

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

**MODELAGEM *FUZZY* PARA AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DO
TOMATE EM TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO E DOSES DE SALINIDADE NA
IRRIGAÇÃO**

DANIEL DOS SANTOS VIAIS NETO

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor em
Agronomia/Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU - SP
MAIO - 2016

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

**MODELAGEM *FUZZY* PARA AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DO
TOMATE EM TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO E DOSES DE SALINIDADE NA
IRRIGAÇÃO**

DANIEL DOS SANTOS VIAIS NETO

Orientador: Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho

Coorientador: Prof. Dr. Antonio Evaldo Klar

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor em
Agronomia/Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU - SP

MAIO - 2016

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

V598m Viais Neto, Daniel dos Santos, 1975-
Modelagem *fuzzy* para avaliação do desenvolvimento do
tomate em tensões de água no solo e doses de salinidade
na irrigação / Daniel dos Santos Viais Neto. - Botucatu :
[s.n.], 2016
xi, 70 f. : fots. color., grafs. color., ils. color.,
tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2016
Orientador: Luís Roberto Almeida Gabriel Filho
Coorientador: Antonio Evaldo Klar
Inclui bibliografia

1. Tomate - Irrigação. 2. Irrigação com déficit hídrico. 3. Plantas - Efeito do sal. 4. Solo - Salinidade.
I. Gabriel Filho, Luís Roberto Almeida. II. Klar, Antonio Evaldo. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. IV. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

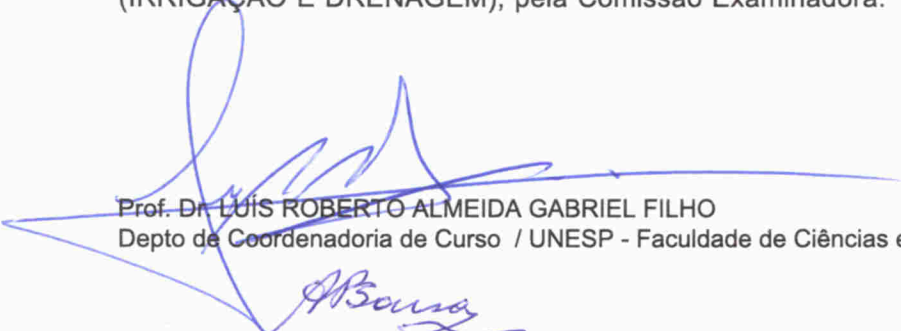
TÍTULO DA TESE: MODELAGEM FUZZY PARA AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DO TOMATE EM TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO E DOSES DE SALINIDADE NA IRRIGAÇÃO

AUTOR: DANIEL DOS SANTOS VIAIS NETO

ORIENTADOR: LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

CO-ORIENTADOR: ANTONIO EVALDO KLAR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

Depto de Coordenadoria de Curso / UNESP - Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã



Prof. Dr. ANTÔNIO DE PÁDUA SOUSA

Depto de Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. FERNANDO FERRARI PUTTI

Depto de Coordenadoria de Curso / UNESP - Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã



Profa. Dra. CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI

Depto de Coordenadoria de Curso / UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas de Dracena



Profa. Dra. ANA CAROLINA BARBOSA KUMMER

Depto de Engenharia Civil / Universidade Estadual de Ponta Grossa - Uvaranas/PR

Botucatu, 23 de maio de 2016.

Nem tão longe que eu não possa ver

Nem tão perto que eu possa tocar

Nem tão longe que eu não possa crer que um dia chego lá

Nem tão perto que eu possa acreditar que o dia já chegou

(Humberto Gessinger - A montanha)

Dedico a ...

Minha querida esposa Fabrícia:

Meus pais João e Ana;

Meus irmãos João Paulo, Fernando e Matheus;

E a minha cunhada Rosa Maria.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, pela inteligência, discernimento e por tantas benções concedidas.

Ao professor Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho pela orientação, amizade, confiança e empenho na condução e realização deste trabalho.

A minha família por todos os valores ensinados, princípios de cidadania e por todos os esforços que fizeram para que eu chegasse até este momento.

A minha esposa Fabrícia pelo apoio incondicional em todos os momentos, principalmente nos de incerteza, muito comuns para quem tenta trilhar novos caminhos.

Aos amigos Camila Pires Cremasco Gabriel, Deyver Bordin, Fernando Ferrari Putti e Josué Ferreira Silva Junior pelo apoio constante e inestimável colaboração, essencial para a realização desse trabalho.

À Faculdade de Ciências Agronômicas - FCA/UNESP e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Irrigação e Drenagem pela oportunidade de realizar o curso de doutorado.

A todos os professores e funcionários da FCA/UNESP, em especial ao meu coorientador professor Dr. Antonio Evaldo Klar pela orientação, ensinamentos de vida e pelas conversas.

A todos os colegas do Curso de Pós-Graduação, pela convivência e pelo companheirismo no decorrer do curso.

À Fatec de Presidente Prudente e a Comissão Permanente de Regime de Jornada Integral - CPRJI por viabilizar a realização deste curso de doutorado.

Aos amigos e professores da Fatec de Presidente Prudente Cintia Camargo Furquim, Giovana Angélica Ros Miola, João Cesar Martins Castro e Sidnei Favarin, a ajuda de vocês foi essencial para esse trabalho.

Enfim, para todos aqueles que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho, Muito Obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO.....	1
INTRODUÇÃO	3
CAPÍTULO 1 – “MODELAGEM <i>FUZZY</i> PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA IRRIGAÇÃO E DA SALINIDADE DA ÁGUA NO PONTO DE COLHEITA DA CULTURA DO TOMATE”	7
CAPÍTULO 2 – “MODELAGEM <i>FUZZY</i> PARA A AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA IRRIGAÇÃO E DA SALINIDADE DA ÁGUA EM DIFERENTES ESTÁDIOS DA CULTURA DO TOMATE”	41
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
REFERÊNCIAS	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área experimental, equipamentos e espaçamentos utilizados.	11
Figura 2. SBRF de avaliação do tomateiro com 2 variáveis de entrada (Irrigação e Salinidade), 8 variáveis de saída (variáveis biométricas e de produtividade).	14
Figura 3. Funções de pertinência das variáveis de entrada (a) Irrigação e (b) Salinidade.	16
Figura 4. Funções de pertinência das variáveis de saída segundo a proposta metodológica de utilização dos percentis.....	18
Figura 5. Funções de pertinência das variáveis de saída com indicação do subintervalo com maior grau de pertinência ao conjunto <i>fuzzy</i> M1.....	19
Figura 6. Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> para as variáveis de saída da cultura de tomate submetido a diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação: (a) Altura da planta, (b) Diâmetro do caule, (c) Área foliar e (d) Fitomassa verde.....	22
Figura 7. Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> para as variáveis de saída da cultura de tomate submetido a diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação: (a) Fitomassa seca, (b) Número de frutos, (c) Peso médio dos frutos e (d) Porcentagem de frutos deficientes.....	23
Figura 8. Classificação da variável altura da planta para Irrigação igual a -60 kPa e Salinidade igual a 0,08 dS.m ⁻¹	25
Figura 9. Altura da planta (Alt) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.....	26
Figura 10. Diâmetro do caule (Diam) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.....	27
Figura 11. Área foliar (AF) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.	28
Figura 12. Fitomassa verde (FV) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.....	29
Figura 13. Fitomassa seca (FS) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.....	30
Figura 14. Número de frutos (NF) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.....	31

Figura 15. Peso médio dos frutos (PMF) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.	32
Figura 16. Porcentagem de frutos deficientes (PFD) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.....	33
Figura 17. SBRF de avaliação do tomateiro com 2 variáveis de entrada (Irrigação e DAS), 4 variáveis de saída (variáveis biométricas).	47
Figura 18. SBRF de avaliação do tomateiro com 2 variáveis de entrada (Salinidade e DAS), 5 variáveis de saída (variáveis biométricas).	47
Figura 19. Funções de pertinência da variável de entrada DAS.....	48
Figura 20. Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> para as variáveis de saída da cultura de tomate submetido a diferentes tensões de água no solo ao longo do seu ciclo: (a) Diâmetro do caule, (b) Área foliar, (c) Fitomassa verde e (d) Fitomassa seca.....	53
Figura 21. Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> para as variáveis de saída da cultura de tomate submetido a diferentes doses de salinidade na irrigação ao longo do seu ciclo: (a) Altura da planta, (b) Diâmetro do caule, (c) Área foliar, (d) Fitomassa verde e (e) Fitomassa seca. .	55
Figura 22. Gráficos tridimensionais representando o desenvolvimento das variáveis de saída do SBRF: (a) Diâmetro do caule e (b) Área foliar.	56
Figura 23. Gráficos tridimensionais representando o desenvolvimento das variáveis de saída do SBRF: (a) Fitomassa verde e (b) Fitomassa seca.	57
Figura 24. Mapas de contorno representando o desenvolvimento das variáveis de saída do SBRF.	57
Figura 25. Gráficos tridimensionais representando o desenvolvimento das variáveis de saída do SBRF: (a) Altura da planta, (b) Diâmetro do caule, (c) Área foliar, (d) Fitomassa verde e (e) Fitomassa seca.	59
Figura 26. Mapas de contorno representando o desenvolvimento das variáveis de saída do SBRF.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação entre potenciais de água e teor de água no solo utilizado no experimento, para a camada de 0 - 0,20 m.	13
Tabela 2. Definição das funções de pertinência da variável de entrada Irrigação.....	15
Tabela 3. Definição das funções de pertinência da variável de entrada Salinidade.	15
Tabela 4. Valores do Quadrados Médios (QM) e dos Coeficientes de Variação (CV) obtidos de análises de variância para as possíveis variáveis de saída do SBRF.	16
Tabela 5. Definição das funções de pertinência das variáveis de saída.	17
Tabela 6. Combinações das variáveis de entrada com pontos de grau de pertinência 1 associados aos conjuntos <i>fuzzy</i> para a elaboração da base de regras.	18
Tabela 7. Intervalos com maior grau de pertinência ao conjunto <i>fuzzy</i> associado.	20
Tabela 8. Generalização dos intervalos com maior grau de pertinência ao conjunto <i>fuzzy</i> associado.....	20
Tabela 9. Valores de percentis dos dados utilizados para avaliar o desenvolvimento e a produtividade do tomateiro por meio de um SBRF.....	22
Tabela 10. Intervalos com maior grau de pertinência ao conjunto <i>fuzzy</i> associado.	23
Tabela 11. Base de regras do sistema <i>fuzzy</i>	24
Tabela 12. Base de regras alternativa do sistema <i>fuzzy</i>	24
Tabela 13. Procedimento realizado para elaboração da base de regras do sistema <i>fuzzy</i> para a variável de saída altura da planta.....	25
Tabela 14. Parâmetros da equação de Van Genuchten.....	45
Tabela 15. Definição das funções de pertinência da variável de entrada “DAS”.	48
Tabela 16. Valores dos Quadrados Médios (QM) e dos Coeficientes de Variação (CV) obtidos de análises de variância para as possíveis variáveis de saída do Modelo 1.....	49
Tabela 17. Valores dos Quadrados Médios (QM) e dos Coeficientes de Variação (CV) obtidos de análises de variância para as possíveis variáveis de saída do Modelo 2.....	49
Tabela 18. Combinações das variáveis de entrada do Modelo 1 com pontos de grau de pertinência 1 associados aos conjuntos <i>fuzzy</i> para a elaboração da base de regras.	50
Tabela 19. Combinações das variáveis de entrada do Modelo 2 com pontos de grau de pertinência 1 associados aos conjuntos <i>fuzzy</i> para a elaboração da base de regras.	51
Tabela 20. Valores de percentis dos dados utilizados para avaliar o desenvolvimento do tomateiro por meio de um SBRF (Modelo 1).....	52

Tabela 21. Base de regras do sistema <i>fuzzy</i> (Modelo 1).....	54
Tabela 22. Valores de percentis dos dados utilizados para avaliar o desenvolvimento do tomateiro por meio de um SBRF (Modelo 2).....	54
Tabela 23. Base de regras do sistema <i>fuzzy</i> (Modelo 2).....	56

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos	Descrição	Unidades
AF	Área foliar	[cm ²]
Alt	Altura da planta	[cm]
CC	Capacidade de campo	[g.g ⁻¹]
Diam	Diâmetro do caule	[cm]
FS	Fitomassa seca	[g]
FV	Fitomassa verde	[g]
NF	Número de frutos	[unid.]
PFD	Porcentagem de frutos deficientes	[%]
PMF	Peso médio dos frutos	[g]
SBRF	Sistema baseado em regras <i>fuzzy</i>	-

MODELAGEM FUZZY PARA AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DO TOMATE EM TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO E DOSES DE SALINIDADE NA IRRIGAÇÃO. Botucatu, 2016, 70 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem). Faculdade de Ciências Agronômicas - FCA/UNESP.

Autor: DANIEL DOS SANTOS VIAIS NETO

Orientador: PROF. DR. LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

Coorientador: PROF. DR. ANTONIO EVALDO KLAR

RESUMO

O tomate, a mais popular das hortaliças, caracteriza-se por ser uma cultura exigente em água e, quando em déficit hídrico prolongado e severo, tem limitações em seu crescimento e redução em sua produtividade. Além disto, esta hortaliça é afetada pelo excesso de salinidade na água, que ocasiona murchamento foliar, queimadura do ápice e das bordas da folha e até sua morte. Tais efeitos, em geral, são analisados utilizando técnicas estatísticas, mas existem teorias matemáticas que permitem ajustes mais refinados, destacando-se dentre elas, a lógica *fuzzy*. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desenvolvimento e a produtividade do tomate híbrido em diferentes tensões de água no solo e diferentes doses de salinidade na irrigação ao longo de seu ciclo utilizando modelagem *fuzzy*. Esta avaliação foi desenvolvida em dois capítulos, sendo o primeiro sobre a análise dos efeitos da irrigação e da salinidade da água no ponto de colheita desta cultura; enquanto que o segundo se trata dos efeitos da irrigação e da salinidade da água nos parâmetros de desenvolvimento em diferentes estádios da cultura. Utilizou-se dados de um experimento que foi realizado em um ambiente protegido situado na área experimental na Faculdade de Ciências Agronômicas - FCA/UNESP, Campus de Botucatu - SP. As variáveis de entrada dos sistemas *fuzzy* foram Irrigação, Salinidade e DAS, enquanto que as de saída elegeu-se as variáveis das análises biométricas e de produtividade que apresentaram diferenças estatísticas significativas. As análises dos efeitos da irrigação e salinidade foram realizadas por meio de gráficos tridimensionais e mapas de contorno das variáveis de saída. Foi possível inferir pelos modelos elaborados que as variáveis de desenvolvimento e de produtividade apresentaram resultados satisfatórios quando se utilizou irrigação em capacidade de campo e/ou salinidade nula. Além disso, as modelagens desenvolvidas neste trabalho podem ser adaptadas e utilizadas para avaliar outras culturas.

Palavras-chave: Mamdani, potencial hídrico, déficit hídrico, estresse salino.

FUZZY MODELING FOR EVALUATION OF TOMATO DEVELOPMENT IN WATER STRESS IN SOIL AND SALINITY DOSES IN IRRIGATION. Botucatu, 2016, 70 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem). Faculdade de Ciências Agronômicas - FCA/UNESP.

Author: DANIEL DOS SANTOS VIAIS NETO

Adviser: PROF. DR. LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

Co-Adviser: PROF. DR. ANTONIO EVALDO KLAR

ABSTRACT

Tomato, the most popular of vegetables, is characterized by being a water-demanding crop and, when in prolonged and severe drought, presents growth limitations and reduction in productivity. In addition, this vegetable is affected by excess of water salinity, which causes leaf wilting, leaf apex and edges burn and even its death. These effects are usually analyzed using statistical techniques, but there are mathematical theories that allow finer adjustments, among which, *fuzzy* logic is highlighted. The objective of the present study was to evaluate the development and productivity of hybrid tomato in different water tensions in soil and different doses of salinity in irrigation throughout its cycle using *fuzzy* modeling. The evaluation was conducted in two chapters, the first one on the analysis of the effects of irrigation and water salinity at the harvest point of the crop; while the second one deals with the effects of irrigation and water salinity in development parameters at different stages of the culture. Data from an experiment conducted in a greenhouse located at the experimental area at the *Faculdade de Ciências Agronômicas - FCA/UNESP* in Botucatu - SP campus were used. The input variables of *fuzzy* systems were Irrigation, Salinity and DAS, while the output ones were the biometric and productivity analysis variables that showed statistically significant differences. Analyses of the effects of irrigation and salinity were performed through three-dimensional graphics and through output variables outline maps. It can be inferred through the elaborated models that the development and productivity variables showed satisfactory results when field capacity irrigation and/or zero salinity were used. Moreover, the modeling developed in the present work can be adapted and used to evaluate other crops.

Keywords: Mamdani, water potential, water deficit, salt stress.

INTRODUÇÃO

O tomateiro é originário da América do Sul, mais precisamente da faixa costeira andina, onde estão Chile, Peru e Equador, e desta região de origem, a espécie difundiu-se para os continentes e para quase todos os países do mundo (BRESOLIN et al., 2010). Devido a sua facilidade e versatilidade de utilização, tornou-se a mais popular das hortaliças, consumida tanto *in natura* como processada (FERRARI, 2008). Além disso, “destaca-se por estar entre as dez hortaliças mais importantes do mercado brasileiro uma vez que possui excelente valor nutritivo com altos teores de vitaminas A e C, além de ser rico em licopeno” (CARVALHO; PAGLIUCA, 2007). “O tomate processado é encontrado na forma de sucos, molhos prontos, ketchup, conserva e tomate seco. Esses produtos são utilizados como ingredientes em diferentes cardápios e como matéria-prima em várias formulações alimentícias” (JUSTUS, 2012).

Para atender a demanda hídrica do tomateiro, os produtores adotam a prática da irrigação, pois é uma das hortaliças mais exigentes em água sendo suscetível ao déficit hídrico. “A irrigação é uma prática agrícola de fornecimento de água às culturas, onde e quando o volume das chuvas ou qualquer outra forma natural de abastecimento não são suficientes para suprir as necessidades hídricas das plantas” (SILVA; KLAR, 2010). Além disso, “a qualidade da água utilizada para irrigação é fator primordial para que as plantas possam expressar seu máximo desenvolvimento e potencial produtivo” (GUEDES et al., 2015). Segundo a ANA (2015), da demanda consuntiva total estimada para o Brasil em 2014, o setor da irrigação foi responsável pela retirada de 55% do total, seguido das vazões de retiradas para fins de abastecimento humano urbano, industrial, animal e humano rural. Neste sentido, a Comissão de Agricultura e Reforma Agrária (2014) afirma que os principais desafios para garantir expansão da área irrigada são o aporte regularizado de água para a agricultura; o fortalecimento do mecanismo de outorga; e a racionalização do uso da água nos diversos métodos, inclusive pela modernização tecnológica de equipamentos e adequado manejo agrícola.

O manejo da irrigação deve atender às necessidades fisiológicas da cultura, no momento adequado, aproveitando a potencialidade do método utilizado, pelo uso racional e sustentável da água, energia e mão-de-obra (PIRES et al., 2008). De acordo com Mantovani et al. (2006), a “eficiência de irrigação pode ser definida como a relação entre a quantidade de água requerida pela cultura e a quantidade total aplicada pelo sistema”. Já Campagnol et al. (2014) afirmam que reduzir a quantidade de água aplicada sem afetar a

produtividade ou aumentar a produção aplicando a mesma quantidade de água pode fazer com que o máximo da eficiência de irrigação seja atingido.

Quando não ocorre o manejo adequado pode-se provocar “o déficit hídrico prolongado e severo que limita o crescimento e reduz a produtividade” (ALVARENGA, 2004). Filgueira (2008) acrescenta que além da produtividade, a irrigação influencia a qualidade dos frutos e inclusive reduz a incidência de anomalias fisiológicas, principalmente a podridão-apical, que de acordo com Lopes e Reis (2011), é “o principal distúrbio fisiológico do tomateiro, que se manifesta normalmente em frutos verdes, logo após atingirem a metade do seu tamanho normal”, e “caracteriza-se por uma mancha negra, dura e seca na extremidade apical, bem visível desde a formação dos frutinhos” (FILGUEIRA, 2008). Outras ocorrências são “rachadura dos frutos, ocorrência de frutos ocos, queda de flores, além da redução no estabelecimento dos frutos, sendo tais efeitos de oscilações mais severos se a cultura estiver instalada em um ambiente relativamente salino” (MEDEIROS, 2010).

Segundo Duarte et al. (2007), o termo salinidade da água e do solo está diretamente ligado ao teor de sais contidos nos mesmos e que, quando em elevadas quantidades na zona radicular podem provocar uma baixa disponibilidade de água para as plantas, reduzindo assim, em alguns casos a produção. Alvarenga et al. (2004) relatam que “o sintoma do efeito salino no tomateiro é caracterizado, inicialmente, pelo murchamento foliar nos períodos mais quentes do dia, em seguida, ocorre a queimadura do ápice e das bordas da folha pela morte do tecido foliar e, finalmente, pode ocasionar a morte da planta”.

Na experimentação agrícola, que visa investigar causas e efeitos de novas tecnologias, otimização de recursos, reutilização de resíduos sólidos e líquidos entre outros, utilizam-se técnicas estatísticas para inferir os melhores resultados, entretanto para expressar os valores intermediários, que não são testados experimentalmente, empregam-se normalmente os modelos de regressão (PUTTI, 2015). Existem técnicas computacionais que permitem ajustes mais refinados, umas dessas técnicas é a lógica *fuzzy*, que foi introduzida no meio científico por Zadeh (1965).

A teoria dos conjuntos *fuzzy* é recente do ponto de vista de historiografia, mas vem se desenvolvendo e ganhando espaço e, cada vez mais, é empregada como ferramenta para a formulação de modelos nos vários campos das ciências (BARROS; BASSANEZI, 2010). “Os sistemas *fuzzy* têm a habilidade de raciocinar de forma semelhante à dos humanos e seu comportamento é representado de maneira muito simples e natural, levando à construção de sistemas compreensíveis e de fácil manutenção” (CORDEIRO et al., 2007). Além disso, segundo Lababidi e Baker (2006), a aplicação da teoria dos conjuntos *fuzzy* e a

lógica *fuzzy* tem mostrado uma enorme recompensa em áreas onde a intuição e o julgamento ainda desempenham papéis importantes no modelo. Por fim, Gabriel Filho et al. (2012) inferiram que “a utilização da lógica *fuzzy* em problemas de avaliação de fenômenos agrários, biológicos e administrativos está tornando-se uma alternativa extremamente eficiente e eficaz frente a métodos estocásticos recorrentes”.

Na área agronômica, diversas aplicações que compõem os diferentes usos desta teoria são encontradas, como por exemplo, na elaboração de um sistema de apoio para irrigação e conservação de água na agricultura (GIUSTI; MARSILI-LIBELLI, 2015), no auxílio do manejo de espécies de orquídeas (PUTTI et al., 2014), na avaliação dos recursos do solo agrícola (KURTENER; SUKHANOV, 2014), no controle de temperatura na zona de combustão do gaseificador e da temperatura do ar quente de exaustão de um conjunto gaseificador/combustor utilizado na secagem de grãos (REZENDE, 2012) e na divisão de pomar de laranjeiras em classes distintas de comportamento produtivo por meio da análise de agrupamentos visando o gerenciamento localizado da produção (PARISE; VETTORAZZI, 2005).

Desta forma, justifica-se o estudo envolvendo questões práticas do produtor, tais como o manejo de irrigação e da salinidade. Tal fato ganha maior amplitude na cultura do tomate por ser sensível às condições de déficit hídrico e o processo osmótico provocado pela salinização da água. Assim, há a necessidade de estudos que mostrem os efeitos deste manejo nesta cultura, o que em geral é somente realizado em alguns níveis fixos de irrigação e salinidade. Buscando a determinação de resultados em diversos outros pontos não verificados em experimentos, propõe-se a utilização da teoria *fuzzy*, possibilitando tal extrapolação.

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desenvolvimento e a produtividade do tomate híbrido (*Lycopersicum esculentum*) em diferentes tensões de água no solo e diferentes doses de salinidade na irrigação ao longo de seu ciclo utilizando modelagem *fuzzy*.

Os objetivos específicos desta pesquisa foram:

- a) Obter um modelo utilizando sistema *fuzzy* para estudar os efeitos no desenvolvimento e na produtividade do tomate híbrido de diferentes tensões de água no solo e de diferentes doses de salinidade na irrigação aos 120 dias após semeadura;

- b) Obter um modelo utilizando sistema *fuzzy* para estudar os efeitos no desenvolvimento do tomate híbrido de diferentes tensões de água no solo ao longo do seu ciclo;
- c) Obter um modelo utilizando sistema *fuzzy* para estudar os efeitos no desenvolvimento do tomate híbrido de diferentes doses de salinidade na irrigação ao longo do seu ciclo.

Para atingir os objetivos propostos, a tese foi dividida em 2 capítulos, sendo o primeiro capítulo intitulado “MODELAGEM *FUZZY* PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA IRRIGAÇÃO E DA SALINIDADE DA ÁGUA NO PONTO DE COLHEITA DA CULTURA DO TOMATE” e o segundo capítulo intitulado “MODELAGEM *FUZZY* PARA A AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA IRRIGAÇÃO E DA SALINIDADE DA ÁGUA EM DIFERENTES ESTÁDIOS DA CULTURA DO TOMATE”.

CAPÍTULO 1 – “MODELAGEM FUZZY PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA IRRIGAÇÃO E DA SALINIDADE DA ÁGUA NO PONTO DE COLHEITA DA CULTURA DO TOMATE”

Resumo

A cultura do tomate é exigente em tratamentos culturais tais como a irrigação, que afeta sua produtividade, influencia a qualidade dos frutos e reduz a incidência de anomalias fisiológicas. A salinidade é outro fator determinante no desenvolvimento desta cultura, pois em excesso, reduz a altura das plantas, área foliar, produção da fitomassa seca da parte aérea e produção de frutos. Tais efeitos, em geral, são analisados utilizando técnicas estatísticas, mas existem teorias matemáticas que permitem ajustes mais refinados, destacando-se dentre elas, a lógica *fuzzy*. Frente ao exposto, o objetivo deste trabalho foi estudar os efeitos no desenvolvimento e na produtividade do tomate híbrido de diferentes tensões de água no solo e diferentes doses de salinidade na irrigação aos 120 dias após semeadura utilizando modelagem *fuzzy*. Para tal estudo, utilizou-se de dados de um experimento que foi realizado na Faculdade de Ciências Agrônomicas - FCA/UNESP, Campus de Botucatu - SP. As variáveis de entrada do SBRF desenvolvido foram Irrigação e Salinidade e para ambas foram definidos 3 conjuntos *fuzzy*. As variáveis de saída foram escolhidas elegendo-se as variáveis das análises biométricas e de produtividade que apresentaram diferenças estatísticas significativas, à saber, altura da planta, diâmetro do caule, área foliar, fitomassa verde, fitomassa seca, número de frutos, peso médio dos frutos e porcentagem de frutos deficientes. Para as variáveis de saída do SBRF foram definidos 9 conjuntos *fuzzy*. A análise dos efeitos da irrigação e salinidade foi realizada por meio de gráficos tridimensionais e mapas de contorno das variáveis de saída. Foi possível aferir que os resultados mais favoráveis, com exceção da variável altura da planta, ocorreram para a irrigação em capacidade de campo e a salinidade nula.

Palavras-chave: lógica *fuzzy*, déficit hídrico, estresse salino.

Abstract

The tomato crop is demanding in cultural practices such as irrigation, which affects its productivity, influences the fruit quality and reduces the incidence of physiological abnormalities. Salinity is another determining factor in the development of this culture, because

in excess, it reduces plant height, leaf area, production of dry biomass of the plant aerial part and fruit production. These effects are usually analyzed using statistical techniques, but there are mathematical theories that allow finer adjustments, among which, *fuzzy* logic is highlighted. Based on that, the aim of the present work was to study the effects on the development and productivity of hybrid tomato of different water tensions in soil and different salinity doses in irrigation in 120 days after sowing, using *fuzzy* modeling. For this study, data from an experiment conducted at the *Faculdade de Ciências Agrônômicas - FCA/UNESP*, in Botucatu - SP campus were used. The developed SBRF input variables were Irrigation and Salinity and for each of them 3 *fuzzy* sets were defined. The output variables elected were biometric and productivity analysis that showed statistically significant differences, such as plant height, stem diameter, leaf area, green biomass, dry biomass, number of fruits, average fruit weight and percentage of disabled fruits. For SBRF output variables, 9 *fuzzy* sets were defined. The analysis of the effects of irrigation and salinity was performed through three-dimensional graphics and output variables outline maps. It was possible to infer that the most favorable results, except for the variable plant height, occurred for field capacity irrigation and zero salinity.

Keywords: *fuzzy* logic, water deficit, salt stress.

Introdução

O tomate é uma planta originária da Cordilheira dos Andes, pertencente à família Solanácea, com hábitos de crescimento determinado ou indeterminado (CARMO; CALIMAN, 2010) e com facilidade de adaptação a uma grande variedade de climas, com exceção daqueles nos quais as geadas estão presentes (ROSA et al., 2011). “O tomate de mesa ou para consumo *in natura* é produzido em praticamente todas as regiões geográficas do Brasil e em épocas distintas sob diferentes sistemas de cultivo e diferentes níveis de manejo” (MATOS et al., 2012), além disso, se destaca “como a segunda hortaliça mais cultivada no mundo sendo superada apenas pela batata” (SANTOS et al., 2011).

A cultura do tomate é exigente em tratamentos culturais como a irrigação e adubação (MACEDO et al., 2005). Santana et al. (2009) afirmam que a deficiência hídrica é responsável por afetar a produção do tomateiro, e que a mesma responde negativamente também ao excesso de água no solo. De acordo com Filgueira (2008), o déficit hídrico influencia a qualidade dos frutos e inclusive reduz a incidência de anomalias fisiológicas,

principalmente a podridão-apical. Já o excesso de água no solo, por outro lado, pode saturar o solo e expulsar o oxigênio da zona radicular (ALVARENGA, 2004).

“O ciclo de desenvolvimento do tomateiro pode ser subdividido em cinco estádios distintos com relação às necessidades hídricas e de irrigação da cultura: formação de mudas, inicial, vegetativo, frutificação e maturação” (MAROUELLI et al., 2012). Na fase inicial, a necessidade de água é pequena, aumentando substancialmente durante a fase de vegetação e frutificação, que ocorrem simultaneamente (FILGUEIRA, 2008). Segundo Marouelli et al. (2012), “de norte a sul no Brasil, a duração do ciclo do tomateiro, desde o transplante de mudas até a colheita, varia de 95 a 125 dias”.

Segundo Bernardo (1996), “a agricultura irrigada depende da quantidade e da qualidade da água”. O mesmo autor afirma que “dentre as características que determinam a qualidade da água para a irrigação, a concentração de sais solúveis ou salinidade é um fator limitante ao desenvolvimento de algumas culturas”. Em relação a água utilizada na irrigação do tomateiro, Alvarenga (2004) infere que deve ser de boa qualidade, isenta de contaminantes biológicos, além disso, o teor de sais deve ser inferior a $1,5 \text{ g.L}^{-1}$ (equivalente à condutividade elétrica inferior a $2,2 \text{ dS.m}^{-1}$). “Em situações extremas de salinidade, a cultura do tomate não é capaz de realizar o ajuste osmótico necessário para suprir sua demanda por água, e, conseqüentemente, por nutrientes, ocasionando decréscimo de turgor e produtividade” (SILVA JUNIOR, 2012). De maneira geral, os sais da água de irrigação reduzem, de forma significativa, a altura das plantas, área foliar, produção da fitomassa seca da parte aérea e a produção de frutos da cultura do tomate (OLIVEIRA et al., 2007).

Na experimentação agrícola, que visa investigar causas e efeitos de novas tecnologias, otimização de recursos, reutilização de resíduos sólidos e líquidos entre outros, utilizam técnicas estatísticas para inferir os melhores resultados, entretanto para expressar os valores intermediários, que não são testados experimentalmente, empregam-se normalmente os modelos de regressão (PUTTI, 2015). Existem técnicas computacionais que permitem ajustes mais refinados, umas dessas técnicas que vêm ganhando destaque é a lógica *fuzzy*, que foi introduzida no meio científico por Zadeh (1965).

De acordo com Simões e Shaw (2007), a modelagem de situações reais é necessária por poder ser objeto de utilizações em ensaios e experimentos de uma forma mais fácil, e com menores custos, do que a utilização dos sistemas reais. E devido à complexidade de compreender os modelos matemáticos, a lógica *fuzzy* traz a facilidade de compreender fenômenos de diversas áreas tornando-se uma teoria importante na análise de resultados (GABRIEL FILHO, 2015).

A lógica tradicional assume sempre a possibilidade de apenas dois estados: verdadeiro ou falso. Já a lógica *fuzzy*, advinda do conceito de conjuntos *fuzzy*, considera os elementos pertencentes a um determinado conjunto com um certo grau de aderência (CREMASCO, 2008). Portanto, um dado elemento que na lógica tradicional simplesmente não pertencia a um certo conjunto, pode pertencer a esse mesmo conjunto com um grau de pertinência baixo (BENINI, 2012), ou seja, “a pertinência seria uma questão de grau, na qual, o grau de pertinência de um determinado objeto a um conjunto *fuzzy* seria representado por algum número real que se encontraria no intervalo real entre 0 e 1” (SILVA, 2012). “Estes conjuntos foram propostos pelo fato dos conjuntos clássicos apresentarem limitações para lidar com problemas onde transições (passagem de pertinência para a não pertinência) de uma classe para outra acontecem de forma lenta e gradual” (BENINI, 2012).

“No Brasil, as teorias *fuzzy* têm sido muito utilizadas nas áreas médica e epidemiológica para resolver problemas de diagnósticos médicos e controle de pragas, áreas em que o grau de incerteza é muito grande” (MERLI; ALMEIDA, 2011). Outros exemplos de aplicações que compõem os diferentes usos desta teoria, baseada em métodos matemáticos e inteligência computacional, são: desenvolvimento de um *software* para a comparação da massa corporal de bovinos entre si e identificação dos grupos para abate (GABRIEL FILHO et al., 2016), criação de um índice para avaliar a qualidade dinâmica dos solos agrícolas em relação às suas características biológicas, físicas e química (RODRÍGUEZ et al., 2016), avaliação do desenvolvimento da cultura da alface, quando irrigada com água tratada magneticamente e convencional (PUTTI, 2015), desenvolvimento de um modelo de inferência adaptativo neuro *fuzzy* para estimação da produtividade de trigo em função da adubação nitrogenada (SILVA, 2014), controle de temperatura na zona de combustão do gaseificador e da temperatura do ar quente de exaustão de um conjunto gaseificador/combustor utilizado na secagem de grãos (REZENDE, 2012) e avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de potência ativa e reativa em uma empresa de avicultura de postura (CREMASCO et al., 2010).

Frente ao exposto, este trabalho teve por objetivo estudar os efeitos no desenvolvimento e na produtividade do tomate híbrido (*Lycopersicum esculentum*) de diferentes tensões de água no solo e diferentes doses de salinidade na irrigação aos 120 dias após semeadura utilizando modelagem *fuzzy*.

Material e Métodos

Neste tópico, inicialmente, foi descrito o experimento utilizado para elaborar a modelagem *fuzzy*. Posteriormente, apresentou-se todos os passos de tal modelagem para o estudo dos efeitos da irrigação e da salinidade no ponto de colheita da cultura do tomate.

Descrição do experimento

Os dados experimentais utilizados para a modelagem *fuzzy* do presente estudo foram analisados estatisticamente em Silva Junior (2012). O experimento foi conduzido, entre junho e outubro de 2011, em um ambiente protegido instalado em uma área com altitude média de 786 m, latitude igual a 22°51'03" Sul, longitude igual a 48°25'37" Oeste e situado no Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas - FCA/UNESP, Campus de Botucatu - SP.

O ambiente utilizado foi uma casa de vegetação do tipo túnel alto, com dimensões de 27 m de comprimento; 7 m de largura; 1,7 m de pé direito e 3 m de altura no centro. Sua estrutura era em forma de arcos feitos com tubos galvanizados e cobertura de filme de polietileno aditivado transparente, com 150 µm de espessura. Nas laterais instalou-se uma tela “sombrite” com 30% de sombreamento, com o objetivo de interceptar insetos e animais. A casa de vegetação possuía orientação no sentido Norte/Sul em seu comprimento, perpendicular à trajetória do Sol (Figura 1).



Figura 1. Área experimental, equipamentos e espaçamentos utilizados.
FONTE: Silva Junior, (2012).

O solo utilizado foi caracterizado Latossolo Vermelho Distroférico de textura média (EMBRAPA, 2013) e foi coletado da camada de 0 - 0,20 m de profundidade. Este foi destorroado e peneirado e em seguida seco ao ar até atingir o teor de água de 4%. Os vasos utilizados apresentavam capacidade de 15 dm³ e foram preenchidos de forma que cada recipiente contivesse 13 kg de solo.

A calagem e as adubações de plantio e cobertura foram realizadas com base em análise do solo, seguindo-se a recomendação contida no Boletim Técnico 100 (TRANI; RAIJ, 1997). A variedade do tomateiro utilizada foi a cv. Kátia. As mudas foram preparadas pelo Departamento de Horticultura e transplantadas para vasos 45 dias após a semeadura. A condução foi em haste única, sendo que o espaçamento entre plantas foi de 1 m entre as linhas e de 0,6 m entre plantas. O tutoramento realizou-se individualmente com fitilho, eliminando-se todas as brotações das axilas das folhas.

O manejo de irrigação foi estabelecido para fornecimento de água à cultura em três condições de potenciais matriciais de água do solo ($\Psi = -60, -30$ e -10 kPa). Além disso, a água utilizada na irrigação possuía condutividade elétrica (CE) de 0,08 (sem adição de sal) e nas concentrações de 3 e 5 dS.m⁻¹. Desta forma, foram utilizadas três doses de salinidade no experimento.

Para a determinação da diluição de cloreto de sódio (NaCl) na água, foi utilizado a curva padrão de salinidade proposta por Silva Junior (2012), em que a condutividade elétrica (CE) é expressa pela seguinte equação:

$$CE = 0,00874NaCl(mL.L^{-1}) + 0,284$$

O cálculo da água a ser aplicada em cada tratamento deu-se pela leitura de vinte e sete tensiômetros instalados a 0,15 m de profundidade, sendo três tensiômetros por tratamento, além disso, a irrigação ocorreu sempre que o potencial matricial médio do solo se encontrava nas faixas de -30 ou -60 kPa e um dos tratamentos, sem estresse hídrico, foi mantido com teor de água no solo constante (28,60%), irrigando-se por capacidade de campo (CC).

Para obtenção do teor de água no solo, foram utilizadas as relações do conteúdo de água volumétrica com a tensão com que a água está retida, expressas na Tabela 1. Com tais dados, foi possível elaborar uma curva de retenção de água no solo por métodos não lineares existentes na literatura, sendo escolhido o método de Van Genuchten (1980) para a determinação de tal curva, e assim sendo possível a determinação do valor do teor de água no solo para o potencial de água -60 kPa.

Tabela 1. Relação entre potenciais de água e teor de água no solo utilizado no experimento, para a camada de 0 - 0,20 m.

Ψ_t (-kPa)	Ug (g.g ⁻¹)
10	0,286
30	0,244
50	0,232
100	0,211
300	0,199
500	0,198
1500	0,194

FONTE: Silva Junior, (2012) (Adaptado).

Os parâmetros biométricos e de produtividade do tomateiro aferidos por Silva Junior (2012) aos 120 dias após a semeadura foram: altura da planta (cm), diâmetro do caule (cm), área foliar (cm²), fitomassa verde (g), fitomassa seca (g), número de frutos (unidades), peso médio dos frutos (g) e porcentagem de frutos deficientes (%).

A altura das plantas correspondeu à distância entre a base, a partir do solo, e o ápice da planta. O diâmetro do caule, também foi determinado na região basal da planta, rente ao solo. Já a área foliar foi calculada utilizando uma estimativa feita com a fitomassa seca da folha, para tanto foram extraídos de folíolos da folha mais nova totalmente expandida dez discos, com 8 mm de diâmetro, foram mantidos em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C durante 24 h e por fim, considerou-se a média das massas dos dez discos igual a uma área de 0,5 cm². O cálculo tanto da fitomassa verde quanto da seca corresponderam à soma das massas dos folíolos, pecíolos, cachos e caule. E por fim, o percentual de frutos deficientes foi calculado em relação aos frutos que apresentaram podridão apical.

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial duplo com três repetições, sendo três tensões de água no solo (-60, -30 e -10 kPa) e três doses de salinidade (0,08; 3 e 5 dS.m⁻¹).

Modelagem fuzzy

A partir do experimento realizado por Silva Junior (2012), que utilizou-se do manejo de diferentes tensões de água no solo (Irrigação) e diferentes doses de salinidade na irrigação (Salinidade) ao longo do ciclo do tomateiro, realizou-se uma modelagem *fuzzy* para estudar os efeitos nas variáveis biométricas e de produtividade no ponto de colheita dessa cultivar, que se deu aos 120 dias após semeadura (DAS).

Para tanto, foi considerado o seguinte modelo agrônomo para representar a situação proposta por Silva Junior (2012): $F: X_1 \times X_2 \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^8, (x_1, x_2) \mapsto Y = F(x_1, x_2)$, onde $X_1 = [-60, -10]$, $X_2 = [0, 08; 5]$, $\mathbb{R}$ é o conjunto dos números reais, x_1 representa a tensão de água no solo (kPa) e x_2 a dose de salinidade na irrigação (dS.m^{-1}). Os extremos dos intervalos X_1 e X_2 estão de acordo com os valores mínimos e máximos utilizados no experimento. Além disso, $Y = F(x_1, x_2) = (y_1, y_2, \dots, y_8)$ foi definido pelas medianas das variáveis biométricas e de produtividade do tomateiro sendo $y_1 = \text{Alt}$, $y_2 = \text{Diam}$, $y_3 = \text{AF}$, $y_4 = \text{FV}$, $y_5 = \text{FS}$, $y_6 = \text{NF}$, $y_7 = \text{PMF}$ e $y_8 = \text{PFD}$.

Para a elaboração do sistema baseado em regras fuzzy (SBRF), definiu-se um processador de entrada (ou *fuzzyficador*), um conjunto de regras linguísticas, um método de inferência fuzzy e um processador de saída (ou *defuzzyficador*), gerando um número real como saída (Figura 2).

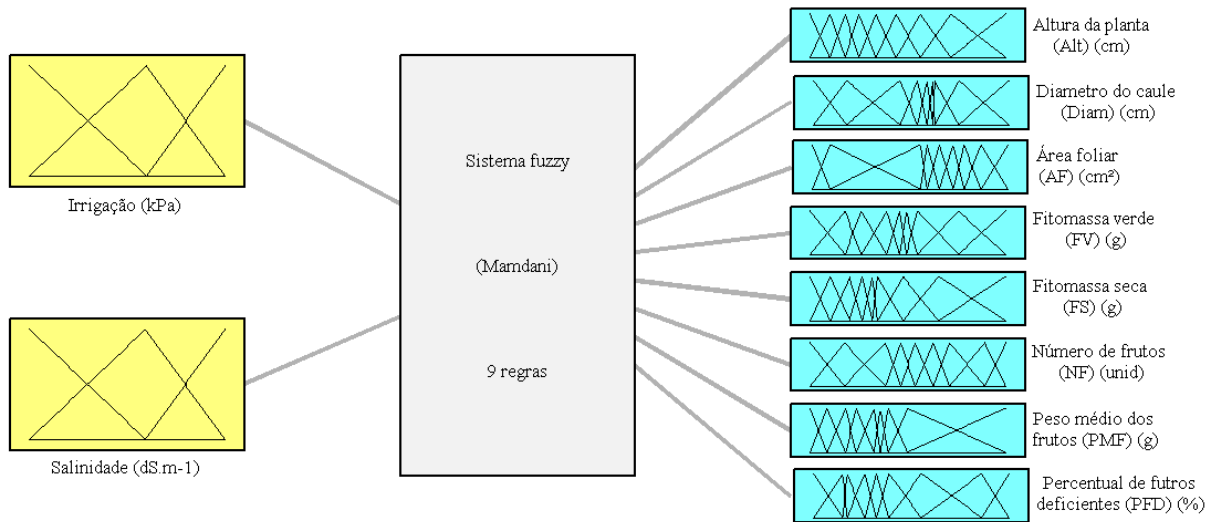


Figura 2. SBRF de avaliação do tomateiro com 2 variáveis de entrada (Irrigação e Salinidade), 8 variáveis de saída (variáveis biométricas e de produtividade).

Este SBRF é representado pela função $F: X_1 \times X_2 \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^8$ tal que $F = (f_1(x_1, x_2), f_2(x_1, x_2), f_3(x_1, x_2), f_4(x_1, x_2), f_5(x_1, x_2), f_6(x_1, x_2), f_7(x_1, x_2), f_8(x_1, x_2))$, onde o produto cartesiano que constitui o domínio representa as tensões de água no solo ($X_1 = [-60, -10]$) e as doses de salinidade na irrigação ($X_2 = [0, 08; 5]$). O contradomínio $\mathbb{R}^8$ representa as oito variáveis de saída avaliadas: altura da planta (Alt), diâmetro do caule (Diam), área foliar (AF), fitomassa verde (FV), fitomassa seca (FS), número de frutos (NF), peso médio dos frutos (PMF) e porcentagem de frutos deficientes (PFD), nesta ordem.

Conjuntos fuzzy das variáveis de entrada

As variáveis de entrada do SBRF desenvolvido foram Irrigação e Salinidade. Para ambas variáveis, foram definidos 3 conjuntos *fuzzy* denominados Baixo (B), Médio (M) e Alto (A) de acordo com as Tabelas 2 e 3, respectivamente, cujos valores numéricos apresentados foram retirados da análise dos dados do experimento realizado por Silva Junior (2012).

As funções de pertinência foram elaboradas de modo que as tensões de água no solo adotadas no experimento (-60, -30 e -10 kPa) apresentassem grau de pertinência igual a 1 aos conjuntos *fuzzy* B, M e A, respectivamente. O mesmo procedimento foi utilizado para as doses de salinidade na irrigação adotadas no experimento (0,08; 3 e 5 dS.m⁻¹).

Tabela 2. Definição das funções de pertinência da variável de entrada Irrigação.

Conjuntos <i>fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
B	Triangular	[-61, -60, -30]
M	Triangular	[-60, -30, -10]
A	Triangular	[-30, -10, -9]

Tabela 3. Definição das funções de pertinência da variável de entrada Salinidade.

Conjuntos <i>fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
B	Triangular	[-0.92, 0.08, 3]
M	Triangular	[0.08, 3, 5]
A	Triangular	[3, 5, 6]

Deste modo, foi adotado para o conjunto “B” no seu primeiro delimitador o ponto $P_1 - 1$, afim de que o grau de pertinência 1 ocorra tanto para a tensão de água no solo de -60 kPa quanto para a dose de salinidade na irrigação 0,08 dS.m⁻¹, visto que se trata de pontos observados experimentalmente. Analogamente, foi adotado para o conjunto “A” no seu último delimitador o ponto $P_3 + 1$. Assim, tanto a tensão de água no solo de -10 kPa quanto a dose de salinidade na irrigação de 5 dS.m⁻¹ obtiveram grau de pertinência 1. Tal procedimento foi utilizado por Gabriel Filho et al. (2011), Putti et al. (2014) e Gabriel Filho (2015).

As funções de pertinência das variáveis Irrigação e Salinidade, estão representadas na Figura 3.

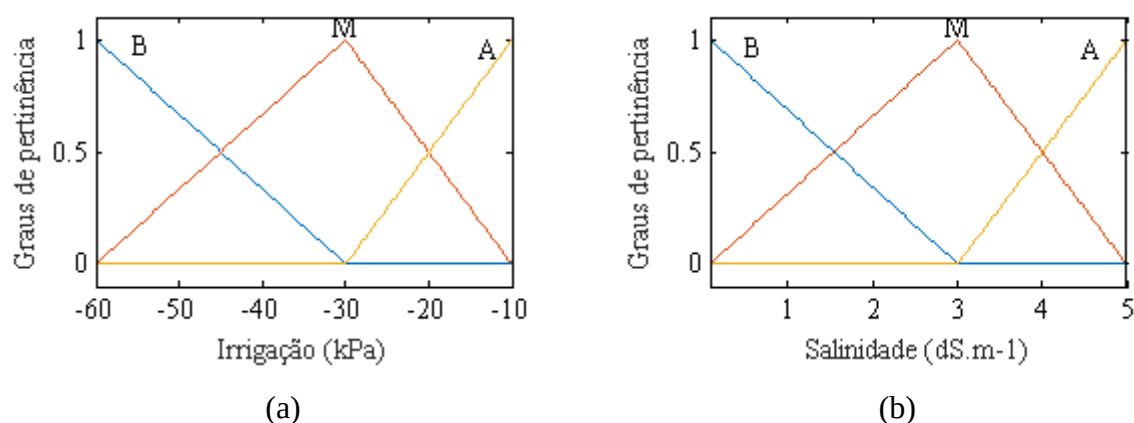


Figura 3. Funções de pertinência das variáveis de entrada (a) Irrigação e (b) Salinidade.

Conjuntos fuzzy das variáveis de saída

Elegeram-se as variáveis de saída a partir das análises biométricas e de produtividade que apresentaram diferenças significativas entre as tensões de água no solo e/ou as doses de salinidade na irrigação 120 dias após a semeadura e/ou interações entre tais fatores. Esta análise estatística foi realizada em Silva Junior (2012), com nível de significância $\alpha = 5\%$ (Tabela 4).

Tabela 4. Valores do Quadrados Médios (QM) e dos Coeficientes de Variação (CV) obtidos de análises de variância para as possíveis variáveis de saída do SBRF.

Fator de variação	QM							
	Alt	Diam	AF	FV	FS	NF	PMF	PFD
Irrigação (-kPa)	853,00*	0,07*	3455,69*	3738,51*	56,14*	117,81*	326,23*	2912,87*
Salinidade (dS.m ⁻¹)	59,24	0,08*	1159,93*	1508,12*	157,42*	22,23*	323,88*	1643,07
Irrigação × Salinidade	2,16	0,09*	848,99*	10,73	33,20	9,78*	77,40	2286,74*
CV (%)	12,85	6,68	24,17	12,03	16,14	11,97	11,62	19,99

(*) Significativo pelo teste F com 5% de probabilidade de erro.

FONTE: Silva Junior, (2012) (Adaptado).

Para generalizar a metodologia das variáveis de saída do SBRF foram definidos 9 conjuntos *fuzzy* denominados Baixo 1 (B1), Baixo 2 (B2), Baixo 3 (B3), Médio 1 (M1), Médio 2 (M2), Médio 3 (M3), Alto 1 (A1), Alto 2 (A2) e Alto 3 (A3), buscando-se com tal número elevado de conjuntos *fuzzy* aumentar a precisão do modelo. A fim de reduzir a complexidade, os conjuntos *fuzzy* triangulares foram adotados, pois são comumente empregados e necessitam apenas determinar o valor de pico e a largura de sua base. Para tanto,

foi necessário criar delimitadores que possibilitassem definir de forma triangular cada uma das funções de pertinência de cada um desses conjuntos *fuzzy* em questão. Os cálculos a seguir para a determinação de tais delimitadores são semelhantes aos procedimentos metodológicos adotados em Putti (2015) e Gabriel Filho (2015).

Neste caso, as funções de pertinência triangulares carecem do cálculo de 9 delimitadores, que foram definidos como sendo os percentis do conjunto de dados aferidos de cada variável de saída. Estes percentis em $x\%$, denotados por $P(x\%)$, dependem de uma constante k , uma vez que os 9 delimitadores necessários são da forma $P(mk)$, $0 \leq m \leq 8$. A constante k foi calculada da seguinte maneira:

$$8k = 100\% \Rightarrow k = \frac{100\%}{8} \Rightarrow k = 12,5\%.$$

A Tabela 5 e a Figura 4 apresentam a definição das funções de pertinência para as variáveis de saída utilizando os percentis variando em 12,5%. Destaca-se que para as funções de pertinência B1 e A3, um dos dois intervalos disjuntos do suporte cujos pontos não tem grau de pertinência 1, foi definido com amplitude igual a 1.

Tabela 5. Definição das funções de pertinência das variáveis de saída.

Conjuntos <i>fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
B1	Triangular	[P(0%) - 1, P(0%), P(12,5%)]
B2	Triangular	[P(0%), P(12,5%), P(25%)]
B3	Triangular	[P(12,5%), P(25%), P(37,5%)]
M1	Triangular	[P(25%), P(37,5%), P(50%)]
M2	Triangular	[P(37,5%), P(50%), P(62,5%)]
M3	Triangular	[P(50%), P(62,5%), P(75%)]
A1	Triangular	[P(62,5%), P(75%), P(87,5%)]
A2	Triangular	[P(75%), P(87,5%), P(100%)]
A3	Triangular	[P(87,5%), P(100%), P(100%)+1]

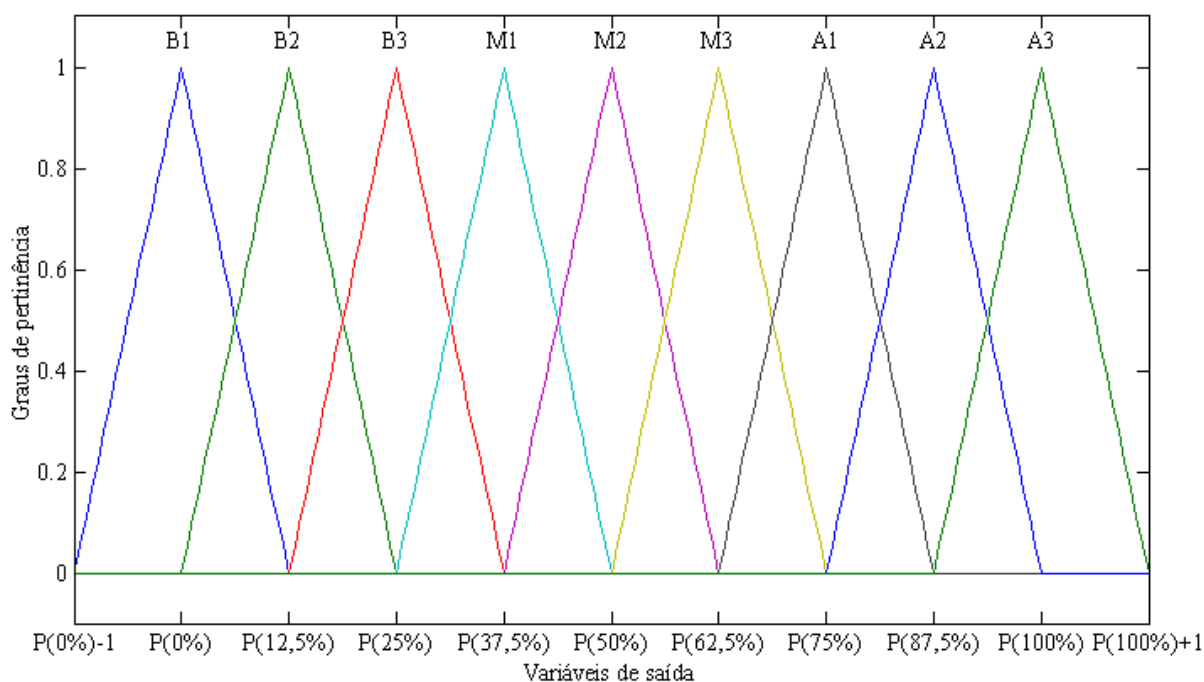


Figura 4. Funções de pertinência das variáveis de saída segundo a proposta metodológica de utilização dos percentis.

Base de regras

Para a obtenção da base de regras, considerou-se as 9 (3×3) combinações entre os conjuntos *fuzzy* das duas variáveis de entrada. Assim criou-se 9 pares da forma Irrigação $\times$ Salinidade conforme metodologia desenvolvida em Cremasco (2008), Gabriel Filho et al. (2011), Putti (2015) e Gabriel Filho (2015). A Tabela 6 apresenta os pontos de cada variável assim consideradas e as combinações dos conjuntos *fuzzy* descritas.

Tabela 6. Combinações das variáveis de entrada com pontos de grau de pertinência 1 associados aos conjuntos *fuzzy* para a elaboração da base de regras.

Irrigação		Salinidade	
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência 1 associado	Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência 1 associado
B	-60	B	0,08
B	-60	M	3
B	-60	A	5
M	-30	B	0,08
M	-30	M	3
M	-30	A	5
A	-10	B	0,08
A	-10	M	3
A	-10	A	5

A associação das combinações dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada com um conjunto *fuzzy* de cada variável de saída, o que caracteriza totalmente a base de regra, foi realizada mediante a determinação do maior grau de pertinência do valor mediano obtido das 3 repetições aferidas em experimento em cada combinação (Tabela 6).

Também destaca-se que o maior grau de pertinência foi adotado uma vez que, excetuando-se pontos com grau de pertinência 1, todos os demais pontos do intervalo $[P(0\%), P(100\%)]$ pertencem à dois conjuntos *fuzzy* das variáveis de saída.

Sendo assim, supondo que uma combinação apresentada na Tabela 6 tenha como resultado um valor mediano (dentre 3 aferições) que pertença aos conjuntos *fuzzy* B3 e M1 de alguma variável de saída, e supondo que tal valor estivesse localizado no subintervalo $\left[\frac{P(25\%)+P(37,5\%)}{2}, \frac{P(37,5\%)+P(50\%)}{2}\right]$ indicado na Figura 5, então tal combinação seria associada ao conjunto *fuzzy* M1, uma vez que há um maior grau de pertinência para este conjunto.

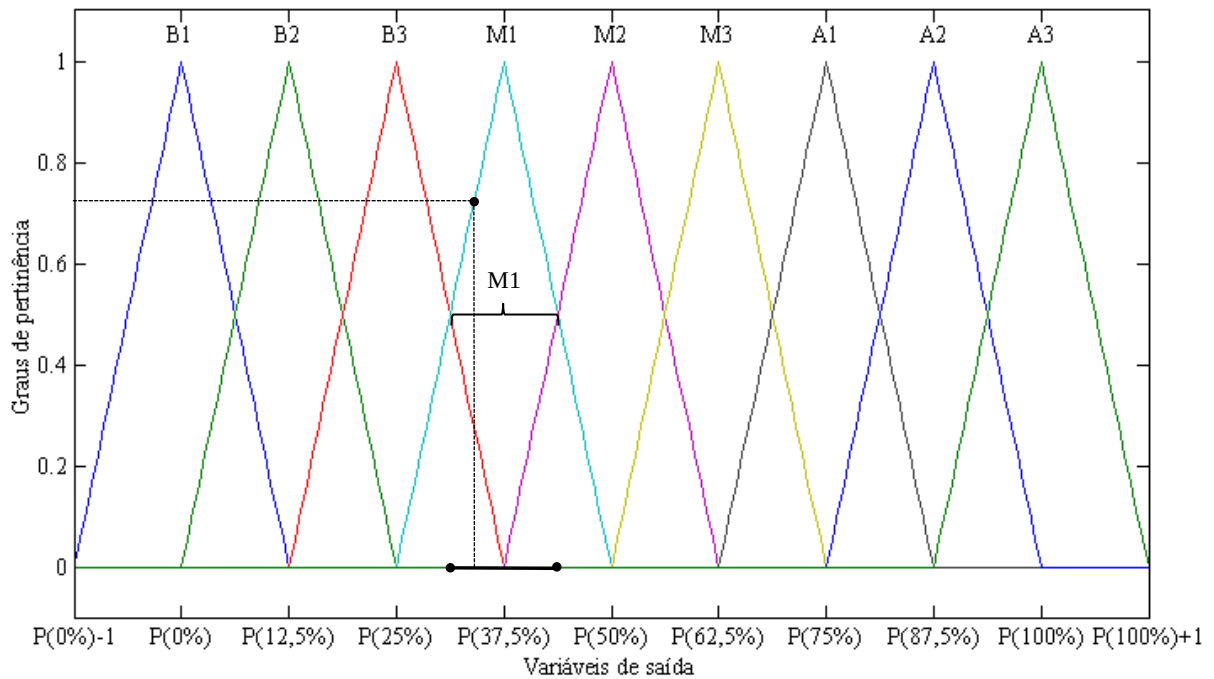


Figura 5. Funções de pertinência das variáveis de saída com indicação do subintervalo com maior grau de pertinência ao conjunto *fuzzy* M1.

A fim de generalização das demais associações, a Tabela 7 apresenta os conjuntos *fuzzy* relacionados aos seus respectivos intervalos. Tal relação indica que os pontos de determinado intervalo têm maior grau de pertinência ao conjunto *fuzzy* relacionado. Os intervalos são referentes às partições do domínio de cada variável de saída.

Tabela 7. Intervalos com maior grau de pertinência ao conjunto *fuzzy* associado.

Conjunto <i>fuzzy</i> de saída	Intervalo de maior grau de pertinência
B1	$\left[P(0\%), \frac{P(0\%) + P(12,5\%)}{2} \right]$
B2	$\left[\frac{P(0\%) + P(12,5\%)}{2}, \frac{P(12,5\%) + P(25\%)}{2} \right]$
B3	$\left[\frac{P(12,5\%) + P(25\%)}{2}, \frac{P(25\%) + P(37,5\%)}{2} \right]$
M1	$\left[\frac{P(25\%) + P(37,5\%)}{2}, \frac{P(37,5\%) + P(50\%)}{2} \right]$
M2	$\left[\frac{P(37,5\%) + P(50\%)}{2}, \frac{P(50\%) + P(62,5\%)}{2} \right]$
M3	$\left[\frac{P(50\%) + P(62,5\%)}{2}, \frac{P(62,5\%) + P(75\%)}{2} \right]$
A1	$\left[\frac{P(62,5\%) + P(75\%)}{2}, \frac{P(75\%) + P(87,5\%)}{2} \right]$
A2	$\left[\frac{P(75\%) + P(87,5\%)}{2}, \frac{P(87,5\%) + P(100\%)}{2} \right]$
A3	$\left[\frac{P(87,5\%) + P(100\%)}{2}, P(100\%) \right]$

Adotando-se nomenclatura alternativa para os conjuntos *fuzzy* de saída (apenas a título de generalização), denotando por S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9 os conjuntos *fuzzy* B1, B2, B3, M1, M2, M3, A1, A2, A3, respectivamente, temos que a Tabela 7 pode ser representada pela Tabela 8.

Tabela 8. Generalização dos intervalos com maior grau de pertinência ao conjunto *fuzzy* associado.

Variáveis de saída	Conjunto <i>fuzzy</i> associado
S1	$\left[P(0), \frac{P(0) + P(k)}{2} \right]$
$S_i, 2 \leq i \leq 8$	$\left[\frac{P((i-2)k) + P((i-1)k)}{2}, \frac{P((i-1)k) + P(ik)}{2} \right]$
S9	$\left[\frac{P(7k) + P(8k)}{2}, P(8k) \right]$

Vale ressaltar que o presente método de utilização de percentis de dados experimentais foi adotado visando evitar a subjetividade na escolha dos delimitadores das funções de pertinência, criando-se também assim uma forma de generalização de estabelecimento destas funções para todas variáveis. Além disto, destaca-se que o presente sistema refere-se à informações do experimento deste trabalho, o que não inviabiliza a utilização da mesma metodologia em outras culturas.

Método de inferência e defuzzyficação

O método de inferência utilizado neste trabalho foi o Método de Mamdani proposto por Mamdani e Assilian (1975) e que de acordo com Ross (2010), é o método mais comum praticado na literatura.

Na *defuzzyficação*, o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras *fuzzy* é traduzida num valor real e tal procedimento foi realizado por meio do Método do Centro de Gravidade que, de acordo com Cremasco (2008), pode ser compreendido como uma média ponderada, onde $\mu_a(x)$ funciona como o peso do valor x e é calculado da seguinte forma:

$$\bar{z} = \frac{\sum_x \mu_a(x)x}{\sum_x \mu_a(x)}$$

Softwares utilizados

Para a elaboração do SBRF, foram utilizados planilhas eletrônicas e o *software* Matlab®, cuja licença para seu uso a Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE/UNESP, Campus de Tupã - SP, possui.

Além disso, utilizou-se a ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox* do *software* Matlab®, para determinar as funções de pertinência, os gráficos tridimensionais e os mapas de contorno do SBRF.

Resultados e Discussão

Neste tópico, apresentou-se inicialmente os resultados obtidos em relação à modelagem e posteriormente, os resultados sobre os efeitos da irrigação e da salinidade da água no ponto de colheita da cultura do tomate.

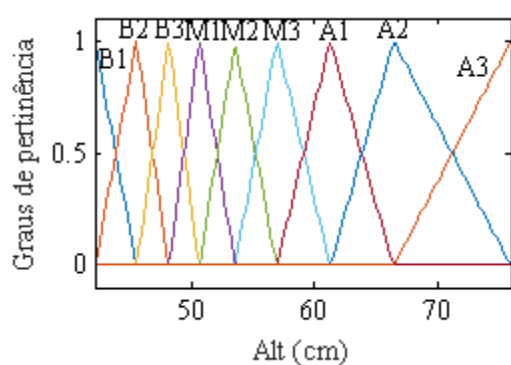
Sistema baseado em regras fuzzy

Com a determinação dos percentis dos dados aferidos (Tabela 9) no experimento agrônômico realizado por Silva Junior (2012) e utilizando a metodologia proposta, foram elaboradas as funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de saída do presente trabalho (Figuras 6 e 7), nomeadamente altura da planta (cm), diâmetro do caule (cm),

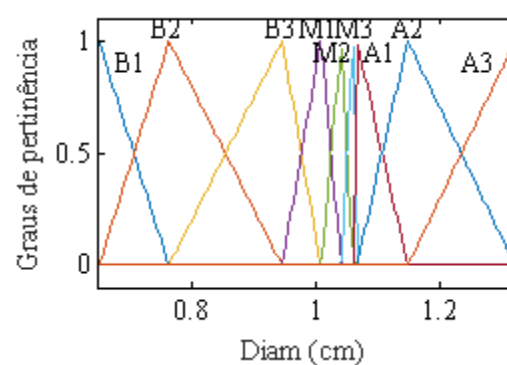
área foliar (cm^2), fitomassa verde (g), fitomassa seca (g), número de frutos (unid.), peso médio dos frutos (g) e porcentagem de frutos deficientes (%).

Tabela 9. Valores de percentis dos dados utilizados para avaliar o desenvolvimento e a produtividade do tomateiro por meio de um SBRF.

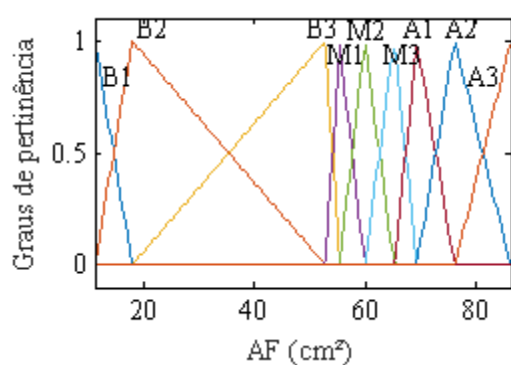
Percentil (%)	Alt	Diam	AF	FV	FS	NF	PMF	PFD
0,0%	42,10	0,65	11,10	82,06	15,07	2,00	12,92	7,82
12,5%	45,48	0,76	17,80	99,49	17,32	4,25	16,04	21,48
25,0%	48,10	0,95	52,80	108,02	19,56	7,00	19,54	23,33
37,5%	50,60	1,01	55,35	120,65	21,02	8,00	21,69	32,14
50,0%	53,50	1,04	59,93	126,99	22,16	9,00	25,00	37,50
62,5%	56,93	1,06	65,25	130,45	22,71	10,19	26,15	43,26
75,0%	61,25	1,07	69,33	136,37	25,60	11,25	27,63	58,76
87,5%	66,44	1,15	76,19	156,85	29,67	13,63	31,26	87,15
100,0%	76,00	1,32	86,38	180,75	37,29	15,00	49,88	100,00



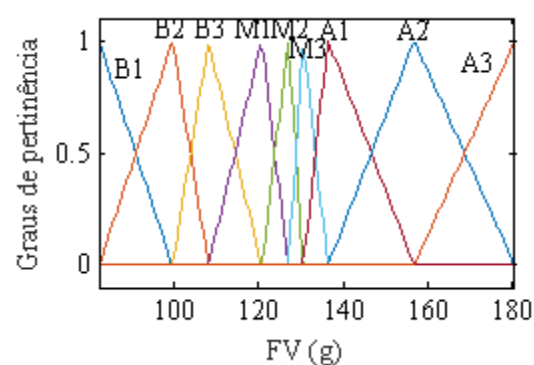
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura de tomate submetido a diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação: (a) Altura da planta, (b) Diâmetro do caule, (c) Área foliar e (d) Fitomassa verde.

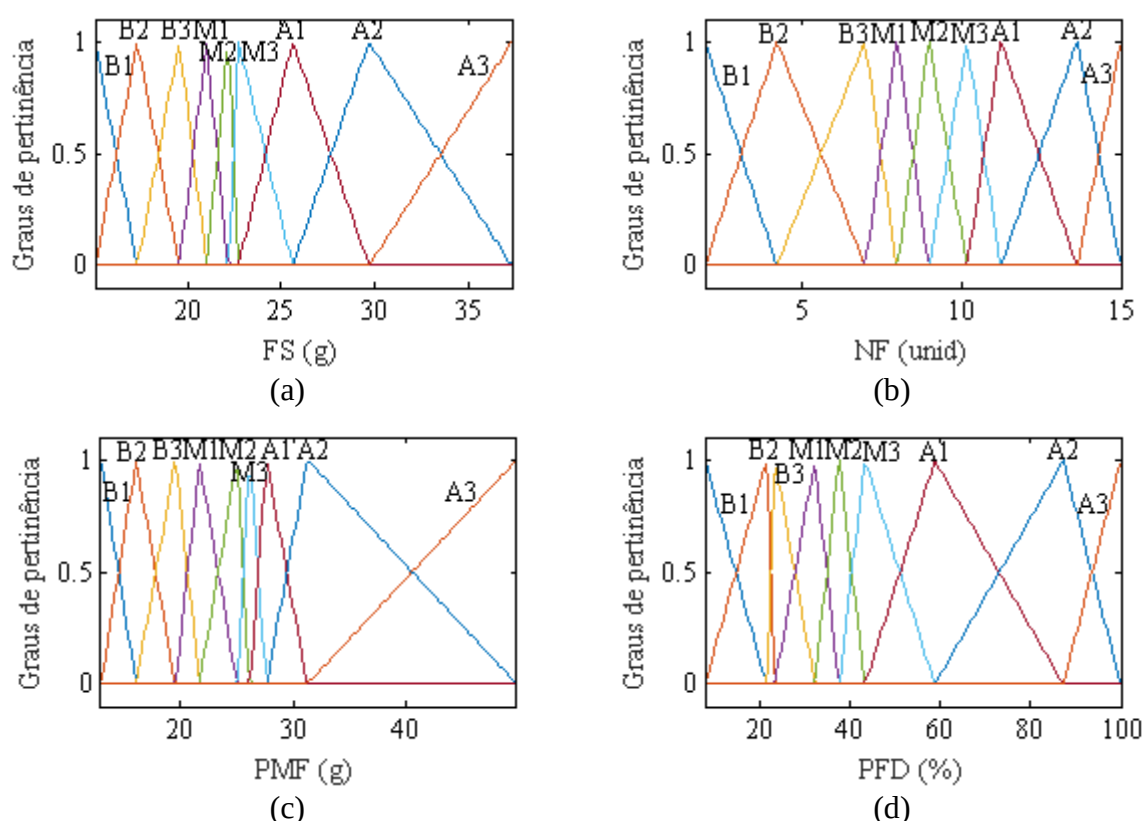


Figura 7. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura de tomate submetido a diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação: (a) Fitomassa seca, (b) Número de frutos, (c) Peso médio dos frutos e (d) Porcentagem de frutos deficientes.

De acordo com as Tabelas 7 e 9, foi possível determinar os intervalos que indicam o maior grau de pertinência de cada ponto das variáveis de saída à um determinado conjunto *fuzzy* (Tabela 10).

Tabela 10. Intervalos com maior grau de pertinência ao conjunto *fuzzy* associado.

Conjunto <i>fuzzy</i> de saída	Intervalo de maior grau de pertinência							
	Alt	Diam	AF	FV	FS	NF	PMF	PFD
B1	[42,1; 43,8[	[0,65; 0,71[	[11,1; 14,5[	[82,1; 90,8[	[15,1; 16,2[	[2; 3,1[	[12,9; 14,5[	[7,8; 14,7[
B2	[43,8; 46,8[	[0,71; 0,86[	[14,5; 35,3[	[90,8; 103,8[	[16,2; 18,4[	[3,1; 5,6[	[14,5; 17,8[	[14,7; 22,4[
B3	[46,8; 49,4[	[0,86; 0,98[	[35,3; 54,1[	[103,8; 114,3[	[18,4; 20,3[	[5,6; 7,5[	[17,8; 20,6[	[22,4; 27,7[
M1	[49,4; 52,1[	[0,98; 1,03[	[54,1; 57,6[	[114,3; 123,8[	[20,3; 21,6[	[7,5; 8,5[	[20,6; 23,3[	[27,7; 34,8[
M2	[52,1; 55,2[	[1,03; 1,05[	[57,6; 62,6[	[123,8; 128,7[	[21,6; 22,4[	[8,5; 9,6[	[23,3; 25,6[	[34,8; 40,4[
M3	[55,2; 59,1[	[1,05; 1,07[	[62,6; 67,3[	[128,7; 133,4[	[22,4; 24,2[	[9,6; 10,7[	[25,6; 26,9[	[40,4; 51[
A1	[59,1; 63,8[	[1,07; 1,11[	[67,3; 72,8[	[133,4; 146,6[	[24,2; 27,6[	[10,7; 12,4[	[26,9; 29,4[	[51; 73[
A2	[63,8; 71,2[	[1,11; 1,24[	[72,8; 81,3[	[146,6; 168,8[	[27,6; 33,5[	[12,4; 14,3[	[29,4; 40,6[	[73; 93,6[
A3	[71,2; 76]	[1,24; 1,32]	[81,3; 86,4]	[168,8; 180,8]	[33,5; 37,3]	[14,3; 15]	[40,6; 49,9]	[93,6; 100]

De acordo com a proposta metodológica de elaboração da base de regras, foi possível gerar as regras utilizada pelo sistema *fuzzy* em questão para classificar as variáveis de saída de acordo com o tratamento escolhido (Tabela 11).

Tabela 11. Base de regras do sistema *fuzzy*.

Variáveis de entrada		Variáveis de saída							
Irrigação	Salinidade	Alt	Diam	AF	FV	FS	NF	PMF	PFD
B	B	M1	M2	M3	M2	M3	B1	M2	A3
B	M	M1	M2	M3	M2	M1	M2	M3	B3
B	A	M2	A1	M2	B2	B3	B2	B3	M1
M	B	B3	M3	A2	A1	A1	M1	A1	A2
M	M	M3	M3	A1	M3	M2	M3	B2	M3
M	A	B3	M2	M1	M1	B3	M1	B2	M3
A	B	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	B1
A	M	A3	B2	B2	A1	A2	A2	A1	B2
A	A	A1	B1	B1	B1	B2	A2	M1	M1

A primeira linha da Tabela 11 é explicada da seguinte forma: “Se (Irrigação é B e Salinidade é B), então (Altura da planta é M1; Diâmetro do caule é M2; Área Foliar é M3; Fitomassa verde é M2; Fitomassa seca é M3; Número de frutos é B1; Peso médio dos frutos é M2 e Porcentagem de frutos deficientes é A3)”. As demais linhas são interpretadas de forma análoga.

Utilizando a nomenclatura apresentada na Tabela 8, foi possível determinar a Tabela 12 que é uma alternativa de generalização da Tabela 11 de classificação das variáveis de saída em relação ao tratamento escolhido.

Tabela 12. Base de regras alternativa do sistema *fuzzy*.

Variáveis de entrada		Variáveis de saída							
Irrigação	Salinidade	Alt	Diam	AF	FV	FS	NF	PMF	PFD
B	B	S4	S5	S6	S5	S6	S1	S5	S9
B	M	S4	S5	S6	S5	S4	S5	S6	S3
B	A	S5	S7	S5	S2	S3	S2	S3	S4
M	B	S3	S6	S8	S7	S7	S4	S7	S8
M	M	S6	S6	S7	S6	S5	S6	S2	S6
M	A	S3	S5	S4	S4	S3	S4	S2	S6
A	B	S8	S8	S8	S8	S8	S8	S9	S1
A	M	S9	S2	S2	S7	S8	S8	S7	S2
A	A	S7	S1	S1	S1	S2	S8	S4	S4

Vale ressaltar que para a determinação das regras do sistema *fuzzy* (Tabelas 11 e 12), nas quais são relacionados os conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada com os de saída, calcularam-se os valores medianos referentes a cada combinação dos conjuntos *fuzzy* de entrada. Além disso, as classificações apresentadas nestas Tabelas são possivelmente invariantes ou não teriam mudanças significativas caso um novo experimento fosse realizado nas mesmas condições e no mesmo período descritos, o que torna o resultado relevante.

Para a variável de saída altura da planta, temos os seguintes valores (Tabela 13) aferidos para algumas combinações dos conjuntos *fuzzy* de entrada (para as demais variáveis de saída e demais combinações de conjuntos *fuzzy* de entrada, o procedimento realizado foi análogo).

Tabela 13. Procedimento realizado para elaboração da base de regras do sistema *fuzzy* para a variável de saída altura da planta.

Conjunto <i>fuzzy</i> de entrada		Valores mediano dos dados de 3 repetições da variável altura da planta	Conjunto <i>fuzzy</i> associado (conjunto com maior grau de pertinência)
Irrigação	Salinidade		
B (-60 kPa)	B (0,08 dS.m ⁻¹)	50,0	M1
B (-60 kPa)	M (3 dS.m ⁻¹)	49,7	M1
B (-60 kPa)	A (5 dS.m ⁻¹)	53,5	M2

Logo, para a combinação dos conjuntos *fuzzy* B da variável Irrigação e B da variável Salinidade, temos pela Tabela 13 que o valor mediano das 3 repetições (que pela base de dados corresponde ao valor 50 cm) pertence a dois conjuntos *fuzzy* da variável altura da planta, à saber, B3 e M1. Tal fato pode ser observado nas Figuras 6(a) e 8. Como este valor tem maior grau de pertinência ao conjunto *fuzzy* M1, cria-se a regra: “Se Irrigação for B e Salinidade for B, então Alt é M1”.

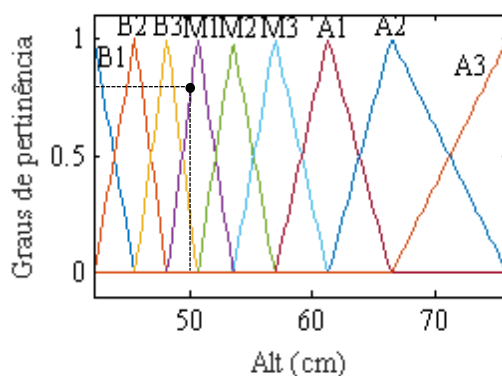


Figura 8. Classificação da variável altura da planta para Irrigação igual a -60 kPa e Salinidade igual a 0,08 dS.m⁻¹.

Resultados práticos

Utilizando os métodos de inferência e *defuzzyficação* adotados, obtém-se os gráficos tridimensionais e seus respectivos mapas de contorno das variáveis de saída como solução do sistema.

Em relação à altura da planta, verificou-se, a partir da modelagem *fuzzy*, que o maior valor foi obtido quando a cultura do tomate foi submetida a tensão de água no solo de -10 kPa e a dose de salinidade na irrigação de 3 dS.m⁻¹. Já o menor valor, ocorreu para tensão de água no solo de -30 kPa e dose de salinidade na irrigação de 0,08 dS.m⁻¹ (Figura 9).

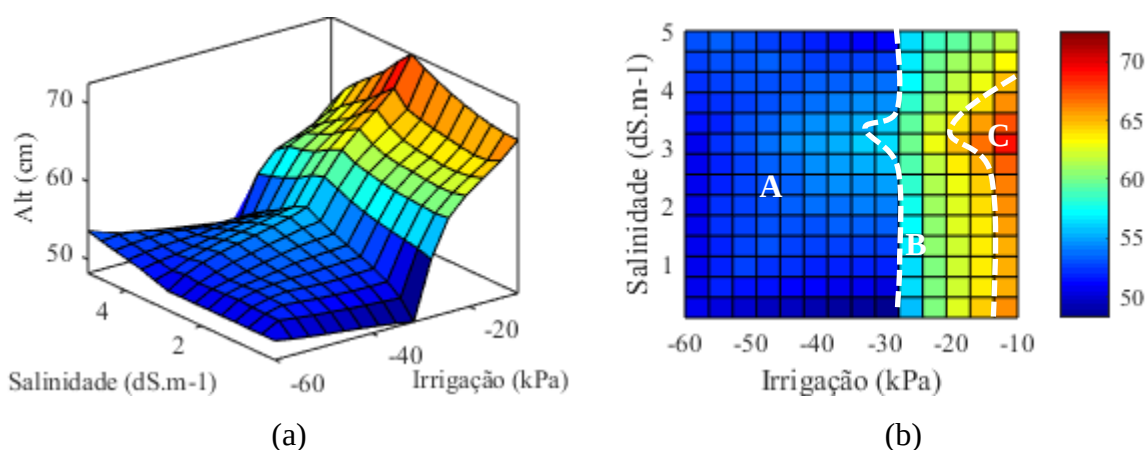


Figura 9. Altura da planta (Alt) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.

A partir do gráfico tridimensional (Figura 9a) foi possível elaborar o mapa de contorno (Figura 9b). Na Região A foi possível verificar que, entre as tensões de água no solo -60 a -30 kPa não houve efeito na altura das plantas, mas para tensões acima -30 kPa (Região B e C), constatou-se incrementos na altura das plantas quando comparado com a Região A. Os maiores valores para tal variável foram obtidos nos tratamentos pertencentes a Região C, onde foi mantido a irrigação em CC.

Tal efeito na Região A foi oriundo da baixa disponibilidade hídrica no solo, que prejudica diretamente a relação planta-solo, em que a água fica fortemente retida no solo, e assim afetando os processos fisiológicos e fotossintético (TAIZ; ZAIGER, 2013). Nessas condições, ocorre fechamento dos estômatos foliares e redução na transpiração, e,

consequentemente, diminuição na absorção de água e nutrientes pelas plantas, resultando em menor crescimento das plantas (LIMA et al., 2015).

De acordo com Silva Junior (2012), as tensões de água no solo -60 kPa e -30 kPa apresentaram reduções de 26,7 e 24,1% na altura da planta, respectivamente, quando comparados com a tensão de -10 kPa para quaisquer doses de salinidade na água. Já Soares et al. (2011) obtiveram aumento na altura do tomateiro quando irrigados com lâmina de até 120 % da evapotranspiração (ET_o). Em relação a salinidade da água, não houve interferência significativa das doses sobre a altura das plantas ao contrário do que foi constatado por Oliveira et al. (2007), Gomes et al. (2011) e Guedes et al. (2015) que por meio de experimentos com outras cultivares de tomate, inferiram que ocorreu a redução na altura das plantas com o aumento da salinidade da água.

Na análise do diâmetro do caule constatou-se, por meio da modelagem *fuzzy*, que o maior valor ocorreu entre -20 kPa e -10 kPa e 0,08 dS.m⁻¹. Já o menor valor, foi verificado para a tensão de água no solo de -10 kPa e para a dose de salinidade na irrigação de 5 dS.m⁻¹ (Figura 10).

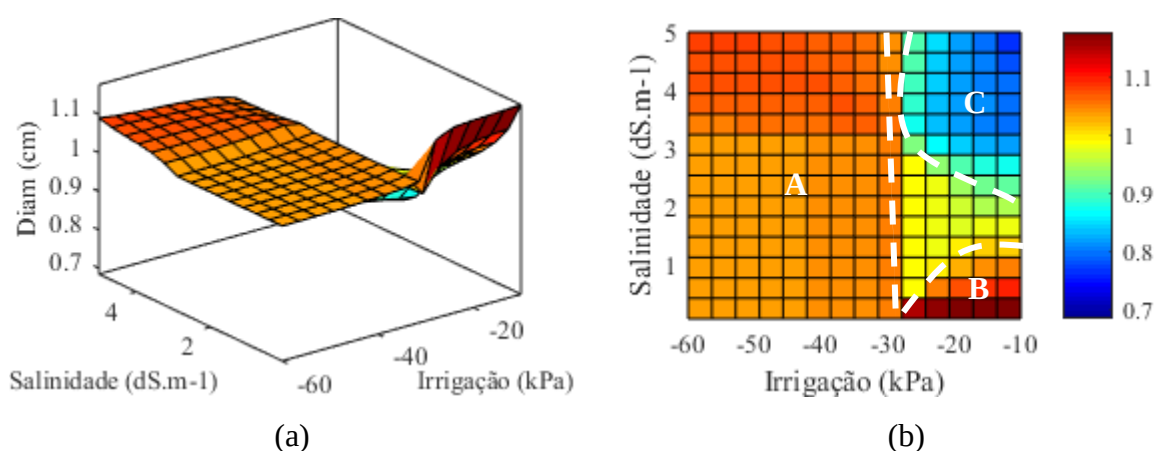


Figura 10. Diâmetro do caule (Diam) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.

Na Figura 10b, verificou-se na Região A que, independentemente das tensões de água no solo e das doses de salinidade na irrigação, não houve diferença significativa no diâmetro do caule. Já na Região B, conferiu-se os maiores valores da variável em questão e, na Região C, possivelmente devido à alta salinidade da água, ocorreu o acúmulo de sal no solo, afetando negativamente o diâmetro do caule.

Para as plantas que foram irrigadas com água cuja salinidade é de $0,08 \text{ dS.m}^{-1}$, as tensões de água no solo de -30 e -60 kPa reduziram o diâmetro do caule em $15,6$ e $16,2\%$, respectivamente, se comparados a tensão de -10 kPa (SILVA JUNIOR, 2012). Já Soares et al. (2011) não verificaram efeito significativo no diâmetro de caule com redução da disponibilidade hídrica em seu trabalho e classificou tal variável como pouco sensível ao estresse hídrico. Além disso, em relação a salinidade, nos trabalhos de Najla et al. (2007), Gomes et al. (2011) e Guedes et al. (2015) foram constatados uma pequena redução do diâmetro do caule em virtude do seu aumento, e de maneira semelhante, Lima et al. (2015) constatou tal efeito na cultura da berinjela.

A área foliar foi afetada negativamente pelas doses de salinidade na irrigação entre 3 e 5 dS.m^{-1} quando submetida a tensão de água no solo de -10 kPa , comportamento análogo a variável diâmetro do caule. Além disso, constatou-se que a área foliar apresentou os maiores valores para os tratamentos que utilizaram doses de salinidade na irrigação igual a $0,08 \text{ dS.m}^{-1}$ e tensões de água no solo entre -30 e -10 kPa (Figura 11).

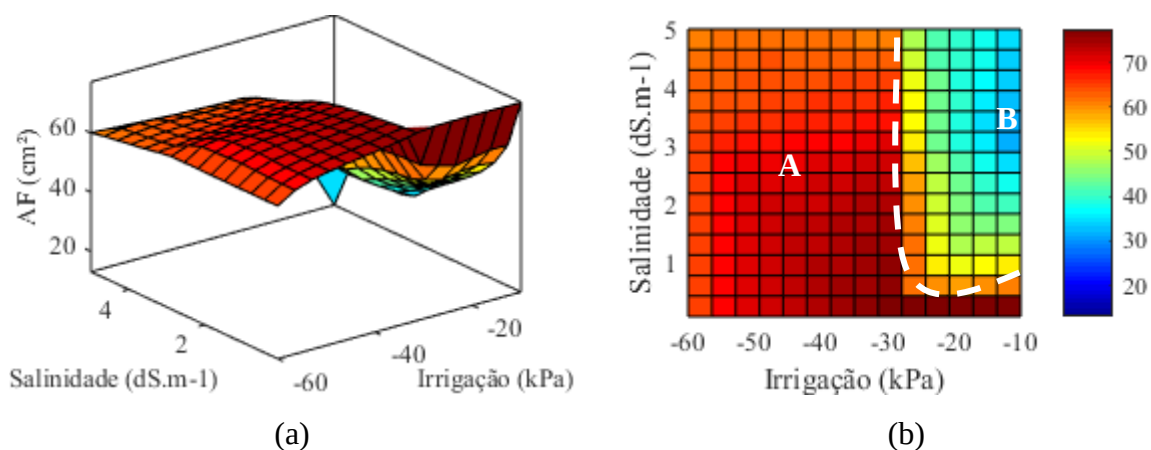


Figura 11. Área foliar (AF) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.

Na Região A (Figura 11b), verificou-se que a área foliar não apresentou diferença significativa entre as tensões de água no solo -60 e -30 kPa para quaisquer doses de salinidade na irrigação. Já na Região B, constatou-se que o aumento da salinidade gerou os menores valores para a variável área foliar, possivelmente decorrentes do estresse salino no ambiente radicular que provoca o estresse osmótico e hídrico na planta e consequentemente a redução da área foliar (SOUSA et al., 2012).

Para a tensão de água no solo de -10 kPa o efeito osmótico reduz a área foliar em $71,6$ e $79,6 \%$ na comparação entre as doses de salinidade da água de 3 e 5 dS.m^{-1} ,

respectivamente, com a dose de $0,08 \text{ dS.m}^{-1}$ (SILVA JUNIOR, 2012). A redução da área foliar em virtude da salinidade aplicada na água de irrigação também foi verificada por Oliveira et al. (2007) e Guedes et al. (2015). Já Soares et al. (2011), relataram aumento de 29,45% na quantidade de folhas entre as plantas irrigadas com a lâmina de 120% da ETo em relação às submetidas a 60% da ETo em seu trabalho.

A fitomassa verde aérea da cultura do tomate obteve o maior acúmulo para a tensão de água no solo de -10 kPa e para as doses de salinidade a irrigação entre 0,08 e 1 dS.m^{-1} . O menor acúmulo ocorreu para a tensão de água no solo de -60 kPa e dose de salinidade na irrigação de 5 dS.m^{-1} (Figura 12).

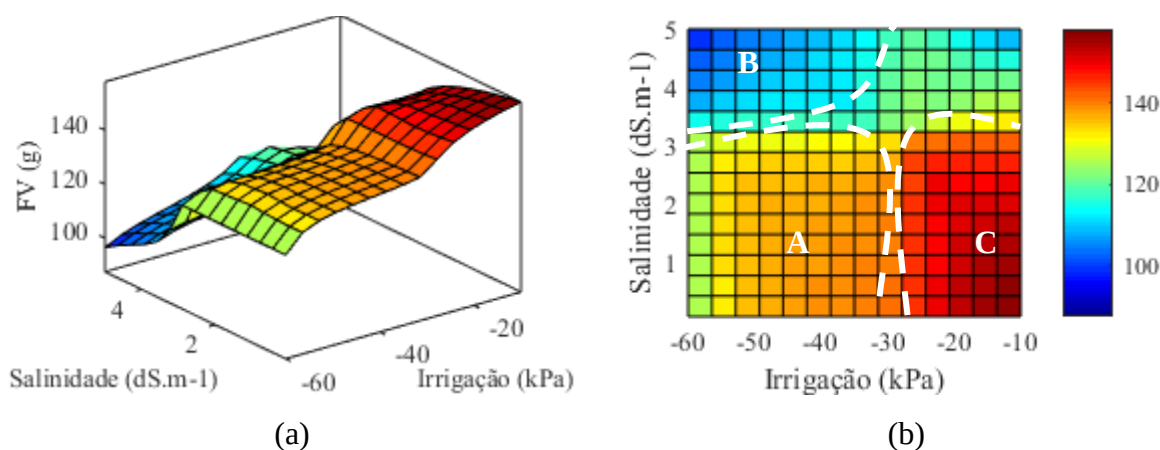


Figura 12. Fitomassa verde (FV) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.

Nas tensões de água no solo entre -60 a -30 kPa, não constatou-se efeito das doses de salinidade na irrigação entre 0 a 3 dS.m^{-1} (Região A) (Figura 12b). Já para as doses de salinidade na irrigação entre 3 a 5 dS.m^{-1} , e considerando-se as mesmas tensões anteriores, verificou-se redução severa da fitomassa verde (Região B). Na Região C, onde foi mantido as tensões de água no solo acima de -30 kPa, a cultura do tomate apresentou o maior acúmulo de fitomassa para doses de salinidade na irrigação abaixo de 3 dS.m^{-1} .

A redução da fitomassa verde do tomate em consequência do estresse hídrico é observada por vários autores (MAROUELLI e SILVA, 2008; SOARES et al., 2012; MORALES et al., 2015), isto ocorre provavelmente, porque “déficit hídrico reduz a pressão de turgor e, consequentemente, o fluxo de seiva pelos vasos condutores”, como explica Taiz e Zeiger (2013), isto faz com que “diminua o alongamento celular e, assim, o crescimento e o

desenvolvimento das plantas”. “Isto proporciona reduções na expansão foliar, altura e diâmetro das plantas, resultando em perda da biomassa vegetal” (SOARES et al., 2012).

A tensão de água no solo de -10 kPa apresentou diferença significativa na produção de fitomassa verde entre as doses de salinidade da água 0,08 e 5 dS.m⁻¹ de 46,95% (SILVA JUNIOR, 2012). De modo geral, vários autores constataram a influência negativa da salinidade sobre a fitomassa verde do tomateiro (CAVATTE et al., 2004; COSME et al., 2011; MALHEIROS et al., 2012).

Também foi inferido valores a respeito da fitomassa seca aérea da planta do tomate que apresentou comportamento análogo ao da fitomassa verde, sendo que a correlação entre as variáveis foi significativa ($R^2 = 0,81$; $P < 0,001$) (Figura 13).

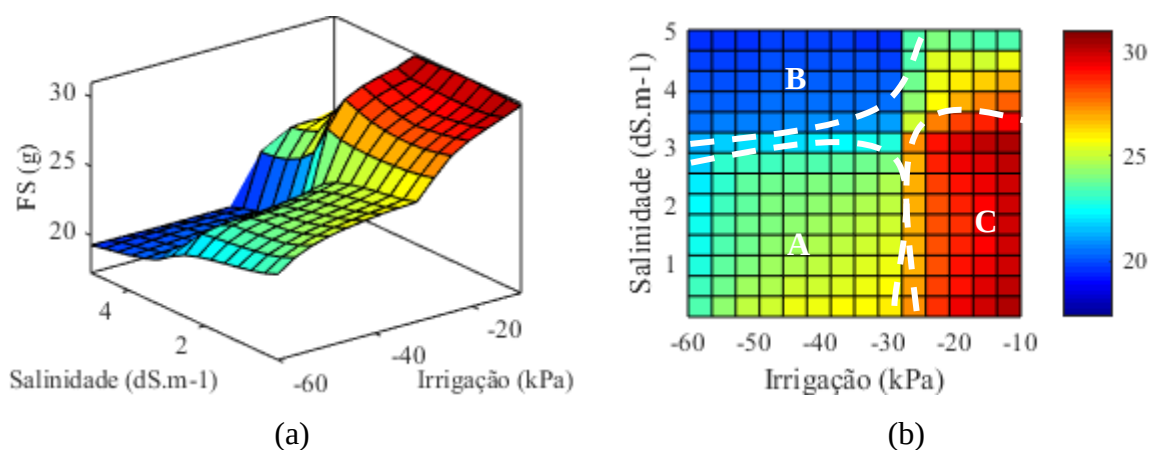


Figura 13. Fitomassa seca (FS) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.

Na Região A, notou-se que tanto a irrigação quanto a salinidade não apresentam diferenças significativas na variável em questão (Figura 13b). Na Região B observou-se o menor acúmulo de fitomassa seca. E na Região C, com tensões de água no solo entre -25 a -10 kPa e doses de salinidade na irrigação inferiores a 3 dS.m⁻¹, constatou-se o maior acúmulo de fitomassa seca.

De acordo com Silva Junior (2012), a tensão de água no solo de -10 kPa também apresentou diferença significativa na produção de fitomassa seca para as doses de salinidade da água iguais a 0,08 e 5 dS.m⁻¹ de 47,14%. Oliveira et al. (2007), constataram que a fitomassa seca é a variável menos tolerante ao ambiente salino das variáveis relacionada ao desenvolvimento. A redução da fitomassa seca em virtude do aumento da salinidade também

foi constatada por outros autores (CAMPOS et al., 2007; COSME et al., 2011; GOMES et al., 2011; SILVA et al., 2013).

Segundo Taiz e Zeiger (2013), “a salinidade elevada reduz a taxa de assimilação metabólica pelas plantas e a atividade de enzimas responsáveis pela respiração e fotossíntese”. O mesmo autor, diz que tal fato “restringe a obtenção de energia para o crescimento e diferenciação das células em tecidos, reduzindo consequentemente, o alongamento do eixo embrionário e a produção de massa seca”.

A maior quantidade de frutos por plantas foi constatada para os tratamentos que utilizaram tensão de água no solo igual a -10 kPa independente das doses de salinidade na irrigação. Já para a tensão de água no solo de -60 kPa e a dose de salinidade na irrigação de 0,08 dS.m⁻¹, verificou-se a menor quantidade de frutos por planta (Figura 14).

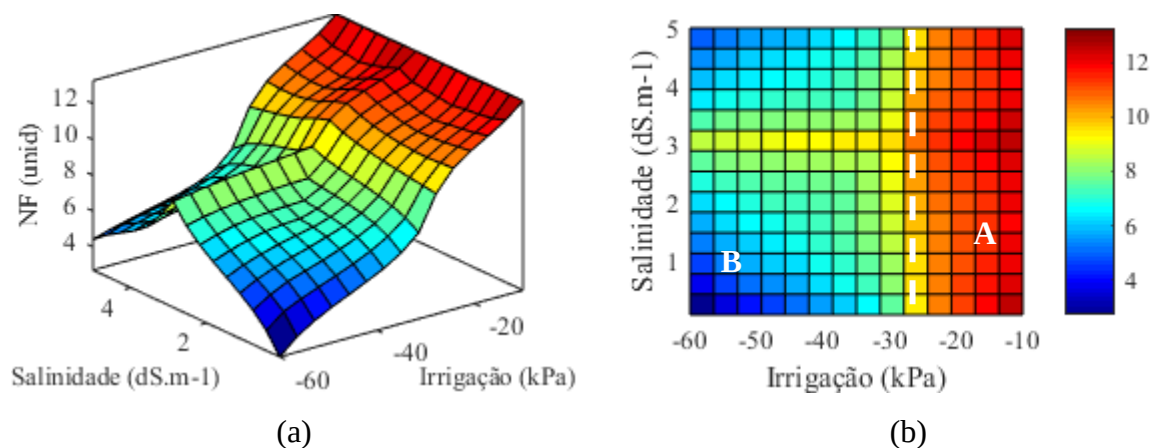


Figura 14. Número de frutos (NF) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.

Na Figura 14b, constatou-se que na Região A os manejos proporcionaram a maior quantidade de frutos por plantas, sendo que a disponibilidade hídrica foi fator determinante. Também verificou-se na Região B que o déficit hídrico provocou a redução na quantidade de frutos.

Silva Junior (2012) afirmou que o número de frutos diminui significativamente entre as tensões de água no solo para os tratamentos que utilizaram doses de salinidade na irrigação iguais a 0,08 ou 5 dS.m⁻¹, por exemplo, para a tensão de -60 kPa, quando comparada a tensão de -10 kPa, verificou-se uma redução de 84% no número de frutos para a dose de salinidade da água 0,08 dS.m⁻¹.

Apesar da pouca influência das doses de salinidade na água sobre o número de frutos no experimento analisado por este trabalho, tal efeito já foi observado por vários autores na cultura do tomate (OLIVEIRA et al., 2007; FREIRE et al., 2010; COSME et al., 2011; MEDEIROS et al., 2012; SILVA et al., 2013; GUEDES et al., 2015) e outras solanáceas, como berinjela (OLIVEIRA et al., 2014), pimentão (NASCIMENTO et al., 2015) e beterraba (LIMA et al., 2015).

Em relação ao peso médio dos frutos, verificou-se que os maiores valores ocorreram quando não se irrigou com água salina e manteve-se a mesma em CC (-10 kPa). Já os menores valores para tal variável ocorreram quando se adotou a tensão de água no solo de -30 kPa e doses de salinidade na irrigação entre 3 e 5 dS.m⁻¹ (Figura 15).

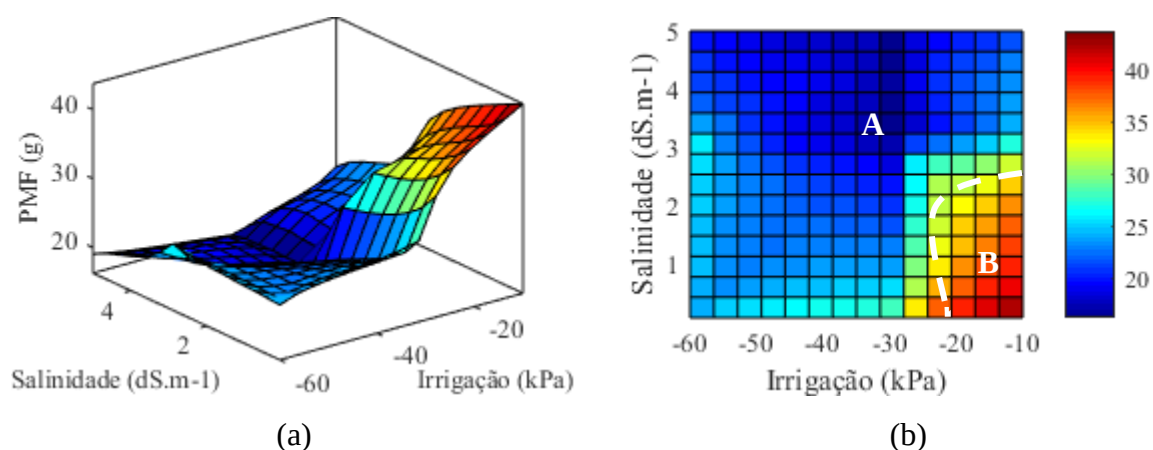


Figura 15. Peso médio dos frutos (PMF) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.

Na Região A (Figura 15b), verificou-se os menores valores para a variável peso médio dos frutos com destaque aos efeitos provocados pelas doses de salinidade na água. Já na Região B, a disponibilidade hídrica para o tomateiro propiciou os maiores valores para tal variável. De acordo com Santana et al. (2010), “o crescimento ou a redução do tamanho de um fruto de tomateiro são altamente relacionados com aumento e diminuição diária do potencial de água na planta que está intimamente relacionado com a quantidade de água no solo”.

O déficit hídrico e o estresse salino influenciaram significativamente o peso médio dos frutos. O maior valor observado no experimento foi de 44,84 g e este foi obtido no tratamento -10 kPa e 0,08 dS.m⁻¹ e o menor valor foi de 15,99 g, obtido no tratamento -30

kPa e 3 dS.m^{-1} (SILVA JUNIOR, 2012). O efeito negativo da salinidade sobre o peso médio dos frutos também foi verificado por Oliveira et al. (2014) na cultura de berinjela.

Por fim, foi analisado a porcentagem de frutos deficientes, onde tal deficiência foi aferida em relação aos frutos que apresentaram podridão apical. A partir da modelagem *fuzzy*, constatou-se que esta variável apresentou o maior percentual quando a tensão de água no solo e a dose de salinidade na irrigação utilizadas foram -60 kPa e $0,08 \text{ dS.m}^{-1}$, respectivamente. Para esta dose de salinidade, a podridão apical também apresentou um elevado percentual para a tensão de água no solo de -30 kPa e o menor percentual, foi constatado para a tensão de água no solo de -10 kPa (Figura 16).

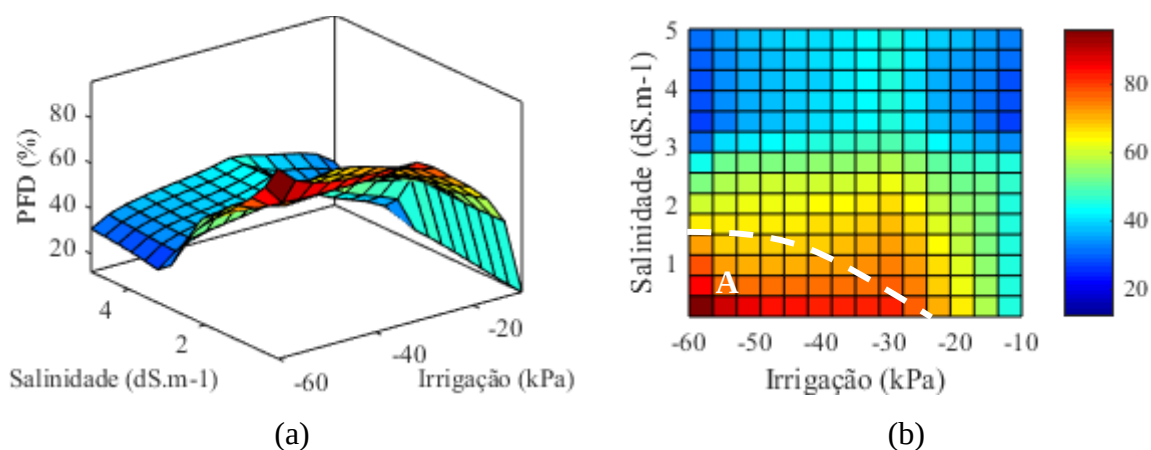


Figura 16. Porcentagem de frutos deficientes (PFD) para a cultura do tomate submetida em diferentes tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. (a) Gráfico tridimensional e (b) Mapa de contorno.

Na Figura 16b, constatou-se que a Região A apresenta os manejos em que ocorreram os maiores percentuais de podridão apical. Segundo Silva Junior (2012), o déficit hídrico afetou a qualidade dos frutos e o aparecimento de podridão apical foi verificado em todos os tratamentos, sendo que o menor valor observado foi de 9,38% no tratamento -10 kPa e $0,08 \text{ dS.m}^{-1}$ e o maior valor, 100%, foi observado no tratamento -60 kPa e $0,08 \text{ dS.m}^{-1}$.

“Em hortaliças, os desequilíbrios relacionados ao cálcio incluem a queima dos bordos das folhas, de ocorrência comum em alface, e a podridão apical ou fundo preto, que ocorre em tomates e pimentões” (ARRUDA JUNIOR et al., 2011), mas Lopes e Reis (2011), enfatizam que “embora a principal causa da podridão apical seja atribuída à deficiência de cálcio, a insuficiência de água, ainda que temporária, contribui significativamente para o seu aparecimento”.

Conclusões

A modelagem *fuzzy* possibilitou determinar funções que se ajustaram, tanto aos resultados aferidos experimentalmente das variáveis biométricas e de produtividade do tomateiro no momento da colheita, quanto também aos demais valores não aferidos, e que estavam dentro dos parâmetros pré-estabelecidos.

Todas as variáveis aqui estudadas apresentaram alterações de acordo com as tensões de água no solo e/ou as doses de salinidade na irrigação, sendo que os resultados mais favoráveis, com exceção da variável altura de plantas, ocorreram para a irrigação em capacidade de campo e a salinidade da água nula.

Para tensões de água no solo entre -20 a -10 kPa, verificou-se maiores quantidades de frutos por planta e menor incidência de podridão apical, e se considerarmos as doses de salinidade abaixo de 2 dS.m⁻¹, também tem-se os maiores pesos médios dos frutos, o que representa situações ótimas de cultivo. Ademais, vale ressaltar que, para tensões de água no solo entre -60 a -30 kPa, as doses de salinidades próximas à 3 dS.m⁻¹ remetem melhores situações de produtividade.

Referências

- ALVARENGA, M. A. R. *Sistemas de produção em campo aberto e em ambiente protegido*. Capítulo 7. In: ALVARENGA, M. A. R. *Tomate: Produção em campo, em casa-de-vegetação e em hidroponia*. UFLA. Lavras, 2004.
- ARRUDA JÚNIOR, S. J.; BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P.; RESENDE, L. V. Podridão apical e produtividade do tomateiro em função dos teores de cálcio e amônio. *Revista Caatinga*, v. 24, n. 4, p. 20-26, 2011.
- BENINI, L. C. *Uma introdução à teoria dos conjuntos fuzzy*. Congresso Brasileiro de Sistemas Fuzzy. Natal, 2012.
- BERNARDO, S. *Manual de irrigação*. 6ª ed. UFV. Viçosa, 1996. 596 p.
- CAMPOS, C. A. B.; FERNANDES, P. D.; GHEYI, H. R.; BLANCO, F. F. Tomato growth and dry matter partitioning as a function of the irrigation water quality. *Revista Ciência Agronômica*, v. 38, n. 3, p. 239-246, 2007.

CARMO, C. A. S.; CALIMAN, L. F. *Clima, época de plantio e cultivar*. Capítulo 5. In: Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. Tomate. Incaper. Vitória, 2010. 430 p.

CAVATTE, P. C.; LOPES, J. C.; LIMA, E. A. *Efeito do estresse salino e da temperatura na germinação, vigor de sementes e no desenvolvimento de plântulas de tomate*. In: Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, 8. Anais... Universidade do Vale do Paraíba. São José dos Campos, v. 01. p. 562-564, 2004.

COSME, C. R.; DIAS, N. S.; OLIVEIRA, A. M.; OLIVEIRA, E. M. M.; SOUSA NETO, O. N. Produção de tomate hidropônico utilizando rejeito da dessalinização na solução nutritiva aplicados em diferentes épocas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 499-504, 2011.

CREMASCO, C. P. *Aplicação da lógica fuzzy para avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de uma empresa de avicultura de postura*. 2008. Tese (Doutorado em Agronomia) - FCA/UNESP. Botucatu, 2008.

CREMASCO, C. P.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; CATANEO, A. Metodologia de determinação de funções de pertinência de controladores fuzzy para a avaliação energética de empresas de avicultura de postura. *Revista Energia na Agricultura*, v. 25, p. 21-39, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3ª ed. Embrapa. Brasília, 2013. 353p.

FILGUEIRA; F. A. R. *Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças*. 3ª ed. UFV. Viçosa, 2008. 421 p.

FREIRE, A. L. O.; SARAIVA, V. P.; MIRANDA, J. R. P.; BRUNO, G. B. Crescimento, acúmulo de íons e produção de tomateiro irrigado com água salina. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 31, p. 1133-1144, 2010.

GABRIEL FILHO, L. R. A. *Sistemas Fuzzy aplicados nas Ciências Agrárias*. 2015. 258p. Tese (Livre-Docência em Matemática Aplicada e Computacional) - FCE/UNESP, Tupã, 2015.

GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; PUTTI, F. F.; CHACUR, M. G. M.

Application of *fuzzy* logic for the evaluation of livestock slaughtering. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 4, p. 813-825, 2011.

GABRIEL FILHO, L. R. A.; PUTTI, F. F.; CREMASCO, C. P.; BORDIN, D.; CHACUR, M. G. M.; GABRIEL, L. R. A. Software to assess beef cattle body mass through the *fuzzy* body mass index. *Engenharia Agrícola*, v. 36, n. 1, p. 179-193, 2016.

GOMES, J. W. S.; DIAS, N. S.; OLIVEIRA, A. M.; BLANCO, F. F.; SOUSA NETO, O. N. Crescimento e produção de tomate cereja em sistema hidropônico com rejeito de dessalinização. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 4, p. 850-856, 2011.

GUEDES, R. A. A.; OLIVEIRA, F. A.; ALVES, R. C.; MEDEIROS, A. M.; GOMES, L. P.; COSTA, L. P. Estratégias de irrigação com água salina no tomateiro cereja em ambiente protegido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, v. 19, n. 10, p. 913-919, 2015.

LIMA, L. A.; OLIVEIRA, F. A.; ALVES, R. C.; LINHARES, P. S. F.; MEDEIROS, A. M. A.; BEZERRA, F. M. S. Tolerância da berinjela à salinidade da água de irrigação. *Revista Agro@mbiente On-line*, v. 9, n. 1, p. 27-34, 2015.

LOPES, C. A.; REIS, A. *Doenças do tomateiro cultivado em ambiente protegido*. 2ª ed. Embrapa Hortaliças. Brasília, 2011.

MACEDO, J. R.; CAPACHE, C. L.; MELO, A. S.; BHERING, S. B. *Recomendações técnicas para a produção do tomate ecologicamente cultivado – TOMATEC*. Circular Técnica 33 - Embrapa. Rio de Janeiro, 2005.

MALHEIROS, S. M. M.; SILVA, E. F. F.; MEDEIROS, P. R. F.; PEDROSA, E. M. R.; ROLIM, M. M.; SANTOS, A. N. Cultivo hidropônico de tomate cereja utilizando-se efluente tratado de uma indústria de sorvete. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 10, p. 1085-1092, 2012.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a *fuzzy* logic controller. *International Journal Man-Machine Studies*, v. 7, p. 1-13, 1975.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. *Tensões - limite de água no solo para o cultivo do tomateiro para processamento irrigado por gotejamento*. Embrapa Hortaliças. Brasília, 2008.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, H. R.; SILVA, W. L. C. *Irrigação e fertigação*. Capítulo 6. In: CLEMENTE, F. M. V. T.; BOITEUX, L. S. *Produção de tomate para processamento industrial*. Embrapa. Brasília, 2012.

MATOS, E. S.; SHIRAHIGE, F. H.; MELO, P. C. T. Desempenho de híbridos de tomate de crescimento indeterminado em função de sistemas de condução de plantas. *Horticultura Brasileira*, v. 30, n. 2, p. 240-245, 2012.

MEDEIROS, P. R. F.; DUARTE, S. N.; UYEDA, C. A.; SILVA, E. F. F. Tolerância da cultura do tomate à salinidade do solo em ambiente protegido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, p. 51-55, 2012.

MERLI, R. F.; ALMEIDA, L. M. W. *Nem tudo é tão certo como parece ser: a matemática fuzzy como linguagem*. XI EPREM - Encontro Paranaense de Educação Matemática. Apucarana, 2011.

MORALES, R. G. F.; RESENDE, L. V.; BORDINI, I. C.; GALVÃO, A. G.; REZENDE, F. C. Caracterização do tomateiro submetido ao déficit hídrico. *Scientia Agraria*, v. 16, n. 1, p. 09-17, 2015.

NAJLA, S.; VERCAMBRE, G.; PAGÈS, L.; GRASSELLY, D.; GAUTIER, H.; GÉNARD, M. Effect of salinity on tomato plant architecture. *Acta Horticulturae*, n. 801, p. 1183-1190, 2007.

NASCIMENTO, I. B.; MEDEIROS, J. F.; ALVES, S. S. V.; LIMA, B. L. C.; SILVA, J. L. A. Desenvolvimento inicial da cultura do pimentão influenciado pela salinidade da água de irrigação em dois tipos de solos. *ACSA – Agropecuária Científica no Semi-Árido*, v. 11, n. 1, p. 37-43, 2015.

OLIVEIRA, B. C.; CARDOSO, M. A. A.; OLIVEIRA, J. C.; OLIVEIRA, F. A.; CAVALCANTE, L. F. Características produtivas do tomateiro submetido a diferentes níveis de sais, na água de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 1, p. 11-16, 2007.

OLIVEIRA, F. A.; MEDEIROS, J. F.; ALVES, R. C.; LINHARES, P. S. F.; MEDEIROS, A. M. A.; OLIVEIRA, M. K. T. Interação entre salinidade da água de irrigação e adubação nitrogenada na cultura da berinjela. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 480-486, 2014.

PUTTI, F. F. *Análise dos indicadores biométricos e nutricionais da cultura da alface (Lactuca sativa L.) irrigada com água tratada magneticamente utilizando modelagem fuzzy*. 2015. 205p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - FCA/UNESP. Botucatu, 2015.

PUTTI, F. F.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; SILVA, A. O.; LUDWIG, R.; GABRIEL, C. P. C. Fuzzy logic to evaluate vitality of catasetum fimbiratum species (Orchidacea). *Revista Irriga*, v. 19, n. 3, p. 405-413, 2014.

REZENDE, O. L. T. *O uso da lógica fuzzy no controle das temperaturas de um conjunto gaseificador/combustor de biomassas*. 2012. Tese (Doutorado Engenharia Agrícola) - UFV. Viçosa, 2012.

RODRÍGUEZ, E.; PECHE, R.; GARBISU, C.; GOROSTIZA, I.; EPELDE, L.; ARTETXE, U.; IRIZAR, A.; SOTO, M.; BECERRIL, J. M.; ETXEBARRIA, J. Dynamic Quality Index for agricultural soils based on fuzzy logic. *Ecological Indicators*, v. 60, p. 678-692, 2016.

ROSA, C. L. S.; SOARES, A. G.; FREITAS, D. F. G. C.; ROCHA, M. C.; FERREIRA, J. C.; GODOY, R. L. O. Caracterização físico-química, nutricional e instrumental de quatro acessos de tomate italiano (*Lycopersicum esculentum* Mill) do tipo 'Heirloom' produzido sob manejo orgânico para elaboração de polpa concentrada. *Alimentos e Nutrição*, v. 22, n. 4, p. 649-656, 2011.

ROSS, T. J. *Fuzzy logic with engineering applications*. 2ª ed. Wiley. England, 2010. 607 p.

SANTANA, M. J.; VIEIRA, T. A.; BARRETO, A. C. Efeito dos níveis de reposição de água no solo na produtividade do tomateiro. *Horticultura Brasileira*, v. 27, n. 2, p. 1378-1384, 2009.

SANTANA, M. J.; VIEIRA, T. A.; BARRETO, A. C.; CRUZ, O. C. Resposta do tomateiro irrigado a níveis de reposição de água no solo. *Revista Irriga*, v. 15, n. 4, p. 443-454, 2010.

SANTOS, F. F. B.; RIBEIRO, A.; SIQUEIRA, W. J.; MELO, A. M. T. Desempenho agrônomo de híbridos F1 de tomate de mesa. *Horticultura Brasileira*, v. 29, n. 3, p. 304-310, 2011.

SILVA, A. A. *Aspectos lógicos e algébricos dos conjuntos fuzzy*. 2012. Dissertação (Mestrado em Filosofia) - FFC/UNESP. Marília, 2012.

SILVA, A. A. V. *Desenvolvimento de aplicações em medicina e agronomia utilizando lógica fuzzy e neuro fuzzy*. 2014. Doutorado (Engenharia Elétrica) - FEIS/UNESP. Ilha Solteira, 2014.

SILVA, G. G.; AZEVEDO, B. M.; MESQUITA, J. B. R.; VIANA, T. V. A. Características agrônomicas do amendoimzeiro sob irrigação com águas salinas em solo com biofertilizantes. *Revista Agro@mbiente On-line*, v. 6, n. 2, p. 124-132, 2012.

SILVA JUNIOR, J. F. *Desenvolvimento do tomate em diferentes níveis de irrigação e de doses de salinidade*. 2012. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - FCA/UNESP. Botucatu, 2012.

SILVA, P. F.; LIMA, C. J. G. S.; BARROS, A. C.; SILVA, E. M.; DUARTE, S. N. Sais fertilizantes e manejo da fertirrigação na produção de tomateiro cultivado em ambiente protegido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, p. 1173-1180, 2013.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. *Controle e modelagem fuzzy*. 2ª ed. Blucher. São Paulo, 2007. 186 p.

SOARES, L. A. A.; LIMA, G. S.; BRITO, M. E. B.; SÁ, F. V. S.; SILVA, E. C. B.; ARAÚJO, T. T. Cultivo do tomateiro na fase vegetativa sobre diferentes lâminas de irrigação em ambiente protegido. *Agropecuária Científica no Semi-Árido*, v. 8, p. 38-45, 2012.

SOARES, L. A. A.; LIMA, G. S.; BRITO, M. E. B.; ARAÚJO, T. T. SILVA SÁ, F. V. Taxas de crescimento do tomateiro sob lâminas de irrigação em ambiente protegido. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 6, n. 2, p. 210-217, 2011.

SOUSA, G. G.; AZEVEDO, B. M.; ALBUQUERQUE, A. H. P.; MESQUITA, J. B. R.; VIANA, T. V. A. Características agronômicas do amendoimzeiro sob irrigação com águas salinas em solo com biofertilizantes. *Revista Agroambiente On-line*, v. 6, n. 2, p. 124-132, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 5ª ed. ArtMed. Porto Alegre, 2013. 954p.

TRANI, P. E.; RAIJ, B. van. *Hortaliças*. In: RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2ª ed. Instituto Agronômico/Fundação IAC. Campinas, 1997. p. 183-184.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*. v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338-353, 1965.

CAPÍTULO 2 – “MODELAGEM FUZZY PARA A AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA IRRIGAÇÃO E DA SALINIDADE DA ÁGUA EM DIFERENTES ESTÁDIOS DA CULTURA DO TOMATE”

Resumo

O tomate é uma cultura exigente em tratos culturais, dentre os quais a irrigação exerce forte influência na produção e qualidade dos frutos, uma vez que é considerada sensível ao déficit hídrico. Já a salinidade altera os processos de absorção, transporte, assimilação e distribuição de nutrientes na planta. Em geral, tais efeitos são analisados utilizando testes estatísticos. Porém, modelos *fuzzy* possibilitam simulações entre os pontos não verificados na experimentação agrícola. O objetivo deste trabalho foi estudar os efeitos nas variáveis biométricas durante o desenvolvimento do tomate híbrido em duas condições distintas utilizando modelagem *fuzzy*, a primeira em relação à diferentes tensões de água no solo e a segunda em relação às diferentes doses de salinidade na irrigação. Para tanto, desenvolveu-se dois modelos que utilizaram dados de um experimento realizado na Faculdade de Ciências Agrônômicas - FCA/UNESP, Campus de Botucatu - SP. O Modelo 1 visou estimar os valores das variáveis biométricas do tomateiro em diferentes tensões de água no solo versus os dias após semeadura. Já o Modelo 2, em diferentes doses de salinidade na irrigação versus os dias após semeadura. No Modelo 1, as variáveis de entrada do SBRF foram Irrigação e DAS e no Modelo 2, Salinidade e DAS. As variáveis de saída de ambos modelos foram escolhidas elegendo-se as variáveis das análises biométricas que apresentaram diferenças estatísticas significativas. A análise dos efeitos da irrigação e salinidade na água foi realizada por meio de gráficos tridimensionais e mapas de contorno das variáveis de saída. Constatou-se que no Modelo 1, as variáveis biométricas do tomateiro apresentaram melhor desenvolvimento entre as tensões de água no solo -25 e -10 kPa. Já no Modelo 2, o melhor desenvolvimento das variáveis ocorreu para as doses de salinidade na irrigação entre 0,08 e 3 dS.m⁻¹.

Palavras-chave: lógica *fuzzy*, potencial hídrico, água salina.

Abstract

The tomato crop is demanding in terms of cultivation practices, of which irrigation has a strong influence on production and fruit quality, since tomato is considered sensitive to water deficit.

Salinity, on the other hand, changes the processes of absorption, transportation, distribution and assimilation of nutrients in the plant. In general, these effects are analyzed using statistical tests. However, *fuzzy* models allow simulations among points not checked in agricultural experimentation. The objective of the present work was to study the effects on the biometric variables during the development of hybrid tomato in two distinct conditions using *fuzzy* modeling, the first in relation to different water tensions on the ground and the second in relation to different salinity doses in irrigation. Therefore, two models, which used data from an experiment conducted at the *Faculdade de Ciências Agronômicas* - FCA/UNESP in Botucatu - SP campus, were developed. Model 1 aimed at estimating the values of tomato biometric variables in different water tensions in soil versus days after sowing. Model 2 aimed at determining the values of tomato biometric variables in different salinity doses in irrigation versus days after sowing. In Model 1, the input variables of SBRF were Irrigation and DAS and in Model 2, Salinity and DAS. The output variables of both models were chosen through the election of the biometric analysis variables that showed statistically significant differences. The analysis of the effects of irrigation and salinity in water was performed through three-dimensional graphics and output variables outline maps. It was found that in Model 1, the biometric variables of tomato showed better development for water tension in the soil between -25 and -10 kPa. In Model 2, the best development of the variables occurred for salinity doses in irrigation between 0.08 and 3 dS.m⁻¹.

Keywords: *fuzzy* logic, water potential, saline water.

Introdução

“O tomate está entre as hortaliças mais consumidas no mundo, sendo uma fonte de vitaminas A e C e de sais minerais como potássio e magnésio” (MELO et al., 2014). “No Brasil, ocupa o segundo lugar em importância econômica entre as hortaliças, ficando atrás somente da batata” (PEDROSA et al., 2011) e “está presente, praticamente todos os dias na mesa do brasileiro, em algumas das múltiplas formas de consumo: *in natura* ou processado nas formas de suco, molho, pasta, desidratado, doces entre outros” (SILVA et al., 2007).

O tomate é “uma cultura exigente em tratamentos culturais, dentre os quais a irrigação exerce forte influência na produção e qualidade dos frutos, uma vez que é considerada

sensível ao déficit hídrico” (SANTANA et al., 2010). Quando irrigado corretamente, pode-se “evitar rachadura nos frutos, podridão apical, ocorrência de frutos ocos, queda de flores, além da redução no estabelecimento dos frutos” (MEDEIROS, 2010).

De acordo com Guedes et al. (2015), “a qualidade da água utilizada para irrigação é fator primordial para que as plantas possam expressar seu máximo desenvolvimento e potencial produtivo”. Por outro lado, a utilização de água com níveis moderados de salinidade tem se tornando uma prática comum, tanto devido à disponibilidade cada vez menor de água de boa qualidade, como uma estratégia para melhoria da qualidade da produção (FREIRE et al., 2010).

“O efeito da salinidade é de natureza osmótica podendo afetar diretamente o rendimento das culturas” (HOLANDA et al. 2010). Medeiros (2010) afirma que a “salinidade altera as relações nutricionais das culturas, reduzindo a atividade dos íons em solução e alterando os processos de absorção, transporte, assimilação e distribuição de nutrientes na planta”. O tomateiro é considerado “uma cultura moderadamente sensível aos efeitos dos sais, apresentando reduções em seu rendimento potencial com águas de condutividade elétrica acima de $1,7 \text{ dS.m}^{-1}$ ” (AYERS; WESTCOT, 1991).

Nos experimentos desenvolvidos, os efeitos são analisados utilizando testes estatísticos que visam auxiliar na interpretação dos resultados e assim afirmar as reais implicações provocadas pelos diferentes tratamentos adotados. Deste modo, modelos matemáticos buscam fornecer respostas mais precisas, sendo que os modelos *fuzzy*, possibilitam simulações entre os pontos não verificados na experimentação agrícola, que de acordo com Putti (2015) é mais preciso que os modelos de regressão.

A lógica *fuzzy* constitui, segundo Benini e Meneguette Junior (2009) “a base para o desenvolvimento de métodos e algoritmos de modelagem e controle de processos, permitindo a redução da complexidade de projeto e implementação, tornando-se a solução para problemas de identificação até então intratáveis por técnicas clássicas”. Diferentemente da lógica booleana, na lógica *fuzzy*, não existe somente respostas extremas, ela permite atribuir um grau de aproximação da solução exata e assim inferir algo que seja necessário (MALAMAN, 2014). Além disso, segundo Putti (2015), a modelagem *fuzzy* permite compreender e analisar situações considerando inclusive os fatores exógenos que inferem nas repostas do modelo diferentemente da modelagem matemática convencional que é limitada em relação a esses fatores, assim os modelos *fuzzy* permitem observar com maior precisão.

Nas ciências agrárias diversas aplicações envolvendo a lógica *fuzzy* são encontradas, tais como na criação de um índice para avaliar a qualidade dinâmica dos solos

agrícolas (RODRÍGUEZ et al., 2016), no crescimento de mosquitos (CASTANHO et al., 2014), na previsão de chuva-vazão (SENAVIRATNE et al., 2014), na gestão da produção de algodão (PAPAGEORGIOU et al., 2009), na produção de clorofila (PEREIRA et al., 2009), na determinação do risco por infestação de plantas daninhas em lavouras (BRESSAN et al., 2008) e na estimativa de área plantada da cultura de soja (ANTUNES; ZULLO JÚNIOR, 2007).

O objetivo deste trabalho foi estudar os efeitos nas variáveis biométricas durante o desenvolvimento do tomate híbrido (*Lycopersicum esculentum*) em duas condições distintas utilizando modelagem *fuzzy*, a primeira em relação às diferentes tensões de água no solo e a segunda em relação às diferentes doses de salinidade na irrigação.

Material e Métodos

Neste tópico, inicialmente, foi descrito o experimento utilizado para elaborar as modelagens *fuzzy*. Posteriormente, apresentou-se todos os passos destas modelagens para o estudo dos efeitos da irrigação e da salinidade nos diferentes estádios da cultura do tomate.

Descrição do experimento

Os dados experimentais necessários para a geração das modelagens *fuzzy* deste presente estudo também foram utilizados no trabalho de Silva Junior (2012). Tais dados foram obtidos a partir de um experimento conduzido, entre junho e outubro de 2011, em uma casa de vegetação do tipo túnel alto cuja estrutura tinha forma de arcos feitos com tubos galvanizados, cobertura de filme de polietileno aditivado transparente (150 µm de espessura), uma tela “sombrite” com 30% de sombreamento nas laterais e com orientação em relação ao seu comprimento, Norte/Sul, perpendicular à trajetória do Sol. Suas dimensões eram de 27 m de comprimento; 7 m de largura; 1,7 m de pé direito e 3 m de altura no centro. Este ambiente estava situado na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas - FCA, UNESP, Campus de Botucatu – SP, com altitude média 786 m, latitude 22°51'03" Sul e longitude 48°25'37" Oeste.

Os vasos utilizados apresentavam capacidade de 15 dm³, foram preenchidos com solo retirado da camada de 0 - 0,20 m de profundidade, classificado como Latossolo Vermelho Distroférico de textura média (EMBRAPA, 2013). Este foi destorroado e

peneirado e em seguida seco ao ar até atingir ao teor de água de 4%, e para determinação do teor de água do solo, foi utilizado o método proposto por Klar (1988).

A calagem e as adubações de plantio e cobertura foram realizadas com base em análise do solo, seguindo-se a recomendação contida no Boletim Técnico 100 (TRANI; RAIJ, 1997). A variedade do tomateiro utilizada foi a cv. Kátia. As mudas foram preparadas pelo Departamento de Horticultura e transplantadas para vasos 45 dias após a semeadura.

Para a salinização da água utilizou-se o cloreto de sódio (NaCl) em que foi preparado uma solução de 2M (2 vezes o peso molecular do NaCl), afim de ter um litro de solução, assim foi determinado a partir de um condutivímetro que diluindo as proporções de 0; 31,07; 53,96 ml da solução em um litro de água de abastecimento, foi possível obter as respectivas doses de 0,08; 3 e 5 dS.m⁻¹ de salinidade da água.

Para a determinação do teor de água no solo em função dos potenciais matriciais (Ψ) do solo, foi coletado uma amostra de solo na camada de 0 - 0,20 m, a qual foi encaminhada para o laboratório de Relação Solo Planta Água Atmosfera, no Departamento de Engenharia Rural, assim determinou por meio dos pontos da curva de retenção de água no solo e ajustados pelo programa *Soil Water Retention Curve* (DOURADO NETO et al.,1990) utilizando-se o modelo proposto por Van Genuchten (1980). Os parâmetros são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Parâmetros da equação de Van Genuchten.

Solo	α	m	n	θ_r	θ_s
	0,07034	0,4610	1,8552	0,1922	0,3058

Após o cálculo dos parâmetros, gerou-se a seguinte curva característica do solo:

$$\theta_{0-0,20} = 0,1922 + \frac{0,1136}{[1+(0,07034 \cdot |\Psi|)^{1,8552}]^{0,4610}}.$$

Foram estabelecidos os potenciais matriciais (Ψ) de -60; -30; -10 kPa afim de provocar o estresse hídrico, assim a irrigação foi determinada com base na massa do vaso. A partir da equação de Van Genuchten estabelecida foi inferido o teor de água no solo, deste modo foi calculado diariamente a quantidade de água para atingir os níveis estabelecidos.

Os parâmetros biométricos do tomateiro aferidos por Silva Junior (2012) ao longo do seu ciclo foram: altura da planta (cm), diâmetro do caule (cm), área foliar (cm^2), fitomassa verde (g) e fitomassa seca (g).

Segundo o mesmo autor, a altura das plantas correspondeu à distância entre a base, a partir do solo, e o ápice da planta; o diâmetro do caule foi determinado na região basal da planta, rente ao solo; a área foliar foi calculada utilizando uma estimativa feita com a fitomassa seca da folha; o cálculo tanto da fitomassa verde quanto da seca corresponderam à soma das massas dos folíolos, pecíolos, cachos e caule; e o percentual de frutos deficientes foi calculado em relação aos frutos que apresentaram podridão apical.

Como as avaliações foram destrutivas, buscando atender as 4 análises ao longo do ciclo (75, 90, 105 e 120 dias após a semeadura), foram utilizadas 27 plantas para cada avaliação dos efeitos da irrigação e da salinidade da água na cultura do tomate, havendo assim a necessidade do plantio de 108 plantas (4×27).

Modelagem fuzzy

A partir do experimento realizado por Silva Junior (2012), que utilizou-se do manejo de diferentes tensões de água no solo e diferentes doses de salinidade na irrigação ao longo do ciclo do tomateiro, realizou-se duas modelagens *fuzzy* para avaliar as características do desenvolvimento.

A primeira modelagem (Modelo 1) visou estimar os valores das variáveis biométricas da cultura do tomate em diversas tensões de água no solo (Irrigação) versus os dias após semeadura (DAS). Já a segunda (Modelo 2), visou estimar os valores das variáveis biométricas da cultura do tomate em diferentes doses de salinidade na irrigação (Salinidade) versus os dias após semeadura (DAS).

No Modelo 1, foi utilizado uma dose de salinidade da água de irrigação igual a $0,08 \text{ dS.m}^{-1}$ e as variáveis estudadas foram: diâmetro do caule (Diam), área foliar (AF), fitomassa verde (FV) e fitomassa seca (FS). Para tanto, considerou-se o seguinte modelo agrônomo para representar tal situação: $F: X_1 \times X_2 \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^4, (x_1, x_2) \mapsto Y = F(x_1, x_2)$, onde $X_1 = [-60, -10]$, $X_2 = [75, 120]$, $\mathbb{R}$ é o conjunto dos números reais, x_1 representa as tensões de água no solo (kPa) e x_2 a quantidade de dias após semeadura. Além disso, $Y = F(x_1, x_2) = (y_1, y_2, y_3, y_4)$ foi definido pelas medianas dos valores das variáveis biométricas do tomateiro, $y_1 = \text{Diam}$, $y_2 = \text{AF}$, $y_3 = \text{FV}$ e $y_4 = \text{FS}$.

No Modelo 2, a tensão de água no solo foi mantida a -10 kPa e as variáveis estudadas foram: altura da planta (Alt), diâmetro do caule (Diam), área foliar (AF), fitomassa verde (FV) e fitomassa seca (FS). Para tanto, considerou-se o seguinte modelo agrônomo para representar tal situação: $F: X_1 \times X_2 \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^5, (x_1, x_2) \mapsto Y = F(x_1, x_2)$, onde $X_1 = [0,08; 5], X_2 = [75,120], \mathbb{R}$ é o conjunto dos números reais, x_1 representa as doses de salinidade na irrigação (dS.m^{-1}) e x_2 a quantidade de dias após semeadura. Além disso, $Y = F(x_1, x_2) = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5)$ é definido pelas medianas dos valores das variáveis biométricas do tomateiro, $y_1 = \text{Alt}$, $y_2 = \text{Diam}$, $y_3 = \text{AF}$, $y_4 = \text{FV}$ e $y_5 = \text{FS}$.

De maneira análoga ao Capítulo 1, para a elaboração de ambos sistemas baseados em regras *fuzzy* (SBRF), definiu-se um processador de entrada, um conjunto de regras linguísticas, um método de inferência *fuzzy* e um processador de saída, de modo que ao final, fosse gerando um número real como saída (Figuras 17 e 18).

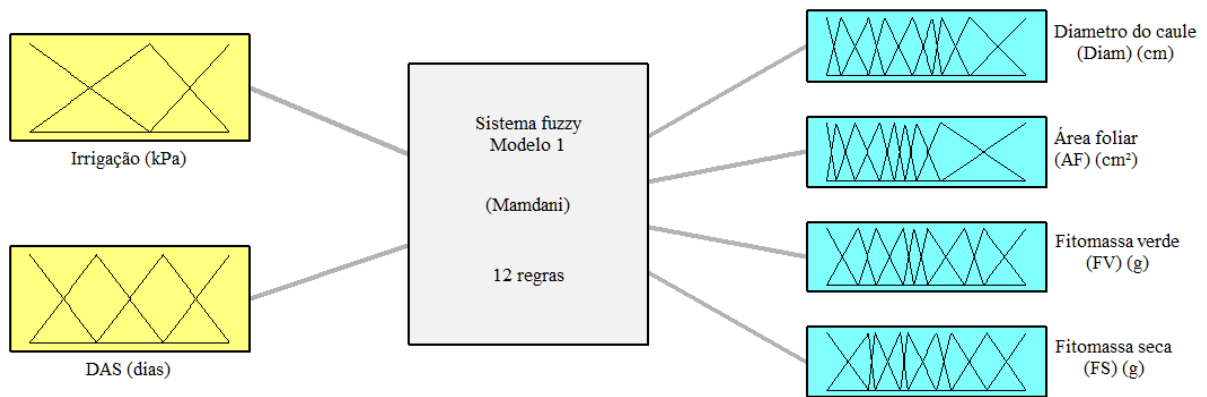


Figura 17. SBRF de avaliação do tomateiro com 2 variáveis de entrada (Irrigação e DAS), 4 variáveis de saída (variáveis biométricas).

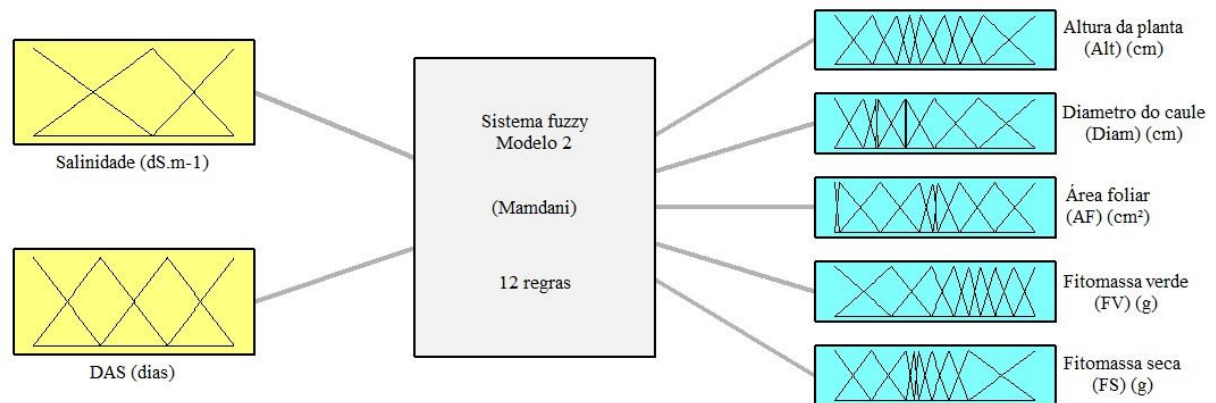


Figura 18. SBRF de avaliação do tomateiro com 2 variáveis de entrada (Salinidade e DAS), 5 variáveis de saída (variáveis biométricas).

Conjuntos fuzzy das variáveis de entrada

No Modelo 1, as variáveis de entrada do SBRF foram Irrigação e DAS. Para a variável Irrigação, foram definidos os mesmos conjuntos *fuzzy* do Capítulo 1. Para a variável DAS, foram definidos 4 conjuntos *fuzzy* denominados Muito Baixo (MB), Baixo (B), Médio (M) e Alto (A) de acordo com a Tabela 15.

As funções de pertinência referentes a variável de entrada Irrigação são análogas às apresentadas no Capítulo 1. Já em relação às funções de pertinência da variável de entrada DAS, foram adotados para os períodos de avaliações do experimento (75, 90, 105 e 120 dias) o grau de pertinência 1 e as variáveis linguísticas MB, B, M e A, respectivamente.

Tabela 15. Definição das funções de pertinência da variável de entrada “DAS”.

Conjuntos <i>fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
MB	Triangular	[74, 75, 90]
B	Triangular	[75, 90, 105]
M	Triangular	[90, 105, 120]
A	Triangular	[105, 120, 121]

Destaca-se as funções de pertinência MB e A da variável DAS, nas quais para cada uma delas, um dos dois intervalos disjuntos do suporte cujos pontos não tem grau de pertinência 1, foi definido com amplitude igual a 1. As funções de pertinência da variável DAS, são apresentadas na Figura 19.

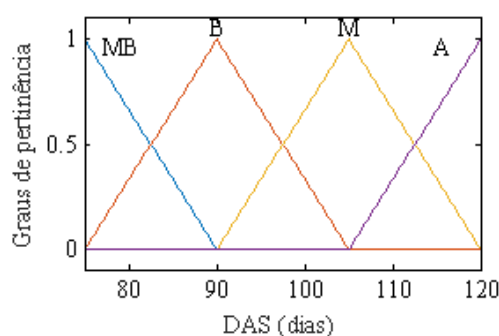


Figura 19. Funções de pertinência da variável de entrada DAS.

No Modelo 2, as variáveis de entrada do SBRF foram Salinidade e DAS. Os conjuntos *fuzzy* e as funções de pertinência referentes as variáveis Salinidade e DAS foram definidas de forma análoga às apresentadas no Capítulo 1 e no Modelo 1, respectivamente.

Conjuntos fuzzy das variáveis de saída

As variáveis de saída do Modelo 1 foram escolhidas elegendo-se as variáveis das análises biométricas que apresentaram diferenças significativas entre as diferentes tensões de água no solo ou ao longo do ciclo do tomateiro (DAS) e/ou interações entre tais fatores, sabendo-se que a dose de salinidade na irrigação foi de $0,08 \text{ dS.m}^{-1}$ (Tabela 16).

Tabela 16. Valores dos Quadrados Médios (QM) e dos Coeficientes de Variação (CV) obtidos de análises de variância para as possíveis variáveis de saída do Modelo 1.

Fator de variação	QM				
	Alt	Diam	AF	FV	FS
Irrigação (-kPa)	101,14	0,160*	10822,04*	7180,28*	327,02*
DAS (dias)	128,63	0,244*	64597,46*	1013,84*	67,28*
Irrigação × DAS	89,90	0,006	3197,77*	97,67	5,98
CV (%)	17,75	8,09	10,69	8,97	10,39

(*) Significativo pelo teste F com 5% de probabilidade de erro.

Na Tabela 16, observa-se na variável Alt a ausência de diferenças entre os níveis dos fatores da análise (Irrigação e DAS) e também de interação entre eles. As variáveis Diam, FV e FS tiveram mesmo comportamento entre si, apresentando diferenças nos níveis de cada fator e ausência de interação entre os fatores de análise. Por fim, destaca-se a interação entre os fatores de análise da variável AF. Em geral, os coeficientes de variação mantiveram-se entre 8 e 18%.

Já as variáveis de saída do Modelo 2 foram escolhidas elegendo-se as variáveis das análises biométricas que apresentaram diferenças significativas entre as doses de salinidade na irrigação ou ao longo do ciclo do tomateiro (DAS) e/ou interações entre tais fatores, sabendo-se que a tensão de água no solo foi de -10 kPa (Tabela 17).

Tabela 17. Valores dos Quadrados Médios (QM) e dos Coeficientes de Variação (CV) obtidos de análises de variância para as possíveis variáveis de saída do Modelo 2.

Fator de variação	QM				
	Alt	Diam	AF	FV	FS
Salinidade (dS.m^{-1})	133,92	0,253*	4528,62*	3531,34*	153,33*
DAS (dias)	402,55*	0,059*	125682,81*	931,38	9,24
Salinidade × DAS	72,27	0,053*	2983,77*	1231,27*	51,96*
CV (%)	11,69	10,50	11,67	9,96	11,86

(*) Significativo pelo teste F com 5% de probabilidade de erro.

Na Tabela 17, observa-se na variável Alt diferenças entre os níveis do fator DAS, mas ausência de diferenças entre o fator Salinidade e também de interação entre os fatores de análise (Salinidade e DAS). As demais variáveis apresentam interação entre os fatores de análise. Em geral, os coeficientes de variação mantiveram-se entre 9 e 12%.

A metodologia utilizada para a criação das funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de saída nas modelagens realizadas neste capítulo foi análoga à utilizada no Capítulo 1.

Base de regras

Para a obtenção da base de regras do sistema *fuzzy* em ambas modelagens, considerou-se as 12 (3×4) combinações entre os conjuntos *fuzzy* das duas variáveis de entrada. Assim foram criados 12 pares da forma Irrigação $\times$ DAS para o Modelo 1 e 12 pares da forma Salinidade $\times$ DAS para o Modelo 2 conforme metodologia utilizada no Capítulo 1 e desenvolvida em Cremasco (2008), Gabriel Filho et al. (2011), Putti (2015) e Gabriel Filho (2015), nos quais, após a elaboração dos conjuntos *fuzzy* de saída, foram calculados os maiores graus de pertinência de cada mediana dos tratamentos, associando as variáveis de entrada com as de saída. As Tabelas 18 e 19 apresentam os pontos de cada variável assim consideradas e as combinações dos conjuntos *fuzzy* descritas do Modelo 1 e do Modelo 2, respectivamente.

Tabela 18. Combinações das variáveis de entrada do Modelo 1 com pontos de grau de pertinência 1 associados aos conjuntos *fuzzy* para a elaboração da base de regras.

Irrigação		DAS	
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência 1 associado	Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência 1 associado
B	-60	MB	75
B	-60	B	90
B	-60	M	105
B	-60	A	120
M	-30	MB	75
M	-30	B	90
M	-30	M	105
M	-30	A	120
A	-10	MB	75
A	-10	B	90
A	-10	M	105
A	-10	A	120

Tabela 19. Combinações das variáveis de entrada do Modelo 2 com pontos de grau de pertinência 1 associados aos conjuntos *fuzzy* para a elaboração da base de regras.

Salinidade		DAS	
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência 1 associado	Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência 1 associado
B	0,08	MB	75
B	0,08	B	90
B	0,08	M	105
B	0,08	A	120
M	3	MB	75
M	3	B	90
M	3	M	105
M	3	A	120
A	5	MB	75
A	5	B	90
A	5	M	105
A	5	A	120

A associação das combinações dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada com um conjunto *fuzzy* de cada variável de saída tanto do Modelo 1 quanto do Modelo 2, foram realizadas de forma análoga ao Capítulo 1.

Este modelo de base de regras apresenta a inovação de não necessitar do especialista para ser elaborado (PUTTI, 2015), o que no presente trabalho certamente vem a auxiliar o produtor na tomada de decisão sobre o manejo de diferentes níveis de irrigação e doses de salinidade aplicadas ao tomateiro.

Método de inferência e defuzzyficação

A inferência é a etapa mais importante do sistema *fuzzy* e é por meio dela que é definido como as regras serão ativadas e combinadas (OLIVEIRA, 2014). Neste trabalho, em ambas modelagens se utilizou o método proposto por Mamdani e Assilan (1975), cuja regra semântica tradicionalmente empregada para o processamento de inferências é chamada de inferência *Max-Min* que se “utiliza de operações de união e intersecção entre conjuntos, por meio de operadores de máximo e mínimo, respectivamente” (SANTOS; BENICASA, 2012).

Na *defuzzyficação*, processo pelo qual o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras *fuzzy* é traduzida num valor real, empregou-se o Método do Centro de Gravidade descrito em Cremasco (2008).

Softwares utilizados

Para a elaboração dos sistemas *fuzzy*, foram utilizados planilhas eletrônicas e o *software* Matlab®, cuja licença para seu uso a Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE/UNESP, Campus de Tupã - SP, possui. Também foi empregada a ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox* do *software* Matlab®, para determinar as funções de pertinência, os gráficos tridimensionais e os mapas de contorno de cada um dos sistemas.

Além disso, utilizou-se o *software* R 3.2.1 com nível de significância $\alpha = 5\%$ para realizar as análises de variância dos parâmetros biométricos do tomateiro.

Resultados e Discussão

Neste tópico, apresentou-se inicialmente os resultados obtidos em relação às modelagens e posteriormente, os resultados sobre os efeitos da irrigação (Modelo1) e da salinidade (Modelo 2) em diferentes estádios da cultura do tomate.

Sistema baseado em regras fuzzy (Modelo 1)

Feita a análise de percentis dos dados aferidos (Tabela 20) referente ao experimento agrônômico realizado e utilizando a metodologia proposta no Capítulo 1, foram elaboradas as funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de saída do Modelo 1 (Figura 20), designadamente diâmetro do caule (cm), área foliar (cm²), fitomassa verde (g) e fitomassa seca (g).

Tabela 20. Valores de percentis dos dados utilizados para avaliar o desenvolvimento do tomateiro por meio de um SBRF (Modelo 1).

Percentil (%)	Diam	AF	FV	FS
0,0%	0,65	54,92	89,58	12,39
12,5%	0,70	70,48	103,76	16,79
25,0%	0,80	101,98	112,21	17,48
37,5%	0,86	145,45	124,46	20,11
50,0%	0,96	169,68	129,26	20,86
62,5%	1,03	187,48	135,64	23,97
75,0%	1,06	206,44	152,54	25,46
87,5%	1,16	248,74	161,00	29,22
100,0%	1,36	393,86	180,75	33,35

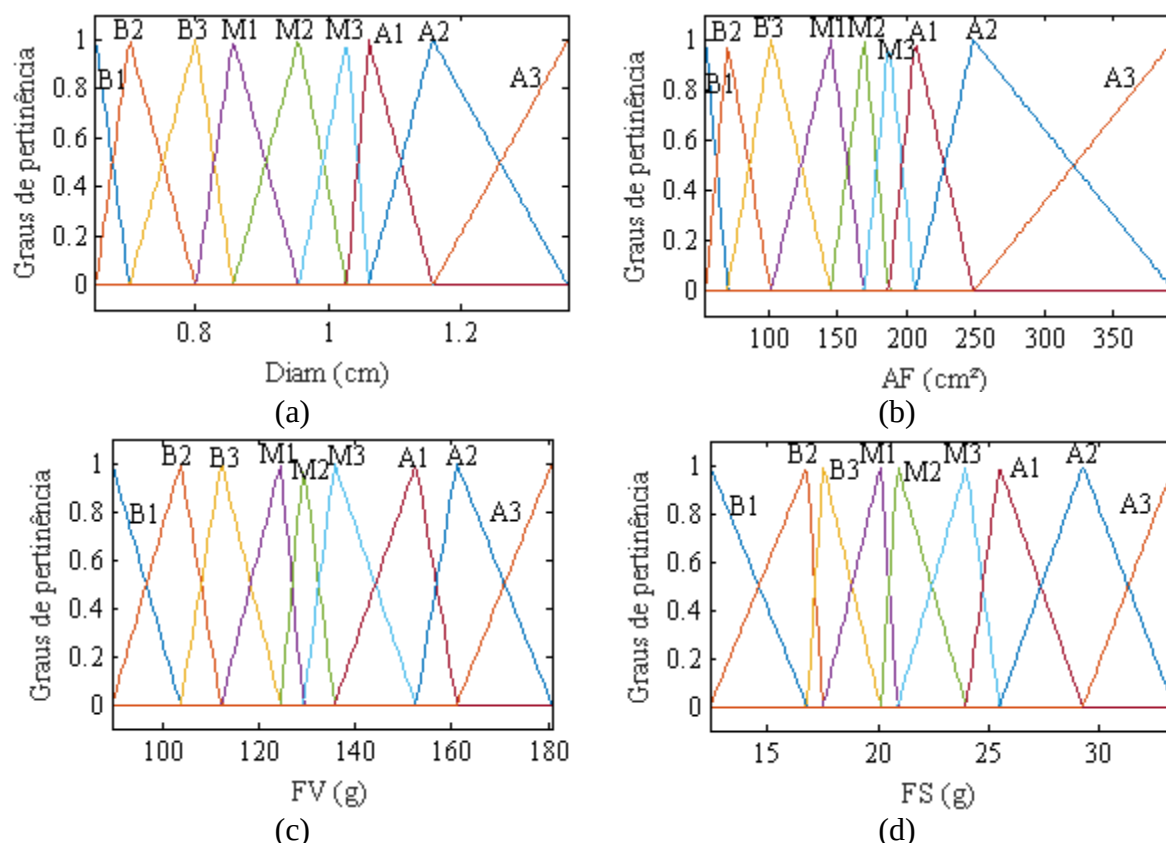


Figura 20. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura de tomate submetido a diferentes tensões de água no solo ao longo do seu ciclo: (a) Diâmetro do caule, (b) Área foliar, (c) Fitomassa verde e (d) Fitomassa seca.

Definidas as funções de pertinência, tomou-se o maior grau de pertinência para cada variável biométrica analisada referente ao tipo de tratamento que foi aplicado durante o desenvolvimento do tomateiro. Assim foi possível avaliar a situação que se enquadra a variável em análise comparando-a com os demais tratamentos. A Tabela 21 representa a base de regras do sistema *fuzzy*.

Ressalta-se que as classificações apresentadas nesta Tabela são possivelmente invariantes ou não teriam mudanças significativas caso um novo experimento fosse realizado nas mesmas condições e no mesmo período descritos neste trabalho, o que torna o resultado relevante.

Tabela 21. Base de regras do sistema *fuzzy* (Modelo 1).

Variáveis de entrada		Variáveis de saída			
Irrigação	DAS	Diam	AF	FV	FS
B	MB	B3	M1	B2	B2
B	B	B2	A2	B2	B2
B	M	M2	M3	M2	M1
B	A	M3	B2	M2	M3
M	MB	M1	M2	M1	M1
M	B	B2	A1	B2	B3
M	M	A1	M1	M3	M1
M	A	A1	B2	M3	A1
A	MB	M3	M3	A1	A1
A	B	B3	A3	A2	A2
A	M	A3	A1	A2	A2
A	A	A2	B2	A2	A2

Sistema baseado em regras fuzzy (Modelo 2)

De maneira análoga ao Modelo 1, também foram calculados os percentis dos dados aferidos (Tabela 22) no experimento agrônômico realizado e elaboradas as funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de saída do Modelo 2 (Figura 21), designadamente altura da planta (cm), diâmetro do caule (cm), área foliar (cm²), fitomassa verde (g) e fitomassa seca (g).

Tabela 22. Valores de percentis dos dados utilizados para avaliar o desenvolvimento do tomateiro por meio de um SBRF (Modelo 2).

Percentil (%)	Alt	Diam	AF	FV	FS
0,0%	40,70	0,65	11,10	82,06	15,07
12,5%	47,21	0,75	19,70	109,97	19,06
25,0%	51,60	0,80	98,64	129,43	22,96
37,5%	53,84	0,80	171,96	140,78	23,85
50,0%	55,75	0,90	197,53	148,02	24,30
62,5%	60,08	0,90	207,84	153,51	25,74
75,0%	62,75	1,00	249,08	160,77	27,72
87,5%	66,70	1,16	315,53	170,13	29,86
100,0%	76,00	1,36	393,86	180,75	37,29

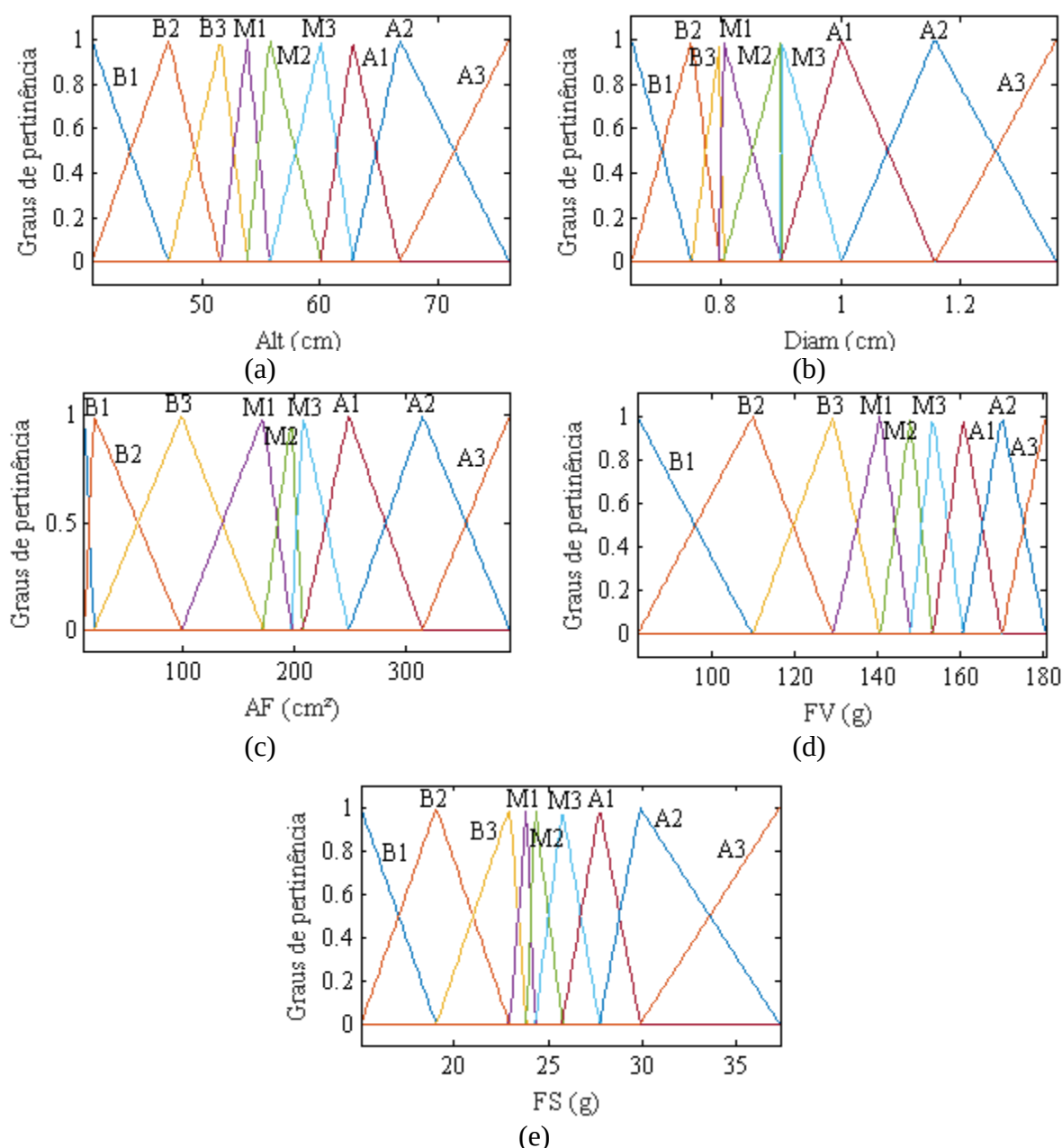


Figura 21. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura de tomate submetido a diferentes doses de salinidade na irrigação ao longo do seu ciclo: (a) Altura da planta, (b) Diâmetro do caule, (c) Área foliar, (d) Fitomassa verde e (e) Fitomassa seca.

Definidas as funções de pertinência, tomou-se de acordo com a metodologia, o maior grau de pertinência para cada variável biométrica analisada referente ao tipo de tratamento que foi aplicado durante o desenvolvimento do tomateiro, tal como no Modelo 1. Assim foi possível avaliar a situação que se enquadra a variável em análise comparando-a com os demais tratamentos. A Tabela 23 representa a base de regras do sistema *fuzzy*.

Tabela 23. Base de regras do sistema *fuzzy* (Modelo 2).

Variáveis de entrada		Variáveis de saída				
Salinidade	DAS	Alt	Diam	AF	FV	FS
B	MB	B3	A1	M1	M3	M2
B	B	M1	M1	A3	A1	A2
B	M	M1	A3	M2	A2	A1
B	A	A2	A2	B3	A1	A2
M	MB	B3	M3	M3	M2	M1
M	B	M2	M3	A2	B3	B3
M	M	A2	A1	M1	M3	A1
M	A	A3	B2	B2	M1	A2
A	MB	M2	M3	A1	A1	M1
A	B	M1	B2	A2	M1	M1
A	M	M1	M1	B3	B2	B2
A	A	A1	B1	B1	B1	B1

Além disso, as classificações apresentadas na Tabela 23, tal como na Tabela 21 referente ao Modelo 1, são possivelmente invariantes ou não teriam mudanças significativas caso um novo experimento fosse realizado nas mesmas condições e no mesmo período descritos neste trabalho, o que torna o resultado relevante.

Resultados práticos (Modelo 1)

No Modelo 1, foram analisadas as variáveis de saída diâmetro do caule, área foliar, fitomassa verde e fitomassa seca cujos gráficos tridimensionais são apresentados nas Figuras 22 e 23 e os mapas de contorno na Figura 24.

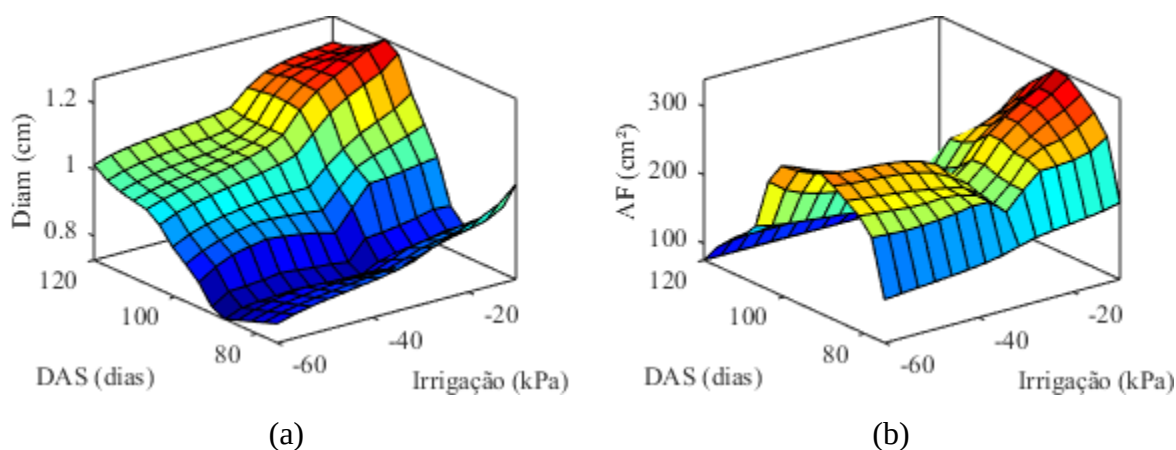


Figura 22. Gráficos tridimensionais representando o desenvolvimento das variáveis de saída do SBRF: (a) Diâmetro do caule e (b) Área foliar.

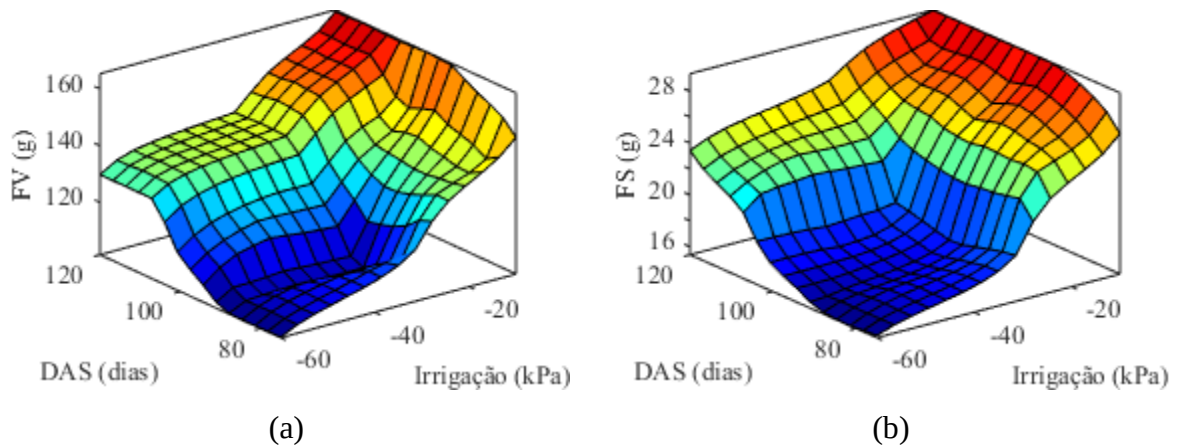


Figura 23. Gráficos tridimensionais representando o desenvolvimento das variáveis de saída do SBRF: (a) Fitomassa verde e (b) Fitomassa seca.

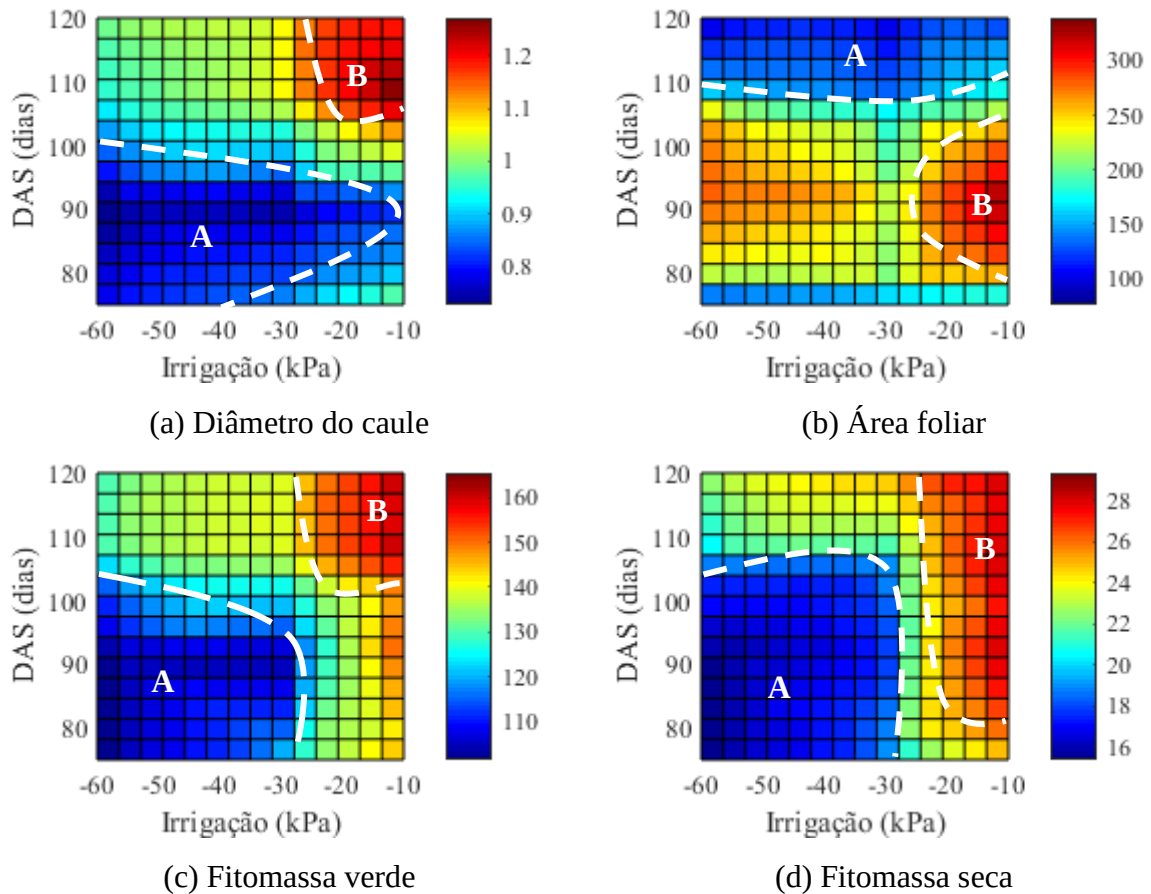


Figura 24. Mapas de contorno representando o desenvolvimento das variáveis de saída do SBRF.

Na análise do diâmetro do caule (Figura 24a), a partir da modelagem *fuzzy*, verificou-se que o maior valor ocorreu em -10 kPa para a tensão de água no solo e a 105 DAS. Para as tensões de água no solo entre -25 e -10 kPa, percebeu-se que existiu um

crescimento gradativo do diâmetro até o final do ciclo do tomateiro, ao passo que entre as tensões -30 e -60 kPa esse desenvolvimento só ocorreu após 90 dias. Segundo Soares et al. (2012), “a alocação de biomassa no caule apresenta acréscimos lineares com o incremento das lâminas de água a partir de 60% da ETr”.

Em relação a área foliar (Figura 24b), o valor máximo inferido ocorreu para a tensão de água no solo de -10 kPa aos 90 DAS. Também foi possível constatar-se, por meio da modelagem *fuzzy*, que aos 120 DAS, independentemente do valor da tensão de água no solo, o tamanho da área foliar foi semelhante. Segundo Anjum et al. (2011), o déficit hídrico diminui o número de folhas por planta e sua área foliar como também a longevidade da folha devido a redução do potencial hídrico do solo.

Também foi inferido o desenvolvimento da fitomassa verde aérea da planta do tomate (Figura 24c), e tal variável obteve valor máximo para a tensão de água no solo de -10 kPa no último período de avaliação. Percebeu-se ainda, pela modelagem *fuzzy*, que não há desenvolvimento da fitomassa verde entre as tensões de -60 a -30 kPa e de 75 a 105 DAS.

Por fim, foi possível verificar que o comportamento da fitomassa seca foi análogo ao da fitomassa verde (Figura 24d).

Uma Região A e uma Região B foram demarcadas nos mapas de contorno das variáveis biométricas analisadas (Figura 24). A Região A representa os menores valores inferidos para cada uma das variáveis, enquanto a Região B representa os maiores valores. Com isso, percebe-se que para todas as variáveis, a Região A está parcialmente ou totalmente inserida entre os níveis de irrigação -60 e -30 kPa, ao passo que a Região B está totalmente inserida entre os níveis de irrigação -25 e -10 kPa. De modo geral é possível inferir que o déficit hídrico influencia de maneira negativa todas as variáveis analisadas ao longo do ciclo do tomateiro.

Resultados práticos (Modelo 2)

No Modelo 2, foi analisado as variáveis de saída altura da planta, diâmetro do caule, área foliar, fitomassa verde e fitomassa seca cujos gráficos tridimensionais e os mapas de contorno são dados pelas Figuras 25 e 26, respectivamente.

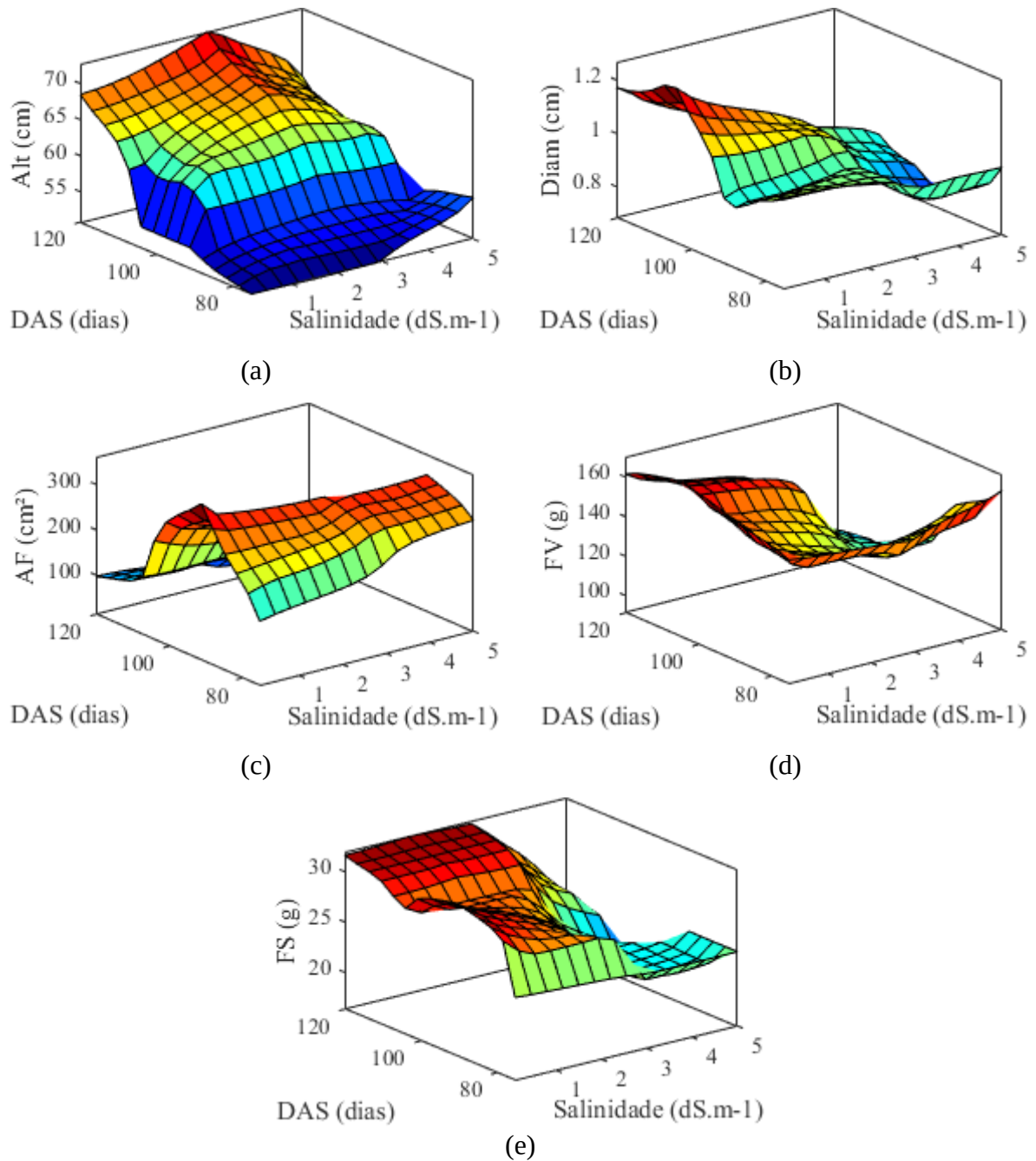


Figura 25. Gráficos tridimensionais representando o desenvolvimento das variáveis de saída do SBRF: (a) Altura da planta, (b) Diâmetro do caule, (c) Área foliar, (d) Fitomassa verde e (e) Fitomassa seca.

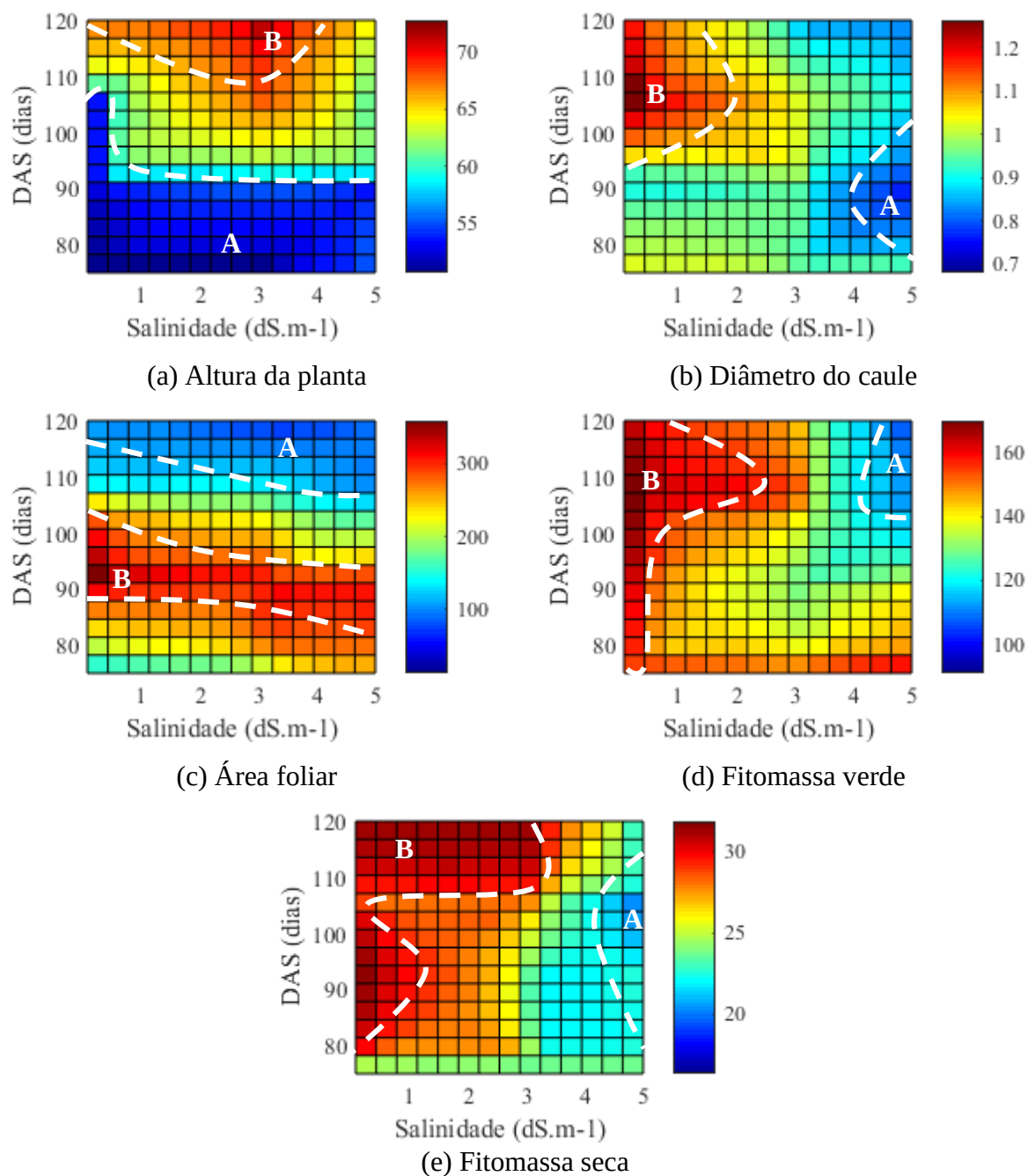


Figura 26. Mapas de contorno representando o desenvolvimento das variáveis de saída do SBRF.

Em relação à altura da planta do tomate (Figura 26a), o valor máximo ocorreu 120 DAS quando a cultura foi submetida a dose de salinidade na irrigação 3 dS.m^{-1} . Já para o tratamento com dose de salinidade na irrigação $0,08 \text{ dS.m}^{-1}$, o desenvolvimento desta variável só foi verificado no final do ciclo entre 105 e 120 DAS.

Na análise do diâmetro do caule (Figura 26b), foi possível verificar, a partir da modelagem *fuzzy*, que a variável atinge seu máximo para a dose de salinidade na

irrigação de $0,08 \text{ dS.m}^{-1}$ e 115 DAS. Já o valor mínimo para o diâmetro foi inferido aos 90 DAS para a dose de salinidade na irrigação de 5 dS.m^{-1} .

Também constatou-se que o maior valor para a área foliar ocorreu a 90 DAS para a dose de salinidade na irrigação de $0,08 \text{ dS.m}^{-1}$. De modo geral, foi possível verificar, a partir do mapa de contorno, que independente da dose de salinidade na irrigação, o comportamento desta variável segundo os tratamentos submetidos é muito semelhante ao longo do ciclo do tomateiro (Figura 26c).

Em condições de estresse salino, de acordo com Oliveira et al., (2012), “é comum ocorrerem alterações morfológicas e anatômicas nas plantas, que refletem na redução da transpiração como alternativa para manter a baixa absorção de água salina; uma dessas adaptações é a redução do número de folhas”.

Para a variável fitomassa verde foi possível verificar que o maior desenvolvimento ocorreu ao longo do ciclo para o tratamento com dose de salinidade na irrigação de $0,08 \text{ dS.m}^{-1}$. O contrário da situação mencionada ocorreu aos 105 DAS para a dose de salinidade na irrigação de 5 dS.m^{-1} (Figura 26d).

De modo geral, o comportamento da variável fitomassa seca foi análogo ao da fitomassa verde, embora percebeu-se, por meio da modelagem *fuzzy*, que a fitomassa seca sofreu maior influência das doses de salinidade na irrigação ao longo do ciclo para valores acima de 3 dS.m^{-1} (Figura 26e).

A inibição no crescimento e produção de fitomassa pelas plantas de forma geral, é resposta do desequilíbrio nutricional e toxicidade, que refletem em perdas de respiração, expansão radicular, absorção de água e fixação de CO_2 (PARIDA; DAS, 2005). Já Silva et al. (2008), relata que o declínio na produção de fitomassa aérea das plantas irrigadas com água salina, é quase sempre resultado da senescência precoce provocada pelos efeitos tóxicos dos sais em excesso na água, que limitam a expansão da área foliar e, por conseguinte, reduz o rendimento de matéria seca.

Segundo Guedes et al. (2015), “a redução na produção de biomassa das plantas submetidas ao estresse salino é um dos principais efeitos da salinidade sobre as culturas”. Outros autores já constataram tal efeito (FREIRE et al., 2010; COSME et al., 2011; GOMES et al., 2011; MEDEIROS et al., 2011; SILVA et al., 2015).

Semelhante ao processo realizado na Figura 24, na Figura 26 foram demarcadas uma Região A e uma Região B nos mapas de contorno de todas as variáveis biométricas analisadas. A Região A representa os menores valores inferidos para cada uma das variáveis, enquanto a Região B representa os maiores valores. Percebeu-se que as variáveis

mais afetadas em relação ao aumento nas doses de salinidade na irrigação são o diâmetro do caule, a fitomassa verde e a fitomassa seca, pois a Região A destas variáveis estão situadas entre as doses de salinidade na irrigação 4 e 5 dS.m⁻¹. Além disso, notou-se que para todas as variáveis, a Região B destas, estão parcialmente ou totalmente inseridas entre as doses de salinidade na irrigação 0,08 e 3 dS.m⁻¹, o que condiz com a afirmação de Ayers e Westcot (1991) de que o tomateiro é considerado moderadamente sensível aos sais, sendo o limiar para a cultura em 2,5 dS.m⁻¹.

Conclusões

Todas as variáveis biométricas da cultura do tomate analisadas no Modelo 1 apresentaram melhor desenvolvimento entre as tensões de água no solo -25 e -10 kPa, pois o déficit hídrico influenciou de maneira negativa as variáveis analisadas ao longo do ciclo do tomateiro. Além disso, verificou-se certa homogeneidade nos efeitos causados pelas tensões de água no solo no desenvolvimento das variáveis diâmetro do caule, fitomassa verde e fitomassa seca.

No Modelo 2, o aumento nas doses de salinidade na irrigação teve efeito severo sobre as variáveis diâmetro do caule, fitomassa verde e fitomassa seca ao longo do ciclo do tomateiro. Além disso, doses de salinidade na irrigação entre 0,08 e 3 dS.m⁻¹ proporcionaram o melhor desenvolvimento a todas as variáveis biométricas analisadas.

Referências

ANJUM, S. A.; XIE, X.; WAN, L. C.; SALEEM, M. F.; MAN, C.; LEI, W. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, v. 6, n. 9, p. 2026-2032, 2011.

ANTUNES, J. F. A.; ZULLO JÚNIOR, J. *Aplicação de lógica fuzzy para estimativa de área plantada da cultura de soja utilizando imagens AVHRR-NOAA*. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE. Florianópolis, p. 35-42, 2007.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. *A qualidade de água na agricultura*. 2ª ed. UFPB. Campina Grande, 1991, 153 p.

BENINI, L. C.; MENEGUETTE JUNIOR, M. *Uma abordagem para modelagem de dados com o uso de sistemas neuro-fuzzy: aplicações geoespaciais*. In: BARBELOS, C.A. Z.; ANDRADE, E. X. L.; BOAVENTURA, M. (Ed.). XXXII CNMAC. SBMAC. São Carlos, 2009.

BRESSAN, G. M.; KOENIGKAN, L. V.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E.; KARAM, D. A classification methodology for the risk of weed infestation using fuzzy logic. *Weed Research*, v. 48, p. 470-479, 2008.

CASTANHO, M. J. P.; MATEUS, R.P.; HEIN, K.D. Fuzzy model of *Drosophila mediopunctata* population dynamics. *Ecological Modelling*, v. 287, p. 9-15, 2014.

COSME, C. R.; DIAS, N. S.; OLIVEIRA, A. M.; OLIVEIRA, E. M. M.; SOUSA NETO, O. N. Produção de tomate hidropônico utilizando rejeito da dessalinização na solução nutritiva aplicados em diferentes épocas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 499-504, 2011.

CREMASCO, C. P. *Aplicação da lógica fuzzy para avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de uma empresa de avicultura de postura*. 2008. Tese (Doutorado em Agronomia) - FCA/UNESP. Botucatu, 2008.

DOURADO NETO, D.; LIER, Q. J. V.; BOTREL, T. A.; LIBARDI, P. L. Programa para confecção da curva característica de retenção de água do solo utilizando o modelo de Genuchten. *Engenharia Rural*, v. 1, n. 2, p. 92-102, 1990.

FREIRE, A. L. O.; SARAIVA, V. P.; MIRANDA, J. R. P.; BRUNO, G. B. Crescimento, acúmulo de íons e produção de tomateiro irrigado com água salina. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 31, suplemento 1, p. 1133-1144, 2010.

GABRIEL FILHO, L. R. A. *Sistemas Fuzzy aplicados nas Ciências Agrárias*. 2015. 258p. Tese (Livre-Docência em Matemática Aplicada e Computacional) - FCE/UNESP, Tupã, 2015.

GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; PUTTI, F. F.; CHACUR, M. G. M. Application of fuzzy logic for the evaluation of livestock slaughtering. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 4, p. 813-825, 2011.

GOMES, J. W. S.; DIAS, N. S.; OLIVEIRA, A. M.; BLANCO, F. F.; SOUSA NETO, O. N. Crescimento e produção de tomate cereja em sistema hidropônico com rejeito de dessalinização. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 4, p. 850-856, 2011.

GUEDES, R. A. A.; OLIVEIRA, F. A.; ALVES, R. C.; MEDEIROS, A. M.; GOMES, L. P.; COSTA, L. P. Estratégias de irrigação com água salina no tomateiro cereja em ambiente protegido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, v. 19, n. 10, p. 913-919, 2015.

HOLANDA, J. S.; AMORIM, J. R. A.; FERREIRA NETO, M.; HOLANDA, A. C. *Qualidade da água para irrigação*. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (Ed.). Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados. Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade. Fortaleza, p. 43-61, 2010.

KLAR, A.E. *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. 2ª ed. Nobel. São Paulo, 1988. 408 p.

MALAMAN, C. S. *Aplicação de lógica fuzzy na elaboração de planta de valores genéricos*. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). FCT/UNESP. Presidente Prudente, 2014.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal Man-Machine Studies*, v. 7, p. 1-13, 1975.

MEDEIROS, P. R. F. *Manejo da fertirrigação em ambiente protegido visando o controle da salinidade para a cultura do tomate em solo franco-argiloso*. 2010. 85 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - ESALQ/USP. Piracicaba, 2010.

MEDEIROS, R. F.; CAVALCANTE, L. F.; MESQUITA, F. O.; RODRIGUES, R. M.; SOUSA, G. G.; DINIZ, A. A. Crescimento inicial do tomateiro-cereja sob irrigação com águas salinas em solo com biofertilizantes bovino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 505-511, 2011.

MELO, N. C.; SOUZA, L. C.; SILVA, V. F. A.; GOMES, R. F.; OLIVEIRA NETO, C. F.; COSTA, D. L. P. Cultivo de tomate (*Solanum Lycopersicum*) hidropônico sob diferentes níveis de fósforo e potássio em solução nutritiva. *Agroecossistemas*, v. 6, n. 1, p. 10-16, 2014.

- OLIVEIRA, F. A.; OLIVEIRA, M. K. T.; LIMA, L. A.; BEZERRA, F. M. S.; CAVALCANTE, A. L. G. Desenvolvimento inicial do maxixeiro irrigado com águas de diferentes salinidades. *Agropecuária Científica no Semi-Árido*, v. 8, n. 2, p. 22-28, 2012.
- OLIVEIRA, M. D. *Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de estações convencionais de tratamento de água*. 2014. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - UFMG. Belo Horizonte, 2014.
- PAPAGEORGIOU, E. I.; MARKINOS, A.; GEMPTOS, T. Application of fuzzy cognitive maps for cotton yield management in precision farming. *Expert Systems with Applications*, v. 36, p. 12399-12413, 2009.
- PARIDA, A. K.; DAS, A. B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 60, n. 3, p. 324-349, 2005.
- PEDROSA, M. W.; MAGALHÃES, K. S.; RESENDE, F. V.; FRANÇA, F. C. T.; SILVÉRIO, T. T.; SILVA, L. S. *Desempenho de cultivares de tomate orgânico em sistema orgânico de produção*. In: Congresso Brasileiro de Olericultura, 51. Anais... Viçosa, 2011.
- PEREIRA, G. C.; EVSUKOFF, A.; EBECKEN, N. F. F. Fuzzy modelling of chlorophyll production in a Brazilian upwelling system. *Ecological Modelling*, v. 220, p. 1506-1512, 2009.
- PUTTI, F. F. *Análise dos indicadores biométricos e nutricionais da cultura da alface (Lactuca sativa L.) irrigada com água tratada magneticamente utilizando modelagem fuzzy*. 2015. 205p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - FCA/UNESP. Botucatu, 2015.
- RODRÍGUEZ, E.; PECHE, R.; GARBISU, C.; GOROSTIZA, I.; EPELDE, L.; ARTETXE, U.; IRIZAR, A.; SOTO, M.; BECERRIL, J. M.; ETXEBARRIA, J. Dynamic Quality Index for agricultural soils based on fuzzy logic. *Ecological Indicators*, v. 60, p. 678-692, 2016.
- SANTANA, M. J.; VIEIRA, T. A.; BARRETO, A. C.; CRUZ, O. C. Resposta do tomateiro irrigado a níveis de reposição de água no solo. *Revista Irriga*, v. 15, n. 4, p. 443-454, 2010.

SANTOS, J. S.; BENICASA, A. X. *Modelo de sistema fuzzy para apoio ao processo de decisão sobre áreas de pesquisa*. In: Semana de Informática da Universidade Federal de Sergipe, 2. Anais eletrônicos... DSI/UFS. Itabaiana, p. 37-40, 2012.

SENAVIRATNE, G. M. M. M. A.; UDAWATTA, A. R. P. S. H.; BAFFAUT, C.; THOMPSON, A. Use of *fuzzy* rainfall–runoff predictions for claypan watersheds with conservation buffers in Northeast Missouri. *Journal of Hydrology*, v. 517, p. 1008-1018, 2014.

SILVA, E. C.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; ARAÚJO, F. P.; MELO N. F.; AZEVEDO NETO, A. D. Physiological responses to salt stress in young umbu plants. *Enviromental and Experimental Botany*, v. 63, p. 147-157, 2008.

SILVA, J. H.; FONTES, P. C. R.; MIZUBUTI, E. S. G.; PICANÇO, M. C. *Tomate (Lycopersicon esculentum Mill.)*. In: PAULA JÚNIOR, T. J. de; VENZON, M. (Coord.). 101 Culturas manual de tecnologias agrícolas. EPAMIG. Belo Horizonte, p. 735-750, 2007.

SILVA JUNIOR, J. F. *Desenvolvimento do tomate em diferentes níveis de irrigação e de doses de salinidade*. 2012. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - FCA/UNESP. Botucatu, 2012.

SILVA, P. F.; MATOS, R. M.; LIMA, C. J. G. S.; SILVA, E. M.; DUARTE, S. N. Salinidade do solo e fertirrigação sobre a biomassa do tomateiro cultivado em ambiente protegido. *Journal of Agronomic Sciences*, v. 4, n. 2, p. 238-249, 2015.

SOARES, L. A. A.; LIMA, G. S.; BRITO, M. E. B.; SÁ, F. V. S.; SILVA, E. C. B.; ARAÚJO, T. T. Cultivo do tomateiro na fase vegetativa sobre diferentes lâminas de irrigação em ambiente protegido. *Agropecuária Científica no Semi-Árido*, v. 8, p. 38-45, 2012.

TRANI, P. E.; RAIJ, B. van. *Hortaliças*. In: RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2ª ed. Instituto Agrônômico/Fundação IAC. Campinas, 1997. p. 183-184.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*. v.44, n. 5, p.892-898, 1980.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em ambos os capítulos, as modelagens *fuzzy* desenvolvidas permitiram analisar regiões intermediárias aos pontos específicos verificados por meio de experimento e tecer conclusões mais específicas do desenvolvimento e da produtividade do tomateiro.

Para a elaboração dos modelos *fuzzy*, deve-se ressaltar que não foi utilizado a opinião de especialistas para o desenvolvimento da base de regras, e que a metodologia elaborada possibilita desenvolvê-la a partir dos conjuntos de dados de resposta do experimento.

De modo geral, todos os modelos aqui elaborados (Irrigação versus Salinidade, Irrigação versus DAS e Salinidade versus DAS) inferiram os melhores resultados tanto para as variáveis de desenvolvimento quanto para as de produtividade quando utilizou-se irrigação em capacidade de campo e/ou salinidade nula.

Por fim, de acordo com os resultados teóricos apresentados, a modelagem matemática desenvolvida pode ser utilizada para outras culturas nas quais se tenham dados coletados por meio de um experimento, desde que feitas devidas adaptações metodológicas tais como fatores experimentais, variáveis de entrada, variáveis de saída e números de conjunto *fuzzy* de entrada.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, M. A. R. *Sistemas de produção em campo aberto e em ambiente protegido*. Capítulo 7. In: ALVARENGA, M. A. R. *Tomate: Produção em campo, em casa-de-vegetação e em hidroponia*. UFLA. Lavras, 2004.
- ALVARENGA, M. A. R.; LIMA, L. A.; FAQUIN, V. *Fertirrigação*. Capítulo 6. In: ALVARENGA, M. A. R. *Tomate: Produção em campo, em casa-de-vegetação e em hidroponia*. UFLA. Lavras, 2004.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Informe 2015*. ANA. Brasília, 2015. 88 p.
- BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C. *Tópicos de lógica fuzzy e biomatemática*. 2ª ed. UNICAMP/IMECC. Campinas, 2010.
- BRESOLIN, M. et al.; *O cultivo do tomate indústria na região da serra do nordeste do Estado do Rio Grande do Sul*. FEPAGRO. Porto Alegre, 2010.
- CAMPAGNOL, R.; ABRAHÃO, C.; MELLO, S. C.; OVIEDO, V. R. S. C.; MINAMI, K. Impactos do nível de irrigação e da cobertura do solo na cultura do tomateiro. *Revista Irriga*, v. 19, n. 3, p. 345-357, 2014.
- CARVALHO, J. L.; PAGLIUCA, L. G. Tomate: Um mercado que não para de crescer globalmente. *Revista Hortifrúti Brasil*, Ano 6, n. 58, p. 6-14, 2007.
- COMISSÃO DE AGRICULTURA E REFORMA AGRÁRIA - CRA. *Relatório de avaliação de políticas públicas sobre recursos hídricos para a agricultura na região semiárida nordestina*. Senado Federal. Brasília, 2014.
- CORDEIRO, L. F. B.; PARENTE FILHO, L. F. R.; MACHADO, M. A. S.; COSTA, R. S. *Usabilidade de Sistemas: Aplicação da lógica fuzzy na avaliação do sistema IPod*. IV Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. Resende, 2007.
- DUARTE, S. N.; DIAS, N. S.; TELES FILHO, J. F. Recuperação de um solo salinizado devido a excesso de fertilizantes em ambiente protegido. *Revista Irriga*, v. 12, n. 3, p. 422-428, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3ª ed. Embrapa. Brasília, 2013. 353p.

FERRARI, A. A. *Caracterização química de tomates (*Lycopersicum esculentum* Mill) empregando análise por ativação neutrônica instrumental*. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências) - CENA/USP. Piracicaba, 2008.

FILGUEIRA; F. A. R. *Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças*. 3ª ed. UFV. Viçosa, 2008. 421 p.

GABRIEL FILHO, L. R. A.; HALMEMAN, M. C. R.; SERAPHIM, O. J.; HALMEMAN, R. J.; CREMASCO, C. P. *Aplicação da lógica fuzzy para avaliação da eficiência e racionalidade de usinas sucroalcooleiras*. In: BEDREGAL, B. B. R. et al. (Org.) *Recentes Avanços em Sistemas Fuzzy*. 1ª ed. SBMAC - Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional. São Carlos, 2012.

GIUSTI, E.; MARSILI-LIBELLI, S. *A fuzzy decision support system for irrigation and water conservation in agriculture*. *Environmental Modelling & Software*, v. 63, p. 73-86, 2015.

GUEDES, R. A. A.; OLIVEIRA, F. A.; ALVES, R. C.; MEDEIROS, A. M.; GOMES, L. P.; COSTA, L. P. *Estratégias de irrigação com água salina no tomateiro cereja em ambiente protegido*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, v. 19, n. 10, p. 913-919, 2015.

JUSTUS, A. *Influência da aplicação de ondas de ultrassom na desidratação osmótica de tomates (*Lycopersicum esculentum*) cv. Carmem*. 2012. 116 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - UFLA. Larvas, 2012.

KURTENER, D. D.; SUKHANOV, P. *Evaluation of agricultural soil resources using fuzzy modeling*. *Journal of Agricultural Science*, v. 6, n. 4, p. 199-204, 2014.

LABABIDI, H. M. S.; BAKER, C. G. J. *Fuzzy modeling*. In: SABLANI, S. S.; DATTA, A. K.; RAHMAN, M. S.; MUJUMDAR, A. S. *Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques*. Chapter 15. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, p. 451-497, 2006.

LOPES, C. A.; REIS, A. *Doenças do tomateiro cultivado em ambiente protegido*. 2ª ed. Embrapa Hortaliças. Brasília, 2011.

- MANTOVANI E. C.; ZINATO, C. E.; SIMÃO F. R. *Manejo de irrigação e fertirrigação na cultura da goiabeira*. Livro Goiaba. Viçosa, 2006. 60 p.
- MEDEIROS, P. R. F. *Manejo da fertirrigação em ambiente protegido visando o controle da salinidade para a cultura do tomate em solo franco-argiloso*. 2010. 85 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - ESALQ/USP. Piracicaba, 2010.
- PARISE, F. J. O.; VETTORAZZI, C. A. Análise de dados de produção em um pomar jovem de laranjeiras hamlin: II. Classificação de dados espaço-temporais. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 27, n. 1, p. 48-51, 2005.
- PIRES, R. M.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E.; CALHEIROS, R. O.; BRUNINI, O. Agricultura irrigada. *Revista Tecnologia e Inovação Agropecuária – APTA*, vol.1, n. 1, p. 98-111, 2008.
- PUTTI, F. F. *Análise dos indicadores biométricos e nutricionais da cultura da alface (Lactuca sativa L.) irrigada com água tratada magneticamente utilizando modelagem fuzzy*. 2015. 205p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - FCA/UNESP. Botucatu, 2015.
- PUTTI, F. F.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; SILVA, A. O.; LUDWIG, R.; GABRIEL, C. P. C. Fuzzy logic to evaluate vitality of Catasetum Fimbriatum species (Orchidacea). *Revista Irriga*, v. 19, n. 3, p. 405-413, 2014.
- REZENDE, O. L. T. *O uso da lógica fuzzy no controle das temperaturas de um conjunto gaseificador/combustor de biomassas*. 2012. Tese (Doutorado Engenharia Agrícola) - UFV. Viçosa, 2012.
- SILVA, G. J.; KLAR, A. E. Modelo de software livre para avaliação de sistema de irrigação por pivô central. *Revista Energia na Agricultura*, vol. 25, n. 1, p. 70-84, 2010.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338-353, 1965.