica de Sistemas se enquadram perfeitamente nos estudos das interligações existentes entre cultivo, clima, água e solo, pois estas interligações são complexas, percebe-se que são temas que nos instigam a pensá-los de maneira interconectada. Assim, a realização de estudos que possam trazer informações sobre a situação atual e as perspectivas futuras da utilização da água nos cultivos agrícolas poderão sustentar tomadas de decisão quanto à intervenção e gestão desse bem. Segundo Sánchez-Román et al. (2010), Souza et al. (2010) e Sánchez-Román et al. (2009) e Vieira (2008) a metodologia da DS pode auxiliar no entendimento de problemas de gestão de recursos hídricos e/ou em outros ambientes de forma consistente.

Neste ambiente surgem os mais variados trabalhos e estudos utilizando a DS e fazendo uso de muitos modelos já existentes, além da confecção de novos modelos. Ao analisar os boletins publicados pela FAO (boletins 24, 33, 56, 60), onde se aborda os rendimentos mediados pelas condições climáticas, edáficas, das culturas e as relações encontradas entre esses, constata-se que são sistemas: “sistema climático”, “sistema solo” e “sistema cultura”; os rendimentos são oriundos, portanto da modelagem conjunta de todos esses sistemas. As relações entre cultivo, solo e clima são complexas e nestas estão envolvidos muitos processos: biológicos, fisiológicos, físicos e químicos. Para Montoya et al. (2009) e Steduto et al. (2009) um modelo é uma representação ou abstração da realidade através da matemática. Atualmente é possível modelar os rendimentos mediante as condições apresentadas acima pela existência na atualidade de computadores com capacidade de processamento que permitem tal procedimento (Montoya et al., 2009).

Dentre os trabalhos existentes de modelagem matemática e impactos na demanda de água para irrigação, foram base para este estudo e serão referenciados aqui, os estudos realizados por Raes et al. (2009); ONU (2013); Steduto, Hsiao e Fereres (2007); Steduto et al. (2008), Steduto et al. (2009); Hsiao et al. (2009); Farahani; Izzi e Oweis (2009); Heng et al. (2009) e Doorenbos e Kassam (1979). De acordo com Hoogenboom (2000) é impossível incluir em um modelo todas as interações

entre o ambiente e o sistema modelado, sendo assim, devido à complexidade dos sistemas reais, o modelo é, em muitos casos, apenas uma simplificação da realidade.

Para Ortolani, Pedro Junior e Alfonsi (1991) a grande complexidade das relações entre os elementos meteorológicos e a produtividade dos cultivos acontece em função das diferentes formas como essas variáveis afetam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. De acordo com Raes et al. (2009) o AquaCrop, modelo desenvolvido pelo grupo de pesquisadores da FAO, foi idealizado para substituir os procedimentos anteriores do paper de número 33 da FAO. No estudo realizado por Raes et al. (2009) e Steduto et al. (2009) os autores relatam desde os processos iniciais que levaram à utilização de funções empíricas de produção, FAO Irrigação e Drenagem paper n. 33 (Doorenbos e Kassam, 1979) até a obtenção do AquaCrop, que como já foi mencionado acima, é um modelo de simulação orientado a partir da água, mais complexo e mais robusto em suas respostas, o qual requer um número relativamente baixo de parâmetros e dados de entrada para simular a resposta da maioria das culturas à utilização da água.

Nos trabalhos listados acima, principalmente em Raes et al. (2009) e Steduto et al. (2009) estão relatados todos os passos e procedimentos tanto da elaboração do modelo central, a estrutura robusta, quanto de sua utilização posterior. Segundo Raes et al. (2009), o modelo AquaCrop foi desenvolvido para estimar a produtividade da cultura em relação ao suprimento de água e o manejo agrônômico em uma estrutura baseada na corrente fisiológica da planta e nos conceitos de constituição hídrica do solo.

O AquaCrop, modelo específico desenvolvido pela Land and Water Division da FAO para plantas herbáceas, foi adaptado para realização deste estudo em árvores, no caso a laranja Natal. A estrutura completa do AquaCrop faz uso de dados meteorológicos, características da cultura, do solo, além de todo o manejo do ambiente em que a cultura se desenvolve. Este modelo é constituído de algoritmos e procedimentos de cálculo referente à taxa de infiltração, drenagem do ambiente de cultivo, formação da copa e zona de desenvolvimento radicular, especificamente a taxa de crescimento diário tanto da copa quanto da zona de raiz, e mecanismos de cálculos referentes à utilização da água por estes dois (STEDUTO et al., 2009; RAES et al., 2009).

De acordo com Raes et al. (2009) o AquaCrop utiliza um número relativamente pequeno de parâmetros explícitos e variáveis que são quase sempre intuitivas ou então são obtidas por métodos simples de determinação. O AquaCrop tem aderido

também à sua estrutura a evaporação e a taxa de transpiração. Resumindo-se, portanto na formação da biomassa e da produção da cultura. A cobertura vegetal da cultura utilizada é um parâmetro crucial no modelo AquaCrop e neste item se fundamenta o entrave encontrado para a utilização em plantas arbóreas. Utilizou-se, parte da estrutura do AquaCrop (RAES et al., 2009), e coeficientes e equações de alguns outros estudos que possibilitassem a adaptação deste modelo à laranjeira Natal (QUAGIO et al., 2004; GRAÇA et al., 2001; LEDO et al., 1999; LEVY, BIELORAI, SHALHEVET, 1978; ROMERO et al., 2006).

A estruturação, elaboração e construção dos modelos são processos eminentemente criativos, e é neste momento que o pesquisador faz uso de sua criatividade e realiza para um bom trabalho uma pesquisa ampla e multidisciplinar. Portanto a elaboração de modelos exige uma visão holística, o autor ou pesquisador deve observar de maneira geral os problemas ou por melhor se dizer, todas as situações envolvidas, dessa forma, na modelagem não existe uma guia a ser seguida, não funciona com o seguimento de certos procedimentos e princípios, a modelagem é um processo permanente de aprendizado de avaliação e análise constante do modelo que está sendo desenvolvido, onde o pesquisador busca criar um sistema que represente a realidade a ser estudada e que responda por assim dizer, os seus objetivos estabelecidos (STELLA, 2001).

Orellana González (2010) cita alguns dos vários softwares que existem no mercado utilizados para transformar os diagramas de influência em modelos computacionais entre eles: o POWERSIM, o VENSIN, o SIMILE, o I THINK e STELLA: “Structural Thinking Experimental Learning Laboratory”. Este último utilizado nesta pesquisa. Para Sánchez-Román et al. (2010) o STELLA trabalha com programação orientada a objetos e possibilita representar subsistemas inseridos num sistema maior além das inter-relações entre eles, os autores explicam ainda que ao se concentrar em um problema, existem várias maneiras que os modelos de simulação podem ser usados, os objetivos que norteiam os modelos de simulação na DS é que definem a estrutura dos mesmo.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo é parte de um projeto que visa integrar pesquisas em grandes escalas, vinculado ao projeto CAPES-MES/Cuba Nº 177/2012 “Impactos da mudança climática/variabilidade climática na produção agroalimentar: análise em mesoescala em Cuba e no Brasil”, desenvolvido por grupos dos dois países. No Brasil, o grupo que coopera com a pesquisa sedia-se na Faculdade de Ciências Agrônômicas, FCA/UNESP, campus de Botucatu, e em Cuba, na Facultad de Geografía, Universidad de La Habana (UH), financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES.

5.1 Caracterização da área de estudo

5.1.1 Local

O modelo desenvolvido foi utilizado para avaliar o efeito da mudança climática/variabilidade climática sobre o parâmetro produtividade da água da laranja Natal em duas áreas da empresa Citrosuco na região norte do estado de São Paulo, Brasil. Os dados de cultivo foram obtidos de duas áreas da empresa Citrosuco nas cidades de Onda Verde e Altair.

Na cidade de Onda Verde fica localizada a fazenda São João, próxima às coordenadas 20° 21' de latitude sul, longitude 49° 10' oeste e 511 metros de altitude. O solo da fazenda, de onde foram obtidos os dados de rendimento na condição não irrigada, é caracterizado, de acordo com informação da própria empresa, como PV3 -

Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico, A moderado, textura média/média ou média argilosa (EMBRAPA, 2013).

Em Altair, na fazenda Constância, localizada próxima as coordenadas 20° 18' de latitude sul e longitude 49° 1' oeste e altitude 557 metros o cultivo é irrigado e o solo da área é caracterizado como PV4 - Argissolo Vermelho Amarelo, Distrófico ou Álico, A moderado, com textura média/média (EMBRAPA, 2013).

O plantio dos cultivos em ambas as áreas foi realizado em 1998 e os dados dos rendimentos foram coletados a partir de 2002, quando o cultivo estava com cinco anos de idade. A cultivar nas duas situações foi a Natal tendo como porta-enxerto o Limão Cravo. Na cidade de Onda Verde o cultivo é conduzido sem irrigação e o espaçamento utilizado é de 7,5 metros entre ruas e 4,5 metros entre as árvores, a área de cultivo nessa fazenda foi de 61,9 ha. Em Altair, faz-se uso da irrigação por gotejamento com aplicação de vazão de 2 L m⁻² h⁻¹. A lâmina total anual aplicada (Tabela 1) foi variável, era determinada em função da quantidade de dias em que o equipamento de irrigação funcionava em um período de 6, 8 e 10 horas de operação, considerando a fase de desenvolvimento da cultura e os dias com precipitação. O espaçamento é de 8,0 e 4,5m respectivamente, entre ruas e árvores, a área na condição irrigada é equivalente à 296,54 ha. Para a irrigação a empresa considera os dias com chuva e irriga entre 90 a 130 dias por ano agrícola, isso em dependência ao comportamento climático, sendo que um critério que é sempre considerado para a realização da irrigação pela empresa é que não se realiza a irrigação nos meses de janeiro, fevereiro, junho e dezembro.

Tabela 1 - Lâmina de irrigação total em cada ano

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
\sum ETo (mm)*	1566	1406	1414	1436	1403	1449	1382	1445
Lâmina de Irrigação (mm)**	793,6	769,6	795,2	809,6	798,4	644,8	788,8	710,4
Precipitação Efetiva***	766,55	942,14	826,98	893,11	982,49	816,29	758,35	1064,56
Total de dias de irrigação**	124	116	122	126	104	97	118	107

Fonte: * banco de dados IAC; ** Comunicação pessoal (Citrosuco); *** Precipitação efetiva calculada com método proposto pelo USDA Soil Conservation Service (USDA-SCS) (CLARKE, 1998 apud BARBOSA et al., 2005), apresentado nas equações 4 e 5, utilizando dados pluviométricos fornecidos pelo DAEE.

$$Pe = \frac{P * 125 - 0,2 * P}{125}; \text{ para } P < 250 \text{ mm} \quad (\text{Equação 3})$$

$$Pe = 125 + 0,1 * P; \text{ para } P \geq 250 \text{ mm} \quad (\text{Equação 4})$$

O banco de dados climáticos, em particular a pluviometria nas duas fazendas, que serviu de base para execução do trabalho foi obtido junto ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). Os dados referentes a temperatura máxima e mínima, a umidade relativa, velocidade do vento, horas de sol e evapotranspiração foram obtidos junto aos pontos de gestão do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC).

5.1.2 Clima

Segundo o Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura (CEPAGRI) as regiões a Noroeste, onde se localiza as duas fazendas das quais são provenientes os rendimentos, nas cidades de Onda Verde e Altair, o clima de modo geral nessas duas cidades é pertencente ao tipo Aw, mais quente, tropical chuvoso com inverno seco e em pontos isolados dessa região, o tipo climático é Am que caracteriza o clima tropical chuvoso, com inverno seco onde o mês menos chuvoso tem precipitação inferior a 60 mm. Em Altair o mês mais frio, julho, tem temperatura média igual a 19,9 °C e em Onda Verde a temperatura média do mês mais frio, julho, é equivalente à 20,0°C (CEPAGRI, 2015).

5.1.3 Fonte de dados

O estudo apresenta uma avaliação de projeções de emissões futuras de CO₂, usando as saídas geradas por quatro cenários do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC. Este painel projeta alterações no clima baseadas em modelos e em cenários. Das quantidades projetadas pelo IPCC (2014), foram adotados três que representam desde alta a baixa emissão de CO₂, em virtude destes serem caracterizados por emissões marcantes e os demais serem intermediários, os mesmos estão incluídos dentro das famílias A1 e B1 especificados nos relatórios do IPCC. Dentro das famílias A1, as emissões continuam acentuadas, o crescimento da população mundial

permanece ascendente com alta taxa de crescimento, nos cenários que correspondem a essa categoria, projeta-se que os combustíveis fósseis mantenham sua posição dominante na matriz energética global. Já na família B1, o futuro nesta categoria, apresenta com a mesma perspectiva de crescimento da população mundial que a família de cenário A1, atingindo o ápice na metade do atual século e declínio logo depois. A diferença fundamental são as rápidas mudanças nas estruturas econômicas em direção a uma economia de serviços e de informação, com reduções na intensidade de utilização da matéria, e a introdução de tecnologia limpa e eficiente em termos de utilização de recursos. O objetivo primordial dentro da família B1 está em soluções globais para sustentabilidade econômica, social e ambiental, incluindo aumento de equidade, mas sem iniciativas climáticas adicionais (IPCC, 2007, 2013).

Para a realização do trabalho selecionaram-se as quantidades de projeções futuras: sustentável (SUST), máximo (MAX) e mínima (MIN) projetados pelo IPCC (2014). Estes correspondem respectivamente:

- a) baixa emissão de CO₂, denominado aqui de sustentável, o qual propõe, além de reduzidas emissões, a diminuição da concentração atual CO₂ na atmosfera, observado aqui como “otimista”; neste cenário, a partir de 2060 as taxas de emissões de CO₂ na atmosfera serão cada vez mais reduzidas;
- b) a projeção de máximas emissões de CO₂ (MAX) e
- c) as projeções de mínimas emissões de CO₂ na atmosfera (MIN).

Estes cenários são conhecidos como Special Report Emission Scenarios (SRES), e aparecem detalhados no relatório do IPCC (2014). Na Tabela 2 a seguir estão os dados apresentados pelo IPCC, correspondentes a emissões de CO₂ que foram fonte para percepção do comportamento do parâmetro produtividade (WP) da água no futuro.

Tabela 2 - Projeções das Emissões de CO₂ para o período estudado de 2010 à 2100 fornecidas pelo IPCC

Anos	CO ₂ Cenários (ppm)		
	MAXIMO	MÍNIMO	SUSTENTÁVEL
2010	413	366	387
2020	449	386	411
2030	496	412	434
2040	555	443	460
2050	627	482	485
2060	713	530	506
2070	810	588	522
2080	914	651	534
2090	1026	722	542
2100	1142	794	544

Fonte: adaptado do IPCC (2014)

5.2 Desenvolvimento do modelo

Como citado anteriormente o processo de estruturação, elaboração e construção do modelo é extremamente criativo, não existe um roteiro ou um guia de procedimentos na modelagem. É exatamente neste momento de elaboração e desenvolvimento que o pesquisador faz uso da sua criatividade tendo sempre uma visão ampla, observando de forma geral os problemas ou todas as situações envolvidas. Para a obtenção de um bom trabalho, o pesquisador realiza uma pesquisa ampla e multidisciplinar, tendo a consciência de que problemas e soluções poderão surgir espontaneamente no processo de elaboração do modelo. Portanto, a modelagem é um processo permanente de aprendizado de avaliação, e de análise constante do modelo que está sendo desenvolvido, buscando-se criar um modelo que responda os objetivos estabelecidos (STELLA, 2001).

No presente estudo foi desenvolvido um modelo de simulação utilizando a metodologia de Dinâmica de Sistemas através do uso do software STELLA 10.0.5. O objetivo principal do modelo desenvolvido é simular o comportamento do parâmetro produtividade da água na cultura da laranja Natal influenciado pelas

concentrações de CO₂ na atmosfera indicados pelo IPCC (2014) (Tabela 1). O modelo tem abertura para verificar o comportamento futuro do parâmetro produtividade da água em qualquer variedade de citros.

Deve-se deixar claro que tanto o diagrama de influências apresentado na Figura 3 quanto o diagrama de estoques e fluxos (FIGURAS 3 e 4) são resultados da pesquisa, no entanto se faz necessária uma descrição detalhada destes dois diagramas na metodologia do trabalho, que por motivos de compreensão do processo de desenvolvimento do modelo em DS deve ser colocado nesta seção.

O trabalho de unir as equações e o estudo realizado no decorrer do processo de elaboração dessa ferramenta foi estruturado através das seguintes etapas: a) conceitualização; b) formalização; e c) simulação. As etapas de conceitualização e formalização são descritas na metodologia do trabalho, já a etapa de simulação, a qual inclui avaliação e exploração, será apresentada nos resultados e discussão.

5.2.1. Etapa de conceitualização

Durante a elaboração da base estrutural da pesquisa passa-se por muitas fases, a primeira etapa compreende a familiarização com o objeto de estudo a ser modelado. Neste momento visualiza-se a necessidade da integração das pesquisas antes desenvolvidas, primeiramente buscou-se compreender e identificar os elementos e os processos que constituem a formação do rendimento da laranjeira Natal, estudos estes vinculados à temática da mudança climática, principalmente a relação do CO₂ na atmosfera e sua influência no parâmetro produtividade da água da cultura. Com a identificação dos fatores inerentes à formação do rendimento fez-se uso de parte de modelos já estabelecidos pela FAO, como também de estudos iniciais do grupo que trabalha com a modelagem e a variabilidade climática na FCA.

Da FAO utilizou-se parte das equações que dão origem ao desenvolvimento da cultura a partir do modelo AquaCrop, do grupo de estudos da FCA fez-se uso do modelo desenvolvido dentro do ambiente STELLA, da parte que envolvia a base climatológica.

Outro fato importante neste momento foi ver a possibilidade de utilizar os conhecimentos gerados de forma individual e coletiva para a formulação de

cenários futuros e de alguma forma ajudar no planejamento da utilização dos recursos hídricos pela cultura em todo o Estado através da extrapolação dos resultados alcançados.

5.2.1.1 Definição do modelo

Durante o desenvolvimento foi realizada uma ampla pesquisa, além de um trabalho criativo de vincular as equações que resultam em um modelo e por fim em um instrumento computacional que servirá de base para analisar o parâmetro produtividade da água e a produção de biomassa mediante os cenários futuros de concentração de CO₂. Os passos iniciais foram identificar os principais parâmetros envolvidos no processo de formação do rendimento da cultura e estudar as equações principais que são utilizadas para cálculo de rendimento fornecidas pela FAO. O resultado é uma “ferramenta”, ou melhor, um modelo que representa a estrutura mental anteriormente pensada pelo pesquisador.

O passo fundamental no desenvolvimento do modelo foi a adaptação do AquaCrop, modelo que simula o crescimento da cultura, através do desenvolvimento da cobertura verde que transpira água, e um sistema de raiz que se aprofunda e capta água do solo. Nesse processo, a água transpirada é uma troca de biomassa produzida, pela assimilação de dióxido de carbono.

O AquaCrop, modelo específico desenvolvido pela Land and Water Division da FAO para plantas herbáceas, foi adaptado para realização deste estudo em árvores, no caso a laranjeira Natal. De acordo com Raes et al. (2009) o AquaCrop utiliza um número relativamente pequeno de parâmetros explícitos e variáveis que são quase sempre intuitivas ou então são obtidas por métodos simples de determinação. O AquaCrop também tem aderido à sua estrutura, de forma separada, a evaporação e a taxa de transpiração, estas obtidas por cálculo ou observações no desenvolvimento das próprias plantas, no intervalo de tempo utilizado pelo modelo. Resumidamente o AquaCrop permite determinar a formação da biomassa e a produção da cultura. A cobertura vegetal da cultura utilizada é um parâmetro crucial no modelo AquaCrop, e neste item se fundamenta o entrave encontrado para a utilização deste modelo em plantas arbóreas. Para a utilização de parte da estrutura AquaCrop no presente estudo, fez-se uso de coeficientes e equações de alguns outros estudos que possibilitassem a adaptação deste modelo à laranjeira Natal (QUAGIO et al., 2004; GRAÇA et al., 2001; LEDO et al., 1999; LEVY, BIELORAI, SHALHEVET, 1978; ROMERO et al., 2006). Essas equações e coeficientes estão

5.2.1.2 Diagrama de influência ou círculo de casualidade

Dentro da etapa de conceitualização a compreensão da totalidade do problema de estudo permite a elaboração do diagrama de influências ou círculo de casualidade. Nesse momento se estabelecem as relações de causa e efeito entre as principais variáveis do modelo; neste círculo de casualidade pode-se expressar graficamente o comportamento das variáveis envolvidas ao longo do tempo. O círculo de casualidade é composto por variáveis conectadas com setas que indicam o sentido da alimentação do ciclo ou das influências das variáveis nele envolvidas. Tem-se, portanto, a utilização dos sinais “+” e “-”, nos diagramas de casualidade, os quais indicam respectivamente se o movimento da alimentação está no mesmo sentido da influência original ou se está no sentido contrário.

No círculo de casualidade apresentado na Figura 3, estão identificados os componentes básicos do sistema, assim como a interação que acontece entre eles. Através do mesmo pode-se visualizar o conjunto de inter-relações entre as principais variáveis envolvidas, tem-se o Parâmetro Produtividade da Água e o CO_2 como as variáveis que influenciam as principais acumulações no sistema e a Evapotranspiração (ETo) de referência e a Transpiração (Tr) como variáveis que influenciam quantitativamente o comportamento do parâmetro produtividade da água, a Biomassa representa o principal estoque que acumula no sistema. O Parâmetro Produtividade da Água e a Biomassa recebem a água durante o processo de formação do rendimento, o CO_2 também apresenta forte influência na formação da Biomassa e Parâmetro Produtividade da Água, funcionando como fonte no processo de carboxilação, já a ETo e a Tr enchem ou esvaziam as variáveis principais, portanto atuam como fluxos.

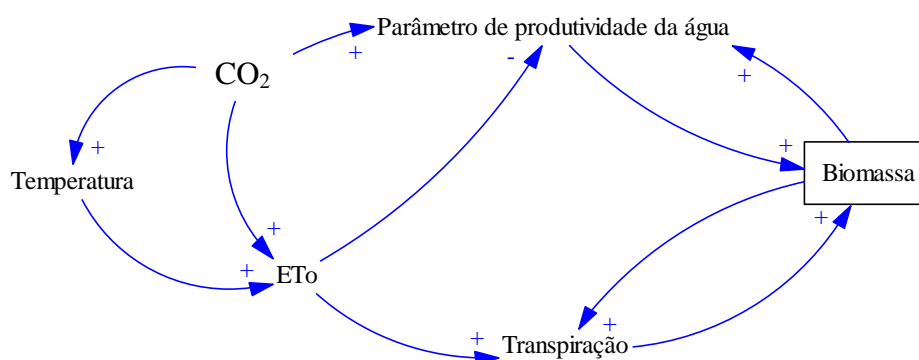


Figura 3 - Diagrama de influências do modelo desenvolvido.

Fonte: Este resultado da pesquisa foi obtido no desenvolvimento do modelo.

Resumidamente podem-se explicar os laços de retroalimentação existentes entre os componentes do sistema, destacando-se os seguintes pontos: o aumento na concentração de CO₂ trará aumento no parâmetro produtividade da água (+), o mesmo ocorrerá com incremento na taxa transpiratória que também proporcionará aumento na Biomassa resultando em aumento no parâmetro produtividade da água (+), já o aumento na evapotranspiração de referência repercute numa redução do parâmetro produtividade da água (-). A relação entre biomassa e transpiração apresenta o mesmo sentido de resposta (+), nota-se que uma relação de reforço positiva.

Em síntese mediante as relações entre as variáveis, o modelo está caracterizado por um laço de retroalimentação positivo ou de reforço, verificado entre a biomassa e a transpiração, entre a biomassa e o parâmetro produtividade da água e entre o CO₂ e a evapotranspiração de referência. Na explicação de Orellana González (2010) um laço de reforço significa que a variação de um elemento se propaga em toda a sua extensão reforçando a variação exponencial, a partir de onde a variação é amplificada provocando mais movimento na mesma direção.

5.2.2. Etapa de Formalização

Depois da construção do círculo de casualidade com os fatores que determinam a obtenção do parâmetro produtividade da água foi elaborado o modelo de simulação para verificação desse parâmetro mediante as concentrações futuras de CO₂ na atmosfera. Nesta etapa realizou-se a formulação do diagrama de influência (FIGURA 3),

fazendo uso da linguagem matemática, o passo inicial dessa etapa foi a elaboração do diagrama de estoques e fluxos.

5.2.2.1 Diagrama de estoque e fluxo

O diagrama de estoques e fluxos desenhado a partir do diagrama de influência, permite descrever o funcionamento do sistema de forma mais detalhada. Nesta etapa procede-se, a partir da formalização do diagrama de causalidade, auxiliados pelas ferramentas empregadas na construção de modelos, o desenvolvimento do diagrama de estoques e fluxos.

Como dito anteriormente a DS utiliza softwares para formalizar matematicamente modelos mentais. Trabalha com programação orientada a objetos e é nesta fase que se formaliza o diagrama de influência fazendo uso desses softwares. O software escolhido para transcrever e quantificar as variáveis e as relações entre elas foi o STELLA 10.0.5 para Windows, este permite a construção e simulação de modelos dinâmicos, e através de representação gráfica baseada em objetos, possibilita estabelecer modelos por meio da conexão dos elementos básicos (ícones), e das relações do sistema modelado que posteriormente permitirão a quantificação das variáveis.

As variáveis são representadas no software na forma de: estoques, fluxos, conversores e conectores (STELLA, 2001); estão descritas abaixo as variáveis do software utilizadas para representar o sistema estudado:



Estoque: O estoque representa uma variável que sofre alteração contínua mediada por outra variável do tipo taxa (fluxo).



Fluxo: O fluxo é a variável que promove a alteração no estoque



Conversor: Esta variável representa uma constante ou uma função.



Conector: Serve para transportar a informação de uma variável à outra, ao utilizar um conector para ligar duas variáveis, impõe-se uma relação entre elas.

O modelo desenvolvido no estudo compõe-se de estoques, os quais representam as biomassas em função do CO₂, da transpiração e a biomassa total, que é nada menos que a biomassa acumulada nos dois processos de acumulação; um fluxo, que é a taxa de variação do estoque, além de conversores e conectores, os quais são elementos e/ou variáveis que se inter-relacionam. Essas relações são descritas da mesma forma, se estabelecem por meio de setas, tanto no diagrama causal ou de influências como no diagrama formalizado no STELLA. O modelo criado simula os processos de formação do parâmetro produtividade da água mediados pelas concentrações de CO₂ na atmosfera, e o diagrama construído e formalizado nessa etapa representa gráfica e matematicamente tais processos.

Na Figura 4 se encontra o modelo desenvolvido nesta pesquisa representado pelo diagrama de estoques e fluxos. O código do modelo se encontra no Anexo 1.

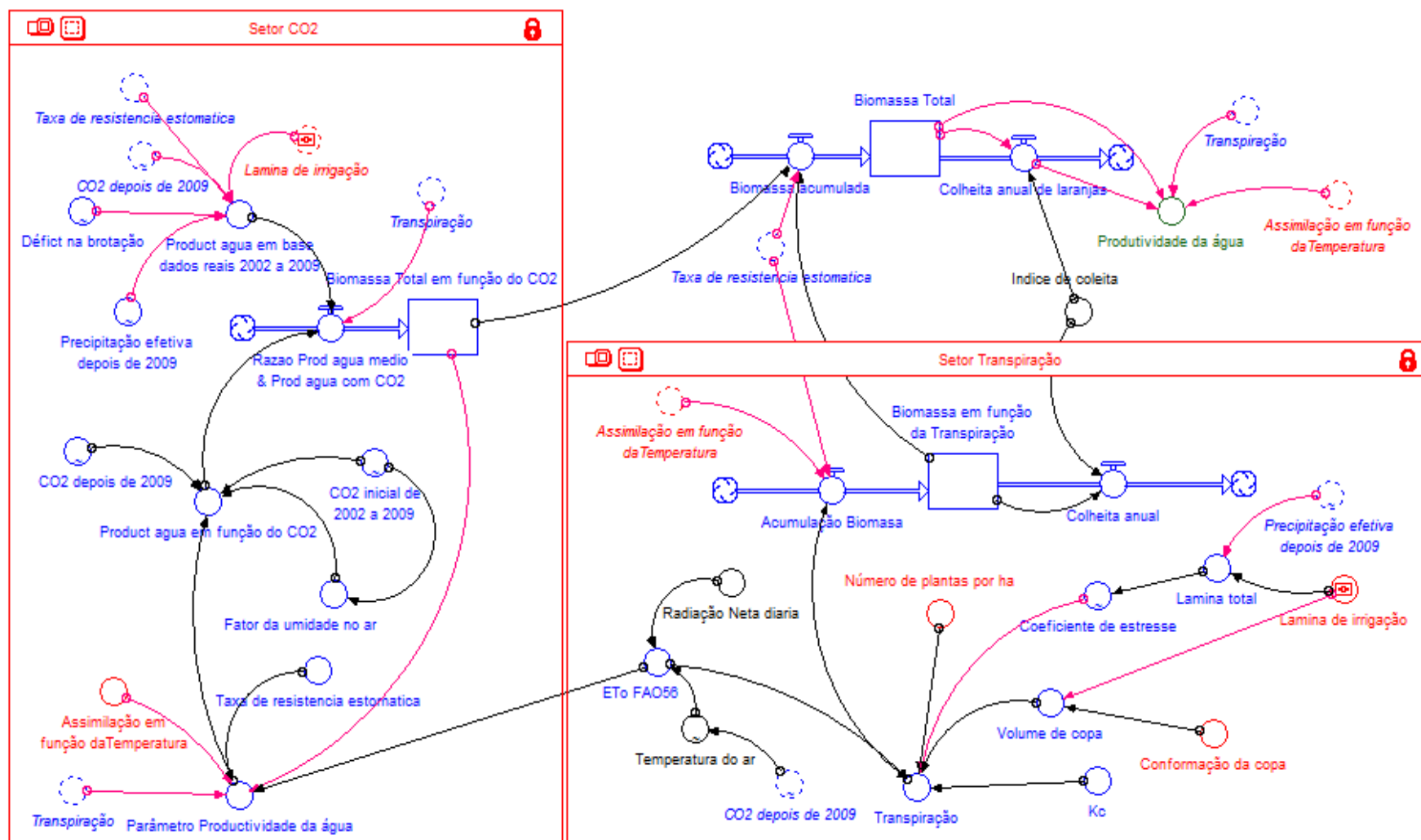


Figura 4 - Diagrama de estoques e fluxos

Fonte: resultado da pesquisa.

5.2.2.2 Descrição matemática do modelo

Sob a ótica da Dinâmica de Sistemas os modelos são elaborados usando um conjunto de equações diferenciais que são resolvidas matematicamente para um determinado período, através de um algoritmo que dá origem a comportamentos dependentes do tempo, nas variáveis contidas no modelo.

A seguir são apresentadas as principais equações utilizadas no modelo, estas são originais do AquaCrop e serviram como base de entrada para a simulação no software STELLA. Os autores do manual 56 da FAO desenvolveram uma forma de aprimorar a Equação 1 fazendo a separação da evapotranspiração em Transpiração (Tr) e Evaporação do solo (E) e tratando o Rendimento final (Y) como uma função da Biomassa final (B) e o Índice de Colheita (IC).

ii) Estrutura

Os passos para a estruturação do modelo consistem na identificação das principais variáveis e relações entre as mesmas. De forma conceitual o modelo que aborda os processos de formação do parâmetro produtividade da água e a biomassa da cultura está apresentado nas Figuras 5 e 6. Essas Figuras representam os componentes fundamentais do modelo, o CO₂, que juntamente com a condição hídrica determinam a carboxilação, ou seja, a assimilação de carbono pela cultura; a transpiração, a qual é o processo biológico fundamental na formação dos rendimentos; e o fator climático representado no modelo pela evapotranspiração.

Na Figura 5 está apresentada a formação da cobertura vegetal e, portanto da biomassa e do parâmetro produtividade da água em condições distintas. Na situação A, as condições hídricas e demais condições do solo, assim como todos os fatores que influenciam a formação do rendimento estão favoráveis para o desenvolvimento da cultura, já na situação B a formação é conduzida sob diferentes situações de estresse determinando redução considerável no parâmetro produtividade da água.

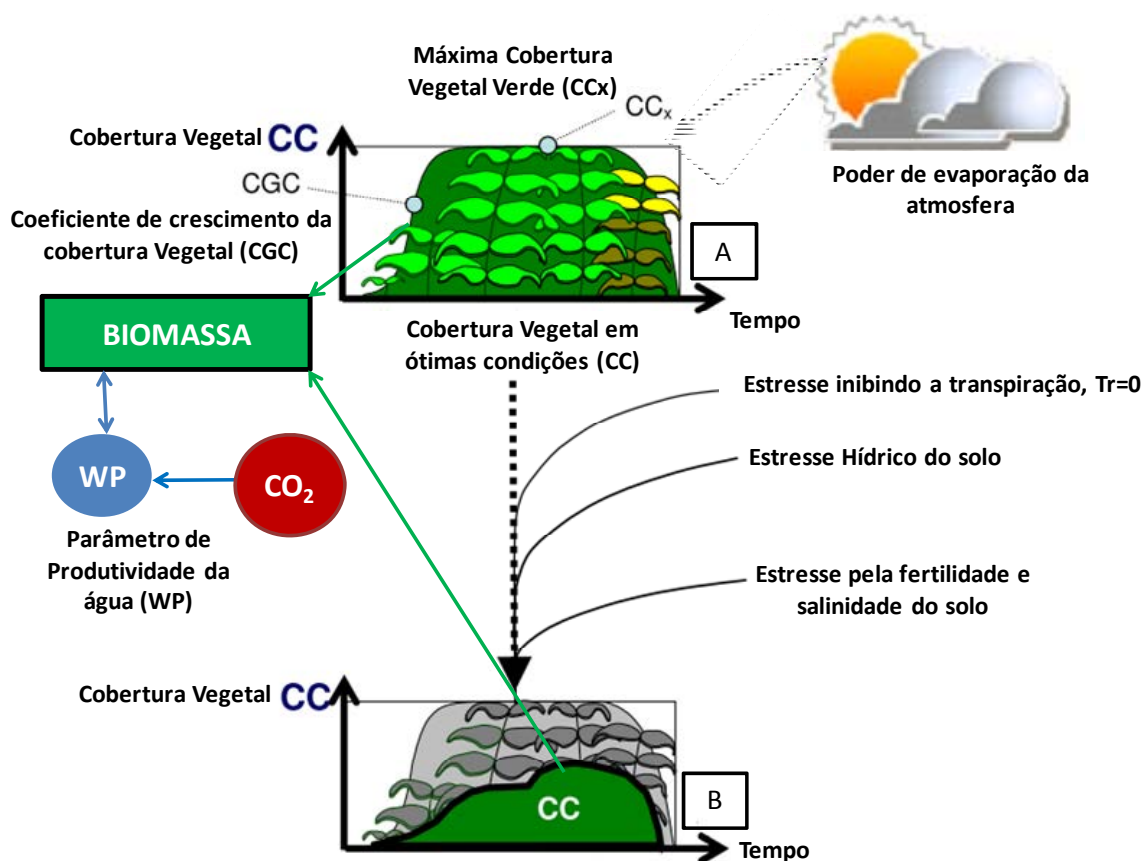


Figura 5 - Modelo conceitual da formação da biomassa e parâmetro produtividade da água mediado pela concentração de CO_2 .

Fonte: adaptado de FAO, Raes et al. (2012) e Steduto, Hsiao e Fereres (2007).

ii) Escala temporal

No modelo original do AquaCrop a unidade temporal é variável, podendo ser diária, decadal e mensal. Com o AquaCrop pode-se introduzir intervalos diários para contar as mudanças dinâmicas no abastecimento de água ao solo, na evaporação do solo e na transpiração da cultura, em contraste com a Equação (1), que calcula a produção em períodos longos de tempo. Na situação da atual pesquisa foi adotada a unidade de referência temporal como sendo o ano agrícola, em virtude de a cultura ser de ciclo perene e também pela falta de dados cruciais como volume de copa e biomassa num período menor de tempo, os quais alimentam as variáveis secundárias do modelo, portanto todas as variáveis envolvidas foram trabalhadas em base anual como unidade temporal de referência.

No entanto é possível reduzir a unidade temporal no modelo proposto, seria possível inclusive modificar o modelo para obter dados de biomassa e parâmetro produtividade da água em intervalos menores, por exemplo, dentro do ciclo fenológico da cultura, representando cada fase. A modificação seria mediada em função dos interesses e da disponibilidade de dados, cito aqui que poderia ser modificado se outrora tivesse em mãos dados concernentes ao volume de copa em cada fase de desenvolvimento da cultura assim como se realizasse a dessecação das plantas de laranja buscando os respectivos valores de biomassas em cada fase do ciclo fenológico.

Tem-se que o conceito do modelo desenvolvido é a formação do parâmetro produtividade da água e da biomassa mediados pelas concentrações de CO₂ na atmosfera.

Para melhor compreensão das variáveis que influenciam o processo de formação do parâmetro produtividade da água, e também a normalização desse parâmetro pelas concentrações de CO₂, estabeleceu-se dois setores. De início, o Setor Transpiração que compreende os procedimentos realizados para obtenção do parâmetro produtividade da água, os quais são a transpiração, a biomassa e a evapotranspiração; estes são os envolvidos mais diretamente na obtenção deste parâmetro, depois tem-se o Setor CO₂, que demonstra as relações do CO₂ na atmosfera e o volume de copa, esta última determinada como variável secundária.

iii) Parâmetro produtividade de água

Aqui são analisados com mais particularidades os principais processos envolvidos na formação do parâmetro produtividade da água, compreendidos no modelo proposto nesta pesquisa e de acordo ao modelo da FAO, AquaCrop (RAES et al., 2012; STEDUTO, HSIAO e FERERES 2007). Sendo eles: a biomassa e a transpiração, ambos influenciados pelo fator climático e a concentração de CO₂ na atmosfera.

O parâmetro produtividade da água mediado pelas concentrações de CO₂ na atmosfera é o foco do modelo desenvolvido, para facilitar a descrição, resolveu-se dividir a estrutura inicial em setores, mesmo tendo analisado o sistema de forma completa.

A simulação entre as variáveis (FIGURA 6) permite destacar a introdução de duas etapas intermediárias no processo de formação da biomassa e

parâmetro produtividade da água: a separação de evaporação do solo (E_s), da transpiração da cultura (T_r) e a obtenção de rendimento a partir da biomassa mediado pelo fator climático.

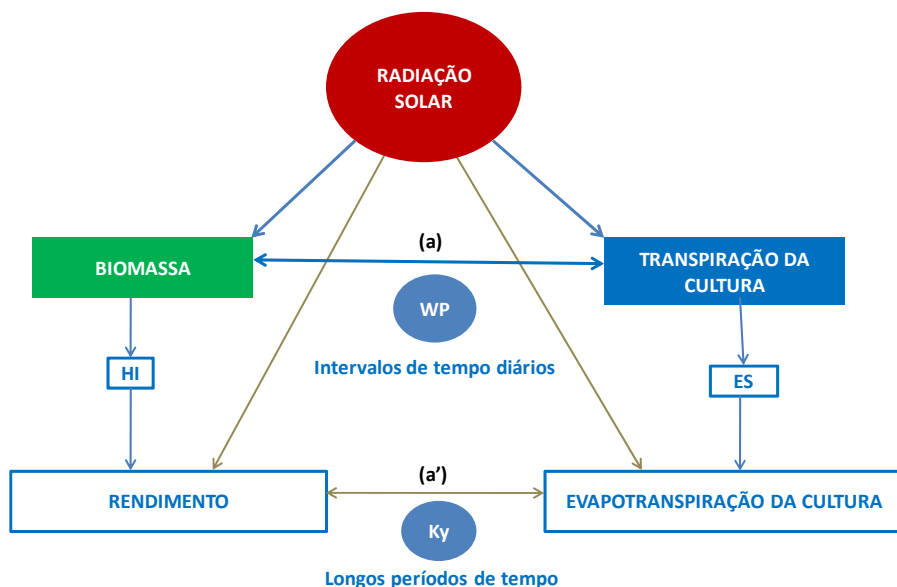


Figura 6 - Modelo conceitual do rendimento, evolução do AquaCrop a partir da função de produção.

WP: é o parâmetro produtividade da água em kg ou g por mm^{-1} de água transpirada; HI índice de colheita, ES evaporação do solo, em função da área foliar da cultura e a área de solo descoberto; Ky: é o fator que relaciona o rendimento com a evapotranspiração da cultura.

Fonte: adaptado de FAO, Raes et al. (2012).

Segundo Raes et al. (2009) e Raes et al. (2012) a produtividade da água normalizada para a biomassa (WP) é fundamental para o funcionamento do AquaCrop e tem se mostrado quase constante para várias demandas evaporativas e quando os nutrientes minerais do solo não são limitantes. Para plantas C_3 herbáceas o intervalo de abrangência do WP é de 15 a 20 g m^{-2} , no caso da laranjeira, mesmo sendo uma planta C_3 um dos principais entraves para a realização da pesquisa foi o fato de não se ter ainda descrito o parâmetro produtividade da água em pesquisas anteriores. Cabe aqui ressaltar que o parâmetro produtividade da água fornecido pela FAO é determinado, muitas vezes, em intervalos de tempo diários, os modelos utilizados pelo grupo da FAO simulam, para plantas herbáceas, biomassa diária e todos os outros parâmetros diários. O parâmetro produtividade da água aqui foi calculado pela metodologia descrita nos trabalhos publicados pela FAO (RAES et al., 2009; RAES et al., 2012). Tanto a calibração quanto a

normalização para concentração de CO₂ do parâmetro produtividade da água se basearam na Equação 5.

$$WP = \left(\frac{B}{\sum \frac{Tr}{ETo}} \right) [CO_2] \quad (\text{Equação 5})$$

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 m³ de água transpirada.

ΣTr: Transpiração do cultivo (mm);

ETo: Evapotranspiração de referência (mm);

CO₂: Concentração de CO₂ na atmosfera (ppm).

Na maioria dos cultivos só uma parte da biomassa produzida é destinada aos órgãos colhidos formando então rendimento agrícola de interesse em cada cultura em particular.

iv) Passos para o cálculo do parâmetro produtividade da água - WP

Primeiramente com os dados de rendimento da laranja Natal fornecidos pela empresa Citrosuco calculou-se a biomassa total. Os rendimentos fornecidos correspondiam à biomassa útil da laranja Natal, ou seja, o fruto, nas duas condições de cultivo, na área irrigada e na área não irrigada. Para converter esses valores em biomassa total foi utilizado fator de conversão baseado em pesquisas anteriores que determinaram que percentagem das árvores de laranja correspondiam à biomassa útil. Mattos Junior et al. (2003) fizeram a distribuição da biomassa total da laranjeira Hamlin, frutos frescos correspondem à 59,3%, folhas, 7,1%; ramos, 13,0%; tronco, 3,0% e raízes, 17,6%, com estes valores foi possível estimar a biomassa total da laranjeira Natal e então, o parâmetro produtividade da água.

A variável volume de copa (Vc) da laranjeira Natal para os anos de cultivo dos quais correspondiam os rendimentos fornecidos pela empresa foi obtida através

de valores estabelecidos na literatura. Foram tomados como base para o cálculo dessa variável os trabalhos publicados por Quagio et al. (2004), Graça et al. (2001), Stuchi e Donadio (2000) e Ledo et al. (1999). De posse dessas informações estabeleceu-se que na área irrigada as árvores já teriam o volume de copa com 100% de formação, na área não irrigada foi utilizado um percentual de redução baseado no estudo realizado por Levy, Bielorai, Shalhevet (1978) e Romero et al. (2006). Estes autores observaram que o volume de copa é positivamente correlacionado com o consumo de água, dessa forma, fica evidente a necessidade de utilizar um fator de redução no volume de copa da laranjeira na área não irrigada, este foi calculado a partir do estudo de Romero et al. (2006) em pomares que são conduzidos na condição de sequeiro, acontece 41% de redução no volume de copa dos citros, a partir desses coeficientes de redução do crescimento e de valores dos percentuais de volume de copa publicados, aplicou-se o percentual de redução na área não irrigada.

Com a obtenção do volume de copa, tem-se a transpiração por planta. A partir da determinação da transpiração e com o número de plantas por hectare, adquiri-se a quantidade de água transpirada por hectare em cada ano agrícola nas condições irrigada e não irrigada.

Aqui abrir-se-á um parêntesis para explicar os passos para a obtenção das equações que alimentaram o software STELLA. Em primeiro momento foram realizadas análise e estudo dos dados fornecidos pela Citrosuco, onde percebeu-se que os rendimentos foram influenciados por algumas variáveis, por exemplo o déficit hídrico que ocorria no período de brotação (DNB) da laranjeira Natal, influenciado pelas condições climáticas e o ciclo da cultura. O déficit hídrico foi obtido realizando o cálculo do balanço hídrico no período em que foram obtidos os rendimentos (2002 à 2009).

Percebeu-se que o maior déficit hídrico acontecia anualmente no período compreendido entre a segunda quinzena de maio até final da primeira quinzena de agosto, momento em que se iniciava a reposição da lâmina evapotranspirada com o uso da irrigação na área conduzida sob irrigação. A partir da análise dos rendimentos nas duas condições de cultivo, criou-se uma correlação linear múltipla para cada uma destas duas situações. A correlação linear múltipla da área irrigada está apresentada na Equação 6, percebeu-se mediante o estudo, que o comportamento dinâmico do parâmetro produtividade da água era influenciado não apenas pelo CO₂, como também pelo déficit

hídrico no período de brotação da laranjeira e pela lâmina de irrigação fornecida ao longo de todo o ciclo e principalmente após esse déficit.

Para a área irrigada a Equação que determina o parâmetro produtividade da água é:

$$WP = -480,76 - 0,084 * DNB + 1,31 * CO_2 - 0,007 * L \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:

WP: Parâmetro produtividade da água ($\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$);

DNB: Déficit na brotação (mm), faixa de aplicação ($-70 \geq DNB \leq -400$);

CO₂: concentração de CO₂ na atmosfera (ppm), faixa de aplicação ($280 \geq CO_2 \leq 1200$);

L: Lâmina de irrigação aplicada durante o ciclo (mm), faixa de aplicação ($600 \geq L \leq 900$).

A Equação 6 é útil para prever o WP na condição irrigada, pois o valor de significância fornecido pelo teste F foi inferior a 5%, evidenciando que o déficit hídrico e a lâmina de irrigação estão relacionados com o parâmetro produtividade da água. As três variáveis juntas explicam 77% da variabilidade do WP nos dados reais de rendimento de 2002 à 2009.

Na área não irrigada, as variáveis que imprimiam maiores alterações na variabilidade do parâmetro produtividade da água foram o déficit hídrico, ocorrido com maior incidência no período de brotação e a precipitação. Nessa condição a Equação que foi levada ao STELLA para as simulações futuras não inclui o CO₂. A correlação linear múltipla da área não irrigada está apresentada na Equação 7; juntas essas variáveis, o déficit e a precipitação efetiva explicam 96% do comportamento do WP nessa condição de cultivo. O R² dessa equação foi 0,96.

$$WP = -10,24 - 0,03 * DNB + 0,04 * PE \quad (\text{Equação 7})$$

Em que:

WP: Parâmetro produtividade da água ($\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$);

DNB: Déficit na brotação (mm); faixa de aplicação ($-70 \geq DNB \leq -400$);

PE: Precipitação Efetiva (mm); ($600 \geq PE \leq 1000$).

De posse desses dados foi possível calcular o parâmetro produtividade da água (WP) nas duas condições de cultivo e então dar continuidade ao trabalho alimentando o software STELLA para as simulações.

v) Cálculo da transpiração

A transpiração da cultura, processo biofísico mediado por um conjunto de fatores (FIGURA 7), é o processo pelo qual a água passa pela planta, como parte de seu metabolismo, convertendo-se uma parte em biomassa, e a outra é transferida para a atmosfera pelos estômatos, obedecendo uma série de resistências desde o solo, passando pelos vasos condutores (xilema), mesófilo, estômatos e finalmente indo para a atmosfera.

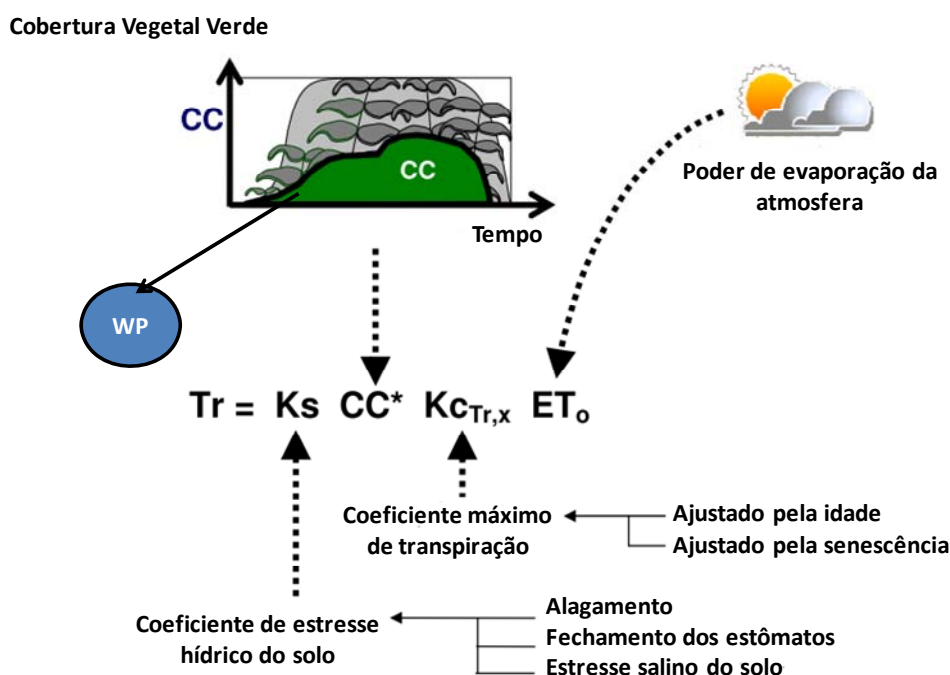


Figura 7 - Esquema de cálculo em AquaCrop para transpiração da cultura (Tr)

Fonte: adaptado de FAO, Raes et al. (2012).

O processo de transpiração das plantas ocorre tanto em condições de solo saturado como não saturado. O modelo proposto reuni os processos físicos e biológicos neste fluxo, ditados no mesmo pelo coeficiente de estresse (K_s), pelo ($K_{c_{Tr,x}}$), pela ET_o e pelo volume de copa da laranjeira.

É possível que o entrave principal para a determinação do parâmetro produtividade da água encontrado pelo grupo de pesquisadores do AquaCrop para culturas arbóreas e perenes, seja o fato da determinação eficaz da cobertura vegetal, parâmetro esse, base da transpiração dos cultivos e portanto fundamental para a produção da biomassa. Mediante este problema e buscando a obtenção de WP para a laranja, este procedimento poderia ser realizado com a utilização de transpiração medida diretamente na planta, mas os dados encontrados correspondiam à variedade Valência, portanto optou-se por calcular a transpiração pela Equação 8 proposta por Raes et al. (2009).

$$Tr = K_s * D * \%CC * K_{C_{tr}} * ETo \quad (\text{Equação 8})$$

Em que:

K_s : coeficiente de estresse hídrico (decimal)

$\%CC$: de volume de copa (decimal)

$K_{C_{Tr}}$: K_c da transpiração máxima (adimensional)

ETo : Evapotranspiração de referência (mm)

Na área irrigada foi fornecida toda a água evapotranspirada, logo o coeficiente de estresse utilizado foi equivalente a um, já na área não irrigada, o coeficiente de estresse foi calculado para cada ano com o valor de água oriundo das precipitações, obtendo-se o mesmo da seguinte forma, a lâmina total de irrigação foi considerada como 100% do volume evapotranspirado, ou seja, 1, a partir deste e utilizando a precipitação efetiva, único volume de água que era fornecido à área não irrigada, calculou-se o percentual de estresse hídrico para a condição sem irrigação.

Calculou-se a transpiração por planta e depois, com o espaçamento de cultivo, obteve-se número de plantas por hectare, adquirindo-se assim a quantidade de água transpirada por hectare em cada ano agrícola nas condições irrigada e não irrigada.

A evapotranspiração de referência foi determinada segundo metodologia descrita por Wu (1997), onde utilizou-se a temperatura média de cada uma das fazendas de onde foram procedentes os dados de rendimento e a radiação solar incidente convertida em mm dia^{-1} .

De posse desses dados foi possível calcular o WP da água e então dar continuidade ao trabalho alimentando o software STELLA para a simulações.

Na publicação de número 33 da FAO são apresentados os trabalhos de Doorenbos e Kassan (1979) para o K_c de diversas culturas em diferentes condições de cultivo e estágios de desenvolvimento, tanto nesta publicação como na publicação posterior de Doorenbos e Pruitt (1977, 1984) os autores realizaram uma síntese de como se comporta o K_c no decorrer do ciclo fenológico dos citros (TABELA 3), estes valores foram utilizados no estudo.

Tabela 3 - Coeficiente de cultivo utilizado para obtenção da Transpiração

Kc											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0.9	0.9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassan (1979) e Doorenbos e Pruitt (1977)

O parâmetro produtividade da água (Kg ou $g\ m^{-2}\ mm^{-1}$) é determinado em Kg (biomassa) por m^2 (área ocupada pela cultura) por mm de água transpirada. Este processo é intermediado pelo fator climático e concentração de CO_2 na atmosfera (FIGURA 6). Tem-se dessa forma a transpiração e o volume de copa como variáveis fundamentais no processo de acumulação de biomassa.

Depois da obtenção das biomassas realizou-se o cálculo do parâmetro produtividade da água com a Equação 3, para alimentar o modelo desenvolvido de simulação deste parâmetro mediado pelas concentrações futuras de CO_2 na atmosfera.

vi) Normalização do parâmetro produtividade da água com as concentrações de CO_2

Para verificação da influência das futuras concentrações de CO_2 na atmosfera foi utilizada a Equação 7 proposta por Steduto, Hsiao e Fereres (2007). Antes se faz necessário compreender como acontece o processo de assimilação do CO_2 descrito no mesmo trabalho. De acordo com os autores, ao nível de folha, define-se produtividade fotossintética da água (W_{Pp}), sendo esta a razão entre a assimilação líquida de dióxido de carbono e a transpiração na folha, ambos expressos como fluxos e taxas sobre a base da área foliar. Nos processos de trocas gasosas entre a folha e seu ambiente, o CO_2 e o vapor de água compartilham da mesma via, entre as grandes quantidades de massa atmosféricas e o espaço aéreo intracelular.

Tanto o CO₂ quanto o vapor de água ao longo do caminho de carboxilação e transpiração encontram resistências à difusão no decorrer desses processos, resistências promovidas principalmente pela condutância estomática, além da também resistência promovida pelas condições atmosféricas, principalmente pela temperatura na base das folhas. Todos os processos metabólicos complexos de fixação de CO₂ ao nível bioquímico estão embutidos nos parâmetros das equações fornecidas no trabalho de Steduto, Hsiao e Fereres (2007). Neste estudo os autores recomendam, para efeitos práticos, o uso da Equação 9, tendo em vista a realidade de que os dados da taxa ($\Delta w/\Delta w_0$) que representa a diferença na concentração no vapor de água entre o espaço aéreo intercelular e a atmosfera, para qualquer situação (Δw) e para uma situação de referência (Δw_0), não são fáceis de serem determinados, e na maioria não existem. Outra justificativa para utilizar a Equação 9, é que esta é constituída de variáveis que abordam todos processos metabólicos complexos de fixação de CO₂, inclusive no que se refere ao nível bioquímico de assimilação de CO₂.

A Equação 9 é semi-empírica e segundo os autores, deve ser utilizada para normalização do parâmetro produtividade da água mediado pelas concentrações de CO₂ na atmosfera (STEDUTO, HSIAO e FERERES 2007).

$$WP = WP_b \frac{C_{a,o}}{C_a} * D \quad (\text{Equação 9})$$

Em que:

WP: Parâmetro produtividade da água em função das concentrações de CO₂ (g m⁻² mm⁻¹),

WP_b: Parâmetro produtividade da água de biomassa (obtido com os rendimentos fornecidos pela empresa) (g m⁻² mm⁻¹);

c_{a,o}: Concentração anual média de CO₂ na atmosfera medida pelo Mauna Loa Observatory (Havaí), para o ano de referência;

c_a: Concentração anual média de CO₂ na atmosfera medida pelo Mauna Loa Observatory (Havaí), para o ano em que a biomassa é produzida.

A efeito de medida temporária, principalmente por escassez de dados, Steduto, Hsiao; Fereres (2007) recomendam que D seja obtido pela Equação 10:

$$D = a - b \times (C_a - C_{a,o}) \quad (\text{Equação 10})$$

Em que:

a=1 e b=0,000138

Na Equação 10, $C_{a,o}$ é tomado como sendo um valor de referência igual à 360 ppm.

Para determinação dos coeficientes a e b da Equação 10, Steduto, Hsiao e Fereres (2007) realizaram experimentos em câmaras sob condições controladas de emissão de CO₂ e dos demais parâmetros relacionados a condições de pressão de saturação de vapor, temperatura do ar e umidade dentre outros, e sugeriram que mediante adaptações, essa mesma Equação (9) poderia ser utilizada para a normalização de diferentes concentrações de CO₂ na atmosfera.

Mais detalhadamente D é um fator empírico oriundo de uma aproximação da soma de Δw , ou seja, da soma da diferença na concentração de vapor d'água entre o espaço aéreo intercelular e a atmosfera, em uma dada situação (Δw) e uma situação de referência (Δw_o). No processo de obtenção desse fator, Steduto, Hsiao e Fereres (2007) explicam por observação em experimentos em câmaras sob condições controladas, que este diminui com o aumento da concentração de CO₂, no entanto essa diminuição é leve, no estudo os autores afirmam, não com tanta certeza, que a taxa de diminuição é em torno de 7%. A relação que determina D, $\Delta w/\Delta w_o$, é decorrente das condições de pressão de saturação de vapor, temperatura do ar e umidade relativa do ar dentre outros, mediante os vários obstáculos que são verificados no processo de obtenção dessa relação, os autores sugerem calcular D pela Equação 10.

Por fim, a partir dessas equações, que representam os indicadores estruturais que permitiram a previsão de resultados futuros, e com o uso do software STELLA, fizeram-se as simulações, buscando analisar e perceber quais seriam os resultados do parâmetro produtividade da água nas concentrações futuras de CO₂.

vii) Normalização do parâmetro produtividade da água à Temperatura do ar

Para simular o comportamento do parâmetro produtividade da água mediante alterações no ambiente, especificamente sob alterações na temperatura do ar e

sua influência na assimilação de CO₂ na atmosfera, esta pesquisa baseou-se em estudo realizado por Machado et al (2005), em que os autores obtiveram curvas respostas da laranjeira Valência cultivada sob porta-enxerto limão cravo em câmaras com condições controladas de temperatura do ar, pressão de vapor, densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos e concentrações diferenciadas de CO₂.

As curvas de resposta da assimilação de CO₂ da laranjeira Valência à temperatura na câmara de crescimento foram obtidas mantendo as plantas sob a mesma temperatura, até a completa estabilização da taxa fotossintética (por volta de uma hora), e assim se registrava a medida definitiva da assimilação de CO₂. Para verificação dessa taxa de assimilação à variação de temperatura do ar, a pressão de saturação de vapor era mantida entre 1 e 1,5 kPa, em todas as temperaturas simuladas na câmara (15°C, 20°C, 25°C, 30°C, 35°C e 40°C), as taxas de assimilação do CO₂ nestas temperaturas estão apresentadas na Tabela 4. Na presente pesquisa utilizaram-se apenas as temperaturas: 25°C, 30°C e 40°C.

Outro parâmetro fundamental no resultado é a limitação à fotossíntese exercida pelo estômato, ao analisar o estudo realizado por Machado et al. (2005) verificou-se que esta variável influencia a assimilação do CO₂ pela laranjeira. Neste trabalho os autores determinaram a limitação à fotossíntese exercida pelo estômato para a Valência, variedade que mais se assemelha à variedade Natal, a resistência estomática, segundo os autores equivale à 23%. Este foi o valor utilizado na presente pesquisa. Além da resistência estomática, utilizou-se um ponto de inflexão, o qual estabelece que a partir de uma concentração de 600 ppm de CO₂, ocorre uma redução de 50% na carboxilação, parâmetro estabelecido a partir de revisão dos estudos de Pinto, Assad e Zullo (2004), Streck e Alberto (2006), Streck (2005), Machado et al. (2005) e Amthor (2001), onde afirma que níveis próximos de 1000 ppm são excessivos e passam a causar fitotoxidade.

Em sua estrutura o modelo comporta parâmetros adjacentes, porém fundamentais nos resultados encontrados; portanto, faz-se necessário esclarecer de onde são oriundos cada um destes parâmetros utilizados. O déficit hídrico aderido ao modelo foi estabelecido de informação fornecida por Marengo (2006a), em que modelou o comportamento da precipitação até 2100, assim, baseado neste estudo, fez-se uma analogia do comportamento futuro do déficit hídrico mediante cenários futuros da precipitação fornecidos pelo autor acima citado.

Tabela 4 - Taxa de assimilação anual de CO₂ em função da temperatura do ar

Temperatura (°C)	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
Porcentagem de assimilação (%)	64,24	89,94	81,37	93,01	81,37	59,96
Quantidade anual de assimilação de CO ₂ (g m ⁻² ano ⁻¹)	416,37	582,92	527,40	648,149	458,93	388,61

Fonte: Autora, adaptado de Machado et al. (2005).

Normalmente o aumento de CO₂ ocorre combinado com elevação de temperatura do ar e déficit de pressão de vapor. Os modelos projetam aumento de vários graus na temperatura do ar (FUHRER e GREGORY, 2014) até o final do século 21; foi baseado nesse pensamento que se constituiu os cenários com a componente temperatura.

5.2.3 Validação do modelo matemático

O resultado de todo o processo de estudo, elaboração e construção do modelo está impresso nesta fase. De acordo com Ford (1999), essa fase da modelagem poderia começar com a seguinte questão: Você pode provar que o modelo desenvolvido é válido? O autor afirma que descrever com detalhes o modelo não é prova consistente de que o mesmo é válido. Outra questão feita e que é tão importante quanto, é: O modelo é útil? Neste mesmo trabalho Ford cita uma revisão feita por Greenberg, Crenson e Crissey (1976), como conclusão os autores afirmam que não existe um procedimento uniforme para a validação dos modelos, que nenhum modelo tem sido ou será completamente válido, mesmo sendo completamente apoiado pelos objetivos.

Mesmo assim Ford (1999) enfatiza a necessidade nessa fase da modelagem, de que o pesquisador pergunte a si próprio se a estrutura do modelo e seus parâmetros fazem sentido e adicionalmente, realize a verificação e, por conseguinte, a validação do mesmo. Em Forrester (1961) citado por Orellana González (2010) explica-se que na Dinâmica de Sistemas a validação dos modelos de simulação se julga de acordo com suas conveniências e utilidades, além do que é preciso confiar em seu comportamento sob condições limitadas, sempre observando o objetivo específico ao qual o modelo foi proposto. Para Orellana González (2006) o processo de validação de um modelo na linha de Dinâmica de Sistemas tem como foco principal responder os objetivos para os quais ele foi elaborado pelo estabelecimento da sua validade estrutural.

Para Barlas (1996) nos modelos que são desenvolvidos buscando fornecer uma visão de longo prazo do comportamento dos sistemas a ênfase é dada

principalmente aos padrões de predição, mais do que aos resultados precisos, que são obtidos com o uso do modelo. Segundo o autor o que torna ainda mais complicada a validação é que junto com a validação do modelo como o todo é necessária muitas vezes, a validação da estrutura interna do modelo projetado.

No trabalho realizado por Rykiel (1996) sobre uma maneira de validação testando modelos ecológicos, o autor menciona que validar um modelo através de uma série de dados é um ato operacional e que por isso não garante que a base científica do modelo e sua estrutura interna correspondam aos processos atuais ou as relações de causa-efeito que atuam no sistema real. Mesmo tendo sentido contrário, o fato de um modelo apresentar-se de forma mecanicamente correta não significa que o mesmo traga boas predições.

Para a calibração do modelo desenvolvido no presente trabalho utilizou-se equações consolidadas do grupo de estudos da FAO, outro ponto fundamental na calibração foi a utilização de dados de rendimentos em sequência temporal satisfatória para a calibração. Orellana González (2010) afirma que no geral para se efetuar a calibração dos modelos se requer séries de dados temporais de períodos longos, isso significa custos elevados e em algumas situações esses dados são inacessíveis. Essa afirmação é notória na prática no processo de calibração dos modelos que são desenvolvidos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Modelo de verificação da eficiência do uso da água pela laranjeira Natal

Os modelos, como discutido em pontos anteriores, são abstrações da realidade, não são capazes de envolver todos os parâmetros no sistema modelado. Assim fica claro, que no comportamento real dos sistemas, algumas características da dinâmica do mesmo não são passíveis de serem quantificadas. Para Forrester (1961) e Ford (1999) o modelo desenvolvido deve ser estruturado de maneira a confiar em seu comportamento, devendo ter em sua estrutura somente os fatores essenciais de um sistema real, a validação deve ser considerada de acordo com a consistência lógica de sua estrutura interna.

Mesmo possibilitando efetuar representação de sistemas complexos, é importante destacar que nenhum modelo é validado em 100%, por motivos, por exemplo, de que às vezes esses modelos fazem suposições acerca do comportamento real que podem ser diferentes do que acontece de fato na realidade, além do que, podem incluir em sua estrutura, variáveis que não podem ser quantificadas. Mediante tais dificuldades, idealizadores desta linha de pesquisa, sugerem utilização de dados empíricos. Na presente pesquisa, o processo de validação do modelo desenvolvido, constituiu-se de rendimentos reais fornecidos pela Citrosuco, e as demais variáveis necessárias, têm fonte literária. A prioridade nesta etapa de validação de acordo com Ford (1999) é a percepção se o modelo é útil ou não para atender o objetivo anteriormente proposto. Para a Dinâmica de

Sistemas tal aspecto é sem dúvida importante porque permite, pela avaliação do modelo estruturado, melhorar o comportamento do mesmo.

Nesta pesquisa pretendeu-se representar o processo de formação do parâmetro produtividade da água, mediado pelas concentrações futuras de CO₂ e temperatura do ar, o foco principal do modelo era o parâmetro produtividade da água influenciado por essas variáveis, portanto o modelo está constituído por um conjunto de elementos organizados para atingir este objetivo. Como passo inicial teve-se a identificação das variáveis chaves que o conformam. No sistema modelado tem-se em conta que o parâmetro produtividade da água, ou seja, a eficiência do uso da água pela cultura é determinada, em parte fundamental, pela transpiração e esta mediada pelas características da cultura e pelo clima da região.

Buscou-se, portanto constituir um modelo de simulação dinâmica para analisar o efeito da mudança climática/variabilidade climática, fundamentada principalmente nas concentrações futuras de CO₂ e sua influência no parâmetro produtividade da água da laranjeira Natal. Nesta etapa estão os resultados e também as discussões oriundas da aplicação do modelo que foi desenvolvido.

Fez-se uso da Dinâmica de Sistemas que como foi esclarecido em algum momento é uma ferramenta que auxilia no conhecimento da situação existente e seu possível futuro, permite visualizar o comportamento do sistema a curto, médio e longo prazo. No decorrer do processo de simulações e avaliação do sistema modelado utilizou-se dados de rendimentos da laranjeira Natal, referentes ao período compreendido entre 2002 à 2009, obtidos em campo, para este mesmo período foram obtidas todas as variáveis envolvidas na formação desses rendimentos e incluídas no sistema desenvolvido, o CO₂, as condições climáticas do então período, a partir de 2010, os quais são oriundos de fontes literárias, de órgãos que projetaram, por exemplo, as concentrações futuras de CO₂ na atmosfera, assim como as condições ambientais que condicionam a formação do parâmetro produtividade da água e que estão aderidas ao sistemas modelado.

6.2 Etapa de verificação, simulação e aplicação do modelo desenvolvido

O modelo desenvolvido nesta pesquisa foi utilizado para estimar quantas gramas ou Kg de biomassa da laranjeira Natal serão produzidos nos anos futuros por mm de água transpirada, mediante as concentrações de CO₂ fornecidas pelo IPCC, sendo estes estruturados para realizar essa estimativa em duas condições de execução: irrigada e não irrigada. Por perceber quais seriam os fatores que imprimem maior interferência nos resultados durante o processo de verificação, construíram-se 18 diferentes cenários para simulação embasados nessas variáveis, para avaliar o comportamento do parâmetro produtividade da água.

Ao longo do desenvolvimento se identifica aqueles elementos que são chave, e que podem servir como ponto de apoio para a avaliação e melhoria do sistema modelado. A metodologia da Dinâmica de Sistemas permite integrar em um só modelo, diferentes perspectivas do comportamento do parâmetro produtividade da água. Nas simulações modificou-se a temperatura e as concentrações de CO₂. O modelo estruturado dentro do ambiente STELLA compreende uma série de ícones interativos, tais ícones contêm parâmetros que representam desde características da cultura como do ambiente, que condiciona a formação do parâmetro produtividade da água, ou seja, a eficiência do uso da água pela laranjeira Natal. O STELLA constitui-se de uma interface amigável e dessa forma, torna-se fácil a experimentação, avaliação e execução de cenários utilizando o sistema modelado.

As Figuras 8 e 9 são saídas gráficas geradas no ambiente STELLA no momento das simulações, ilustram um dos cenários estruturados para a quantificação do parâmetro produtividade da água, neste caso, a concentração de CO₂ vai de 387-594 ppm de 2010 à 2100, caracterizada como condição sustentável de desenvolvimento, o qual propõe, além de reduzidas emissões, a diminuição da concentração atual CO₂ na atmosfera, na temperatura ar equivalente à 25°C, na condição irrigada. Observa-se analisando a Figura 8 que todos os parâmetros produtividade da água terão aumento gradativo nesta temperatura até 2100, ou seja, os resultados determinam aumento da eficiência do uso da água pela laranjeira Natal na condição estabelecida no cenário A.

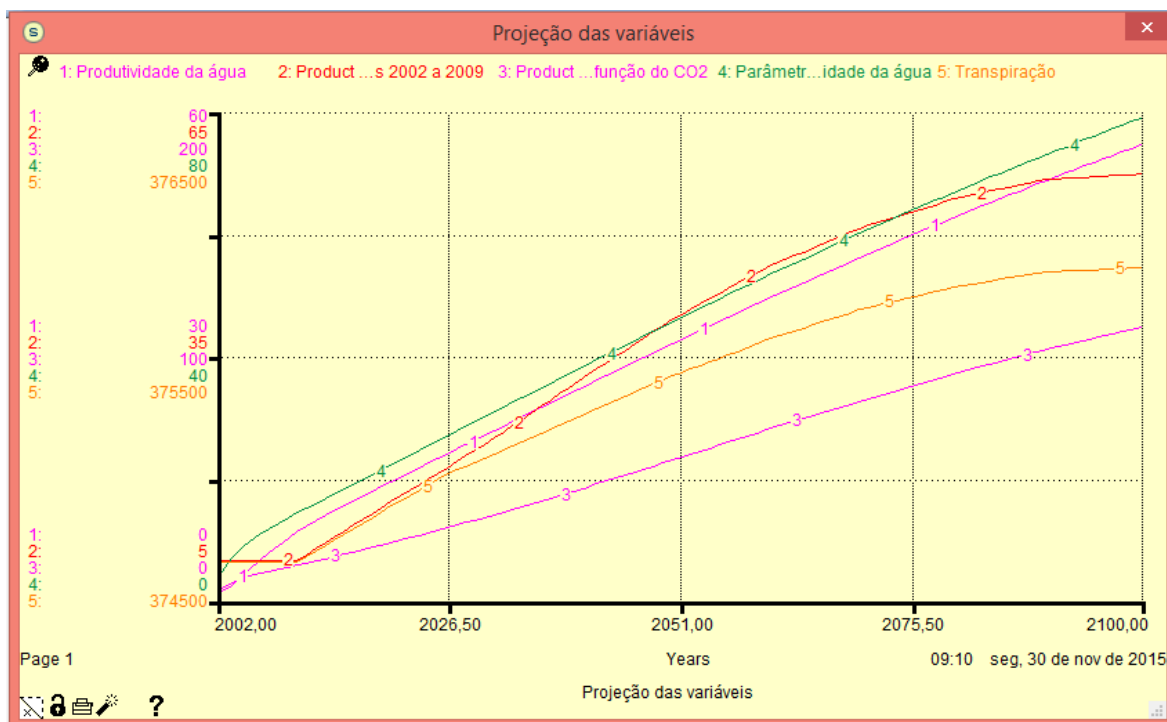


Figura 8 - Resultados simulados pelo modelo desenvolvido com temperatura média do ar igual à 25°C: 1- Produtividade da água (envolvendo todas as variáveis constituintes do modelo), 2- Produtividade da água (Parâmetro produtividade da água obtido com os dados reais fornecidos pela Citrosuco), 3- Produtividade da água (Parâmetro produtividade da água em função apenas do CO₂), 4- Parâmetro produtividade da água em função da transpiração, 5- Transpiração.

A Figura 9 apresenta a quantificação do parâmetro produtividade da água de acordo as variáveis envolvidas, neste caso, a concentração de CO₂ de 387-594 ppm, déficit no período de brotação, lâmina média de irrigação que se estende para todo o período estudado, lâmina total, que equivale à soma da precipitação mais a lâmina de irrigação 2010 à 2100.

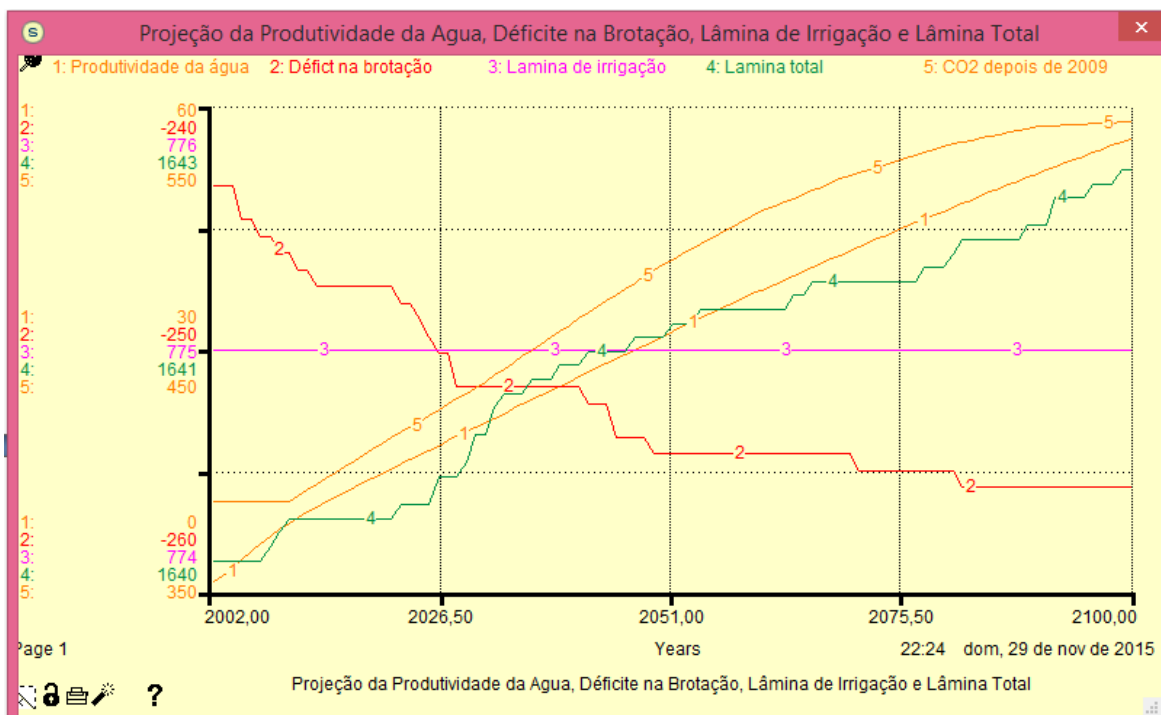


Figura 9 - Resultados simulados pelo modelo desenvolvido com temperatura média do ar igual à 25°C: 1- Produtividade da água (envolvendo todas as variáveis constituintes do modelo), 2- Concentrações futuras (SUST) de CO₂ na atmosfera projetadas pelo IPCC, 3- Déficit hídrico na brotação baseado no estudo realizado por Marengo (2006a), 4- Lâmina total equivalente à Precipitação mais irrigação, 5- Lâmina de irrigação, média dos dados disponibilizados pela Citrosuco).

O processo de simulação do modelo compreende diferentes cenários para a determinação do parâmetro produtividade da água e antes da apresentação dos resultados faz-se necessário esclarecimento da composição dos cenários que foram simulados. Os cenários desenvolvidos compreenderam:

- 1) Duas condições de cultivo da laranjeira Natal: irrigada e não irrigada;
- 2) Três concentrações de CO₂ na atmosfera (SUST, MIN e MAX), projetados pelo IPCC;
- 3) Três temperaturas 25°C, 30°C e 40°C.

As especificações para o processo de simulação foram: a componente temporal, a passagem de tempo escolhida e o método de integração selecionado para a então simulação do modelo:

- a) Componente temporal: esta foi estabelecida mediante as concentrações de CO₂ na atmosfera fornecidas pelo IPCC (2014) e desta forma foram executados 90 cálculos anuais, desde 2010 a 2100;

- b) Passagem do tempo dentro do modelo: este se refere à passagem do tempo que é de uma unidade, aqui estabelecido como um ano agrícola; e
- c) Método de integração para a simulação do modelo: ao usar o STELLA o modelador tem a possibilidade de escolher que método de integração será utilizado para calcular o sistema de equações que são usadas. Dentre os métodos disponíveis no sistema foi escolhido o método de Euler, o qual é frequentemente utilizado e se caracteriza por calcular o valor atual do estoque, ou seja, do BiomassaCO₂ nas duas situações, irrigada e não irrigada, a partir do valor anterior BiomassaCO₂ (t-dt) mais a taxa que estabelece a biomassa (txBiomassa*dt), que é quanto variou no intervalo de tempo dt, correspondente a uma integração da taxa de variação (STELLA, 2001).

No Quadro 1 estão os dados de entrada para a simulação do modelo desenvolvido.

Quadro 1- Características da composição para uma execução do modelo desenvolvido

Variáveis	Características
Assimilação anual de CO ₂ em função da temperatura do ar (decimal)	Três temperaturas 25°C, 30°C e 40°C, as quais corresponderam respectivamente à: 0,2; 0,1 e 0,4.
Precipitação (mm)	Média total, obtida partir dos dados de 2002 à 2009, valor igual à 865,00 mm e assumindo-se tendência comportamental estabelecida por Marengo (2006a), com aumento total de 2 mm até 2100.
Déficit Hídrico (mm)	Média total do déficit (57,76 mm), adquirido realizando o cálculo do balanço hídrico no período em que foram obtidos os rendimentos (2002 à 2009). Por perceber grande oscilação no déficit, assumiu-se para realizar as simulações, valor inicial em 2010 igual à 54 mm com aumento gradativo até 74 mm de déficit hídrico em 2100, esta variável pode ser considerada semi empírica, pois a tendência de aumento considerada na presente pesquisa é superior a determinada por Marengo (2006a).
Resistência estomática (decimal)	0,23 (MACHADO et al., 2005).
Volume de copa (decimal)	1,0 na condição irrigada e 0,59 na condição não irrigada (ROMERO et al., 2006)
Lâmina de irrigação	Média total, obtida partir dos dados de irrigação fornecidos pela empresa de 2002 à 2009, 775,00 mm
CO ₂ (ppm)	Três concentrações de CO ₂ na atmosfera (SUST, MIN e MAX), projetados pelo IPCC.
Ponto de inflexão	600 ppm redução de 50% da carboxilação, parâmetro estabelecido a partir de revisão dos estudos de Pinto, Assad e Zullo (2004), Streck e Alberto (2006), Streck (2005) Machado et al. (2005) e Amthor (2001).

No QUADRO 2 estão apresentadas as características dos 9 cenários da condição irrigada, e os 9 cenários na situação não irrigada. Os resultados obtidos na simulação de cada um deles desde 2010 até 2100 estão apresentados no QUADRO 2.

Quadro 2 - Cenários propostos e avaliados no estudo

Cenários	Descrição dos cenários na área não irrigada
A	Temperatura 25°C, CO ₂ na atmosfera Sustentável (387-544) ppm
B	Temperatura 30°C, CO ₂ na atmosfera Sustentável (387-544) ppm
C	Temperatura 40°C, CO ₂ na atmosfera Sustentável (387-544) ppm
D	Temperatura 25°C, CO ₂ na atmosfera Máxima (413-1142) ppm
E	Temperatura 30°C, CO ₂ na atmosfera Máxima (413-1142) ppm
F	Temperatura 40°C, CO ₂ na atmosfera Máxima (413-1142) ppm
G	Temperatura 25°C, CO ₂ na atmosfera Mínima (413-794) ppm
H	Temperatura 30°C, CO ₂ na atmosfera Mínima (413-794) ppm
I	Temperatura 40°C, CO ₂ na atmosfera Mínima (413-794) ppm
Cenários	Descrição dos cenários na área irrigada
J	Temperatura 25°C, CO ₂ na atmosfera Sustentável (387-544) ppm
K	Temperatura 30°C, CO ₂ na atmosfera Sustentável (387-544) ppm
L	Temperatura 40°C, CO ₂ na atmosfera Sustentável (387-544) ppm
M	Temperatura 25°C, CO ₂ na atmosfera Máxima (413-1142) ppm
N	Temperatura 30°C, CO ₂ na atmosfera Máxima (413-1142) ppm
O	Temperatura 40°C, CO ₂ na atmosfera Máxima (413-1142) ppm
P	Temperatura 25°C, CO ₂ na atmosfera Mínima (413-794) ppm
Q	Temperatura 30°C, CO ₂ na atmosfera Mínima (413-794) ppm
R	Temperatura 40°C, CO ₂ na atmosfera Mínima (413-794) ppm

Todas as quantidades de CO₂ na atmosfera projetados pelo IPCC e utilizados neste estudo, Sustentável (SUST), Máxima (MAX) e Mínima (MIN), mostram elevação constante da concentração de CO₂ na atmosfera de 2010 à 2100 (SUST, 387-544 ppm; MAX, 413-1142ppm e as projeções futuras que indicam mínima concentração, em 2010 de 366ppm e 794ppm em 2100. Observa-se, de forma geral, em cada uma destas concentrações de CO₂ projetadas pelo IPCC e em ambas as situações de cultivo, irrigada e não irrigada, que os resultados obtidos com a simulação do modelo desenvolvido

evidenciam aumento no parâmetro produtividade da água sob as maiores concentração de CO₂. Essa observação já havia sido feita por Taiz e Zeiger (1991), os quais afirmaram que nas plantas, por ser o CO₂ o substrato primário para a fotossíntese, o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera proporciona aumento da taxa de crescimento, esses autores acrescentaram que em plantas de metabolismo C₃, no caso dos citros, são mais beneficiados sob maiores concentrações de CO₂ (QUADRO 3).

Na área irrigada, à qual está representada pelos cenários de J à R, o modelo desenvolvido apresenta valores maiores do parâmetro produtividade da água em todas as quantidades de CO₂ projetadas pelo IPCC e também nas taxas de redução da assimilação de CO₂ mediadas pela temperatura do ar, ao comparar com os resultados encontrados na área não irrigada, cenários A à I (QUADRO 3).

Ao fazer comparação entre os níveis de concentração de CO₂, (SUST, MIN e MAX), observa-se que as temperaturas 25 e 30°C e com o nível de concentração de CO₂ MAX, determinaram os maiores valores do parâmetro produtividade da água, obtidos com a simulação do modelo desenvolvido nas duas conduções, não irrigada, cenários A e B, D e E, G e H e irrigada, cenários J e K, M e N, P e Q. Na temperatura que corresponde à 40°C, a assimilação de CO₂ foi maior na maior concentração desse gás na atmosfera, o que pode ser verificado nos cenários C, F, I, L, O e R (Quadro 3).

O processo de execução do modelo no momento das simulações apresenta como resultado aumento gradativo dos valores do parâmetro produtividade da água. No entanto, observando o Quadro 3, percebe-se que a eficiência do uso da água é mais elevada na condição irrigada. Na condição não irrigada o maior valor foi determinado pelo cenário B, o qual determinou parâmetro produtividade da água igual a 27,69 g m⁻² mm⁻¹ no ano de 2100 e este tem as mesmas características do cenário K, que proporcionou parâmetro produtividade da água igual à 59,1 g m⁻² mm⁻¹, este último simulado na condição irrigada, deve-se mencionar que por maiores que sejam as concentrações desse gás na atmosfera, e que mesmo ocorrendo elevação dos valores do parâmetro produtividade da água com o crescente aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera, a assimilação só acontece até o limite característico de assimilação de cada espécie (MACHADO et al., 2005).

O modelo desenvolvido reúne as variáveis envolvidas no processo de formação do parâmetro produtividade da água da laranja Natal, buscando perceber

como fatores ambientais, temperatura do ar e concentrações de CO₂ afetarão o acúmulo de fitomassa e, portanto a eficiência do uso da água pela laranjeira ao longo do tempo. Deve-se mencionar que em ambas as situações de obtenção do parâmetro produtividade da água, a temperatura do ar correspondente a 30°C determinou os maiores valores de gramas de fitomassa por mm de água transpirada (QUADRO 3), apresentando 59,1 g m⁻² mm⁻¹ para 2100 sob a concentração máxima de CO₂ na atmosfera corresponde (cenário E no Quadro 3). Resultados similares foram encontrados por Machado et al. (2005) em que verificaram que as maiores taxas de assimilação de CO₂ nas laranjeira Valência, Murcote e Tahiti ocorreram entre 25 e 30°C, nas temperaturas do ar acima de 30°C, as três espécies apresentaram decréscimo na assimilação do CO₂. O resultado do estudo destes autores foi fundamental para a composição dos cenários da presente pesquisa, porque neste estudo eles observaram que nas temperaturas extremas 15 e 40°C, a condutância estomática é prejudicada, sendo bastante reduzida e proporcionando redução da taxa fotossintética. No decorrer da obtenção dos resultados foram feitas simulações nestas duas temperaturas atmosféricas e constatou-se redução de até 40% nas taxas de formação do parâmetro produtividade da água, evidenciando que o modelo desenvolvido é adequado à verificação das mudanças climáticas e suas influências na assimilação de CO₂.

Nos cenários elaborados com a condição não irrigada, o modelo desenvolvido apresentou maiores valores para o parâmetro produtividade da água, em 2100 também no nível Máximo de concentração de CO₂ na atmosfera. O parâmetro produtividade da água foi equivalente à 27,69 g m⁻² mm⁻¹ no cenário B (Quadro 3).

No trabalho realizado por Martin et al. (1995) os autores relataram respostas de plantas de limão condicionadas à elevadas concentrações de CO₂ e estas combinadas com baixas e altas temperaturas, observaram que quando altas concentrações de CO₂ foram combinadas com elevada temperatura do ar, dia/noite igual à 42/32°C, promoveu crescimento equivalente à 87%, já quando as mesmas concentrações de CO₂ foram combinadas à temperatura dia/noite, igual à 29/21°C, o crescimento foi apenas de 21%.

Quadro 3 - Parâmetro produtividade da água da laranjeira Natal obtidos em cada cenário

Parâmetro produtividade da água da laranjeira Natal na condição Não Irrigada WP g m ⁻² mm ⁻¹											
Cenários	CO ₂	Temperatura °C	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
A	SUST	25°C	10,92	13,71	15,87	17,66	19,2	20,57	21,82	22,97	23,95
B		30°C	12,7	15,91	18,4	20,46	22,23	23,8	25,23	26,56	27,69
C		40°C	10,1	12,74	14,77	16,46	17,91	19,2	20,38	21,47	22,39
D	MAX	25°C	10,57	13,19	15,14	8,34	8,95	9,46	9,88	10,23	10,51
E		30°C	12,3	15,32	17,55	9,65	10,36	10,94	11,42	11,83	12,15
F		40°C	9,77	12,25	14,08	7,76	8,34	8,81	9,21	9,54	9,8
G	MIN	25°C	10,39	13,1	15,18	16,88	18,28	19,46	10,23	10,66	10,99
H		30°C	13,05	16,36	18,9	20,97	22,7	24,14	12,68	13,21	13,62
I		40°C	10,06	12,86	14,98	16,7	18,12	19,32	10,17	10,6	10,94
Parâmetro produtividade da água da laranjeira Natal na condição Irrigada WP g m ⁻² mm ⁻¹											
Cenários	CO ₂	Temperatura °C	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
J	SUST	25°C	14,56	20,31	25,98	31,57	37	42,19	47,1	51,73	55,65
K		30°C	15,55	21,64	27,64	33,56	39,32	44,82	50,03	54,94	59,1
L		40°C	12,38	17,37	22,29	27,15	31,86	36,36	40,62	44,63	48,04
M	MAX	25°C	18,95	25,8	32,71	19,83	23,29	26,7	30,03	33,25	36,08
N		30°C	20,32	27,57	34,88	21,12	24,79	28,4	31,93	35,35	38,35
O		40°C	16,08	22,07	28,09	17,07	20,07	23,02	25,91	28,7	31,15
P	MIN	25°C	9,58	14,83	20,65	26,75	33,03	39,41	22,91	26,09	28,88
Q		30°C	10,19	15,75	21,93	28,4	35,06	41,83	24,32	27,69	30,65
R		40°C	8,14	12,68	17,73	23,01	28,44	33,96	19,76	22,51	24,93

Concentrações de CO₂ projetadas pelo IPCC: SUST - Sustentável (387-544) ppm, MAX - Máxima (413-1142) ppm, MIN - Mínima (413-794) ppm; WP Parâmetro produtividade da água (g m⁻² mm⁻¹).

Os valores do parâmetro produtividade da água obtidos nas simulações do modelo desenvolvido a partir de 2010 variaram de 8,14 à 59,1 g m⁻² mm⁻¹ Quadro 3 (cenários R, temperatura de 40°C e cenário K, temperatura do ar equivalente à 30°C). Vale lembrar que a base fundamental para a estruturação do modelo desenvolvido nesta pesquisa foi o AquaCrop, modelo criado pela FAO, que estima a produtividade das culturas em relação ao suprimento de água e manejo agrônômico, os resultados oriundos de pesquisas realizadas pelo grupo de pesquisadores que idealizaram o AquaCrop afirmam que o intervalo de abrangência do parâmetro produtividade de plantas C₃ herbáceas é de 15 a 20 g m⁻² mm⁻¹ (RAES et al., 2009; STEDUTO et al. 2009; RAES et al., 2012).

De acordo com a observação feita no parágrafo anterior e analisando a Figura 10 percebe-se que os cenários constituídos com a temperatura do ar equivalente à 40°C irão proporcionar menor eficiência de carboxilação, traduzidas nestes resultados como parâmetro produtividade da água. Llyod e Farquhar (2008) em seu estudo sobre efeitos do aumento da temperatura e CO₂ sobre a fisiologia das florestas tropicais explicam que mesmo apresentando algumas vantagens, a elevação do CO₂ na atmosfera sob altas temperaturas do ar não serão assimiladas, e a justificativa segundo estes autores é que como a demanda evaporativa aumenta, pode levar ao fechamento dos estômatos, um mecanismo das plantas para reduzir as perdas de água pela transpiração.

Outros estudos utilizando a modelagem para prever o impacto das mudanças climáticas nos rendimentos agrícolas também evidenciam que para os níveis elevados de CO₂ na atmosfera devido ao aumento simultâneo da temperatura trarão declínio nos rendimentos, como exemplo o trabalho realizado por Krishnan et al. (2007), os quais verificaram, de acordo às simulações do seu modelo, a redução na produção de arroz por volta de 56% se a concentração de CO₂ for equivalente à 700ppm e a temperatura do ar tiver um aumento de 4°C. ONU (2013) também fez uso da base conceitual dos programas da FAO, CropWat e AquaCrop, para gerar equações buscando prever rendimentos de batata e milho mediados pela variabilidade e/ou as mudanças climáticas na Colômbia, especificamente, rendimentos influenciados por variações na temperatura do ar. Neste estudo os autores concluíram que além de ser favorável a utilização da modelagem para prever rendimentos, é possível modelar a resposta fotossintética de cada cultura mediada pelas condições ambientais.

Os resultados das simulações para os anos futuros a partir de 2020 à 2100 evidenciam aumento consecutivo na quantidade de g de fitomassa da laranjeira

Natal por mm de água transpirada com o aumento de CO₂ na atmosfera. De fato é este o principal resultado alcançado pelo modelo desenvolvido, no entanto, em trabalhos publicados anteriormente por Medina, Machado e Pinto (1998), Medina, Machado e Gomes (1999) e Machado et al. (2005), os autores afirmaram que se a elevação das taxas do CO₂ ocorrerem junto com a elevação do déficit de pressão de vapor, tanto a taxa de transpiração quanto a assimilação de CO₂ serão prejudicadas, diminuindo o crescimento das plantas e, portanto, o parâmetro produtividade da água.

São vários os fatores que interferem no processo de formação da biomassa das culturas, de modo que se buscou aderir ao sistema modelado todas as variáveis que tivessem possibilidade de serem quantificadas. O objetivo era que os resultados cercassem a realidade. De modo geral os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido, mostram que a elevação das concentrações de CO₂ na atmosfera combinadas com temperaturas do ar que geralmente ocorrem em ambiente natural, promoverão eficiência do uso água pela laranjeira. Outros fatores que também imprimem importância foram adicionados, como a deficiência hídrica no solo, e verificou-se que a redução nos valores do parâmetro produtividade da água na condição não irrigada será consideravelmente inferior a situação irrigada em 2100.

Outros trabalhos também relataram a queda da taxa de fotossíntese em laranjeiras em função da queda no teor de umidade do solo (SYVERTSEN, LLOYD (1994; BRAKKE, ALLEN 1995; MEDINA, MACHADO, PINTO 1998; MEDINA, MACHADO, GOMES 1999), tais autores afirmaram que a queda da fotossíntese é mais intensa quando a quantidade de água disponível no solo diminui, Medina, Machado e Pinto (1998) esclareceram que sob deficiência hídrica do solo ocorre o fechamento dos estômatos, reduzindo a perda de vapor d'água para a atmosfera reduzindo a assimilação de CO₂ e portanto a produtividade.

Observa-se ainda na Figura 10 que serão as temperaturas do ar equivalentes a 25°C e 30°C que irão promover nas décadas futuras maiores taxas de assimilação de CO₂; Magalhães Filho et al. (2009) estudando a influência da variação de temperatura no substrato sob as taxas de fotossíntese na laranjeira Valência também verificaram que o aumento da temperatura do substrato de 10°C para 20°C causou aumento da assimilação de CO₂, nesse estudo os autores observaram que as plantas cultivadas na temperatura do substrato equivalente à 10°C apresentavam decréscimo de até 23% na

eficiência máxima de carboxilação em comparação às plantas cultivadas em 20°C e 30°C, as quais segundo os autores não diferiram entre si quanto a carboxilação.

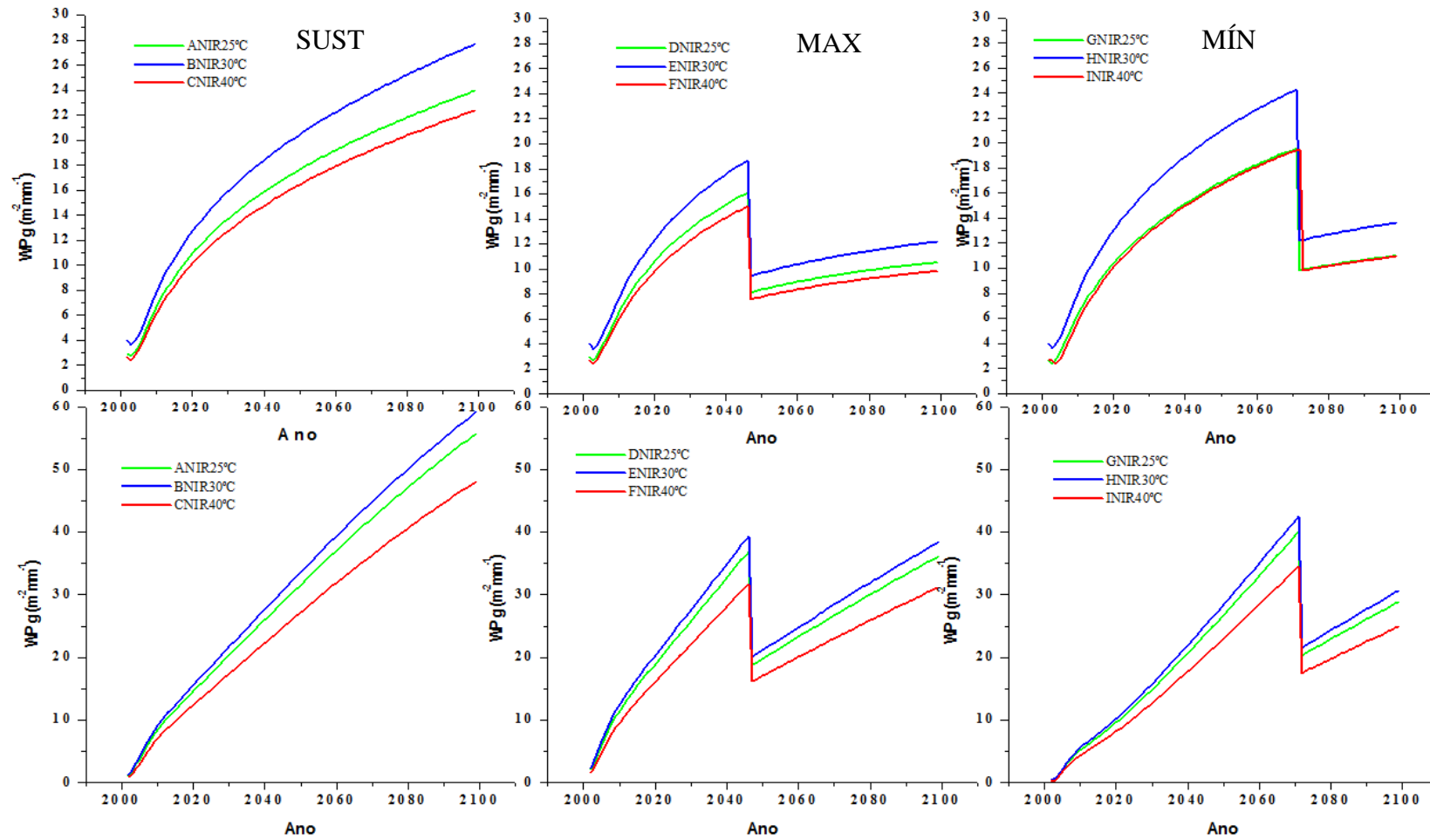


Figura 10 - Parâmetro produtividade da água obtido em cada um dos cenários estudados na condição não irrigada nas temperaturas 25°C, 30°C e 40°C, cenários de A à I. Parâmetro produtividade da água obtido em cada um dos cenários estudados na condição irrigada nas temperaturas 25°C, 30°C e 40°C cenários de J à R.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em sua estrutura o modelo comporta parâmetros que são fundamentais no resultado e que podem servir como fonte de adaptação do modelo desenvolvido para outras situações, como por exemplo a variável volume de copa que no decorrer das simulações não foi alterada, porém sabe-se que ano a ano as culturas perenes, e principalmente as laranjeiras têm sua conformação de copa reduzida ou aumentada mediante vários fatores.

Tem-se examinado 18 cenários os quais compreendem aumentos futuros nas concentrações de CO₂ combinados com variações na temperatura do ar. Os cenários formulados para o exemplo de aplicação do modelo de verificação do crescimento da laranjeira Natal pelas alterações climáticas tem abertura para ser utilizado em outras culturas arbóreas e em outras localidades.

Portanto a presente pesquisa pode ser tida como ponto de partida para estudos futuros sobre o impacto das mudanças climáticas fundamentadas em outros fatores que possam ser quantificados e aderidos ao modelo além do CO₂, como a densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos, o déficit de pressão de vapor e suas interferências na carboxilação e, mas especificamente na eficiência do uso da água na citricultura no estado de São Paulo e em outras localidades do país.

8. CONCLUSÕES

Mediante os resultados conclui-se que:

1. O modelo desenvolvido tem a vantagem de apresentar informação quantitativa, permite analisar cenários constituídos com informações passíveis de serem reais no que concerne a temperatura do ar e as concentrações de CO₂. O modelo serve além do mais, como ferramenta de análise do impacto das diferentes combinações originadas nas alterações no clima, embasados no CO₂ e na temperatura do ar, possibilitando visualizar no futuro quando se realiza a simulação com elevadas concentrações de CO₂ na atmosfera qual será a eficiência do uso da água mediante essas concentrações, assim como a interferência da temperatura do ar em conjunto com os demais parâmetros fundamentais do modelo.

2. O modelo desenvolvido é apto para determinar a influência do clima, principalmente das futuras concentrações de CO₂ na atmosfera e possíveis elevações, ou abaixamento da temperatura do ar no comportamento do parâmetro produtividade da água da laranjeira Natal, o mesmo pode ser utilizado em qualquer localidade com a disponibilidade de dados para o propósito ao qual o mesmo foi desenvolvido.

3. A elevação das concentrações de CO₂ na atmosfera influenciará positivamente na assimilação e, portanto, aumento de g por mm de água transpirada da laranjeira, no entanto, esse efeito positivo poderá ser mascarado por outros efeitos de tal elevação, vinculados principalmente à temperatura do ar e ao déficit de pressão de vapor.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AINSWORTH E. A.; LONG S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. **New Phytologist**, Oxford, v. 165, p. 351–372, 2005.

ALLEN, L.H., BAKER, J.T., BOOTE, K.J. The CO₂ fertilization effect: higher carbohydrate production and retention as biomass and seed yield. In: Bazzaz, F., Sombroek, W. (Eds.), *Global Climate Change and Agricultural Production*. FAO, Rome and John Wiley e Sons, Chichester, **England**, p. 65–100, 1996.

ALLEN, L. H.; VU, J. C. V. Carbon dioxide and high temperature effects on growth of young orange trees in a humid, subtropical environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 149, n. 5, p. 820–830, maio 2009.

AMTHOR, J. S. Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 73, p. 1-34, 2001.

ANDERSON, V.; JONHSON, **Systems thinking basics: from concepts to causal loops**. Cambridge: Pegasus, 1997. 132 p.

ANGELOCCI, L. R. Necessidade hídrica de frutíferas. In: SEMINÁRIO SOBRE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE FRUTÍFERAS, Pelotas. Resumos Expandidos. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2000. p.6-7. (Embrapa. Clima Temperado. Documentos 68).

ARACIL, J. **Introducción a la dinámica de sistemas**. Madrid: LIANZA Universidad, 1986. 96 p.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. **Aquecimento global e cenários futuros da agricultura brasileira**. São Paulo: Embrapa Agropecuária – CEPAGRI/UNICAMP, 2008. 84 p.

- BARBOSA, F. C.; TEIXEIRA, A. S.; GONDIM, R. S. Espacialização da evapotranspiração de referência e precipitação efetiva para estimativa das necessidades de irrigação na região do Baixo Jaguaribe-CE. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.36, n.1, p.24-33, 2005.
- BARLAS, Y. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. **System Dynamics Review**, Cambridge, n. 12, p. 183-210, 1996.
- BARROS, V. et al. Função de produção da cultura do melão para níveis de água e adubação nitrogenada no Vale do Curu-CE. **Irriga**, Botucatu, v. 7, n. 2, p. 98-105, 2002.
- BATES, B. C. et al. (Ed.). *Climate Change and Water: technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC Secretariat, 2008. 210 p.
- BEDDINGTON, J. et al. **Achieving food security in the face of climate change: summary for policy makers from the Commission on Sustainable Agriculture and Climate Change**. Copenhagen: Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security, 2011. Disponível em: <www.ccafs.cgiar.org/commission>. Acesso em: 22 abr. 2013.
- BIDERMAN, R. (OBSERVATÓRIO DO CLIMA). *Diretrizes para Formulação de Políticas Públicas em Mudanças Climáticas no Brasil*. São Paulo/SP. Junho, 2009. Disponível em: <http://www.ipam.org.br/biblioteca/livro/Diretrizes-para-Formulacao-de-Politicas-Publicas-em-Mudancas-Climaticas-no-Brasil/374>>. Acesso em: 12 abril 2014.
- BITRI, M.; GRAZHDANI, S.; AHMETI, A. Validation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Potato Production in Environmental Condition of Korça Zone, South-eastern Albania. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, Entebbe, v. 3, n. 5, p. 1526-1548, 2014.
- BRAKKE, M.; ALLEN JR, L. H. Gas exchange of Citrus seedlings at different temperatures, vapor-pressure deficits, and soil water content. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 120. p. 497-504, 1995.
- BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira laranja: safra 2013/2014**. Brasília, DF, 2013. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_12_12_09_53_25_boletim_de_laranja.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2015.
- BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira laranja: safra 2011/2012**. Brasília, DF, 2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_09_12_17_44_13_arquivo_edit_avel_capa_laranja.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2015.
- BOMBARDI, R. J.; CARVALHO, L. M. V. Variabilidade do regime de monções sobre o Brasil: o clima presente e projeções para um cenário com 2xCO₂ usando o modelo MIROC. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 23, p. 58-72, 2008.

CAPRA, F. **The web of life**. New York: Anchor, 1996. 347 p.
CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA – CEPAGRI. Altair. Disponível em:
<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_011.html> . Acesso em: abr. 2015.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA – CEPAGRI. Onda verde. Disponível em:
<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_386.html>. Acesso em: abr. 2015.

CLIMATE change: A threat to global development: acting now to safeguard the future. Born: Economica Verlag, 1992.

COX, P. et al. Increase risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution. **Nature**, London, v. 453, p. 212-216, 2008.

DECONTO, J. G. (Coord.). **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa, 2008.

DELGADO, A. R. S. et al. Modelagem matemática para otimização da produção e renda de melão e melancia em função de lâminas de água e doses de nitrogênio. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 1-9, 2010.

DONADIO, L. C.; FIGUEIREDO, J. O.; PIO, R. M. **Variedades cítricas brasileiras**. Jaboticabal: FUNEP, 1995. 228p.

DONADIO, L. C.; STUCHI, S. E.; POZZAN, M.; SEMPIONATO, O. R. **Novos resultados de pesquisas citrícolas na EECB**. Jaboticabal: Funep, v.1, 43p. 2000.

DOORENBOS, I.; KASSAN, A. H. **Yield response to water**. Roma: FAO, 1979. 193 p. (FAO. Irrigation Drainage Paper, 33).

DOORENBOS, I.; PRUITT, W. O. Las necesidades de agua de los cultivos. **Estudio FAO Riego y Drenaje**, Roma, n. 24, 1977. 144p. (FAO. Botelin Irrigation y Drenaje, 24).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1984.

DOWNTON, W. J. S.; GRANT, W. J. R.; LOVEYS, B. R. Diurnal changes in the photosynthesis of field-grown grapevines. **New Phytologist**, Cambridge. v. 105, p. 71-80, 1987.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3ed. Brasília, 2013. 353p.

FAGUNDES, J. D. et al. Aquecimento global: efeitos no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade da batata. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n.6 p. 1464-1472, 2010.

FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; OWEIS, T. Y. Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 3. 2009.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS - FAO. The State of Food Insecurity in the World. Roma, 2010. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/013/i1683e/i1683e.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2015

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS - FAO. Production Yearbook. Roma, 2014. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. Acesso em: 03 out. 2014.

FORD, A. **Modeling the environment: An Introduction to System Dynamics: Models of Environmental Systems**. Washington, DC: Island Press, 1999. 401 p.

FORRESTER, J. W. **Industrial Dynamics**. Portland: Productivity Press, 1961. 464p.

FRIZZONE, J. A.; SOARES A. J. Planejamento de Irrigação. Análise de Decisão de Investimentos. Brasília: EIT. 2005. 627p.

FUHRER, J. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global change. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 97, p. 1-20, 2003.

FUHRER, J.; GREGORY, P. J. Climate change impact and adaptation in agricultural systems: introduction. In: _____. Climate change impact and adaptation in agricultural systems. Wallingford: CABInternational, 2014. p. 1-6.

GOLDSCHMIDT, E. E. Carbohydrate supply as a critical factor for citrus fruit development and productivity. **HortScience**, Alexandria, v. 34, p. 1020-1024, 1999.

GOLDSCHMIDT, E.E.; KOCH, K.E. Citrus. In: ZAMSKI, E.; SCHAFFER, A.A. (Ed.) **Photoassimilate distribution in plants and crops**. Source-sink relationships. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 797-823.

GONDIM, T. M. S.; CAVALCANTE, L. F.; BELTRAO, N. E. M. Aquecimento global: salinidade e consequências no comportamento vegetal. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 37-54, 2010.

GONDIM, R. S. et al. Impactos das mudanças climáticas na demanda de irrigação da bananeira na Bacia do Jaguaribe Impact of climate change on irrigation requirement of banana in Jaguaribe river Basin, Ceará, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 594-600, 2011.

GRAÇA, J. et al. Porta-enxertos para laranja 'Natal' no norte fluminense. **LARANJA**, Cordeirópolis, v.22, n.2, p. 449-456, 2001.

GREENBERG, M. CRENSON, M.; CRISSEY, B. **Models in the policy process**. New York: Russell Sage Foundation, 1976.

GRIFFITH, J. J. Recuperar áreas degradadas é zelar pelas futuras gerações. **Informe agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22 n. 210, p. 1-2, 2001.

GRIFFITH, J. J.; TOY, T. J. Linking physical and social systems for improving disturbedland reclamation. In: NATIONAL OF THE AMERICAN SOCIETY OF MINING AND RECLAMATION, 2005, Breckemride. **Proceedings...** Montavesta; Lexington: ASMR, 2005. p. 19-23.

GUNTER, P. **Upsizing**: como gerar mais renda, criar mais postos de trabalho e eliminar a poluição. Porto Alegre: Fundação Zeri Brasil; L&PM, 1999. 356 p.

HABERMANN, G. et al. CO₂ assimilation, photosynthetic light response curves, and water relations of 'Pêra' sweet orange plants infected with *Xylella fastidiosa*. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Rio de Janeiro, v.15, p.79-87, 2003.

HENG, L. K. et al. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 3, p.488-498, 2009.

HEXEM, R.W.; HEADY, E.O. **Water production functions for irrigated agriculture**. Ames: Iowa State University Press, 1978, 215 p.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, n. 1-2, p. 137-157, 2000.

HSIAO T. C. et al. AquaCrop: The FAO crop model to simulate yield response to water. III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, Madison, 101: p. 448-459, 2009.

IDSO, S. B.; KIMBALL, B. A. Downward Regulation of Photosynthesis and Growth at High CO₂ levels. No Evidence for Either Phenomenon in Three-Year Study of Sour Orange Trees. **Plant Physiology**, Rockville, v. 96, p. 990-992, 1991.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGES - IPCC, 1990. **Climate Change**: the IPCC scientific assessment: World meteorological organization united nations environment programme. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 1993. Disponível em < https://www.ipcc.ch/ipccreports/far/wg_I/ipcc_far_wg_I_full_report.pdf > . Acesso em: 19 dez 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGES - IPCC, 1993. Report of the ninth session: of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 1993. Disponível em <<https://www.ipcc.ch/meetings/session09/ninth-session-report.pdf>> . Acesso em: 19 dez 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGES - IPCC, 1999. IPCC Special report: aviation and the global atmosphere: Summary for Policymakers. Geneva:

Intergovernmental Panel on Climate Changes, 2000. Disponível em:
<<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation/>>. Acesso em: 20 jan 2015.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGES - IPCC, 2001. **Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability**. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Changes. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acessado em: 12 abril 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGES – IPCC, 2007. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 976 p. Disponível em:
<https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4_wg2_full_report.pdf> Acesso em: 20 out. 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGES - IPCC, 2013: **The Physical Science Basis: Summary for Policymakers**. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013. 104 p. Disponível em:
<https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGIAR5_SPM_brochure_en.pdf>. Acesso em: 20 jan 2015.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGES - IPCC, 2014: **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [CORE WRITING TEAM, R.K. PACHAURI AND L.A. MEYER (Ed.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2014.

KAUFFMAN, M. R.; DRAPER, L. **Systems 1: An Introduction to Systems Thinking**, Minneapolis, MN: S.A. Carlton, Publishers, 1980. 41 p.

KAUFMANN, M. R.; LEVY, Y. Stomatal response of citrus jambhiri water stress and humidity. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 38, n. 2, p. 1005-108, 1976.

KHAIRI, M. M. A.; HALL, A. E. Temperature and humidity effects on net photosynthesis and transpiration of citrus. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 36, p. 29-34, 1976a.

KHAIRI, M. M. A.; HALL, A. E. Comparative studies of net photosynthesis and transpiration of some citrus species and relatives **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 36, p. 35-39, 1976b.

KIMBALL, B. A.; IDSO, S. B. Increasing atmospheric CO₂: effects on crop yield, water use and climate. **Agriculture and Water Management**, Amsterdam, v.7, p.55-72, 1983.

KIMBALL, B. A.; KOBAYASHI, K.; BINDI, M. Responses of agricultural crops to free air CO₂ enrichment. **Advances in Agronomy**. Maryland Heights, v. 77, p. 293–368, 2002.

- KOO, R. C. J. **Evapotranspiration and soil moisture determination as guides to citrus irrigation**. Alachua: Florida Agricultural Experimental Station, 1958. 232p. (Annual Report).
- KRIEDEMANN, P. E.; BARRS, H.D. Citrus orchards. In: KOZLOWSKI, T.T. Water deficits and plant growth. VI. **Woody plant communities**. New York, Academic Press, 1981. p. 325-418.
- KRIEDEMANN, P.E. Photosynthesis and transpiration as a function of gaseous diffusive resistances in orange leaves. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.24, p.218-225, 1971.
- KRISHNAN, P. et al. Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as elevated by crop simulation studies. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 122, p. 233-242, 2007.
- LEDO, A. S. et al. Porta-enxertos para laranjeiras-doces (*Citrus sinenses* (L.) OSB.), em Rio Branco, Acre. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 7, p. 1211-1216, 1999.
- LEVY, Y.; BIELORAI, H.; SHALHEVET, J. Long-term effects of different irrigation regimes on grapefruit tree development and yield. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v.103, n.5, p.680-3, 1978.
- LLOYD, J.; FARQUHAR; G. D. Effects of rising temperatures and [CO₂] on the physiology of tropical forest trees. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1811-1817, 2008.
- MACHADO, E. C.; MEDINA, C. L.; GOMES, M. M. A. Teor de água no substrato de crescimento e fotossíntese em laranjeira 'Valência'. **Bragantia**, Campinas, v.58, n.2, p.217-26, 1999.
- MACHADO, E.C. et al. Variação sazonal da fotossíntese, condutância estomática e potencial da água na folha de laranjeira 'Valência'. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, p. 53-58, 2002.
- MACHADO, E.C. et al. Respostas da fotossíntese de três espécies de citros a fatores ambientais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, p. 1161-1170, 2005.
- MAGALHÃES FILHO, et al. Variação da temperatura do substrato e fotossíntese em mudas de laranjeira 'Valência'. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.9, p.1118-1126, 2009.
- MANSFIELD, T. A. ; HETHERINGTON, A. M.; ATKINSON, C. J. Some current aspects of stomatal physiology. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 41 p.55-57, 1990.
- MARENCO, J. A. Mudanças climáticas globais e regionais: avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 16 n. 1 p. 01-18, 2001.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade** – caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006a. v.1, p.214.

MARENGO, J. A. Aquecimento global e as conseqüências das mudanças climáticas no Nordeste do Brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia, Instituto de Pesquisas espaciais. Aracaju: CPETEC/INPE. 2007a.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. Estudos Avançados, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 83-96, 200c. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v22n63/v22n63a06.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2014.

MARENGO, J. A.; DIAS, P. S. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. In: Rebouças, A. C.; Braga, B.; Tundisi, J. G. (Ed.) **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3. ed. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados da USP, Academia Brasileira de Ciências, 2006b. p.63-109.

MARENGO, J.A.; VALVERDE, E.M.C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4, CPTEC/INPE, **Revista Multiciência**, Campinas, São Paulo, Edição 8, Mudanças climáticas 2007b.

MARENGO, J.A, TOMASELLA, J., NOBRE, C. A., Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos. In: BICUDO, C.E.DEM.; TUNDISI, J.G.; SCHWENSTUH, M.C.B.. (Org.). **Águas do Brasil: Análises Estratégicas**, 2010. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010, p. 15-23.

MARENGO, J. A. et al. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, Boston, v.21, p.495-516, 2008a.

MARENGO, J. A. et al. Hydro-climatic: and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Biological Sciences**, London, v.21, p.1-6, 2008b.

MARENGO, J. A. et al. Relatório 5: **Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais**. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade (DCBio). **Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. São Paulo, 2007c.

MARIN, F. NASSIF, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: Fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 2, p. 232-239, 2013.

MARTIN, C.A.; STUTZ, J.C.; KIMBALL, B.A.; IDSO, S.B.; AKEY, D.H. Grow and topological changes of Citrus limon (L.) Burm. F. 'Eureka' in response to high temperatures and elevated atmospheric Carbon Dioxide. **Journal of the American Society of Horticultural Science**, Alexandria, v.120, n.6, p.1025-1031, 1995.

MANSUR, A. Eduardo Assad: "É impossível dizer quando a seca acabará". [S.l.]: Blog doPlaneta, 2015. Disponível em: <<http://epoca.globo.com/colunas-e-blogs/blog-do-planeta/noticia/2015/02/beduardo-assadb-e-impossivel-dizer-quando-seca-acabara.html>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

MATTOS JUNIOR, D. et al. Nutrient content of biomass components of Hamlin sweet orange trees. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 60, p. 155-160, 2003.

MEDINA, C.L.; MACHADO, E.C.; PINTO, J.M. Fotossíntese de laranja 'Valência' enxertada sobre quatro porta-enxertos e submetida à deficiência hídrica. **Bragantia**, Campinas, v.57, p.1-14, 1998.

MEDINA, C.L.; MACHADO, E.C.; GOMES, M.M.A. Condutância estomática, transpiração e fotossíntese em laranja 'Valência' sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v.11, n.1, p. 29 – 34, 1999.

MEDINA, C. L. et al. Photosynthetic response of citrus grown under reflective aluminized polypropylene shading nets. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 96, p. 115-125, 2002.

MEDINA, C. L. et al. Fisiologia dos citros. In: MATTOS JUNIOR, D.; NEGRI, J.D.; PIO, R.M.; POMPEU JUNIOR, J. **Citros**. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundag, 2005. p. 147-195.

MEEHL, G. A. et al. Global Climate Projections. In: SOLOMON, S. D. et al. (Ed.) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom, New York: Cambridge University Press, 2007.

MOLION, L. C. B. Aquecimento global: uma visão crítica. **Revista Brasileira de Climatologia**, Presidente Prudente, p. 07-23. 2008.

MOLION, L. C. B. Aquecimento global, manchas solares, El Niños e Oscilação Decadal do Pacífico. **Revista Climanalise**, Cachoeira Paulista, p. 01-05, 2005. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/Artigo_Aquecimento_0805.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2015.

MOLION, L. C. B. Desmistificando o Aquecimento Global. **Intergeo**, Cuiabá, v. 5, p. 13-20, 2007.

MONTOYA et al. Boletín Técnico nº 33. Modelo para simular la producción potencial del cultivo de café em Colombia. **Cenicafé**. 2009. p. 52.

MORAES, W. B. et al. Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, Chapadinha, v. 5, n. 2, p. 3-14, 2011.

MORISON, J. I. L. Intercellular CO₂ concentration and stomatal response to CO₂. In: ZEIGER, E.; COWAN, I. R.; FARQUHAR, G. D. (Ed.). **Stomatal function**. Redwood City: Stanford University Press, 1987. p. 229–251.

MORISON, J. I. L. Response of plants to CO₂ in water-limited conditions. **Vegetatio**, Dordrecht, v.104-105, n. 1, p. 193-209, 1993. Special Edition.

MORISON, J. I. L. Stomatal response to increased CO₂ concentration. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 49, p. 443-452, 1998.

MOTT, K.A. Do stomata respond to CO₂ concentration other than intercellular? **Plant Physiology**, Chichester, v.86, p.200-203, 1988.

NEVES, M. F. et al. **O retrato da citricultura brasileira**, São Paulo: CitrusBR, 2011. 138p.

ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G. **Sustentabilidade de los recursos hídricos en São Miguel do Anta, Minas Gerais: un enfoque de dinámica de sistemas**. Viçosa, MG: UFV, 2006. 104p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, 2006.

ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G. **Modelo de simulação dinâmica para valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. Piracicaba**. Piracicaba, SP: ESALQ-USP, 2010. 284p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” ESALQ-USP, Piracicaba, SP, 2010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS-ONU. Desarrollo de una función agroclimática para estimar la productividad de los cultivos agrícolas em Colombia. Santiago de Chile, 2013. (Médio Ambiente y desarrollo, 197).

ORTOLONI, A. A.; PEDRO JUNIOR, M. J. ALFONSI, R. R. Agroclimatologia e o cultivo dos citros. In: RODRIGUEZ, O. et. (Ed). **Citricultura brasileira**. 2 ed. Campinas: Fundação Cargill, 1991. v. 1, p. 153-195.

PALACIOS, E. V. Response functions of crop yield to soil moisture stress. **Water Resources Bulletin**, Minneapolis, v. 17, n. 4, p. 699-703, 1981.

PARRY, M. L. et al. (Ed.). **Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 976 p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4_wg2_full_report.pdf> Acesso em: 20 out. 2014.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, v. 193, p. 120-146, 1948.

PENNER, J. E. et al. (Ed.). IPCC special report: aviation and the global atmosphere: summary for policymakers. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 1999. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-en.pdf> . Acesso em: 10 jan. 2015.

PINHEIRO, S. L. G. O enfoque sistêmico e o desenvolvimento rural sustentável: uma oportunidade de mudança da abordagem hard-systems para experiências com soft-systems. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 27-37, 2000. Disponível em: <http://www.agriculturasamazonicas.ufpa.br/PDF%27S/Sergio%20Pinheiro%20-%20Abordagem%20sist%C3%AAmica%20%28HS%20e%20SS%29%20OK.pdf>> Acesso em: 6 abr. 2015.

PINTO, H.S.; ASSAD, E.D.; ZULLO JR, J. O aquecimento global e a agricultura. **Revista Saneas**, São Paulo, v.18, p.34-37, 2004.

PIO, R.M.; FIGUEIREDO, J.O.; STUCHI, E.S.; BARROS CARDOSO, S.A. Variedades copas. In: MATTOS JUNIOR, D.; DE NEGRI, J.D.; PIO, R.M.; POMPEU JUNIOR, J. (Org.). **Citros**. Campinas: Instituto Agrônômico /FUNDAG, 2005. p. 37-60.

POMPEU JÚNIOR, J. Porta-enxertos para citros potencialmente ananícantes. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 22, n. 1, p. 147-155, 2001.

POMPEU JÚNIOR, J. Porta-enxertos. In: MATTOS JÚNIOR, D. et al. (Ed.). **Citros**. Campinas: Instituto Agrônômico/Fundag, 2005. v. 1, p. 63-104.

QUAGGIO, J. A. et al. Sweet orange trees grafted on selected rootstocks fertilized with nitrogen , phosphorus and potassium. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 1, p. 55-60, 2004.

RAES, D. et al. Calculation procedures. In: FAO. **AquaCrop**. Version 4.0. Roma, 2012. Chap. 3

RAES, D. et al. AquaCrop: The FAO crop model to simulate yield response to water. In: FAO. **AquaCrop**. Version 4.0. Roma, 2009. Chap. 1

RAY, J. D.; SINCLAIR, T. R. Stomatal conductance of maize hybrids in response to drying soli. **Crop Science**, Madison, v. 37, p. 803-807, 1997.

REUTHER, W. Climate and citrus behavior. In: REUTHER, W. (Ed.). **The citrus industry**. Riverside: University of California, 1973. v. 3, cap. 9, p. 280-337.

RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E.C. Some aspects of citrus ecophysiology in subtropical climates: re-visiting photosynthesis under natural conditions. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas, v.19, p.393-411, 2007.

RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E.C.; OLIVEIRA, R.F. Growth- and leaf-temperature effects on photosynthesis of sweet orange seedlings infected with *Xylella fastidiosa*. **Plant Pathology**, Chichester, v.53, p.334-340, 2004.

RIBEIRO, R.V. et al. High temperature effects on the response of photosynthesis to light in sweet orange plants infected with *Xylella fastidiosa*. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas, v.15, p.89-97, 2003.

RIBEIRO, R.V. et al. Seasonal and diurnal changes in photosynthetic limitation of young sweet orange trees. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v.66, p.203-211, 2009.

RODRIGUES DÍAZ, J. A. et al. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. **Regional Environmental Change**, Heidelberg, v.7, p.149-159, 2007.

RICHARDSON, G. P. System dynamics: simulation for policy analysis from a feedback perspective. In: RICHARDSON, G. P. **Modeling for management: Qualitative simulation modeling and analysis**. New York: Springer Verlag, 1991. p. 144-169.

ROLIM et al. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo, **Bragantia**, Campinas, v.66, n.4, p.711-720, 2007.

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**, London, v.67, n.1, p.51-8, 1991.

ROGERS, H. H. et al. Acclimation of photosynthesis to elevated CO₂ under low-nitrogen nutrition is affected by the capacity for assimilate utilization. Perennial rygrass under free-air CO₂ enrichment. **Plant Physiology**, Rockville, v. 118, n. 2, p. 683-689, 1998.

ROMERO, P. et al. Deficit irrigation and rootstock : their effects on water relations, vegetative development , yield , fruit quality and mineral nutrition of Clemenules mandarin. **Tree physiology**, Oxford, v. 26, p. 1537–1548, 2006.

RYKIEL, E. Testing Ecological Models: the meaning of validation. In: **Ecological Modelling**, Netherlands: Elsevier, v. 90, p. 229-244, 1996.

SALATI, E. et al. Tendências das Variações Climáticas para o Brasil no Século XX e Balanços Hídricos para Cenários Climáticos para o Século XXI. Relatório 4, Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade (DCBio). Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, fevereiro 2007.

SALVUCCI, M. E. CRAFTS-BRANDNER, S. Inhibition of photosynthesis by heat stress: the activation state of rubisco as a limiting factor in photosynthesis. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 120, n. 2. P. 179-186, 2004.

- SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M. V.; ORELLANA-GONZÁLEZ, A. M. G. Situação dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá utilizando modelo desenvolvido em dinâmica de sistemas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.4, p.578-590, 2009.
- SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M. V.; ORELLANA-GONZÁLEZ, A. M. G. Water resources assessment at Piracicaba, Capivari and Jundiá river basins: a dynamic systems approach. **Water Resouces Management**, New York, v. 24, p. 761-773, 2010.
- SANTOS, M. O espaço e os seus elementos: questões de método. **Revista Geografia e Ensino**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 19-30, 1982.
- SENGE, P. M. **A quinta disciplina**. 25ª ed. Rio de Janeiro: BestSeller, 2009. 530p.
- SENGE, P. M. **A quinta disciplina: a arte e prática da organização que aprende**: São Paulo: Best Seller, 1990. 441p.
- SENGE, P. M. **La quinta disciplina**: Madrid: Editorial Granica, 1995. 425p.
- SENGE, P. M. **La quinta disciplina em la práctica**. Madrid: Editorial Granica, 1997. 275p.
- SENTELHAS, P.C. Agrometeorologia dos citros. In: MATTOS JÚNIOR, D. de; DE NEGRI, J.D.; PIO, R.M.; POMPEU JUNIOR, J. (Ed.). **Citros**. Campinas: Instituto Agrônômico: Fundag, 2005. p.318-344.
- SHALHEVET, J. Plants under salt and water stress. In: FOWDEN, L.; MANSHEFIELD, T.; STODDART, J. **Plant adapation to environmental estress**. London: Champman & Hall, 1993. Cap. 7.p.133-154.
- SHIKLOMANOV, I. A. et al. The dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean. In: LEWIS, E.L., JONES, E.P., PROWSE, T.D. & WADHAMS, P. (eds) **The freshwater budget of the Arctic Ocean**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. p. 281-296. 2000
- SILVA, V. M. A.; RIBEIRO, V. H. A. Aquecimento ou resfriamento global ? um único problema de várias respostas. **Polêmica**, Lima, v. 11, n. 3, p. 425–438, 2012.
- SINCLAIR, T.R; ALLEN JR L. H. Carbon dioxide and water vapour exchange of leaves on field-grown citrus trees. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 33, n. 6, p. 1166-1175, 1982.
- SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L.A.B. de. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M.A.; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p.33-63.

SOLOMON, S. et al: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. 996p.

SOUZA, A. P. D. E. **A cana-se-açúcar e as mudanças climáticas: efeitos de uma atmosfera enriquecida em CO₂ sobre o crescimento, desenvolvimento e metabolismo de carboidratos de saccharum ssp.** 2007. 91p. Dissertação (Mestrado em Biologia Celular e Estrutural) - Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2007.

SOUZA, M. N et al. Dinâmica de sistemas e a modelagem com o uso do programa stella dos recursos hídricos da bacia do Rio Preto, afluente do Rio Paracatu. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v.1, n.1, dez. 2010.

STEDUTO, P. Biomass Water-Productivity. Comparing the Growth-Engines of Crop Models. FAO Expert Consultation on Crop Water Productivity Under Deficient Water Supply, p. 26 – 28, 2003, Rome, Italy.

STEDUTO, P.; ALBRIZIO, R. Resource-use efficiency of field grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. II Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 130, p. 269-281, 2005.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 25, n. 3, p. 189–207, 2 fev. 2007.

STEDUTO, P. et al. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 3, p. 426, 2009.

STELLA. **Introduction to systems thinking**. NH: High Performance Systems, 2001, 165p

STICH, S. et al. Evaluation of the terrestrial carbon cycle future plant geograph and climate-carbon cycle feedbacks using Five Dynamics Global Vegetation Models (DGVMs), **Global Change Biology**, v. 14, n. 9, p. 1-25. 2008.

STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, p.734-744, 2005.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 9, p. 1351-1359, 2006.

STRECK, N.A. et al. Estimativa do filocrono em cultivares de trigo de primavera. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v.13, p.423-429, 2005.

STUCHI, E. S.; DONADIO, L. C. **Laranjeira folha murcha**. Jaboticabal: Funep, 2000.

STUCHI, E.S., DONADIO, L.C. Experiência bem sucedida com Lue Gim Gong em Bebedouro. **Citricultura Atual**, Cordeirópolis, n.16, p.18-19, 1999.

- SYVERTSEN J. P; LLOYD, J. Citrus. In: SCHAFFER, B; ANDERSEN, P. (eds), **Handbook of Environmental Physiology of Fruit Crops: Sub-tropical and Tropical Crops**, Boca Raton, v. 2, p. 65-99, CRC Press, 1994.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artemed, 2004. 719p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Redwood City: Benjamin/ Cummings Pub. Co., 1991. 559p.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach a rational classification of climate. **Geographical Review**, Hoboken, v. 38, p. 55-94, 1948.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton, N. J. 1955, 104p. (Publications in Climatology. v. 8, n. 1).
- TUNDISI, J. G. (2008). Recursos Hídricos no futuro: problemas e soluções. *Rev. Estudos Avançados*, v.22, n. 63, pp. 7 – 16.
- VIEIRA, W.C. Dinâmica de sistemas aplicada à gestão de recursos hídricos em bacia hidrográfica. **Revista de Economia e Agronegócio**, Viçosa, v.6, n.3, 2008. Disponível em: . Acesso em: 21 fev. 2015.
- VILLELA, P. R. C. **Introdução à dinâmica de sistemas**. In: SEMANA ACADÊMICA DA GESTÃO DO AGRONEGÓCIO, 2. 2007, Viçosa: UFV, DER, 2007.
- VÖRÖSMARTY, C. J. et al. Global threats to human water security and river biodiversity. **Nature**, London v. 467, p. 555-561, 2010.
- VU, J. C. V; YELENOSKY, G. Water deficit and associated changes in some photosynthetic parameters in leaves of 'Valencia' orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck.). **Plant Physiology**, Rockville, v. 88, p. 375-378, 1988.
- WAND, S. J. E. et al. Responses of wild C4 and C3 grass (Poaceae) species to elevated atmospheric CO₂ concentration: a metanalytic test for current theories and perceptions. **Global Change Biology**, Chichester, v. 5 p. 723-741. 1999.
- WARRICK, R. A. Carbon dioxide, climate change and agriculture. **The Geographical Journal**, Oxford, v. 154, n. 2, p. 221-233, 1988.
- WHITE, C J.; TANTON, T. W.; RYCROFT, D. W. The Impact of Climate Change on the Water Resources of the Amu Darya Basin in Central Asia. **Water Resource Management**, New York, v. 28, p. 5267-5281, 2014.
- WU, I-PAI. A simple Evapotranspiration Model for Hawaii: The Hargreaves Model. *Engineer's Notebook*, n. 106, p. 1–2, 1997.

ZHANG, S.; DANG, Q. Effects of soil temperature and elevated atmospheric CO₂ concentration on gas exchange , in vivo carboxylation and chlorophyll fluorescence in jack pine and white birch seedlings. **Tree Physiology**, Oxford, v. 25, p. 523-531, 2005.

ANEXO

Anexo 1

Biomassa_em_função_da_Transpiração(t) = Biomassa_em_função_da_Transpiração(t - dt) + (Acumulação_Biomasa - Colheita_anual) * dt

INIT Biomassa_em_função_da_Transpiração = (((-480.540413 - (0.0839963*Défict_na_brotação)+(1.3129*CO2_depois_de_2009)-(0.007*Lamina_de_irrigação))))

INFLOWS:

Acumulação_Biomasa = ((Transpiração)*Taxa_de_resistencia_estomatica)-(((Transpiração)*Taxa_de_resistencia_estomatica)*Assimilação_em_função_daTemperatura)

OUTFLOWS:

Colheita_anual = (Biomassa_em_função_da_Transpiração*Indice_de_coleita)

Biomassa_Total(t) = Biomassa_Total(t - dt) + (Biomassa_acumulada - Colheita_anual_de_laranjas) * dt

INIT Biomassa_Total = (((-480.540413 - (0.0839963*Défict_na_brotação)+(1.3129*CO2_depois_de_2009)-(0.007*Lamina_de_irrigação))))

INFLOWS:

Biomassa_acumulada = (((((Biomassa_em_função_da_Transpiração*0.0001))+((Biomassa_Total_em_função_do_CO2)/10)))*Taxa_de_resistencia_estomatica)

OUTFLOWS:

Colheita_anual_de_laranjas = ((Biomassa_Total)*Indice_de_coleita)

Biomassa_Total_em_função_do_CO2(t) = Biomassa_Total_em_função_do_CO2(t - dt) + (Razao_Prod_agua_medio_&_Prod_agua_com_CO2) * dt

INIT Biomassa_Total_em_função_do_CO2 = (((-480.540413 - (0.0839963*Défict_na_brotação)+(1.3129*CO2_depois_de_2009)-(0.007*Lamina_de_irrigação)))*(Transpiração*0.0001))

INFLOWS:

Razao_Prod_agua_medio_&_Prod_agua_com_CO2 = (((((Product_agua_em_base_dados_reais_2002_a_2009/Product_agua_em_função_do_CO2)))*10))*(Transpiração*0.0001)

Assimilação_em_função_daTemperatura = 0.2

CO2_depois_de_2009 = GRAPH(TIME)

(2010, 387), (2020, 411), (2030, 434), (2040, 460), (2050, 485), (2060, 506), (2070, 522), (2080, 534), (2090, 542), (2100, 544)

CO2_depois_de_2011 = GRAPH(TIME)

(2010, 366), (2020, 386), (2030, 412), (2040, 443), (2050, 482), (2060, 530), (2070, 588), (2080, 651), (2090, 722), (2100, 794)

CO2_inicial_de_2002_a_2009 = GRAPH(TIME)

(2002, 372), (2003, 375), (2004, 377), (2005, 379), (2006, 381), (2006, 383), (2007, 385), (2008, 386), (2009, 386)

Coefficiente_de_estresse = GRAPH(Lamina_total)

(750, 0.638), (766, 0.627), (816, 0.58), (826, 0.599), (893, 0.53), (942, 0.547), (1064, 0.6), (1100, 1.00), (2500, 1.00)

Conformação_da_copa = 1

Défict_na_brotação = GRAPH(TIME)

(2002, -243), (2003, -243), (2004, -243), (2005, -245), (2006, -245), (2007, -245), (2008, -245), (2009, -246), (2010, -246), (2011, -247), (2012, -247), (2013, -247), (2014, -247),

(2015, -247), (2016, -247), (2017, -247), (2018, -247), (2019, -247), (2020, -247), (2021, -247), (2022, -248), (2023, -248), (2024, -249), (2025, -249), (2026, -250), (2027, -250), (2028, -252), (2029, -252), (2030, -252), (2031, -252), (2032, -252), (2033, -252), (2034, -252), (2035, -252), (2036, -252), (2037, -252), (2038, -252), (2039, -252), (2040, -252), (2041, -252), (2042, -252), (2043, -252), (2044, -252), (2045, -254), (2046, -254), (2047, -254), (2048, -254), (2049, -254), (2050, -254), (2051, -254), (2052, -254), (2053, -254), (2054, -254), (2055, -254), (2056, -254), (2057, -254), (2058, -254), (2059, -254), (2060, -254), (2061, -254), (2062, -254), (2063, -254), (2064, -254), (2065, -254), (2066, -254), (2067, -254), (2068, -254), (2069, -254), (2070, -254), (2071, -255), (2072, -255), (2073, -255), (2074, -255), (2075, -255), (2076, -255), (2077, -255), (2078, -255), (2079, -255), (2080, -255), (2081, -255), (2082, -256), (2083, -256), (2084, -256), (2085, -256), (2086, -256), (2087, -256), (2088, -256), (2089, -256), (2090, -256), (2091, -256), (2092, -256), (2093, -256), (2094, -256), (2095, -256), (2096, -256), (2097, -256), (2098, -256), (2099, -256), (2100, -256)

ETo_FAO56 =

0.0135*(Radiação_Neta_diaria*365)*(Temperatura_do_ar+17.8)*(238.8/(595.5-(0.55*Temperatura_do_ar)))

Fator_da_umidade_no_ar = 1-0.000138*(360-CO2_inicial_de_2002_a_2009)

Indice_de_coleita = 0.3

Kc = 0.85

Lamina_de_irrigação = 1200

Lamina_total = Precipitação_efetiva_depois_de_2009+Lamina_de_irrigação

Número_de_plantas_por_ha = 278

Parâmetro_Productividade_da_água =

((((Biomassa_Total_em_função_do_CO2/(Transpiração/ETo_FAO56))))-

((Taxa_de_resistencia_estomatica*(Biomassa_Total_em_função_do_CO2/(Transpiração/ETo_FAO56))))+(((Biomassa_Total_em_função_do_CO2/(Transpiração/ETo_FAO56))))/(10))-(((Biomassa_Total_em_função_do_CO2/(Transpiração/ETo_FAO56))))-

((Taxa_de_resistencia_estomatica*(Biomassa_Total_em_função_do_CO2/(Transpiração/ETo_FAO56))))+(((Biomassa_Total_em_função_do_CO2/(Transpiração/ETo_FAO56))))/(10))*Assimilação_em_função_daTemperatura)

Precipitação_efetiva_depois_de_2009 = GRAPH(TIME)

(2002, 865), (2003, 865), (2004, 865), (2005, 865), (2006, 865), (2007, 865), (2008, 865), (2009, 865), (2010, 865), (2011, 865), (2012, 865), (2013, 865), (2014, 865), (2015, 865), (2016, 865), (2017, 865), (2018, 865), (2019, 865), (2020, 865), (2021, 865), (2022, 865), (2023, 865), (2024, 865), (2025, 865), (2026, 865), (2027, 865), (2028, 865), (2029, 865), (2030, 865), (2031, 865), (2032, 866), (2033, 866), (2034, 866), (2035, 866), (2036, 866), (2037, 866), (2038, 866), (2039, 866), (2040, 866), (2041, 866), (2042, 866), (2043, 866), (2044, 866), (2045, 866), (2046, 866), (2047, 866), (2048, 866), (2049, 866), (2050, 866), (2051, 866), (2052, 866), (2053, 866), (2054, 866), (2055, 866), (2056, 866), (2057, 866), (2058, 866), (2059, 866), (2060, 866), (2061, 866), (2062, 866), (2063, 866), (2064, 866), (2065, 866), (2066, 866), (2067, 866), (2068, 866), (2069, 866), (2070, 866), (2071, 866), (2072, 866), (2073, 866), (2074, 866), (2075, 866), (2076, 866), (2077, 866), (2078, 867), (2079, 867), (2080, 867), (2081, 867), (2082, 867), (2083, 867), (2084, 867), (2085, 867), (2086, 867), (2087, 867), (2088, 867), (2089, 867), (2090, 867), (2091, 867), (2092, 867), (2093, 867), (2094, 867), (2095, 867), (2096, 867), (2097, 867), (2098, 867), (2099, 867), (2100, 867)

Product_agua_em_base_dados_reais_2002_a_2009 =

IF(Lamina_de_irrigação>0)THEN((((-480.540413-

```

(0.0839963*Défict_na_brotação)+(1.3129*CO2_depois_de_2009)-
(0.007*Lamina_de_irrigação)))*Taxa_de_resistencia_estomatica)ELSE(((((-10.2529-
(0.02565*Défict_na_brotação)+(0.040423*Precipitação_efetiva_depois_de_2009))))*Taxa
_de_resistencia_estomatica)
Product_agua_em_função_do_CO2 =
((Parâmetro_Productividade_da_água*(CO2_depois_de_2009/CO2_inicial_de_2002_a_20
09)*Fator_da_umidade_no_ar))
Produtividade_da_água =
((((Colheita_anual_de_laranjas+Biomassa_Total))/(Transpiração/10000)))-
((((Colheita_anual_de_laranjas+Biomassa_Total))/(Transpiração/10000))*Assimilação_em
_função_daTemperatura)
Radiação_Neta_diaria = 17.049
Taxa_de_resistencia_estomatica = 0.23
Temperatura_do_ar = GRAPH(CO2_depois_de_2009)
(350, 28.0), (425, 28.1), (500, 28.1), (575, 28.2), (650, 28.3), (725, 28.3), (800, 28.4), (875,
28.4), (950, 28.5), (1025, 28.5), (1100, 28.6)
Transpiração =
(ETo_FAO56*Kc*Volume_de_copa*Número_de_plantas_por_ha*Coeficiente_de_estress
e)
Volume_de_copa =
IF(Lamina_de_irrigação>0)THEN(Conformação_da_copa)ELSE(0.41*Conformação_da_c
opa)

```