

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

**ANÁLISE DOS INDICADORES BIOMÉTRICOS E NUTRICIONAIS
DA CULTURA DA ALFACE (*Lactuca sativa* L.) IRRIGADA COM
ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE UTILIZANDO
MODELAGEM *FUZZY***

FERNANDO FERRARI PUTTI

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

Junho - 2015

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

**ANÁLISE DOS INDICADORES BIOMÉTRICOS E NUTRICIONAIS
DA CULTURA DA ALFACE (*Lactuca sativa* L.) IRRIGADA COM
ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE UTILIZANDO
MODELAGEM *FUZZY***

FERNANDO FERRARI PUTTI

Orientador: Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho

Coorientador: Prof. Dr. Antônio 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

Junho - 2015

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

Putti, Fernando Ferrari, 1990-

P933a Análise dos indicadores biométricos e nutricionais da cultura da alface (*Lactuca sativa* L.) irrigada com água tratada magneticamente utilizando modelagem fuzzy / Fernando Ferrari Putti. - Botucatu : [s.n.], 2015
xxi, 186 f. : grafs. color., ils. color., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2015
Orientador: Luís Roberto Almeida Gabriel Filho
Coorientador: Antônio Evaldo Klar
Inclui bibliografia

1. Alface - Cultivo. 2. Alface - Irrigação. 3. Algoritmos difusos. 4. Água - Magnetização. I. Gabriel Filho, Luís Roberto Almeida. II. Klar, Antônio Evaldo. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO: ANÁLISE DOS INDICADORES BIOMÉTRICOS E NUTRICIONAIS DA CULTURA DA ALFACE (LACTUCA sativa L.) IRRIGADA COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE UTILIZANDO MODELAGEM FUZZY


AUTOR: FERNANDO FERRARI PUTTI

ORIENTADOR: Prof. Dr. LUIS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. ANTONIO EVALDO KLAR

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


Prof. Dr. LUIS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO
Coordenadoria Executiva / Unidade de Tupã


Prof. Dr. ODIVALDO JOSE SERAPHIM
Dep de Engenharia Rural / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu


Prof. Dr. MARIO MOLLO NETO
Coordenadoria de Curso de Engenharia de Biossistemas / Unidade de Tupã


Prof. Dr. ALFREDO BONINI NETO
Coordenadoria de Curso de Engenharia de Biossistemas / Unidade de Tupã


Profa. Dra. ANA CAROLINA BARBOSA KUMMER
Universidade Estadual de Ponta Grossa / Campus Uvaranas

Data da realização: 26 de junho de 2015.

Dedico,

*Aos meus pais, Rute e Nilton, pelo
apoio incondicional para superar este desafio.*

AGRADECIMENTOS

A Deus e Nossa Senhora da Aparecida, pela força e coragem para realizar este grande desafio.

Aos meus irmãos, Rodolfo e Rafael, pela ajuda e por me apoiarem nos momentos de maior dificuldade.

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho (Betão), pela inestimável dedicação, determinação, paciência e orientação na condução deste trabalho.

Ao amigo e coorientador Prof. Dr. Antonio Evaldo Klar, pela amizade, orientação, conselhos, ensinamentos de vida e pelas conversas.

À amiga Prof^ª Dr^ª Camila Pires Cremasco, pela ajuda inestimável, pelos conselhos e a amizade.

Aos professores, funcionários e amigos da Faculdade de Ciências Agronômicas-Unesp-FCA de Botucatu-SP, pelo apoio, convívio e companheirismo durante o doutorado.

Aos amigos do Campus da Unesp de Tupã, em especial ao André, Camila, Danilo, Eduardo, Marcelo Campos, Marcelo Magalhães, Mário, Ricardo e Renato. Aos professores Raimundo, Hélio Grassi, Pádua, Seraphim, João Saad, Ângelo e Lyra.

Aos funcionários e técnicos que, de forma inestimável, auxiliaram no desenvolvimento do experimento, em especial ao Gilberto, Adão, Zé Carlos, Antônio, Israel e Adilson.

E aos meus amigos que me ajudaram em todos os momentos, em especial ao Josué, Ilca, Nayele, Ana Paula, Débora, Luciana, Rafael, Ana Laura, Daiane, Rodrigo e aos demais.

SUMÁRIO

Capítulo I “MODELAGEM FUZZY DO DESENVOLVIMENTO EM DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO DA ALFACE IRRIGADA COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE”	12
Capítulo II “MODELAGEM <i>FUZZY</i> DO CRESCIMENTO DA ALFACE IRRIGADA COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE”	68
Capítulo III “MODELAGEM <i>FUZZY</i> DA PRODUTIVIDADE DA ALFACE IRRIGADA COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE”	116
Capítulo IV “MODELAGEM <i>FUZZY</i> DA AVALIAÇÃO NUTRICIONAL DA ALFACE IRRIGADA COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE”	149

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Resultado da análise química de macronutrientes do solo de 0 a 20 cm.....	17
Tabela 2. Resultado da análise química de micronutrientes do solo de 0 a 20 cm.....	17
Tabela 3. Análise granulométrica e da densidade do solo.....	18
Tabela 4. Definições dos conjuntos fuzzy com suas respectivas funções de pertinência da variável de entrada “Lâminas de Irrigação”.....	26
Tabela 5. Definições das funções de pertinência da variável de entrada “Dias Após Transplântio”.....	28
Tabela 6. Definições das funções de pertinência genérica da variável de saída.....	31
Tabela 7. Combinações das variáveis de entrada com pontos de grau de pertinência 1 associados aos conjuntos fuzzy para a construção da base de regras.....	33
Tabela 8. Coeficientes da regressão e de determinação das equações polinomiais múltiplas para a cultura da alface submetida em diferentes lâminas de irrigação avaliada ao longo do ciclo.....	37
Tabela 9. Base de regras do sistema baseado em lógica <i>fuzzy</i> , para o 1º ciclo da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e avaliada em diferentes datas ao longo do desenvolvimento para a irrigação com ATM.....	42
Tabela 10. Base de regras do sistema baseado em lógica <i>fuzzy</i> , para o 1º ciclo da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e avaliada em diferentes datas ao longo do desenvolvimento para a irrigação com AC.....	43
Tabela 11. Base de regras do sistema baseado em lógica <i>fuzzy</i> , para o 2º ciclo da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e avaliada em diferentes datas ao longo do desenvolvimento, para a irrigação com ATM.....	44
Tabela 12. Base de regras do sistema baseado em lógica <i>fuzzy</i> , para o 2º ciclo da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e avaliada em diferentes datas ao longo do desenvolvimento, para a irrigação com AC.....	45
Tabela 13. Análise de intensidade de associação dos modelos fuzzy e de regressão com os dados coletados a campo, para as variáveis biométricas da cultura da alface, submetidas a diferentes lâminas de irrigação e avaliado ao longo do ciclo, para cada tipo de água.....	58
Tabela 14. Coeficiente da cultura da alface. (FAO 56,1998).....	74

Tabela 15. Definições dos conjuntos fuzzy com suas respectivas funções de pertinência da variável de entrada “tipo de água”.....	77
Tabela 16. Combinações das variáveis de entrada com os pontos de grau de pertinência 1 associados aos conjuntos fuzzy para a construção da base de regras.....	78
Tabela 17. Equações de ajuste do modelo estatístico utilizando regressão polinomial múltipla.....	80
Tabela 18. Base de regras do sistema baseado em lógica fuzzy para a lâmina de irrigação 75% da ETc do 1 ° ciclo.	87
Tabela 19. Base de regras do sistema baseado em lógica <i>fuzzy</i> para a lâmina de irrigação 100% da ETc do 1 ° ciclo.	87
Tabela 20. Base de regras do sistema baseado em lógica fuzzy para a lâmina de irrigação 125% da ETc do 1 ° ciclo.	88
Tabela 21. Base de regras do sistema baseado em lógica fuzzy para a lâmina de irrigação 75% da ETc do 2 ° ciclo.	88
Tabela 22. Base de regras do sistema baseado em lógica fuzzy para a lâmina de irrigação 100% da ETc do 2 ° ciclo.	89
Tabela 23. Base de regras do sistema baseado em lógica fuzzy para a lâmina de irrigação 125% da ETc do 2 ° ciclo.	89
Tabela 24. Análise da intensidade de associação dos modelos fuzzy e da regressão polinomial múltipla com os dados coletados a campo, para as variáveis biométricas da cultura da alface submetidas a diferentes lâminas de irrigação e tipo de água.	107
Tabela 25. Parâmetros climáticos coletados durante a relação do experimento.....	121
Tabela 26. Combinações das variáveis de entrada com pontos de grau de pertinência 1 associados aos conjuntos fuzzy para a construção da base de regras.....	126
Tabela 27. Coeficientes de regressão e determinação das equações de estimativa das variáveis biométricas da cultura alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipo de água.....	127
Tabela 28. Base de regras do sistema baseado em lógica fuzzy, para o 1º ciclo da cultura da alface submetida em diferentes taxas de reposição e tipo de água.	130
Tabela 29. Base de regras do sistema baseado em lógica fuzzy, para o 2 ° ciclo da cultura da alface submetida em diferentes taxas de reposição e tipo de água.	131

Tabela 30. Análise comparativa entre os dados coletados a campo com os modelos *fuzzy* e de regressão, para as variáveis biométricas da cultura da alface submetidas a diferentes lâminas de irrigação e tipo de água. 141

Tabela 31. Coeficientes de regressão e determinação das equações de estimativa das variáveis biométricas da cultura alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipo de água..... 160

Tabela 32. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy* para o 1º ciclo da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipos de água. 164

Tabela 33. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy* para o 2º ciclo, para a cultura da alface submetida em diferentes níveis de irrigação e tipos de água. 165

Tabela 34. Análise comparativa entre os modelos *fuzzy* e de regressão linear para as variáveis biométricas da cultura da alface submetida às diferentes lâminas de irrigação e tipo de água..... 176

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma do desenvolvimento metodológico do presente trabalho.....	17
Figura 2. Box plot da evaporação (mm), temperatura (°C) e umidade (%) durante a realização do 1° ciclo e 2° ciclo.	18
Figura 3. Método de determinação da evapotranspiração e o manejo adotado para o cálculo da lâmina de irrigação e tempo de irrigação.	20
Figura 4. (a) delimitadores $x_i, i = 1, 2, 3$ de uma função de pertinência triangular e (b) delimitadores $x_i, i = 1, 2, 3, 4$ de uma função de pertinência trapezoidal.....	25
Figura 5. Funções de pertinência definidas para os conjuntos fuzzy da variável de entrada “Lâmina de Irrigação (% ETc)”.....	26
Figura 6. Funções de pertinência definidas para os conjuntos fuzzy da variável de entrada “Dias Após Transplântio”.....	28
Figura 7. Sistema baseado em regras fuzzy para a avaliação da cultura da alface, em que apresentou como entrada a lâmina de irrigação e dias após transplântio e como variável de saída o número de folhas, fitomassa verde aérea, fitomassa seca aérea, fitomassa verde de raiz e fitomassa seca de raiz.	29
Figura 8. Funções de pertinência definidas para os conjuntos fuzzy das variáveis de saída.	31
Figura 9. Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a lâminas de irrigação e ATM, ao longo do ciclo, para o 1° ciclo.	38
Figura 10. Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a lâminas de irrigação e AC, ao longo do ciclo, para o 1° ciclo.	39
Figura 11. Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a lâminas de irrigação e ATM, ao longo do ciclo, para o 2° ciclo.	40
Figura 12. Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a lâminas de irrigação e AC, ao longo do ciclo, para o 2° ciclo.	41
Figura 13. Número de folhas da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipos de água, sendo avaliada ao longo do ciclo.	47
Figura 14. Mapa de contorno para o desenvolvimento do número de folhas da cultura da alface submetida em diferentes lâminas de irrigação.	48
Figura 15. Fitomassa verde aérea da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipos de água, sendo avaliada ao longo do ciclo.....	49

Figura 16. Mapa de contorno para o desenvolvimento da fitomassa verde aérea da cultura da alface submetida em diferentes lâminas de irrigação.	50
Figura 17. Fitomassa seca aérea da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipos de água, sendo avaliada ao longo do ciclo.	51
Figura 18. Mapa de contorno para o desenvolvimento da fitomassa seca aérea da cultura da alface submetida em diferentes lâminas de irrigação.	52
Figura 19. Fitomassa verde de raiz da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipos de água, sendo avaliada ao longo do ciclo.	53
Figura 20. Mapas de contorno para o desenvolvimento da fitomassa verde raiz da cultura da alface submetida em diferentes lâminas de irrigação.	54
Figura 21. Fitomassa seca de raiz da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipos de água, sendo avaliada ao longo do ciclo.	55
Figura 22. Mapas de contorno para o desenvolvimento da fitomassa verde aérea da cultura da alface submetida em diferentes lâminas de irrigação.	56
Figura 23. Evaporação diária média do tanque classe A, temperatura do ar e umidade médias relativa do ar, registrados diariamente dentro do ambiente protegido no período de avaliação da cultura da alface para o 1º ciclo.	72
Figura 24. Evaporação diária média do tanque classe A, temperatura do ar e umidade média relativa do ar, registrados diariamente dentro do ambiente protegido no período de avaliação da cultura da alface para o 2º ciclo.	73
Figura 25. Sistema baseado em regras fuzzy para a avaliação da cultura da alface, irrigada com diferentes tipos de água e dias após transplantio e como variáveis de saída número de folhas, fitomassa verde aérea, fitomassa seca aérea, fitomassa verde de raiz, fitomassa seca de raiz.	77
Figura 26. Funções de pertinência definidas para os conjuntos fuzzy da variável de entrada “tipo de água”.	78
Figura 27. Funções de pertinência dos conjuntos fuzzy para as variáveis de saída da cultura da alface avaliadas ao longo do ciclo, na lâmina de 75% da ETc, para o 1º ciclo.	81
Figura 28. Funções de pertinência dos conjuntos fuzzy para as variáveis de saída da cultura da alface avaliadas ao longo do ciclo, na lâmina de 75% da ETc, para o 2º ciclo.	82
Figura 29. Funções de pertinência dos conjuntos fuzzy para as variáveis de saída da cultura da alface avaliadas ao longo do ciclo, na lâmina de 100% da ETc, para o 1º ciclo.	83

- Figura 30.** Funções de pertinência dos conjuntos fuzzy para as variáveis de saída da cultura da alface avaliadas ao longo do ciclo, na lâmina de 100% da ETc, para o 2º ciclo. 84
- Figura 31.** Funções de pertinência dos conjuntos fuzzy para as variáveis de saída da cultura da alface avaliadas ao longo do ciclo, na lâmina de 125% da ETc, para o 1º ciclo. 85
- Figura 32.** Funções de pertinência dos conjuntos fuzzy para as variáveis de saída da cultura da alface avaliadas ao longo do ciclo, na lâmina de 125% da ETc, para o 2º ciclo. 86
- Figura 33.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento do número de folhas da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 75% da ETc. 91
- Figura 34.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento do fitomassa verde aérea da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 75% da ETc..... 92
- Figura 35.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento do fitomassa seca de aérea da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 75% da ETc..... 93
- Figura 36.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa verde de raiz da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 75% da ETc..... 94
- Figura 37.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa seca de raiz da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 75% da ETc..... 95
- Figura 38.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento, o número de folhas da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 100% da ETc. 96
- Figura 39.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento, a fitomassa verde aérea da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 100% da ETc..... 97
- Figura 40.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa seca aérea da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 100% da ETc..... 98
- Figura 41.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa verde raiz da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 100% da ETc. 99
- Figura 42.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa seca raiz da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 100% da ETc. 100
- Figura 43.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento o número de folhas da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 125% da ETc. 101
- Figura 44.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa verde aérea da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 125% da ETc..... 102
- Figura 45.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa seca aérea da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 125% da ETc..... 103

- Figura 46.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa verde de raiz da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 125% da ETc..... 104
- Figura 47.** Modelos fuzzy e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa seca de raiz da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 125% da ETc..... 105
- Figura 48.** Sistema baseado em regras fuzzy para a avaliação da cultura da alface, submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipos de águas, para as variáveis de saída, número de folhas (NF), fitomassa verde aérea (FVA), fitomassa seca aérea (FSA), fitomassa verde de raiz (FVR) e fitomassa seca de raiz (FSR). 125
- Figura 49.** Funções de pertinência dos conjuntos fuzzy para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a diferentes tipos de água e lâminas de irrigação, para o 1º ciclo..... 128
- Figura 50.** Funções de pertinência dos conjuntos fuzzy para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a diferentes tipos de água e lâminas de irrigação, para o 2º ciclo..... 129
- Figura 51.** Modelos fuzzy e de regressão do número de folhas de plantas submetidas a diferentes níveis de reposição hídrica e com ATM (a) 1º ciclo, (b) 2º ciclo; AC (c) 1º ciclo e (d) 2º ciclo. 133
- Figura 52.** Modelos fuzzy e de regressão da fitomassa verde aérea de planta submetida em diferentes níveis de reposição hídrica..... 135
- Figura 53.** Modelos fuzzy e de regressão da fitomassa seca aérea de planta submetida em diferentes níveis de reposição hídrica..... 136
- Figura 54.** Modelos fuzzy e de regressão da fitomassa verde da raiz de planta submetida em diferentes níveis de reposição hídrica..... 138
- Figura 55.** Modelos fuzzy e de regressão da fitomassa seca da planta submetida em diferentes níveis de reposição hídrica..... 139
- Figura 56.** Sistema baseado em regras fuzzy para a avaliação da cultura da alface, em que apresentou como entrada a lâmina de irrigação e tipo de água e como variável de saída os teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, ferro, manganês, zinco. 158
- Figura 57.** Funções de pertinência dos conjuntos fuzzy para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a diferentes tipos de água e lâminas de irrigação..... 162
- Figura 58.** Funções de pertinência dos conjuntos fuzzy para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a diferentes tipos de água e lâminas de irrigação..... 163

- Figura 59.** Modelos fuzzy e de regressão do fósforo da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição e com ATM no (a) 1º ciclo e no (c) 2º ciclo e com AC (b) 1º ciclo e no (d) 2º ciclo. 167
- Figura 60.** Modelos fuzzy e de regressão do potássio da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição e com ATM no (a) 1º ciclo e com AC (b) 2º ciclo. 168
- Figura 61.** Modelos fuzzy e de regressão do cálcio da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição e com ATM no (a) 1º ciclo e com AC (b) 2º ciclo. 168
- Figura 62.** Modelos fuzzy e de regressão do magnésio da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição e com ATM no (a) 1º ciclo e no (c) 2º ciclo e com AC (b) 1º ciclo e no (d) 2º ciclo. 169
- Figura 63.** Modelos fuzzy e de regressão do enxofre da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição. 170
- Figura 64.** Modelos fuzzy e de regressão do boro da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição. 171
- Figura 65.** Modelos fuzzy e de regressão do cobre da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição. 172
- Figura 66.** Modelos fuzzy e de regressão do ferro da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição. 173
- Figura 67.** Modelos fuzzy e de regressão do manganês da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição. 174
- Figura 68.** Modelos fuzzy e de regressão do zinco da cultura da alface cultivada em diferentes taxas. 175

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
B	Boro	[mg dm ⁻³]
B	Bordadura em torno do tanque classe A	[m]
Ca	Cálcio	[mmol dm ⁻³]
CTC	Capacidade de Troca Catiônica	[mmol dm ⁻³]
Cu	Cobre	[mg dm ⁻³]
DAT	Dias após transplântio	[dias]
ECA	Evaporação do tanque Classe A	[mm]
Ef	Eficiência do Sistema	[-]
EQM	Erro quadrado médio	[-]
ETc	Evapotranspiração da cultura	[mm]
ETo	Evapotranspiração	[mm]
f	Fator de irrigação	[-]
Fe	Ferro	[mg dm ⁻³]
FSA	Fitomassa seca aérea	[g]
FSR	Fitomassa seca de raiz	[g]
FVA	Fitomassa verde aérea	[g]
FVR	Fitomassa verde de raiz	[g]
H +Al	Hidrogênio e alumínio	[mmol dm ⁻³]
IA	Intensidade de aplicação	[mm h ⁻¹]
K	Potássio	[mmol dm ⁻³]
Kc	Coeficiente da cultura	[-]
Kp	Coeficiente do tanque	[-]
Li	Lâmina de irrigação	[mm]
M.O.	Matéria Orgânica	[g dm ⁻³]
Mg	Magnésio	[mmol dm ⁻³]
NF	Número de folhos	[-]
P _{resina}	Fósforo	[mg dm ⁻³]
r	Correlação de Pearson	[-]
R ²	Coeficiente de determinação	[-]
SB	Saturação por Base	[mmol dm ⁻³]
Ti	Tempo de irrigação	[h]
UR	Umidade relativa	[%]
V	Velocidade do vento	[m s ⁻¹]
V%	Porcentagem de Saturação por Bases	[mmol dm ⁻³]
Zn	Zinco	[mg dm ⁻³]

ANÁLISE DOS INDICADORES BIOMÉTRICOS E NUTRICIONAIS DA CULTURA DA ALFACE (*Lactuca sativa* L.) IRRIGADA COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE UTILIZANDO MODELAGEM *FUZZY*. Botucatu, 205p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade estadual Paulista.

Autor: FERNANDO FERRARI PUTTI

Orientador: LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

Coorientador: ANTONIO EVALDO KLAR

RESUMO

O atual contexto de crise hídrica pelo mundo vem provocando racionamento desde os centros urbanos até mesmo em propriedades rurais. Assim, pesquisas são desenvolvidas para otimizar o uso racional da água, principalmente na questão de irrigação. Então nos últimos anos, vem se pesquisando os efeitos do tratamento magnético na água para a irrigação, que proporciona maior produção, redução do ciclo e economia de água. A fim de comprovar os efeitos de experimentações são utilizadas frequentemente as análises de regressões. Também alguns pesquisadores recorrem à técnica mais sofisticadas como os modelos matemáticos *fuzzy*. Deste modo, o objetivo do presente trabalho foi analisar os efeitos da irrigação com a água tratada magneticamente na cultura da alface utilizando os modelos baseado em regras *fuzzy*, os quais foram comparados com os modelos de regressão. Deste modo para avaliar o desenvolvimento da cultura da alface, quando irrigada com água tratada magneticamente e convencional, em diferentes lâminas de reposição baseadas na evapotranspiração da cultura (ETc), foi conduzido experimento no Departamento de Engenharia Rural da UNESP, Faculdade Ciências Agrônômicas, Fazenda Experimental Lageado, localizada no município de Botucatu, SP. Para o tratamento magnético da água foi utilizado o equipamento Sylocimol. Foi adotado o delineamento em blocos casualizados, com 2 ciclos de cultivo, sendo realizadas 4 avaliações ao longo de cada ciclo. Na elaboração dos sistemas *fuzzy*, foram considerados como entradas as lâminas de irrigação, tipo de água e tempo ao longo do ciclo e as saídas foram as avaliações biométricas e nutricional. Pode-se inferir que a irrigação com água tratada magneticamente apresentou um aumento na produção da cultura

da alface. Também observou-se a possibilidade da redução no volume de água aplicado via irrigação para atender a demanda hídrica da cultura ao longo do ciclo. Além disso, verificou-se que os modelos *fuzzy* apresentaram redução no valor do erro quadrado médio e aumento no valor da exatidão do modelo, assim como da correlação, o modelo apresentou ser mais exato e com resultados mais refinados quando comparado a análise de regressão.

Palavras-chave: Mamdani, água magnetizada, irrigação, produção/produktividade, regras *fuzzy*, regressão polinomial.

ANALYSIS OF BIOMETRIC INDICATORS AND NUTRITIONAL CULTURE OF LETTUCE (*Lactuca sativa* L.) IRRIGATED WITH WATER magnetically treated USING FUZZY MODELING. Doctoral Thesis in Agronomy/Irrigation and Drainage) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu SP Brazil.

Author: FERNANDO FERRARI PUTTI

Advisor: LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

Co-Advisor: ANTONIO EVALDO KLAR

ABSTRACT

Current water crises worldwide have caused water rationing, involving urban and rural areas. Several researches have been undertaken to optimize the rational use of water, especially water for irrigation. Researches have recently been conducted on the effects of magnetically treated water for irrigation. Since regression analyses have inherent errors, statistic techniques have been employed to prove the true effects of the experiments and thus more advanced techniques, such as the fuzzy mathematic models, are being used. Current assay analyzes the effects of magnetically treated water in the irrigation of lettuce crops. Fuzzy rules-based models have been developed and results were compared with data collected on the field and with regression models. An experiment was conducted in the Department of Rural Engineering of UNESP, Faculty of Agronomic Sciences, on the Lageado Experimental Farm, Botucatu SP Brazil, to evaluate the development of lettuce crops irrigated with magnetically treated water and with conventional water at different replacement levels based on the culture's evapotranspiration (ET_c). Rural Sylocimol equipment, produced by Timol, was employed for the magnetic treatment of water. A randomized block design, with 4 evaluations throughout the cycle, with two cycles, was used. For entrance, the *fuzzy* systems comprised the irrigation water depths, type of water and time throughout the cycle, whereas biometric and nutritional evaluations were used as exits. Results showed that magnetically treated water provided a significant increase in lettuce crops, whilst decrease in irrigation water volume also occurred. Further, *fuzzy* models registered a decrease in mean square error

rate and increase in the model's preciseness and co-relationship. The model proved to be more exact, with more precise results, when compared to regression analysis.

Keywords: Mamdani; food; irrigation efficiency; productivity; *fuzzy* rules; polynomial regression.

INTRODUÇÃO

Com uma expectativa populacional mundial em torno de 9,6 bilhões de pessoas (ONU, 2013), o aumento na produção alimentar que deveria ocorrer concomitantemente a ela, tem gerado preocupações. Segundo a FAO (2014) um aumento de 70% seria necessário na produção agrícola em relação aos níveis atuais, porém uma discussão recorrente é sobre o uso da terra. Para atingir tais índices, o uso do solo deve ser intensificado gerando consequências como a degradação e a desertificação.

O Brasil apresenta ainda vastos territórios a serem explorados para o aumento da produção de alimento, atualmente, a área irrigada é de apenas 6,1 milhões de hectares (ANA, 2013). Esse aumento de área irrigada ocorre devido entre outros às mudanças dos regimes pluviométricos regionais, assim produtores implementam sistemas de irrigação. Se o aumento não for coordenado e legalizado pode-se agravar ainda mais a crise que o Brasil está sofrendo atualmente.

Especialistas alegam que o uso sustentável da terra e da água em um futuro breve pode sofrer degradações e se tornar inviáveis para a agricultura, já que 70% do consumo mundial da água acontece na agricultura. Além desses fatos, recentemente com as mudanças climáticas ocorridas, autores de diversos países vem estudando o impacto negativos que pode ocorrer ou ocorreu na agricultura, por exemplo como os estudos de Casa e Ovando, (2014), El-Fadel et al., (2012), Pouget et al., (2012), Taylor et al., (2012), Grafton et al., (2012), Howells et al., (2013), Sacks et al., (2009), Gans (2012) e Trnka et al., (2011).

A irrigação vem suprir a necessidade hídrica das plantas e caso isso não seja possível a planta em um processo de déficit hídrico, o conteúdo de água de um tecido ou célula fica abaixo do teor de água mais alto exibido no estado de maior hidratação (JENSEN, 1981; TAIZ; ZEIGER, 2009). O crescimento da parte aérea da planta desenvolve até o momento que o fator água se torna limitante, quando isso ocorre o desenvolvimento será menor, consequente folhas menores e quantidade inferiores, neste caso ocasionando a redução da taxa de fotossíntese, que leva então a redução da produção de energia e glicose (GRIFFITHS; PARRY, 2002; TAIZ; ZEIGER, 2009; TEJEDA et al., 2014).

Porém, sabe-se que diversos fatores podem inibir o crescimento, tais como pH do solo, teor de umidade no solo, adubação, temperatura e entre outros (DAVIES et al., 2000; HIMELICK, 2004; NARISAWA et al., 2005; WANG et al., 2012; WANG et al., 2011; WATSON; SHEN et al., 2011). O crescimento da planta pode ser mensurado por meio da fitomassa verde aérea, o qual flutua em resposta às alterações do status hídrico do solo, deste modo sendo um indiciador de como está ocorrendo o crescimento da planta (TAIZ; ZAEIGER, 2009), assim o déficit hídrico é um dos fatores intrínseco no desenvolvimento.

Outro fato que pode agravar o crescimento é a umidade do ar pode levar a uma redução da atividade dos estômatos e dificultar o desenvolvimento das plantas (FANOURLAKIS et al., 2013). Rosensvald et al. (2014) verificaram que o aumento do aquecimento global pode abaixar o nível de umidade relativa do ar, assim prejudicando a taxa de fotossíntese. A temperatura exerce papel fundamental no crescimento vegetativo, em que pode afetar a taxa fotossintética, pois acarreta na diminuição da produção de energia e assim estabiliza o crescimento. A exposição em curtos espaços de tempo a estresses térmico subletais (dentro das faixas letais) pode levar a termotolerância induzida, em que pode levar a senescência ou mesmo a um retardamento no crescimento (JAISWAL et al., 2014; LAZA et al., 2015; MATHIEU et al., 2014; TAIZ; ZAIGER, 2009).

Para a absorção de nutrientes pelas plantas do solo é fundamental que o sistema apresente certa proporção de água para que ocorra a transferência de elementos químicos, nutrientes e entre outras substâncias pelas raízes (RAIJ, 2011).

Tais elementos, necessários para que a planta complete seu ciclo de vida são denominados essenciais, os quais se destacam: boro, cobre, ferro, manganês, zinco, enxofre, magnésio, cálcio, potássio, fósforo e nitrogênio e suas absorções são afetadas diretamente pelas condições do solo (RAIJ, 2011; FERNANDES, 2006).

Os fatos anteriormente mencionados (desenvolvimento, crescimento e absorção de nutrientes), são condições que devem ser elucidadas nos estudos das ciências agrárias em especial da experimentação agrícola, pois interferem nos resultados da produtividade, assim como a qualidade final do produto, em que os produtores podem alavancar as receitas.

Diante da crise hídrica vivenciada nos últimos anos pelos produtores, buscam técnicas que possam reduzir o tempo do ciclo da cultura, tais como cultivares com maior resistência ao déficit hídrico e melhora a absorção de nutrientes pelas plantas com o aumento de produtividade. Frente às necessidades apresentadas, pesquisas vêm apresentando resultados satisfatórios é a aplicação do tratamento magnético da água utilizada para a irrigação, que apontam o aumento significativo na produtividade e qualidade dos alimentos. Podem-se destacar os trabalhos com milho (AODA; FATTAH, 2011), feijão (SAYED, 2014), pinhão manso (LOPES et al., 2007) e tomate (MOHMED, 2013; SELIM; EL-NADY, 2011), as quais apresentaram aumento significativo na produção.

Tal fato do aumento da produtividade pode ser oriundo do processo de indução do campo magnético na água, o qual sabe que ocorre alterações, tais como o valor da adsorção de água em superfícies (OZEKI et al., 1996) e tensão superficial (JOSHI et al., 1966).

A absorção de nutrientes pelas plantas é influenciada diretamente pela tensão no solo, interferindo no desenvolvimento das plantas pelos baixos valores absorvidos de nutrientes. Deste modo, existem tecnologias que favorecem o aumento da umidade do solo ou a redução no volume de água aplicada e a manutenção da umidade ideal para o processo de absorção. Com isso, pesquisas que utilizam o tratamento magnético da água comprovam o efeito do aumento da umidade do solo e a redução no volume aplicado (MOSTAFAZADEH-FARD et al., 2011; KHOSHRAVESH et al., 2011).

Os solos irrigados com água tratada magneticamente proporcionaram o aumento dos teores de nutrientes nas plantas, que consequentemente acarretaram no aumento significativo tanto da produção quanto da qualidade dos alimentos em diversas cultivares, conforme constato por Hozayn et al. (2014).

No presente trabalho, buscou-se verificar os efeitos da água tratada magneticamente na cultura da alface analisando seu desenvolvimento, crescimento, teores absorvidos de macro e micro nutrientes e produtividade por meio da modelagem *fuzzy*.

Assim, objetivou-se verificar o efeito quanto à resistência ao déficit hídrico, ao tempo do ciclo, aos aspectos nutricionais e à produção.

A cultura da alface é umas das hortaliças mais consumidas no Brasil, destaca-se sua importância econômica e social, pois é cultivada por pequenos e médios produtores. Seu consumo vem aumentando devido a sua ampla utilização em lanchonetes *fast-food* (HIRATA et al., 2014; SALA; COSTA, 2008) e por apresentar baixo valor calórico sendo fonte de vitaminas e sais minerais (FIGUEIREDO et al., 2012; OSHE et al., 2001).

Os teores de nutrientes na alface variam de acordo com as condições em que ocorre o cultivo, tais como o pH, umidade do solo, temperatura, índice pluviométrico, teor de matéria orgânica, fertilidade do solo, entre outros que determinam a absorção (JONES, 2012; FAGERIA et al., 2011; FAGERIA, 1974).

Entretanto, por apresentar seu ciclo curto (aproximadamente 35 dias), é exigente nutricionalmente principalmente o nitrogênio (PINK; KEANE, 1993). Deste modo, a cultura demanda cuidados especiais em seu cultivo, principalmente por questões ambientais, como chuva, frio, geadas, granizo, ventos, e também características de seu manejo, como irrigação e adubação.

As análises estatísticas para comprovações de experimentações, tal como naturalmente seria a proposta para a análise dos aspectos supracitados, vêm sendo aperfeiçoadas com a utilização de metodologias computacionais capazes de predizer com maior precisão valores estimados.

Tais análises foram elaboradas em dissertação de mestrado (PUTTI, 2014) mostrando resultados favoráveis à utilização da água tratada magneticamente ao atendimento de economia hídrico, redução de ciclo e aumento de produtividade. Para a análise de variáveis contínuas, é recomendada adicionalmente uma análise por meio de regressão, possibilitando observar o comportamento dentro da amplitude verificada no experimento. De forma genérica, o comportamento da variável dependente (y) em relação à variável independente (x) apresenta-se de diversas maneiras: linear (1º grau), quadrático (2º grau), cúbico (3º grau), quártico (4º grau), exponencial, logarítmico, etc. Pode ainda ocorrer o caso de existir mais de uma variável independente (x_i), $i = 1, 2, \dots$, que interfere diretamente na variável dependente e, neste caso, são consideradas as regressões lineares múltiplas e polinomiais múltiplas (LATTIN, 2008; PINHEIRO, 2008; PAGANO; GAUVREAU, 2008).

Entretanto, muitas vezes a imprecisão do modelo faz com que a resposta não reproduza de fato o que foi verificado. Buckley (2006) verificou que tal imprecisão poderia ser reduzida frente à aplicação da lógica *fuzzy*, em que as respostas seriam mais precisas.

Para modelos que exigem alta complexidade (muitas variáveis dependentes), há necessidade de especialistas que compreendam completamente o experimento do fenômeno, devendo ser capaz de determinar as diversas influências do ambiente e dos fatores controlados da resposta do experimento. A modelagem baseada em regras *fuzzy* visa contribuir na apresentação de generalizações de resultados, bem como a modelagem entre os intervalos pontuais analisados (BLANCO-FERNÁNDEZ et al., 2014; ROSS, 2010; COPPI et al., 2006).

Além disto, em geral, quanto maior a complexidade de um fenômeno, menor a precisão do modelo que o descreve. Ross (2010) infere que, quanto mais imprecisas ou inexatas forem as informações que temos para caracterizar o modelo *fuzzy*, maior será o grau de precisão será da saída.

Atualmente, devido à imprecisão, situações nebulosas em diversas áreas vêm sendo explicadas por meio de aplicações da lógica *fuzzy*, a qual apresenta vertentes em aplicações, como por exemplo os sistemas especialistas, que buscam a extração de um conhecimento específico e tradução em um algoritmo computacional. Também ocorre aplicação para a automação de processos, denominados como controladores *fuzzy* e também a modelagem *fuzzy*, que busca explicar determinados casos com um sistema baseado em regras *fuzzy*.

O presente trabalho visa desenvolver uma modelagem *fuzzy* para verificar o ajuste de curvas por meio da modelagem *fuzzy*, objetivando uma precisão melhor que a tradicional análise de regressão comumente utilizada na agronomia e irrigação.

Dentre os modelos matemáticos, vêm-se destacando a **modelagem matemática fuzzy**, que consegue prever com maior exatidão os fenômenos imprecisos. Giusti e Marsili-Libelli (2015) elaboraram um sistema de apoio baseado em lógica *fuzzy* para irrigação e conservação de água na agricultura. Na determinação da avaliação do desempenho de sistema de irrigação (CHUNG; KIM, 2014; HERRERA et al., 2013; RAJU; KUMAR, 2013; TOUATI et al., 2013). E a modelagem sendo aplicada na predição do rendimento da batata (KHOSHNEVISAN et al., 2014), na vitalidade de orquídeas (PUTTI et al., 2014) e na produção de clorofila no Brasil (PEREIRA et al., 2009). Assim, a

modelagem *fuzzy*, permite compreender e analisar situações que a modelagem matemática e estatística limita-se em modelar devido a fatores exógenos que inferem nas repostas do modelo, assim os modelos *fuzzy* permite observar com maior precisão.

Também se destacam as aplicações dos controladores *fuzzy*, que buscam automatizar processos, como o controle de fluxo de água em tubulações (SORESHJANI et al., 2014), aumento da precisão de sensores (KRAMER; KANDEL, 2012) e no controle de pulverização agrícola (REN, 2010; PREMA et al., 2012).

Os sistemas especialistas que buscam a conversão do conhecimento em algoritmo apresentam diversas aplicações, como na seleção de genótipos de trigo (ISLAM, et al., 2012), na detecção de doenças de plantas (PATIL; KUMAR, 2011) e no manejo da lavoura da cultura de algodão (LEMMON, 1990).

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia e um conjunto de modelos *fuzzy* visando estimar os valores de diversas variáveis biométricas e nutricionais da cultura da alface em tipos de água e em todos os valores intermediários entre as taxas mínima e máxima dos níveis de reposição hídrica adotadas e dias após o transplântio. Os objetivos específicos do presente trabalho concernem na obtenção de modelos *fuzzy* visando estimar valores das variáveis biométricas da cultura da alface irrigada com água tratada magneticamente e com água convencional em:

- todos os valores intermediários entre as taxas mínima e máxima dos níveis de reposição hídrica adotadas e dos dias após transplântio.
- todos os valores intermediários entre as taxas mínima e máxima dos níveis de reposição hídrica adotadas para cada taxa de reposição hídrica.
- todos os valores intermediários entre as taxas mínima e máxima dos níveis de reposição hídrica adotadas para a data de colheita; estimando também as variáveis nutricionais.

Para atingir estes objetivos propostos, o presente trabalho foi dividido em quatro capítulos, sendo o primeiro intitulado “MODELAGEM FUZZY DO DESENVOLVIMENTO DA ALFACE IRRIGADA COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE”, o segundo intitulado “MODELAGEM FUZZY DO CRESCIMENTO DA ALFACE IRRIGADA COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE”, o terceiro intitulado “MODELAGEM FUZZY DA PRODUTIVIDADE DA ALFACE IRRIGADA COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE” e o quarto intitulado “MODELAGEM FUZZY DA AVALIAÇÃO

NUTRICIONAL DA ALFACE IRRIGADA COM ÁGUA TRATADA
MAGNETICAMENTE”.

Capítulo I “MODELAGEM FUZZY DO DESENVOLVIMENTO EM DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO DA ALFACE IRRIGADA COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE”

Resumo

Diante da crise hídrica que o mundo vem vivenciando, buscam-se métodos que otimizem a utilização da água, principalmente voltados para a agricultura que é a maior responsável pelo consumo na atualidade. A água tratada magneticamente destinada à irrigação, provoca benefícios para agricultura, tais como aumento de produtividade e qualidade, assim se faz necessário verificar para a cultura da alface. Assim, o presente trabalho objetivou avaliar os efeitos da água tratada magneticamente na cultura da alface ao longo ciclo em diferentes taxas de reposição e determinar os valores intermediários por meio de modelos *fuzzy*, também buscou verificar o a intensidade de associação dos modelos. O experimento foi conduzido em blocos casualizados, em esquema fatorial 4×5 , sendo cinco lâminas de reposição e quatro avaliações após transplante. Para a avaliação do desenvolvimento, foi utilizada a modelagem matemática *fuzzy* e também por meio de regressões polinomiais múltiplas, em que os resultados foram comparados com os dados coletados em campo. Assim, foi possível verificar que ocorreu o maior desenvolvimento para os tratamentos irrigados com água tratada magneticamente, apresentando maior fitomassa verde aérea e número de folhas ao longo do ciclo. E o modelo *fuzzy* apresentou ajuste mais preciso quando comparado com os resultados obtidos pelo modelo estatístico.

Palavras-chave: crescimento, estresse hídrico, nebuloso, incerto, precisão, curva.

Abstract

In the wake of the worldwide water supply crisis, several methods are being used to optimize the use of water, mainly in agriculture, which is the main consuming factor. Magnetically treated water for agriculture is beneficent due to an increase in quality and productivity. Current assay evaluates the effects of magnetically treated water in lettuce cultivations throughout its cycle and determines the intermediate rates by fuzzy models submitted at different reposition rates and assessed throughout the cycles. The assay was conducted in randomized blocks with a 4 x 5 factor scheme, with 5 reposition laminas and 4 dates after transplant. Development was evaluated by fuzzy mathematical modeling and by multiple polynomial regressions. Results were compared with data collected on the field. The highest development occurred for treatments irrigated with magnetically treated water, featuring a greater green aerial phytomass and number of leaves throughout the cycle. The fuzzy model provided a more exact adjustment when compared with results from statistical models.

Keywords: Growth, water stress, foggy, uncertain, precision, curves

Introdução

A cultura da alface é umas das hortaliças mais consumidas no Brasil; é destacada sua importância econômica e social, pois é cultivada por pequenos e médios produtores. Seu consumo vem aumentando pela sua ampla utilização em lanchonetes *fast-food* (HIRATA et al., 2014; SALA; COSTA, 2008) e por apresentar baixo valor calórico além de ser fonte de vitaminas e sais minerais (FIGUEIREDO et al., 2012; OSHE et al., 2001).

Entretanto, por apresentar ciclo curto (aproximadamente 35 dias) é exigente nutricionalmente (PINK; KEANE, 1993). Deste modo, a cultura demanda cuidados especiais em seu cultivo, principalmente por questões ambientais, como chuva, frio, geadas, granizo, ventos, e também características de seu manejo, como irrigação e adubação.

A preocupação da crise hídrica vem desenvolvendo vertentes de pesquisas que buscam analisar as consequências na agricultura e para a população. Mehta (2014) inferiu que o desenvolvimento histórico da humanidade está ligado diretamente à

água, em que os grandes centros tecnológicos e econômicos ficam em regiões com abundância de água.

Essa discussão deve-se atentar não apenas para a falta de água que vem causando certa preocupação, mas pela qualidade da água que pode interferir na segurança alimentar e causar grandes catástrofes alimentares (ALLOUCHE, 2011; HANJRA; QURESHI, 2010; VÖRÖSMARTY et al., 2010).

Assim, técnicas para a otimização da eficiência da irrigação vêm sendo pesquisadas para reduzir o desperdício (LEVIDOW et al., 2014; SNYDER et al., 2015). Em regiões de maior escassez de água, técnicas como a reutilização de efluentes já estão sendo utilizadas e vem proporcionando resultados satisfatórios (NORTON et al., 2013). A utilização abusiva de águas subterrâneas na irrigação e a falta de chuvas para a recarga estão causando graves problemas em regiões industrializadas (PFEIFFER; LIN, 2014).

A irrigação apresenta alto consumo de energia elétrica na pressurização do sistema, Qing-tao et al. (2013) observaram na China a possibilidade de redução de 20% no total consumido na irrigação, caso fosse realizada a irrigação com maior eficiência. Também se deve ressaltar a importância de estudos para verificar as consequências que podem surgir a partir do uso abusivo dos recursos hídricos (BLANCO FERNÁNDEZ et al., 2014). Observa-se, em regiões altamente tecnológicas, a implementação da irrigação de precisão, que apresenta alta eficiência e desperdício extremamente baixo (DACCACHE et al., 2015).

A irrigação vem suprir a necessidade hídrica das plantas, caso isso não seja possível a planta em um processo de déficit hídrico, em que seu conteúdo de água de um tecido ou célula, fica abaixo do teor de água mais alto exibido no estado de maior hidratação (TAIZ; ZEIGER, 2009; JENSEN, 1981). O crescimento da parte aérea da planta desenvolve até o momento que o fator água se torna limitante, quando isso ocorre o desenvolvimento será menor, conseqüentemente folhas menores e quantidade inferiores, neste caso ocasionam a redução da taxa de fotossíntese, que leva então à redução da produção de energia e glicose (GRIFFITHS; PARRY, 2002; TAIZ; ZEIGER, 2009; TEJEDA et al., 2014).

Para verificar os reais efeitos em cultivares, são utilizadas técnicas que sejam capazes de predizer com menor erro o efeito provocado pelos fatores testados experimentalmente. Deste modo, a análise de regressão polinomial múltipla é uma técnica

difundida e recorrentemente aplicada nas ciências agrárias. Entretanto, as respostas das equações oriundas das análises estatísticas apresentam um erro embutido (HOSHMAND, 1997; NELSEN, 2002). Assim, necessita-se de modelos matemáticos que diminuam este erro e aumente a precisão dos resultados.

Recentemente, as pesquisas que vêm apresentando resultados satisfatórios são aquelas que se utilizam água tratada magneticamente na irrigação. Diversas pesquisas apontam o aumento significativo na produtividade, como também a questão qualitativa. Podem-se destacar pesquisas que envolvem as culturas do aipo, vagem e ervilha (MAHESHWARI; GREWAL, 2009), trigo (HOZAYN; QADOS, 2010), pinhão manso (LOPES et al., 2007), milho (AODA; FATTAH, 2011), tabaco (ALADJADJIYAN; YLIEVA, 2003), pepino (PÉREZ et al., 2011), ervilha (SAYED 2014), tomate (SELIM; EL-NADY, 2011), trigo (KORDAS, 2002), lentilha e ervilha (MARTINÉZ et al., 2009), pimenta (RAWBDEH et al., 2014) e tomate (SOUZA et al. 2005; SELIM; EL-NADY, 2011).

Dentro da irrigação, ocorre uma forte ligação nas pesquisas com a aérea da matemática, pela complexidade na otimização dos sistemas. Porém, modelos matemáticos são aplicados na determinação da vazão de canais (RIVAS - PEREZ et al., 2014), na interação da água subterrânea com a agricultura intensiva (TIAN et al., 2015) e a determinação da irrigação por pulso (ANDRIYAS; MCKEE, 2013).

Nos últimos anos, por imprecisão, situações nebulosas em diversas áreas vêm sendo explicadas por meio de aplicações da lógica *fuzzy*, a qual apresenta vertentes em aplicações como, por exemplo, os sistemas especialistas que buscam extração de um conhecimento específico e traduzem em um algoritmo computacional. Também ocorre a aplicação para a automação de processos, denominados como controladores *fuzzy*. E a modelagem *fuzzy* busca explicar determinados casos por meio de um sistema baseado em regras *fuzzy*.

O presente trabalho visa desenvolver uma modelagem *fuzzy* para verificar o ajuste de curvas por meio da modelagem *fuzzy*, objetivando uma precisão melhor que a tradicional análise de regressão comumente utilizada na agronomia.

Dentro dos modelos matemáticos vêm se destacando a modelagem matemática *fuzzy*, consegue prever com maior exatidão os fenômenos imprecisos. Giusti e Marsili-Libelli (2015) elaboraram um sistema de apoio baseado em lógica *fuzzy* para irrigação e conservação de água na agricultura. A modelagem *fuzzy* aplicada para a avaliação de desempenho de sistema de irrigação, em que verificou uma melhor resposta, quando

comparado com os modelos utilizados (CHUNG; KIM, 2014; HERRERA et al., 2013; RAJU; KUMAR, 2013; TOUATI et al., 2013). Outras aplicações na área de ciências agrárias, como na predição do rendimento da batata (KHOSHNEVISAN et al., 2014), vitalidade de orquídeas (PUTTI et al., 2014) e produção de clorofila no Brasil (PEREIRA et al., 2009).

Também se destacam as aplicações dos controladores *fuzzy*, que buscam automatizar processos, como o controle de fluxo de água em tubulações (SORESHJANI et al., 2014), aumento da precisão de sensores (KRAMER; KANDEL, 2012) e no controle de pulverização agrícola (REN, 2010; PREMA et al., 2012).

Os sistemas especialistas que buscam a conversão do conhecimento em algoritmo apresentam diversas aplicações, como na seleção de genótipos de trigo (ISLAM, et al., 2012), na detecção de doenças de plantas (PATIL; KUMAR, 2011) e no manejo da lavoura da cultura de algodão (LEMMON, 1990).

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma modelagem *fuzzy*, visando estimar os valores das variáveis biométricas da cultura da alface em todos os valores intermediários entre as taxas mínima e máxima dos níveis de reposição hídrica adotadas e dias após o transplante. Também foi desenvolvida uma metodologia específica de modelagem do experimento realizado para a elaboração do sistema *fuzzy* proposto.

Material e métodos

Para a elaboração do presente trabalho, estruturou-se o desenvolvimento de acordo com a Figura 1, em que primeiramente determinaram os objetivos da pesquisa, assim foi possível proceder o planejamento experimental e após a sua execução. A partir do levantamento dos dados realizaram-se as análises preliminares, deste modo foi possível desenvolver o modelo baseado em regras *fuzzy* e os modelos de regressão polinomial, após tais procedimentos realizaram as comparações com os dados coletados a campo.

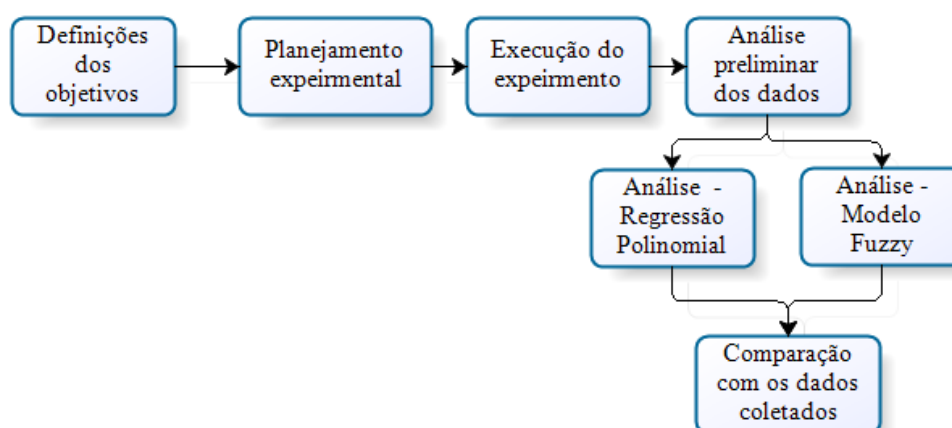


Figura 1. Fluxograma do desenvolvimento metodológico do presente trabalho.

Descrição do experimento

O experimento foi conduzido no Departamento de Engenharia Rural da Unesp, Faculdade Ciências Agrônomicas, Fazenda Experimental, localizada no município de Botucatu, São Paulo, o período de janeiro a abril de 2012. De acordo com a classificação de Köppen (KÖPPEN; GEIGER, 1928), a região apresenta clima do tipo Cfa (clima subtropical úmido).

O solo da casa de vegetação no qual foi conduzido o experimento é classificado de acordo com Embrapa (2006) como Nitossolo Vermelho Distrófico Latossólico, apresentando moderada estrutura média/argilosa e características físicas e químicas, são apresentadas nas Tabelas 1 a 3.

Tabela 1. Resultado da análise química de macronutrientes do solo de 0 a 20 cm.

Análise química de macronutrientes									
pH	M.O.	P _{resina}	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol dm ⁻³						
5,9	24	191	17	4,8	68	25	97	114	85

Tabela 2. Resultado da análise química de micronutrientes do solo de 0 a 20 cm.

Análise química de micronutrientes			
Boro	Cobre	Ferro	Zinco
----- mg dm ⁻³ -----			
0,51	4,8	14	8,0

Tabela 3. Análise granulométrica e da densidade do solo.

Areia	Silte	Argila	Densidade
Porcentagem			g cm ⁻¹
37%	51%	12%	1,21

Na casa de vegetação onde foi conduzido o experimento, havia instalado uma estação meteorológica automática, onde foram coletados os dados diários de temperatura e umidade do ar. Já na determinação da evaporação foi instalado o tanque classe A, no interior do ambiente protegido, os parâmetros medidos ao longo do experimento podem ser visualizados na Figura 2.

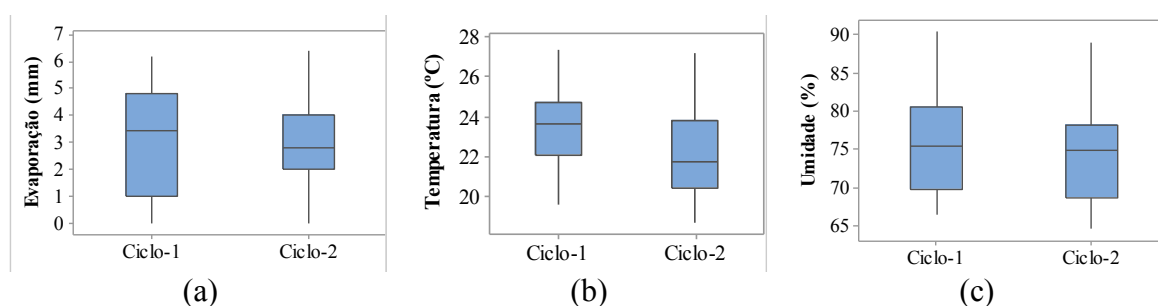


Figura 2. Box plot da evaporação (mm), temperatura (°C) e umidade (%) durante a realização do 1º ciclo e 2º ciclo.

Conduziram-se dois ciclos da cultura da alface crespa variedade Verônica, que buscou verificar se o comportamento da cultura foi similar, no qual foram realizadas quatro avaliações ao longo do ciclo, sendo elas 14, 21, 28 e 35 dias após o transplântio (DAT), a fim de verificar o desenvolvimento da cultura.

Pode-se verificar que o 1º ciclo ocorreu a temperatura, umidade e evaporação maior quando comparado com o 2º ciclo, tal fato ocorreu pois houve uma maior precipitação durante a condução do 2º Ciclo.

Adotou-se o delineamento em blocos casualizados, e os fatores foram as lâminas de irrigação (25, 50, 75, 100, 125% da evapotranspiração da cultura (ETc)) e as avaliações ao longo do ciclo (14, 21, 28 e 35 dias após o transplântio (DAT)). Foi analisado o efeito de duas fontes de água, sendo a água tratada magneticamente e água convencional (sem tratamento). Para o tratamento magnético utilizou-se o equipamento da Sylocymol, que apresenta capacidade de magnetizar 5 m³ a cada 30 min. Para a realização do tratamento magnético da água foi inserido o equipamento dentro do reservatório, que

apresentava capacidade de 500 L, assim em contato com a água ocorria o processo de magnetização.

O cultivo da alface ocorreu em dez canteiros, que apresentava comprimento de 1,2 m e largura de 1 m, perfazendo uma área total de 3,6 m². O espaçamento adotado foi de 0,25 entre linha e de 0,25 entre planta, totalizando 40 plantas em que se desconsiderou a bordadura.

O sistema de irrigação implementado foi localizado por gotejamento, em que havia dois sistemas independentes um para cada tipo de água, a fim de não ocorrer a mistura do tipo de água.

A determinação da evapotranspiração da cultura foi estimada por meio do método do tanque classe A, do coeficiente da cultura (K_c) e do coeficiente do tanque (K_p), que desconsiderou a velocidade do vento. Pode-se observar na Figura 3 a determinação do tempo de irrigação de cada parcela.

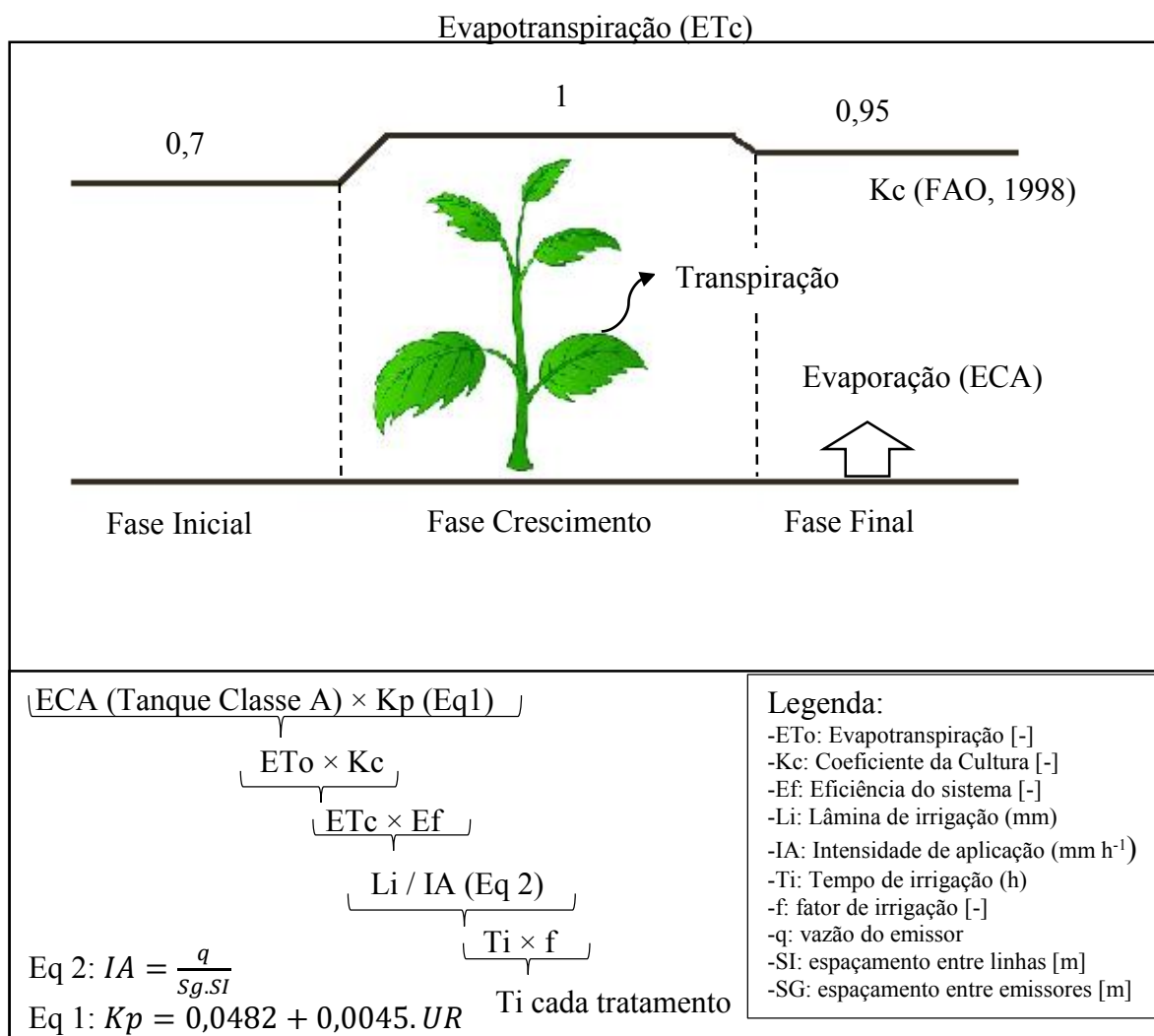


Figura 3. Método de determinação da evapotranspiração e o manejo adotado para o cálculo da lâmina de irrigação e tempo de irrigação.

Nas avaliações realizadas ao longo dos ciclos analisaram-se os seguintes parâmetros biométricos:

Números de folhas

Após a colheita, foram separadas com auxílio de um estilete todas as folhas de cada planta de todos os tratamentos e realizou-se a contagem do número de folhas por planta.

Fitomassa verde aérea

Após a colheita, separou-se a parte aérea das raízes, e com auxílio de uma balança digital graduada em 0,001 g, realizou-se a pesagem total desta parte aérea.

Fitomassa seca aérea

Após a pesagem da matéria fresca, as amostras foram mantidas em estufa com a temperatura a 65°C com circulação de ar forçada por 72 horas, e após este processo realizou a pesagem.

Fitomassa verde da raiz

Após a lavagem e medição do sistema radicular, com o auxílio de uma balança de precisão foi pesado e embalado todas as amostras.

Fitomassa seca da raiz

Após a lavagem e a medição do comprimento, as amostras foram mantidas em estufa com temperatura de 65°C, durante 72 horas.

Análise preliminar dos dados

Analisou-se, previamente em todos os conjuntos de dados considerados no estudo, o teste de normalidade dos dados que foi realizado por meio do teste de *Anderson-Darling* e verificou-se a homocedasticidade a fim de analisar a variância constante dos erros dos dados com o teste da equação da variância (ou teste de Bartlett) (PAGANO; GAUVREAU, 2012). Para os conjuntos de dados que não apresentaram distribuição normal e/ou com diferenças de variância constatada, foi realizada a transformação dos dados, por meio do teste de *Box-Cox* (BOX; COX, 1964); a fim de normalizar os dados, utilizou-se a equação:

$$y_i = \frac{x_i^\lambda - 1}{\lambda}, \lambda \neq 0 \quad (1)$$

em que, x_1, \dots, x_n são os dados originais e y_i são os dados aproximados à distribuição normal e λ é o parâmetro de transformação dos dados.

Análise de regressão polinomial múltipla

O modelo de regressão polinomial múltipla concerne na explicação da importância de cada variável ao modelo, em que se relatam as associações entre variáveis (RIBEIRO; FREITAS, 2012; LATTIN, et al. 2011). Tal técnica é comumente utilizada na avaliação de experimentos na área de ciências agrárias; deste modo foi adotada para obter um modelo proposto que pudesse ser comparado com os modelos *fuzzy* e verificar a intensidade de associação de cada um deles com os dados coletados a campo.

Deste modo, desenvolveu-se um modelo de previsão utilizando dados conhecidos de variáveis independentes ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$) e estimar o valor da variável dependente (y) (HAIR et al., 2006; ZAVALA, 2007), em que o modelo geral pode ser dado pela equação (2):

$$y = \beta_0 + ax_1 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3 \quad (2)$$

em que β_0 é o coeficiente linear, x_1 é o tipo de tratamento de água ($x_1 = 0$, para tratamento convencional e $x_1 = 1$, para tratamento magnético), x_2 % da lâmina de irrigação adotado, $x_2 \in [25; 125\%]$ da ETc.

Neste estudo, serão determinadas para as variáveis de respostas biométricas em função das variáveis independentes (x_1 sendo tipo de água e x_2 lâminas de irrigação). Assim, após obter a equação de ajuste se faz necessário analisar a intensidade do ajuste, em que se calculou o coeficiente de determinação R^2 .

Para determinar a significância das equações de regressões, foi realizado o teste F (estatística F), que verifica se a equação apresenta certo grau de confiança e se a relação estabelecida entre a variável dependente (x) e as variáveis independentes são

relevantes. Deste modo, é possível determinar o *p valor* de cada equação, a fim de verificar a significância do modelo (LATTIN, 2011; PAGANO; GAUVREAU, 2008).

Método de elaboração do sistema *fuzzy*

A modelagem matemática *fuzzy*, proposta neste capítulo, buscou explicar características da produção agronômica da cultura da alface em função do manejo de irrigação na utilização do tratamento magnético na água nos intervalos intermediários aos dos níveis dos fatores do experimento agronômicos realizado, a saber $[25k\%, 25(k + 1)\%]$, $1 \leq k \leq 4$. Nos níveis $25k\%$, $1 \leq k \leq 4$, foram também realizadas avaliações ao longo do ciclo (14, 21, 28 e 35 dias após o transplântio), em que foi realizada a modelagem de forma análoga para cada ciclo. Deve-se ressaltar que foi desconsiderada a variável Comprimento de Raiz (CR), pois não apresentou diferença significativa, deste modo consideram-se as demais, a saber: número de folha (NF), fitomassa verde aérea (FVA), fitomassa seca aérea (FSA), fitomassa verde de raiz (FVR) e fitomassa seca de raiz, (FSR).

Considerando-se um modelo de características agronômicas, desta forma tem-se $f: X_1 \times X_2 \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^5$ onde X_1 é “Tipo de Água” e X_2 é “Lâmina de irrigação” com $y = f(\bar{x})$, em que \mathbb{R} é o conjunto dos números reais; em que $x = (x_1, x_2)$ é definido por $x_1 =$ lâmina de irrigação (% da ETc) $x_1 \in X_1 = \{25, 125\}$; e $x_2 =$ dias após o transplântio, com $x_2 \in X_2 = \{14, 35\}$; e $y = (y_1, \dots, y_5)$, é definido pelas médias dos valores das características biométricas, a saber $y_1 = \overline{NF}$, $y_2 = \overline{FVA}$, $y_3 = \overline{FSA}$, $y_4 = \overline{FVR}$ e $y_5 = \overline{FSR}$.

Este sistema baseado em regras *fuzzy* representa a função $F: [14,35] \times [25,125] \rightarrow \mathbb{R}^5$, $F(x, y) = (f_1(x, y), f_2(x, y), f_3(x, y), f_4(x, y), f_5(x, y))$, em que o produto cartesiano que representa o domínio das avaliações ao longo do ciclo (14 a 35 Dias Após o Transplântio) e das Lâminas de Irrigação (25 a 125% da ETc), no qual o contradomínio \mathbb{R}^5 representa as cinco variáveis de resposta avaliadas no experimento.

Os resultados serão apresentados em duas superfícies de respostas, um para cada tipo de água, e para cada ciclo a saber:

- Grupo 1 - gráficos das funções $F_1^0: [14,35] \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_1^0(0, y) = f_1(0, y)$, no qual o contradomínio de F_1^0 é relativo ao número de folhas; $F_1^1: [14,35] \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_1^1(0, y) = f_1(1, y)$, no qual o contradomínio de F_1^1 é relativo ao número de folhas;
- Grupo 2 - gráficos das funções $F_2^0: [14,35] \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_2^0(0, y) = f_2(0, y)$, no qual o contradomínio de F_2^0 é relativo à fitomassa verde aérea; $F_2^1: [14,35] \times$

- $[25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_2^1(0, y) = f_2(1, y)$, no qual o contradomínio de F_2^1 é relativo à fitomassa verde aérea;
- Grupo 3 - gráficos das funções $F_3^0: [14,35] \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_3^0(0, y) = f_3(0, y)$, no qual o contradomínio de F_3^0 é relativo à fitomassa seca aérea; $F_3^1: [14,35] \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_3^1(0, y) = f_3(1, y)$, no qual o contradomínio de F_3^1 é relativo à fitomassa seca aérea;
 - Grupo 4 - gráficos das funções $F_4^0: [14,35] \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_4^0(0, y) = f_4(0, y)$, no qual o contradomínio de F_4^0 é relativo à fitomassa verde de raiz; $F_4^1: [14,35] \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_4^1(0, y) = f_4(1, y)$, no qual o contradomínio de F_4^1 é relativos à fitomassa verde de raiz;
 - Grupo 5 - gráficos das funções $F_5^0: [14,35] \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_5^0(0, y) = f_5(0, y)$, no qual o contradomínio de F_5^0 é relativo à fitomassa seca de raiz; $F_5^1: [14,35] \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_5^1(0, y) = f_5(1, y)$, no qual o contradomínio de F_5^1 é relativo à fitomassa seca de raiz.

Conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada

Para a variável de entrada “Lâminas de Irrigação”, foram considerados cinco conjuntos *fuzzy* denotados por $L_i, i = 1, 2, 3, 4, 5$. Tal definição deve-se ao fato de, no experimento agrônômico realizado, existirem cinco lâminas de irrigação dimensionadas de acordo com os níveis da ETc, a saber $(25i)\%, i = 1, 2, 3, 4, 5$. Foram adotadas as funções de pertinência (trapezoidais) dos conjuntos L_i , pois de acordo com Yet (2009), por se tratar de um conjunto que apresenta uma variável contínua, o modelo trapezoidal adapta-se melhor na resposta do modelo. Com isto, tais funções foram definidas de modo que cada taxa (% da ETc) tenha grau de pertinência igual a 1 ao seu respectivo conjunto *fuzzy* ($u_{L_i}(25i\%) = 1$) e, além disto, $u_{L_i}(x) = 1, x_{i-1} \leq x \leq x_{i+1}$, com $x_{i+1} - x_{i-1} = k$, para um certo k , no qual $9k = 100\%$, uma vez que adotou-se neste trabalho funções de pertinência da Figura 5. Deste modo, para a determinação dos nove delimitadores dos conjuntos de pertinência e objetivando uma variação simétrica entre os delimitadores, utilizou-se a seguinte equação:

$$k = \frac{x_{max} - x_{min}}{2n - 1} \Rightarrow k = \frac{125\% - 25\%}{9} \Rightarrow k = 11,11\%, \quad (3)$$

em que x_{max} é o ponto máximo avaliado; x_{min} é o ponto mínimo avaliado e n é o número de conjuntos *fuzzy*.

Neste trabalho, adotou-se a denominação delimitadores das funções de pertinência às abcissas dos conjuntos *fuzzy* (Figura 4).

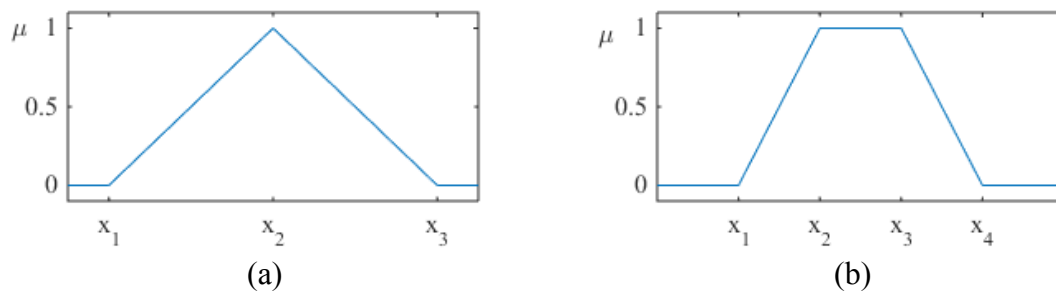
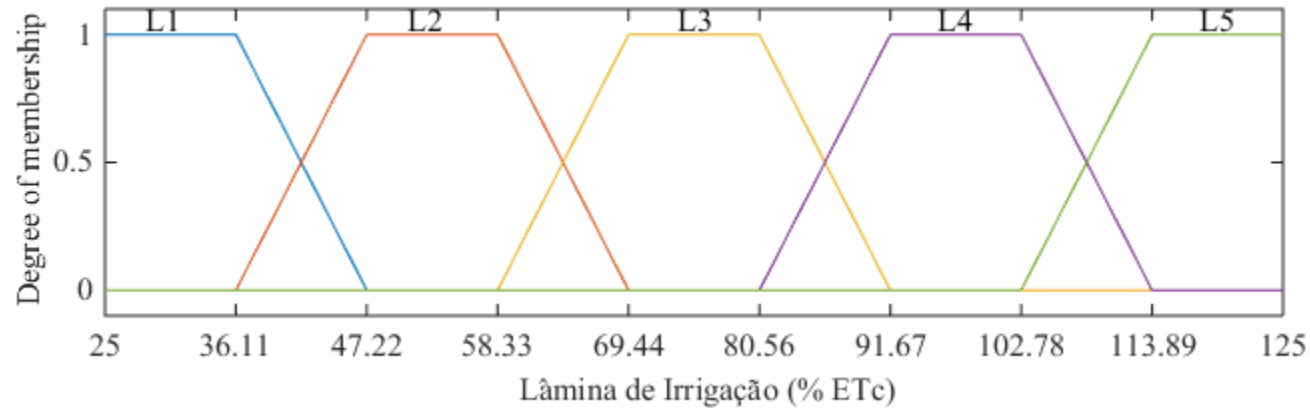


Figura 4. (a) delimitadores $x_i, i = 1, 2, 3$ de uma função de pertinência triangular e (b) delimitadores $x_i, i = 1, 2, 3, 4$ de uma função de pertinência trapezoidal.

Com estes dados, obteve-se para o dimensionamento de cada delimitador a variação de 11,11%, que foi representado de forma genérica por $25 + n.k$, $n = 0, 1, \dots, 9$. Em relação aos delimitadores inferior e superior, adotou-se a subtração de k no delimitador x_1 do primeiro conjunto *fuzzy*, e a adição de k no delimitador x_4 do último conjunto *fuzzy*. A partir da determinação dos cinco conjuntos *fuzzy* referente à lâmina de irrigação foi possível determinar que há a necessidade do cálculo de nove delimitadores, em que a variação foi de 11,11%; deste modo elaborou-se a Tabela 4 e Figura 5.

Tabela 4. Definições dos conjuntos *fuzzy* com suas respectivas funções de pertinência da variável de entrada “Lâminas de Irrigação”.

Conjunto <i>fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
“L1”	Trapezoidal	$[25 - (k); 25; 25 + (k); 25 + (2k)] = [13,89; 25; 36,11; 47,22]$
“L2”	Trapezoidal	$[25 + (k); 25 + (2k); 25 + (3k); 25 + (4k)] = [36,11; 47,22; 58,33; 69,44]$
“L3”	Trapezoidal	$[25 + (3k); 25 + (4k); 25 + (5k); 25 + (6k)] = [58,33; 69,44; 80,56; 91,67]$
“L4”	Trapezoidal	$[25 + (5k); 25 + (6k); 25 + (7k); 25 + (8k)] = [80,56; 91,67; 102,78; 113,89]$
“L5”	Trapezoidal	$[25 + (7k); 25 + (8k); 25 + (9k); 25 + (9k) - (8k)] = [102,78; 113,89; 125; 136,11]$

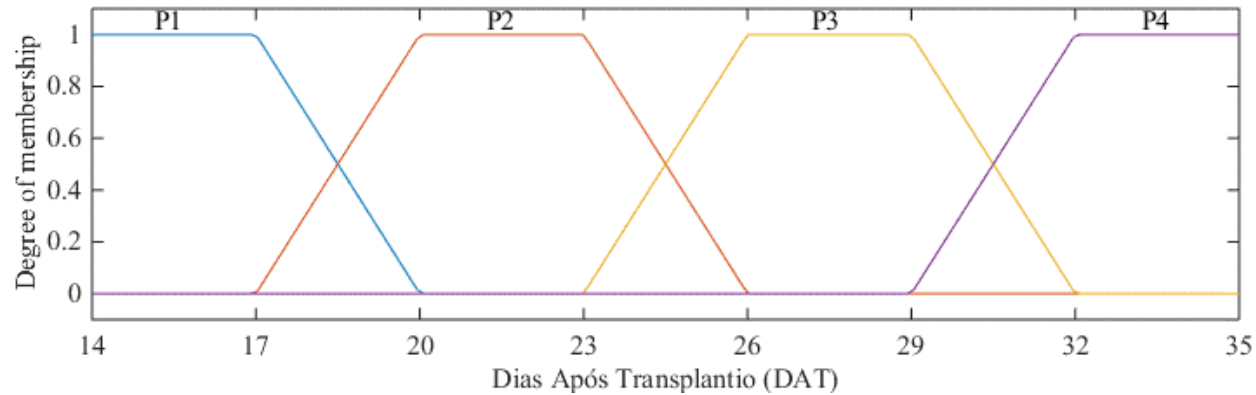
**Figura 5.** Funções de pertinência definidas para os conjuntos *fuzzy* da variável de entrada “Lâmina de Irrigação (% ETC)”.

Já para a determinação dos conjuntos *fuzzy*, da variável “Dias Após Transplântio”, a metodologia similar ao realizado para a “Lâmina de Irrigação”, em que adotou quatro conjuntos *fuzzy* sendo P_i , $i = 1,2,3,4$, referentes aos quatro períodos, pois no experimento agrônômico foram realizadas 4 avaliações ao longo do ciclo, dimensionados de acordo com o estágio vegetativo da cultura, à saber $14 + 7i$, $i = 0,1,2,3$. Implementaram as funções de pertinência do tipo trapezoidal dos conjuntos P_i . Deste modo, determinaram as funções para que cada período (*DAT*) tendo grau de pertinência igual a 1 para seus respectivos conjuntos *fuzzy*. Devido à necessidade para a determinação dos 7 delimitadores dos conjuntos de pertinência, afim de obter uma variação simétrica entre os delimitadores, utilizou-se a seguinte equação:

$$k = \frac{x_{max} - x_{min}}{2n - 1} \Rightarrow k = \frac{35 - 14}{7} \Rightarrow k = 3 \quad (4)$$

Tabela 5. Definições das funções de pertinência da variável de entrada “Dias Após Transplântio”.

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
“L1”	Trapezoidal	$[(14 - (k); 14; 14 + (k); 14 + (2k)) = [11; 14; 17; 20]$
“L2”	Trapezoidal	$[14 + (k); 14 + (2k); 14 + (3k); 14 + (4k)] = [17; 20; 23; 26]$
“L3”	Trapezoidal	$[4 + (3k); 14 + (4k); 14 + (5k); 14 + (6k)] = [23; 26; 29; 32]$
“L4”	Trapezoidal	$[14 + (5k); 14 + (6k); 14 + (7k); 14 + (7k) - (6k)] = (29; 32; 35; 38)$

**Figura 6.** Funções de pertinência definidas para os conjuntos *fuzzy* da variável de entrada “Dias Após Transplântio”.

Conjunto *fuzzy* das variáveis de saída

As variáveis de saída foram escolhidas elegendo-se as variáveis das análises biométricas, observadas que não apresentaram diferenças significativas ($p < 0,001$), de acordo com Putti (2013). A Figura 7 representa o modelo proposto em que se observam as entradas e as saídas.

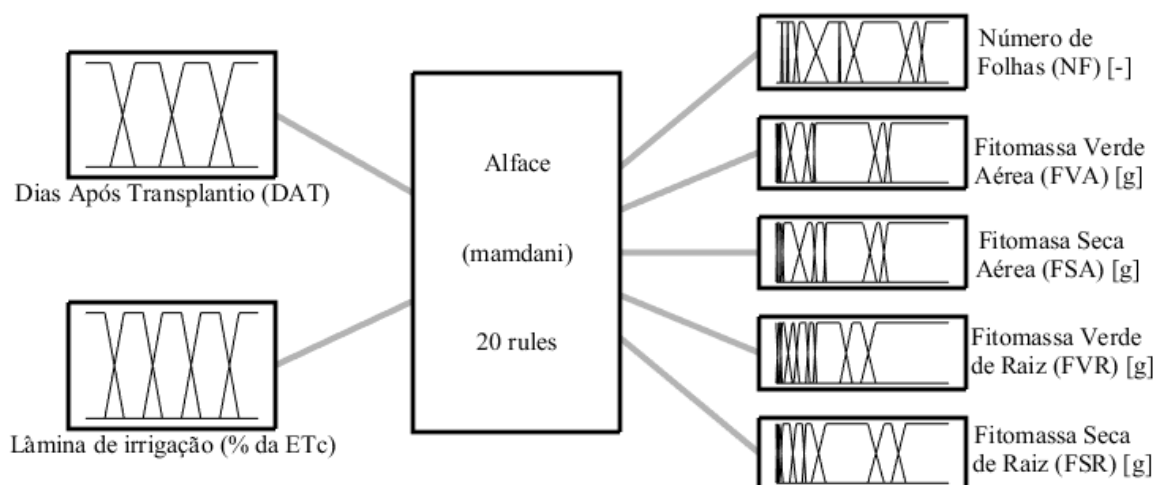


Figura 7. Sistema baseado em regras *fuzzy* para a avaliação da cultura da alface, em que apresentou como entrada a lâmina de irrigação e dias após transplântio e como variável de saída o número de folhas, fitomassa verde aérea, fitomassa seca aérea, fitomassa verde de raiz e fitomassa seca de raiz.

Assim, o que acarretou a utilização das cinco variáveis (NF, FVA, FSA, FVR, FSR), definindo-se dez conjuntos *fuzzy* $C_{n,m} = 1, 2, \dots, 10$, com funções de pertinência trapezoidais, em que foi adotada a metodologia similar à das variáveis de entrada. Calculando-se os diversos delimitadores que possibilitassem definir a forma trapezoidal dos dez conjuntos de pertinência, foram necessários 19 delimitadores que se adotaram como sendo os percentis dos conjuntos de dados mensurados de cada variável de saída. Tais percentis em $x\%$, denotados por $P(x\%)$, dependem de uma constante k , uma vez que os 19 delimitadores necessários são da forma $P(mk)$, $0 \leq m \leq 18$. A constante k é calculada de forma:

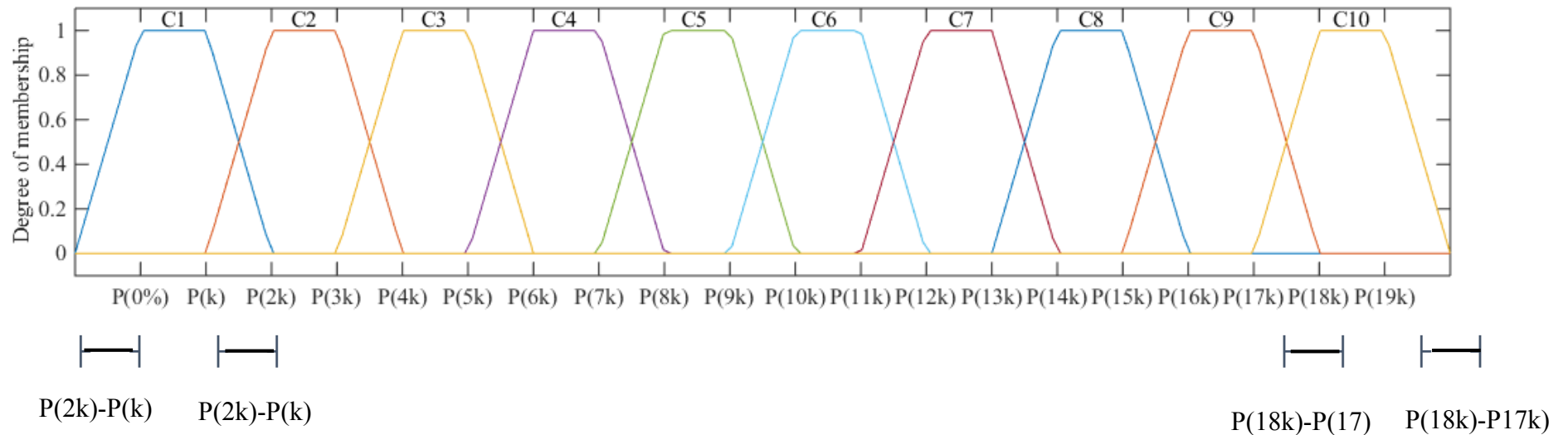
$$k = \frac{x_{max} - x_{min}}{2m - 1} \Rightarrow k = \frac{100\% - 0\%}{19} \Rightarrow k = 5,26\% \quad (5)$$

em que x_{max} é o ponto máximo observado para as variáveis de saída; x_{min} é o ponto mínimo observado para a variável de saída e n é o número de conjuntos *fuzzy*.

Portando, para a definição das funções de pertinência e das variáveis de saída, foram utilizados os percentis que variaram em 5,26%. A Figura 8 e a Tabela 6 apresentam a proposta de metodologia para a determinação de criação das funções de pertinência para as variáveis de saída; assim foram determinados 19 percentis variando em 5,26%, sendo que para o delimitador x_1 do conjunto *fuzzy* C1 foi subtraído o valor de k e para o delimitador x_4 do conjunto *fuzzy* C10 foi adicionado o valor de k .

Tabela 6. Definições das funções de pertinência genérica da variável de saída.

Conjunto <i>fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
“C1”	Trapezoidal	$[P(0\%) - P(2k) + P(k); P(0\%); P(k); P(2k)] = [(P(0) - P(11\%) + P(5\%)); P(0); P(11\%); P(22\%)]$
“C2”	Trapezoidal	$[P(k); P(2k); P(3k); P(4k)] = [P(5\%) P(11\%) P(16\%) P(21\%)]$
“C3”	Trapezoidal	$[P(3k); P(4k); P(5k); P(6k)] = [P(16\%) P(21\%) P(26\%) P(32\%)]$
“C4”	Trapezoidal	$[P(5k); P(6k); P(7k); P(8k)] = [P(26\%) P(32\%) P(37\%) P(42\%)]$
“C5”	Trapezoidal	$[P(7k); P(8k); P(9k); P(10k)] = [P(37\%) P(42\%) P(47\%) P(53\%)]$
“C6”	Trapezoidal	$[P(9k); P(10k); P(11k); P(12k)] = [P(47\%) P(53\%) P(58\%) P(63\%)]$
“C7”	Trapezoidal	$[P(11k); P(12k); P(13k); P(14k)] = [P(58\%) P(63\%) P(68\%) P(74\%)]$
“C8”	Trapezoidal	$[P(13k); P(14k); P(15k); P(16k)] = [P(68\%) P(74\%) P(79\%) P(84\%)]$
“C9”	Trapezoidal	$[P(15k); P(16k); P(17k); P(18k)] = [P(79\%) P(84\%) P(89\%) P(95\%)]$
“C10”	Trapezoidal	$[P(17k); P(18k); P(19k); P(19) + P(18k) - P(17k)] = [P(89\%) P(95\%) P(100\%) (P(100\%) + P(100\%) - P(95\%))]$

**Figura 8.** Funções de pertinência definidas para os conjuntos *fuzzy* das variáveis de saída.

Base de regras

A base de regras do sistema *fuzzy* elaborado demonstra como os resultados são modelados. Partindo da premissa da regra *fuzzy* em que:

- se “*premissa (antecedente)*” então “*conclusão (consequente)*”,

foi possível calcular as entradas do modelo, a partir da combinação dos fatores estabelecidos como as *saídas*.

A partir das variáveis de entrada, foi possível a criação de vinte pares de regras (*Lâmina de irrigação × Dias Após Transplantio*) e associada às cinco variáveis de saída (NF, PVA, PSA, PVR e PSR). A base de regras desenvolvidas para o modelo *fuzzy* proposto foi criada utilizando a metodologia proposta em Cremasco et al. (2010), Gabriel Filho et al. (2011) e Putti et al., (2014), nos quais, após a construção 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 (Tabela 7).

Tabela 7. Combinações das variáveis de entrada com pontos de grau de pertinência 1 associados aos conjuntos *fuzzy* para a construção da base de regras.

Lâmina de irrigação		Dias após transplântio	
Conjunto Fuzzy	Ponto com grau de pertinência 1 associado	Ponto com grau de pertinência 1 associado	Ponto com grau de pertinência 1 associado
P1	14	L1	25%
P1	14	L2	50%
P1	14	L3	75%
P1	14	L4	100%
P1	14	L5	125%
P2	21	L1	25%
P2	21	L2	50%
P2	21	L3	75%
P2	21	L4	100%
P2	21	L5	125%
P3	28	L1	25%
P3	28	L2	50%
P3	28	L3	75%
P3	28	L4	100%
P3	28	L5	125%
P4	35	L1	25%
P4	35	L2	50%
P4	35	L3	75%
P4	35	L4	100%
P4	35	L5	125%

Legenda: L1: lâmina de 25% da ETc; L2: lâmina de 50% da ETc; L3: Lâmina de 75% da ETc; L4: Lâmina de 100% da ETc; L5: lâmina de 125% da ETc; P1: 14 DAT; P2: 21 DAT; P3: 28 DAT; P4: 35 DAT;

A base de regra ela apresenta a inovação de não necessitar do especialista para ser elaborada. Assim pode-se auxiliar o produtor na tomada de decisão sobre o manejo de irrigação e o tipo de água.

Os valores calculados das variáveis de saída com grau de pertinência 1 foram determinados por associações com os conjuntos *fuzzy* das variáveis de saída (*S*). Deste modo, a partir da necessidade do cálculo dos 19 delimitadores, como realizado na metodologia de elaboração dos conjuntos *fuzzy* de saída, determinaram-se os percentis em nível 0% (mínimo) e 5,36. *i*, com *i* = 1, 2, ..., 18, 19 dos dados das variáveis de saídas (*S*), possibilitando a posterior classificação da variável de saída dos pontos com grau de pertinência 1, caracterizou-se a base de regras dos sistemas *fuzzy*:

- Se $S \leq P(5,26\%)$ então a VS é "C1";
- Se $P(10,52\%) \leq S \leq P(15,78\%)$ então a VS é C2;
- Se $P(21,04\%) \leq S \leq P(26,3\%)$ então a VS é C3;
- Se $P(31,56\%) \leq S \leq P(36,82\%)$ então a VS é C4;
- Se $P(42,08\%) \leq S \leq P(47,34\%)$ então a VS é C5;
- Se $P(52,6\%) \leq S \leq P(57,86\%)$ então a VS é C6;
- Se $P(63,12\%) \leq S \leq P(68,38\%)$ então a VS é C7;
- Se $P(73,64\%) \leq S \leq P(78,9\%)$ então a VS é C8;
- Se $P(84,16\%) \leq S \leq P(89,42\%)$ então a VS é C9;
- Se $VS \geq P(94,68\%)$ então a VS é C10,

em que $P(x\%)$ representa o percentil em nível $x\%$ do conjunto dos valores calculados das variáveis de saída e S é a variável de saída, vale ressaltar que $S \in \{NF; FVA; FSA; FVR; FSR\}$.

Método de inferência e defuzzyficação

O método de inferência adotado no modelo foio proposto por Mamdani e Assilian (1975), visto que no presente trabalho as proposições do antecedente e do consequente são proposições *fuzzy*, e que de acordo com Ross (2010) é o método mais comum praticado na literatura.

Para o cálculo da defuzzyficação do sistema, foi considerado o método centro de área ou centroide, que é a técnica mais comumente utilizada e apresenta os resultados mais próximos aos observados (CHACHI et al., 2014; CASTANHO et al., 2014; JONG et al., 2013; KESHWANI et al., 2008; KISI 2014; LABADIDI; BAKER, 2006; PATEL; MOHAN, 2002; PERUZZI et al., 2012; ROSS, 2010; SENA VIRATNE et al., 2014; YEN; LANGARI, 1999), tal método pode ser calculado da seguinte forma:

$$y = \frac{\sum_x \mu_a(x)x}{\sum_x \mu_a(x)} \quad (6)$$

Análise da intensidade de associação dos modelos

Pela elaboração do sistema baseado em regras *fuzzy* e das equações de regressão múltipla, foi possível analisar o grau da intensidade de associação, sendo

realizada a análise entre os dados coletados em campos com o SBRF e as equações de regressão, utilizando os seguintes testes:

1. Erro quadrado médio:

$$EQM = \sum_{i=1}^n \frac{(y_{observado} - y_{fuzzy})^2}{n} \quad (7)$$

2. Correlação de Pearson (r):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{fuzzy} - \bar{y}_{fuzzy})(y_{observado} - \bar{y}_{observado})}{\left[\sum_{i=1}^n (y_{fuzzy} - \bar{y}_{fuzzy})^2 (y_{observado} - \bar{y}_{observado})^2 \right]^{1/2}} \quad (8)$$

3. Índice de Willmott et al. (1985):

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n |y_{fuzzy} - y_{observado}|^2}{\sum_{i=1}^n (|y_{fuzzy} - \bar{y}| + |y_{observado} - \bar{y}|)^2} \right] \quad (9)$$

em que, \bar{y} é a média dos valores observados; y são os dados observados em campo; \bar{x} é a média dos dados modelados e x é o dado modelado.

Quanto mais próximo de 1 estiver o valor de r^2 melhor é o ajuste do modelo. Para a análise do índice de Willmott, quanto mais próximo de 1 estiver o “d” maior será a exatidão do modelo.

Sendo assim esta metodologia acima estabelece uma maneira de comparação entre formas de ajustes de curvas que no presente trabalho foram estabelecidos por sistema *fuzzy* e análises de regressão.

Para determinar os pontos de máximo, foi simulado dentro do sistema *fuzzy* estabelecido, passos de variações de 0,1 para a lâmina de irrigação e o tempo, assim podendo ser verificado qual situação atingiu melhor desempenho.

Softwares utilizados

Para o desenvolvimento dos sistemas baseados em regras *fuzzy* (SBRF) foi utilizado o *software* Matlab, versão 8.4 (2014), por meio dele realizaram-se as simulações das variáveis de repostas. A partir das simulações realizadas no Matlab, juntamente com os modelos de regressões, foi possível a elaboração dos gráficos, os quais foram desenvolvidos em planilha eletrônica do pacote Microsoft Office. Para o cálculo dos modelos de regressões múltiplas utilizou-se o *software* estatístico Minitab, versão 17.0 (2014).

Após a implementação no *software* Matlab, foi possível desenvolver um programa em ambiente do Toolbox Lógica *Fuzzy* que permite simular diversos cenários discretos do sistema baseado em regras *fuzzy*, dentro dos intervalos pré-estabelecido nos conjuntos de entrada.

Resultados e discussão

Equações de ajuste

A partir da verificação dos pressupostos da normalidade e da homocedasticidade, em que foram acatados, não ocorreu a necessidade da transformação dos dados. Deste modo, foi possível determinar as equações de ajuste para as variáveis de resposta do modelo em função das lâminas de irrigação e das avaliações ao longo do ciclo. A Tabela 8 apresenta as equações de ajuste dos modelos, no qual se pode observar que ocorre o ajuste por meio de equações de 3º grau.

Tabela 8. Coeficientes da regressão e de determinação das equações polinomiais múltiplas para a cultura da alface submetida em diferentes lâminas de irrigação avaliada ao longo do ciclo.

Variável	Ciclo	$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^3 a_{ij}x_j^i$							R ²
		β_0	ax_1	ax_1^2	ax_1^3	a_1x_2	$a_2x_2^2$	$a_3x_2^3$	
NF-ATM	1º	30,33*	-0,184*	0,002*	- 0,000006	- 0,184*	0,1*	0,00068	0,98*
	2º	-23,71*	0,47*	0,0074*	- 0,000033*	4,92*	- 0,19*	0,0027*	0,89*
NF-AC	1º	30,4*	- 0,224*	0,0027*	- 0,00000092	- 2,75*	0,1*	- 0,00059	0,94*
	2º	-43,23*	6,86*	0,12	- 0,31	- 0,002*	0,005*	0,000001*	0,94*
FVA-ATM	1º	-133,8*	- 4,58*	0,082*	- 0,00039*	35,59*	- 2,17*	0,0443*	0,96*
	2º	-122,75*	0,523	- 0,0151*	0,000098	22,36*	- 1,41*	0,03*	0,84*
FVA-AC	1º	56,59*	12,7*	0,2	- 0,00089	22*	- 1,171*	0,024	0,95*
	2º	-159,35*	1,77*	- 0,031*	0,00016*	21,89*	- 1,25	0,026	0,91*
FSA-ATM	1º	9,16*	- 0,19	0,0032*	0,00014	- 0,75*	0,019*	- 0,000015	0,92*
	2º	10,08*	- 0,47*	0,0073*	- 0,000032	- 0,35*	0,0083*	0,0002*	0,89*
FSA-AC	1º	2,11*	0,019*	- 0,00065	0,00000460891	- 0,21*	- 0,001*	0,00035	0,94*
	2º	9,84*	0,094	-0,0016	0,0000084*	- 1,68*	0,0718	- 0,00074*	0,88*
FVR-ATM	1º	-23,66*	- 0,13*	0,0023*	0,0033*	4*	- 0,2*	- 0,000011*	0,94*
	2º	-13,69*	- 0,24*	0,0043*	- 0,00002*	2,71*	- 0,13*	0,0023*	0,92*
FVR-AC	1º	-9,74*	0,093	- 0,0015	0,0000082*	1,19*	- 0,061	0,0011*	0,85*
	2º	-6,37*	0,065*	-0,0011	0,0011	0,94*	- 0,054*	0,0000059	0,85*
FSR-ATM	1º	-3,43*	- 0,022	0,00035*	- 0,0000016*	0,62*	- 0,032*	0,00054*	0,86*
	2º	2,27*	- 0,029*	0,00046	- 0,0000021	- 0,15*	0,0032*	0,000013	0,84*
FSR-AC	1º	-1,43*	0,0019	-0,00000274*	0,00000017	0,22*	- 0,012	0,00023*	0,93*
	2º	-0,44*	0,017*	-0,00023	0,000001	0,10*	- 0,009	0,0002*	0,73*

Legenda: x_1 : lâmina de irrigação (%ETc); x_2 : dias após transplantio; NF número de folha; FVA: fitomassa verde aéreo; FSA fitomassa seco aéreo; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seco de raiz, AC: água convencional; ATM: água tratada magneticamente e * significativo para $\alpha = 5\%$.

Sistema *fuzzy* desenvolvido

A metodologia de construção das funções de pertinência de saída do modelo pode ser observada nas Figuras 9 a 12. A elaboração foi possível pela determinação dos percentis de cada variável de saída, assim se pode observar o formato dos conjuntos de *fuzzy* para as variáveis biométricas em seu respectivo ciclo, em apêndice as tabelas que possibilitou a determinação dos vértices dos gráficos a seguir.

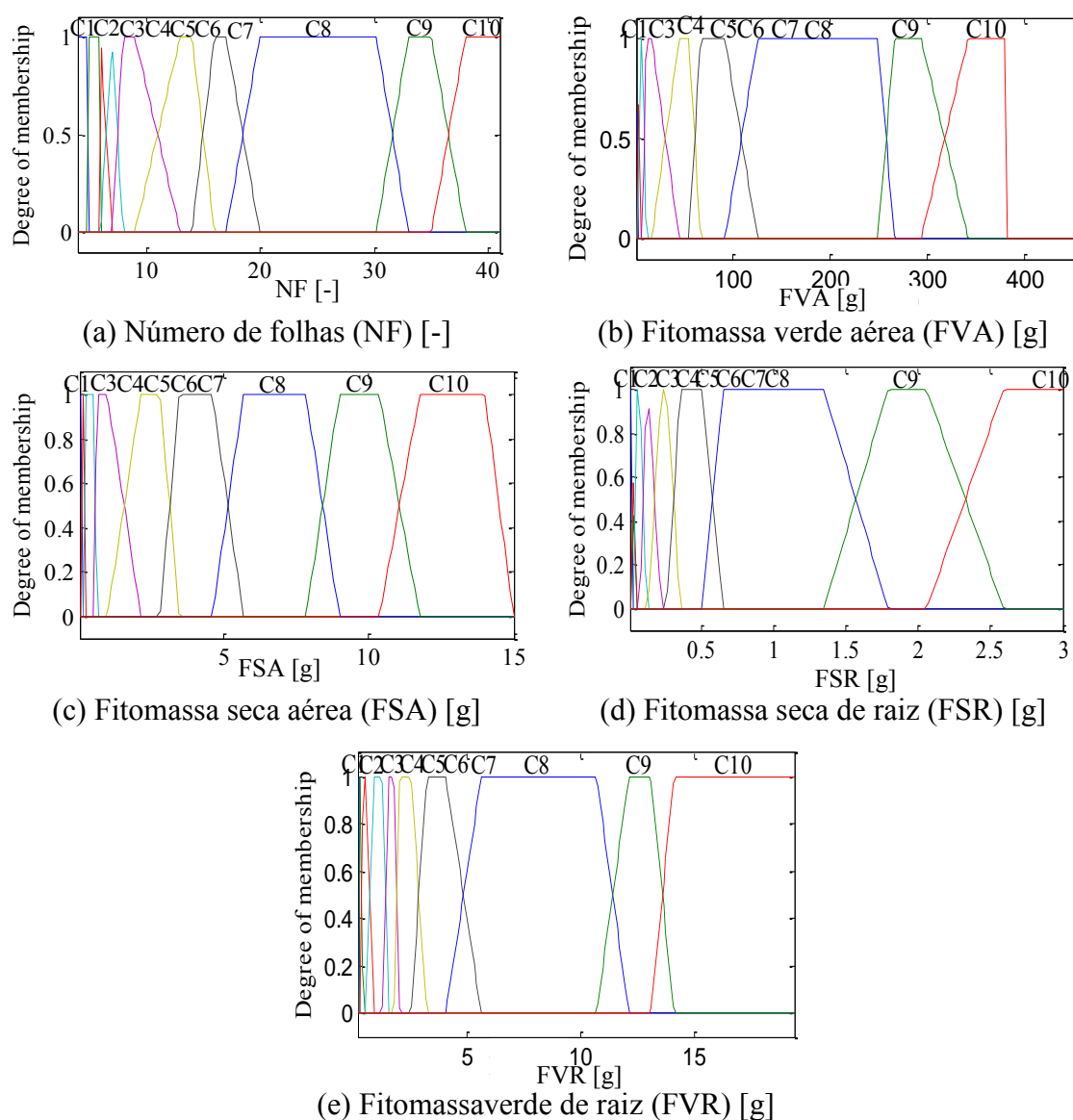


Figura 9. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a lâminas de irrigação e ATM, ao longo do ciclo, para o 1º ciclo.

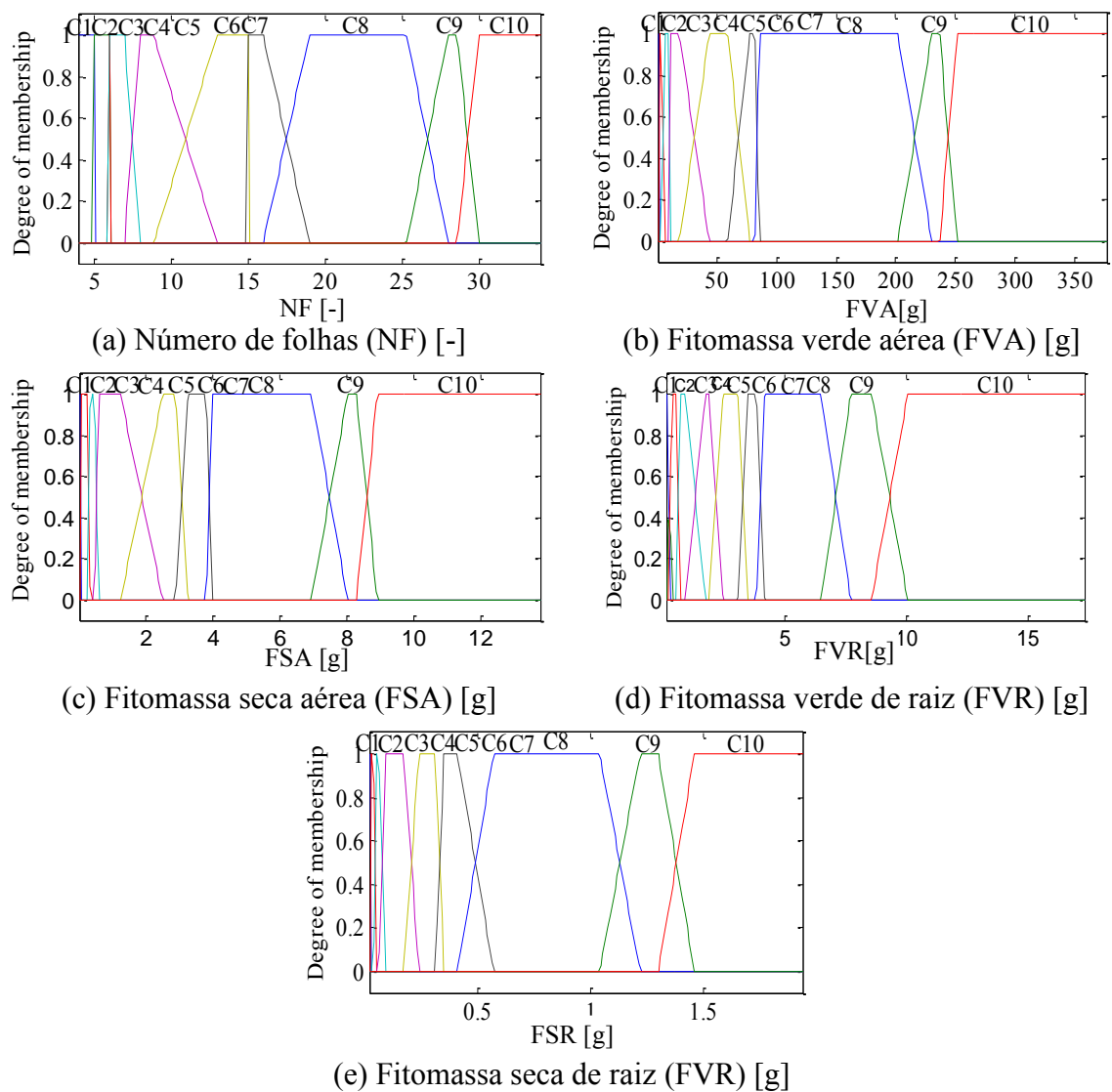


Figura 10. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a lâminas de irrigação e AC, ao longo do ciclo, para o 1º ciclo.

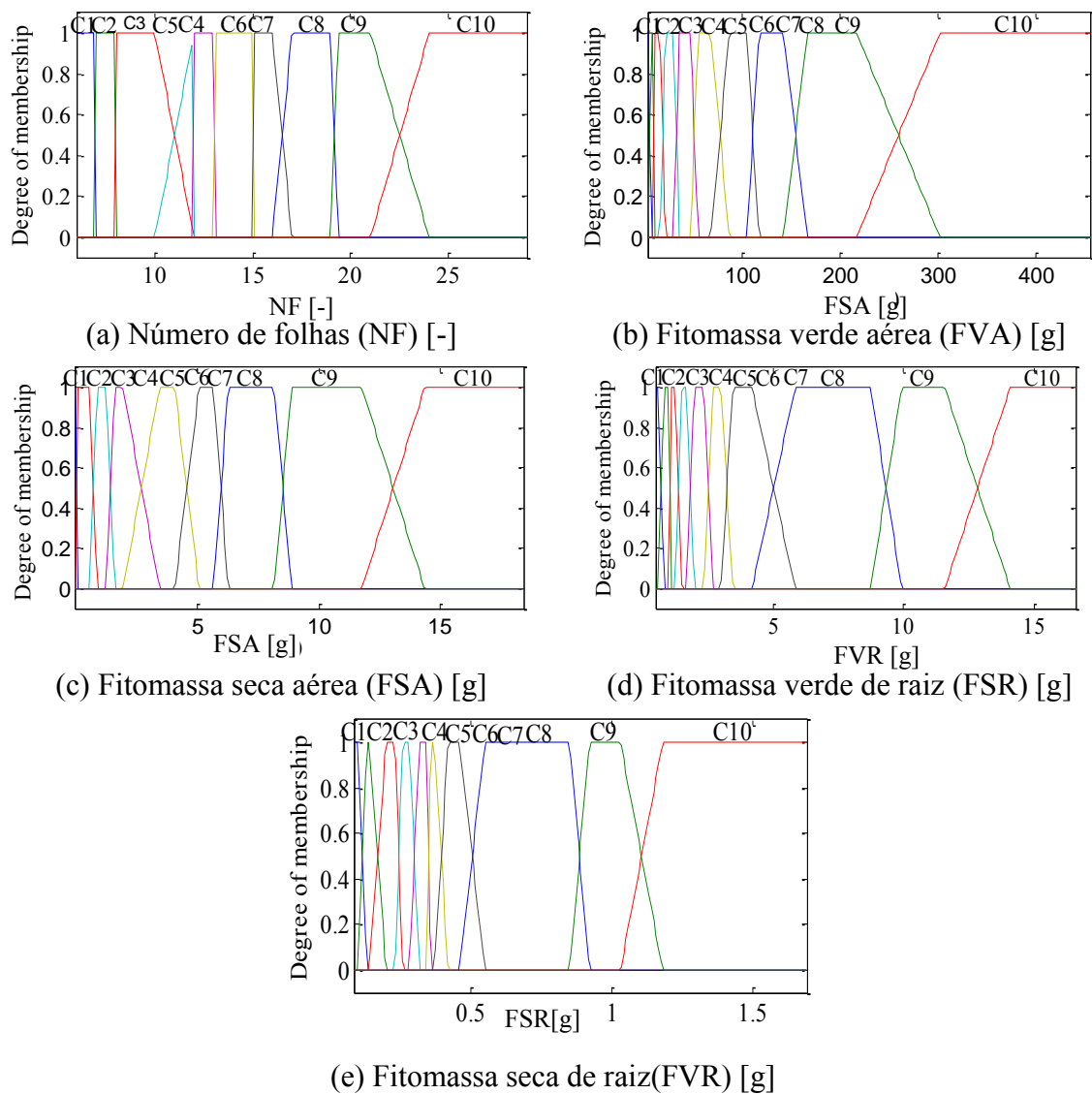


Figura 11. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a lâminas de irrigação e ATM, ao longo do ciclo, para o 2º ciclo.

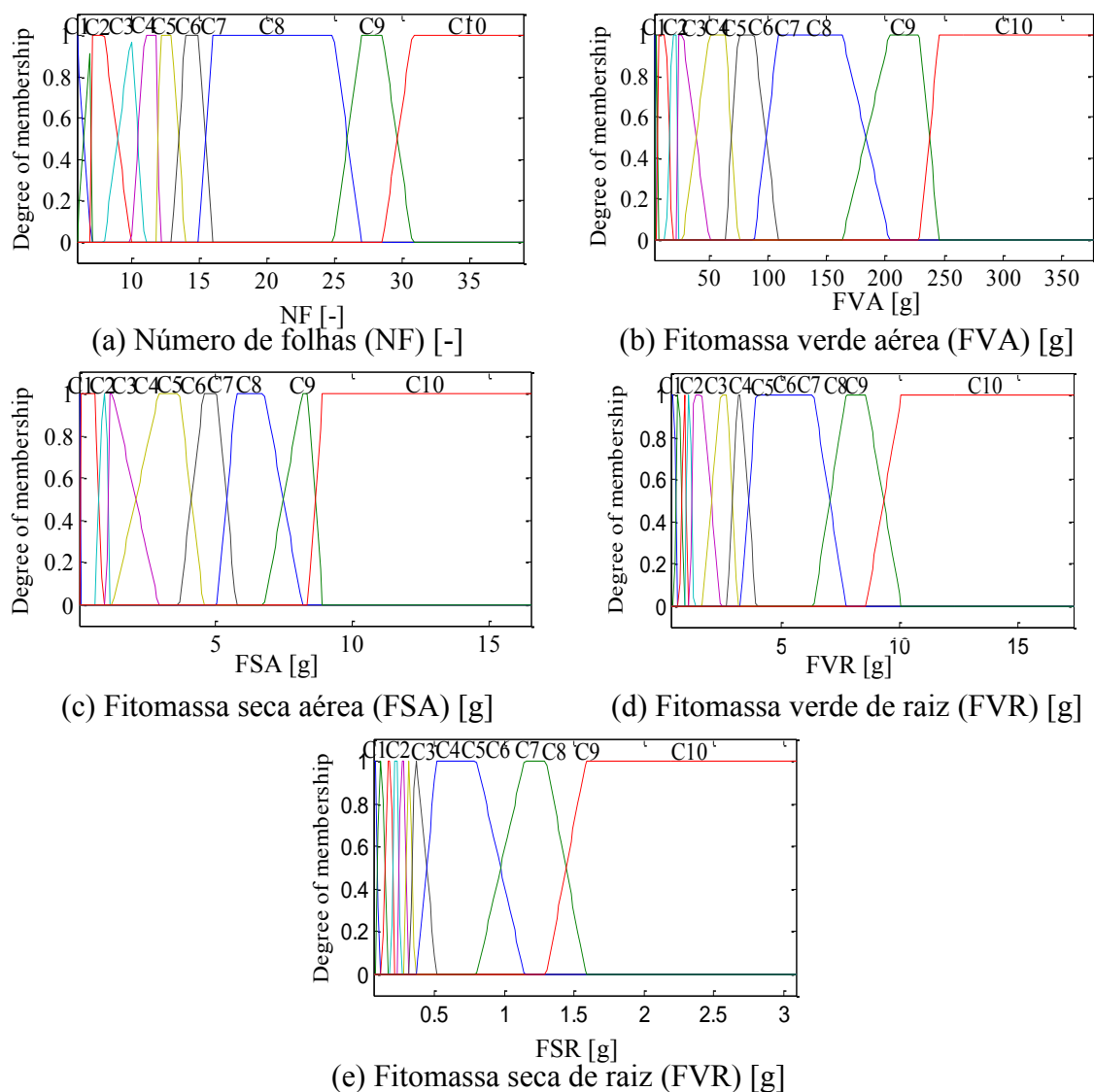


Figura 12. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a lâminas de irrigação e AC, ao longo do ciclo, para o 2º ciclo.

Definidas as funções de pertinência, foram elaborados os conjuntos *fuzzy* das variáveis biométricas analisadas, associando o maior grau de pertinência para cada avaliação realizada para a cultura da alface, quando submetida à irrigação com ATM e AC, analogamente para cada ciclo. A partir da associação, foram realizadas as alterações das bases de regras apresentadas nas Tabelas 9 a 12.

Tabela 9. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy*, para o 1º ciclo da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e avaliada em diferentes datas ao longo do desenvolvimento para a irrigação com ATM.

Variáveis de entrada				Variáveis de saída									
DAT		Lâmina de irrigação		NF	CF	FVA	CF	FSA	CF	FVR	CF	FSR	CF
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1	Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1										
P1	14	L1	25%	6	C4	1,17	C1	0,08	C4	0,29	C3	0,02	C4
P1	14	L2	50%	5	C2	2,29	C5	0,07	C3	0,36	C3	0,03	C5
P1	14	L3	75%	6	C4	2,81	C4	0,12	C3	0,26	C2	0,03	C4
P1	14	L4	100%	5	C2	2,02	C4	0,10	C3	0,25	C2	0,02	C4
P1	14	L5	125%	6	C4	1,71	C4	0,11	C3	0,31	C3	0,03	C4
P2	21	L1	25%	6	C4	3,86	C4	0,27	C4	0,58	C4	0,05	C4
P2	21	L2	50%	9	C6	14,63	C6	0,75	C5	1,77	C6	0,13	C6
P2	21	L3	75%	8	C5	12,40	C5	0,52	C5	1,43	C5	0,12	C5
P2	21	L4	100%	6	C4	2,28	C7	0,18	C4	1,55	C5	0,05	C4
P2	21	L5	125%	8	C5	7,17	C5	0,65	C5	0,88	C4	0,09	C5
P3	28	L1	25%	14	C7	53,53	C7	3,47	C7	2,16	C6	0,28	C7
P3	28	L2	50%	16	C7	63,01	C7	3,10	C7	3,65	C8	0,38	C7
P3	28	L3	75%	17	C8	87,34	C8	4,23	C8	3,32	C7	0,28	C7
P3	28	L4	100%	19	C8	122,89	C8	5,67	C8	5,12	C8	0,64	C8
P3	28	L5	125%	13	C6	46,60	C6	2,10	C6	2,51	C7	0,24	C6
P4	35	L1	25%	35	C10	266,31	C9	8,38	C9	13,61	C10	2,59	C10
P4	35	L2	50%	32	C9	256,98	C9	8,32	C9	12,52	C9	2,23	C10
P4	35	L3	75%	31	C9	294,69	C10	9,18	C9	13,13	C10	1,51	C9
P4	35	L4	100%	39	C10	351,35	C10	12,14	C10	14,13	C10	2,27	C10
P4	35	L5	125%	35	C10	292,28	C10	11,48	C10	11,24	C9	1,66	C9

Legenda: L1: lâmina de 25% da ETc; L2: lâmina de 50% da ETc; L3: lâmina de 75% da ETc; L4: lâmina de 100% da ETc; L5: lâmina de 125% da ETc; P1: 14 DAT; P2: 21 DAT; P3: 28 DAT; P4: 35 DAT; NF número de folha; FVA fitomassa verde aéreo; FSA fitomassa seco aéreo; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seco de raiz e CF; conjunto *fuzzy*

Tabela 10. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy*, para o 1º ciclo da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e avaliada em diferentes datas ao longo do desenvolvimento para a irrigação com AC.

Variáveis de entrada				Variáveis de saída									
DAT		Lâmina de irrigação		NF	CF	FVA	CF	FSA	CF	FVR	CF	FSR	CF
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1	Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1										
P1	14	L1	25%	6	C4	1,25	C3	0,11	C3	0,30	C3	0,0329	C3
P1	14	L2	50%	4	C1	0,81	C1	0,05	C3	0,26	C3	0,0266	C3
P1	14	L3	75%	6	C4	1,44	C3	0,09	C3	0,26	C2	0,0321	C3
P1	14	L4	100%	6	C4	1,05	C4	0,06	C3	0,25	C2	0,0221	C4
P1	14	L5	125%	5	C2	1,35	C3	0,07	C3	0,25	C2	0,0231	C4
P2	21	L1	25%	6	C4	10,02	C5	0,42	C5	0,62	C4	0,0474	C4
P2	21	L2	50%	6	C4	3,67	C4	0,28	C4	0,73	C4	0,0765	C5
P2	21	L3	75%	7	C5	10,55	C5	0,66	C5	1,74	C5	0,0617	C5
P2	21	L4	100%	7	C5	8,97	C5	0,41	C5	0,92	C5	0,0543	C4
P2	21	L5	125%	8	C5	18,60	C6	1,27	C6	1,80	C5	0,1774	C6
P3	28	L1	25%	16	C8	81,60	C8	3,70	C8	3,48	C7	0,336	C7
P3	28	L2	50%	13	C6	43,79	C6	3,00	C7	3,04	C7	0,2339	C6
P3	28	L3	75%	15	C7	83,47	C8	3,31	C7	3,86	C8	0,4625	C8
P3	28	L4	100%	14	C7	54,37	C7	2,80	C7	3,11	C7	0,3978	C8
P3	28	L5	125%	16	C8	78,06	C7	3,63	C8	3,87	C8	0,3175	C7
P4	35	L1	25%	30	C10	241,11	C10	8,42	C10	7,75	C9	1,2447	C9
P4	35	L2	50%	27	C9	231,27	C9	7,46	C9	7,48	C9	1,227	C9
P4	35	L3	75%	28	C9	234,94	C10	8,27	C10	9,14	C10	1,2892	C10
P4	35	L4	100%	27	C9	200,14	C9	8,26	C10	7,95	C9	1,1085	C9
P4	35	L5	125%	30	C10	291,60	C10	11,50	C10	12,26	C10	1,4292	C10

Legenda: L1: lâmina de 25% da ETc; L2: lâmina de 50% da ETc; L3: Lâmina de 75% da ETc; L4: Lâmina de 100% da ETc; L5: lâmina de 125% da ETc; P1: 14 DAT; P2: 21 DAT; P3: 28 DAT; P4: 35 DAT; NF número de folha; FVA fitomassa verde aéreo; FSA fitomassa seco aéreo; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seco de raiz e CF; conjunto *fuzzy*

Tabela 11. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy*, para o 2º ciclo da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e avaliada em diferentes datas ao longo do desenvolvimento, para a irrigação com ATM.

Variáveis de entrada				Variáveis de saída									
DAT		Lâmina de irrigação		NF	CF	FVA	CF	FSA	CF	FVR	CF	FSR	CF
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1	Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1										
P1	14	L1	25%	8	C3	7,98	C4	0,05	C3	0,92	C3	0,37	C6
P1	14	L2	50%	7	C2	5,50	C3	0,03	C3	0,58	C2	0,26	C4
P1	14	L3	75%	7	C2	7,93	C3	0,07	C3	0,98	C3	0,33	C5
P1	14	L4	100%	8	C3	10,60	C3	0,08	C3	1,35	C4	0,46	C8
P1	14	L5	125%	7	C2	5,28	C4	0,04	C3	0,69	C2	0,23	C4
P2	21	L1	25%	14	C6	32,90	C5	1,61	C5	1,68	C5	0,15	C3
P2	21	L2	50%	11	C4	16,14	C4	0,72	C4	1,18	C4	0,10	C2
P2	21	L3	75%	12	C5	29,27	C5	1,20	C5	1,53	C4	0,13	C2
P2	21	L4	100%	13	C6	43,28	C6	1,85	C6	2,81	C6	0,28	C5
P2	21	L5	125%	12	C5	21,08	C4	0,99	C4	1,41	C4	0,13	C2
P3	28	L1	25%	15	C7	74,03	C7	4,75	C7	2,88	C7	0,35	C6
P3	28	L2	50%	15	C7	55,12	C6	3,64	C6	2,72	C6	0,32	C5
P3	28	L3	75%	13	C6	67,79	C7	3,98	C7	2,95	C7	0,37	C6
P3	28	L4	100%	17	C8	123,08	C8	6,41	C8	4,84	C8	0,34	C6
P3	28	L5	125%	15	C7	109,32	C8	5,50	C8	4,60	C8	0,41	C7
P4	35	L1	25%	19	C9	170,47	C9	9,16	C9	9,11	C9	0,85	C9
P4	35	L2	50%	19	C9	130,57	C9	7,85	C9	8,99	C9	1,04	C10
P4	35	L3	75%	20	C9	164,00	C9	9,01	C9	13,70	C10	0,93	C9
P4	35	L4	100%	26	C10	400,81	C10	18,00	C10	14,85	C10	1,37	C10
P4	35	L5	125%	23	C10	262,59	C10	13,94	C10	11,49	C10	1,02	C10

Legenda: L1: lâmina de 25% da ETc; L2: lâmina de 50% da ETc; L3: Lâmina de 75% da ETc; L4: Lâmina de 100% da ETc; L5: lâmina de 125% da ETc; P1: 14 DAT; P2: 21 DAT; P3: 28 DAT; P4: 35 DAT; NF número de folha; FVA fitomassa verde aéreo; FSA fitomassa seco aéreo; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seco de raiz e CF; conjunto *fuzzy*

Tabela 12. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy*, para o 2º ciclo da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e avaliada em diferentes datas ao longo do desenvolvimento, para a irrigação com AC.

Variáveis de entrada				Variáveis de saída									
DAT		Lâmina de irrigação		NF	CF	FVA	CF	FSA	CF	FVR	CF	FSR	CF
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1	Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1										
P1	14	L1	25%	6	C2	4,22	C3	0,03	C3	0,48	C2	0,22	C4
P1	14	L2	50%	7	C3	5,15	C3	0,05	C3	0,64	C2	0,26	C5
P1	14	L3	75%	7	C3	5,19	C3	0,04	C3	0,69	C3	0,31	C6
P1	14	L4	100%	7	C3	4,50	C3	0,03	C3	0,56	C2	0,21	C4
P1	14	L5	125%	7	C3	6,51	C3	0,05	C3	0,90	C3	0,25	C5
P2	21	L1	25%	10	C5	22,93	C5	1,00	C5	1,15	C5	0,12	C3
P2	21	L2	50%	11	C5	21,74	C5	1,01	C5	1,18	C5	0,10	C2
P2	21	L3	75%	11	C5	25,46	C5	1,18	C6	1,18	C5	0,10	C2
P2	21	L4	100%	10	C5	19,68	C4	0,90	C4	1,06	C4	0,08	C2
P2	21	L5	125%	11	C5	22,42	C5	1,08	C5	1,32	C5	0,16	C3
P3	28	L1	25%	14	C7	73,37	C7	4,09	C7	2,98	C7	0,32	C7
P3	28	L2	50%	14	C7	79,74	C7	4,56	C7	3,13	C7	0,29	C6
P3	28	L3	75%	15	C8	71,84	C7	5,36	C8	3,27	C8	0,33	C7
P3	28	L4	100%	13	C7	55,24	C6	2,97	C6	2,46	C6	0,46	C8
P3	28	L5	125%	14	C7	89,36	C8	5,15	C8	3,19	C7	0,32	C7
P4	35	L1	25%	30	C10	236,29	C10	8,42	C10	7,75	C9	1,03	C9
P4	35	L2	50%	25	C9	186,16	C9	7,46	C9	7,48	C9	1,19	C9
P4	35	L3	75%	28	C10	234,64	C10	8,29	C10	9,14	C10	1,47	C10
P4	35	L4	100%	27	C9	200,14	C9	8,26	C10	7,95	C9	1,03	C9
P4	35	L5	125%	32	C10	291,60	C10	12,20	C10	12,26	C10	1,60	C10

Legenda: L1: lâmina de 25% da ETc; L2: lâmina de 50% da ETc; L3: lâmina de 75% da ETc; L4: lâmina de 100% da ETc; L5: lâmina de 125% da ETc; P1: 14 DAT; P2: 21 DAT; P3: 28 DAT; P4: 35 DAT; NF número de folha; FVA fitomassa verde aéreo; FSA fitomassa seco aéreo; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seco de raiz e CF; conjunto *fuzzy*

As três primeiras linhas da Tabela 12 representam as seguintes relações, as demais linhas são representadas de forma análoga.

- Se (DAT é “P1”) e (lâmina de irrigação é “L1”) então (NF é “C2”, FVA é “C3”, FSA é “C3”, FVR é “C3”, FSR é “C2” e CR é “C4”);
- Se (DAT é “P1”) e (lâmina de irrigação é “L2”) então (NF é “C2”, FVA é “C3”, FSA é “C3”, FVR é “C6”, FSR é “C2” e CR é “C5”);
- Se (DAT é “P1”) e (lâmina de irrigação é “L3”) então (NF é “C3”, FVA é “C3”, FSA é “C3”, FVR é “C8”, FSR é “C3” e CR é “C5”).

Simulação e discussão do modelo

Os modelos *fuzzy* desenvolvidos possibilitaram verificar situações intermediárias com maior precisão, quando comparados com as curvas geradas a partir dos modelos de regressão polinomiais múltiplos, para o desenvolvimento da cultura da alface submetida em diferentes lâminas de irrigação, em que foram analisados isoladamente os tipos de água e os ciclos. A partir da implementação em ambiente computacional do Matlab, foi possível realizar as simulações entre os níveis intermediários de irrigação e também para os níveis intermediários das avaliações. As simulações foram implementadas utilizando a função *evalfis*. Deste modo, possibilitam a elaboração das superfícies de respostas para as avaliações biométricas.

Na análise do número de folhas foi possível verificar que os tratamentos irrigados com ATM apresentaram maior desenvolvimento quando comparado com o irrigado com AC (Figura 13).

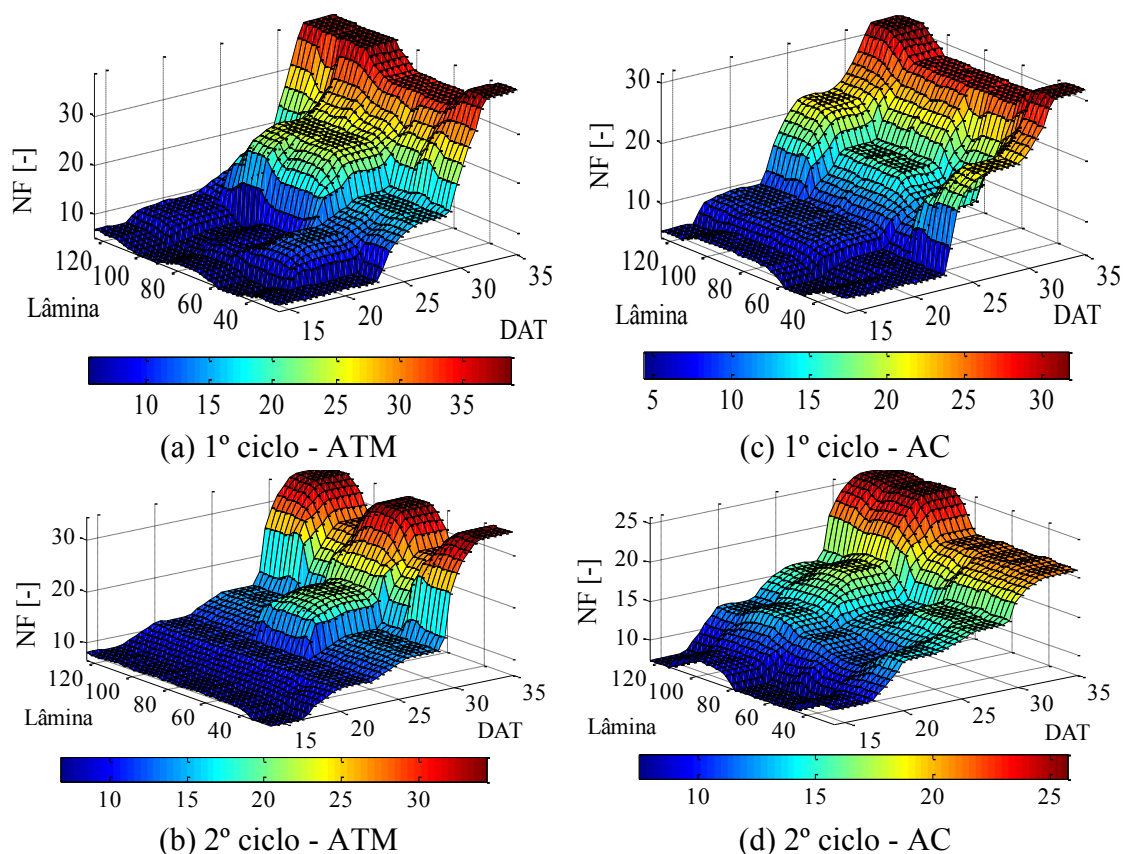


Figura 13. Número de folhas da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipos de água, sendo avaliada ao longo do ciclo.

De forma geral para o 1º ciclo, o maior acúmulo no número de folhas ocorreu quando irrigado com ATM, que para os tratamentos nas taxas de reposição de 75% e 100% da ETC o desenvolvimento ocorreu de forma mais branda. Ao comparar com as demais lâminas, observou-se o desenvolvimento mais abrupto para nas últimas semanas (Figura 13a), atingindo a máxima produção em torno de 35 folhas.

Ao analisar os tratamentos irrigados com AC, notou-se o desenvolvimento menos acentuado ao longo do ciclo, porém chegando a acumular 32 folhas ao final do ciclo (Figura 13c).

No 2º ciclo, verificou-se comportamento muito similar ao 1º ciclo quando submetida à irrigação com ATM, em que houve o desenvolvimento menos acentuado na taxa de 75% da ETC e demais, ocorrendo de forma mais abrupta (Figura 13b), atingindo no máximo 33 folhas.

Já quando utilizada a irrigação com AC observou, de forma geral, que ocorreu o desenvolvimento mais brando ao longo do ciclo, sendo que produziu o máximo de 26 folhas, quando submetido à irrigação 125% da ETC.

A partir das superfícies de respostas, foi possível elaborar os mapas de contorno para melhor visualização do desenvolvimento (Figura 14).

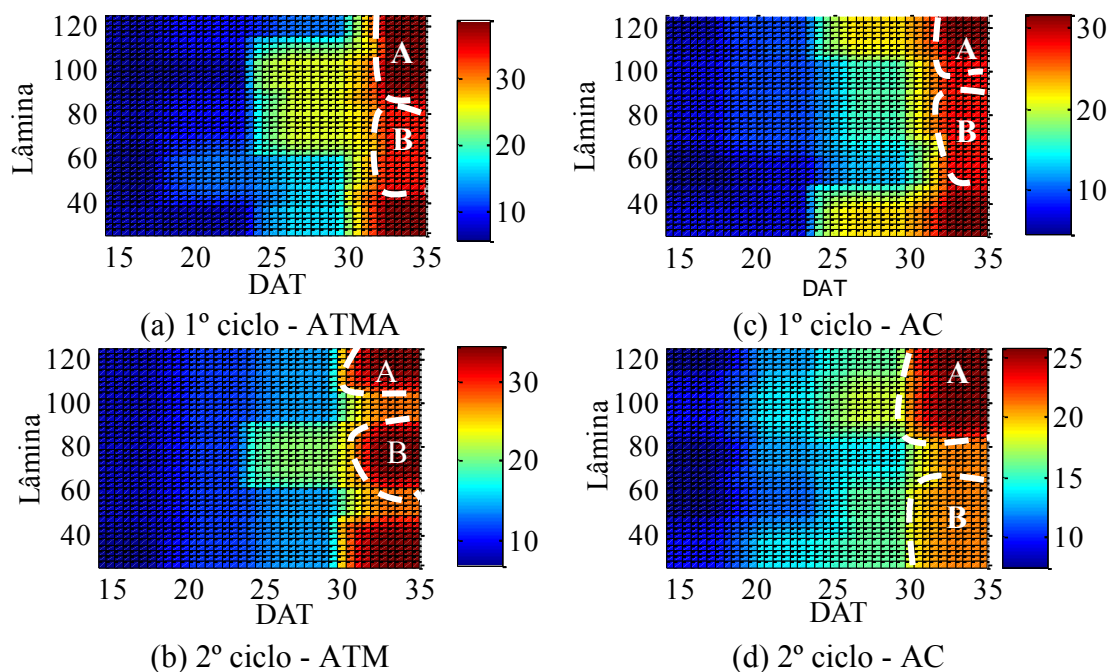


Figura 14. Mapa de contorno para o desenvolvimento do número de folhas da cultura da alfaca submetida em diferentes lâminas de irrigação.

No 1º ciclo, submetida à irrigação com ATM houve maior número de folhas aos 35 DAT na região A (Figura 14a) e sendo superior à produção da região B. Na região A, observou o intervalo da irrigação entre 80 a 125% da ETC, produzindo a mesma quantidade. Assim, pode-se inferir que ocorreu a redução no volume de água aplicado, via irrigação, assim como a redução nos dias do ciclo.

Na irrigação utilizando AC, a região A apresentou maior número de folhas quando comparado com a região B, sendo produzidas 32 folhas (Figura 14a e c).

Para o 2º ciclo, verificou-se que quando a irrigação com ATM há maior produção próximo aos 35 DAT. Ao analisar os pontos em destaque verifica-se que a região A apresentou a maior produção e muito próximo também a região B, demandando maior volume de água. Deve-se ressaltar que a maior produção foi atingida antes dos 35 DAT; deste modo há a possibilidade de ocorrer a colheita antecipada (Figura 14a e b).

No 2º ciclo quando irrigado com AC, verificou-se que a região A apresentou o maior acúmulo do número de folhas ocorrendo próximo aos 35 DAT, comparando-a com a região B. Deve-se observar que a região entre a reposição de 90 a 125%

da ETc ocorreu o maior número de folha, assim a faixa ideal para a máxima produção do número de folhas consta na região A.

Na análise da fitomassa verde aérea, verificou-se o maior desenvolvimento e acúmulo quando submetido à irrigação com ATM (Figura 15).

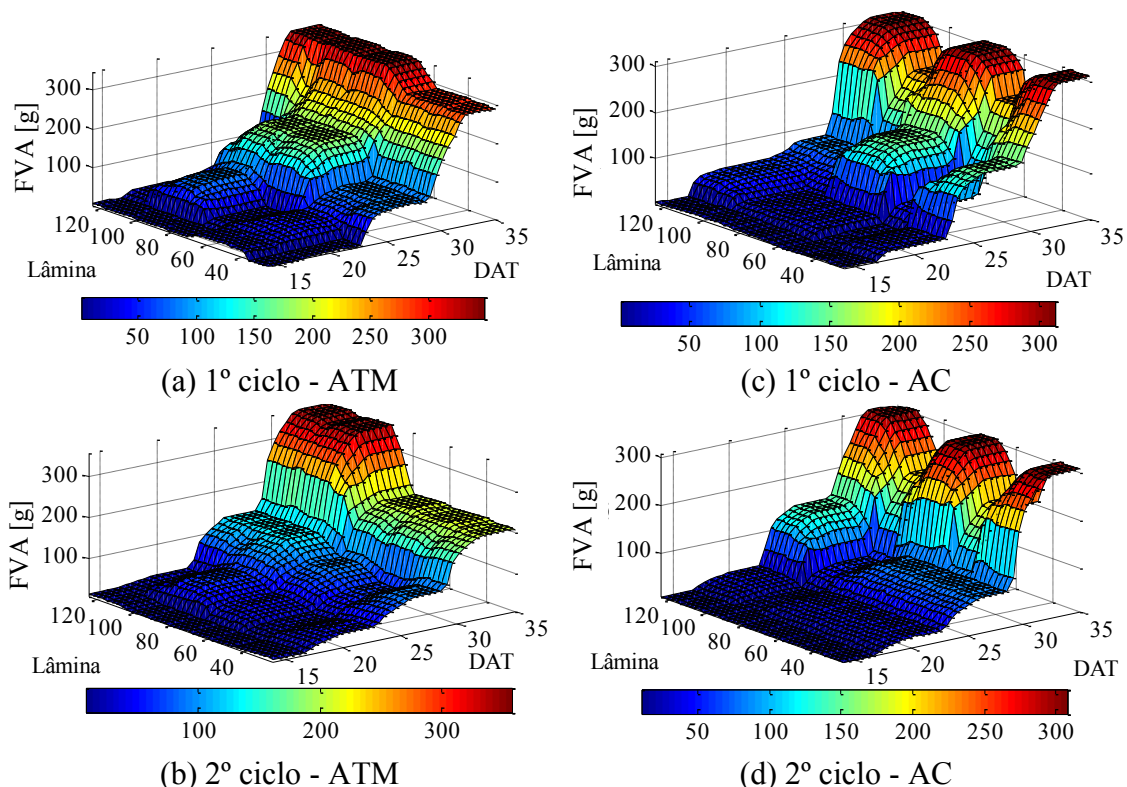


Figura 15. Fitomassa verde aérea da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipos de água, sendo avaliada ao longo do ciclo.

Ao analisar o 1º ciclo, nota-se que quando irrigado com ATM ocorreu desenvolvimento mais brando, sendo que os maiores valores observados ocorreram próximos às taxas de reposição de 100% da ETc (Figura 15a). Quando submetido à irrigação com AC, observou-se que a produção foi inferior do que a irrigada com ATM, sendo que a máxima produção ocorreu próximo às lâminas de 125 e 75% da ETc (Figura 15c).

No 2º ciclo verificou-se o mesmo comportamento, em que ocorreu maior à fitomassa verde aérea, quando irrigado com ATM, sendo que a maior fitomassa ocorreu próximo à taxa de reposição de 125% da ETc (Figura 15b).

Quando irrigado com AC, verificou-se efeito similar ao 1º ciclo, no qual se pode verificar que ocorreu o maior acúmulo da fitomassa verde aérea nas taxas de reposição de 75 e 125% da ETc, sendo o desenvolvimento mais acentuado.

Os mapas de contorno apresentam a fitomassa aérea, conforme se pode observar na Figura 16.

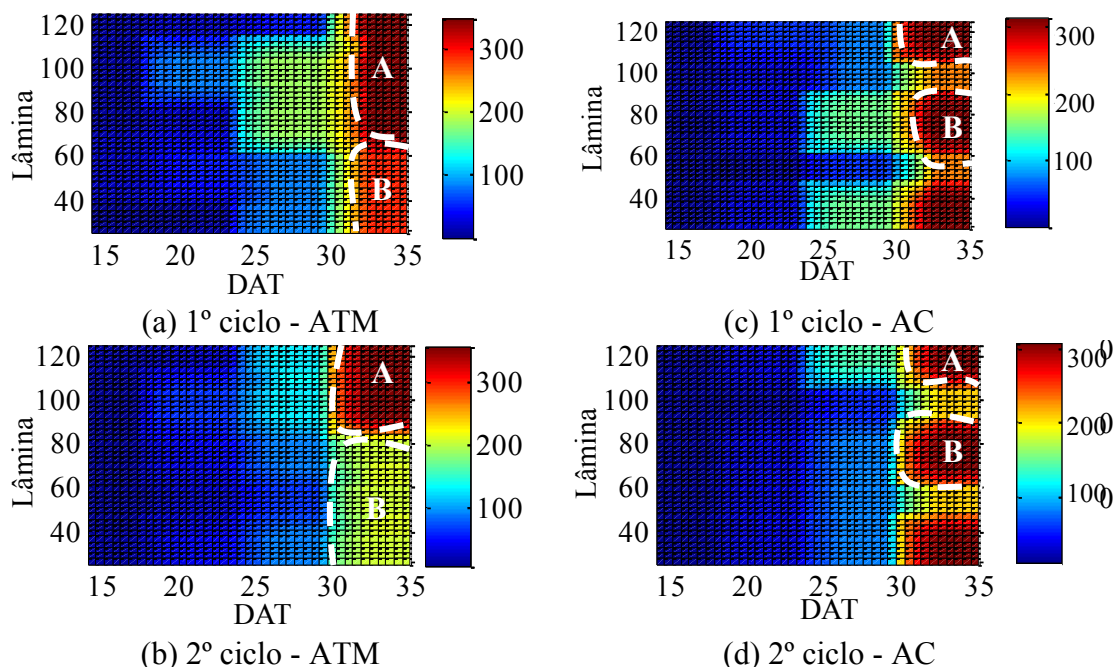


Figura 16. Mapa de contorno para o desenvolvimento da fitomassa verde aérea da cultura da alface submetida em diferentes lâminas de irrigação.

No 1º ciclo, foi possível verificar que o acúmulo superior quando submetido à irrigação com ATM, o qual ocorreu na região A (Figura 16a) em que representa uma faixa entre 70 a 125% da ETc. Já para a região B, ocorre a menor produção ao final do ciclo, assim não sendo recomendada a irrigação nessa faixa.

Quando irrigado com AC, observa-se que tanto a região A e B apresentaram fitomassa verde aérea próxima, sendo as faixas de maiores produções (Figura 16c).

Já para o 2º ciclo, verificou-se o incremento superior para os tratamentos irrigados com ATM, sendo que houve a maior fitomassa verde para a região A, que está entre as taxas de reposições 75 a 125% da ETc (Figura 16b).

Também ocorreu o mesmo comportamento para 2º ciclo quando irrigado com AC, em que as regiões A e B obtiveram os maiores incrementos da fitomassa verde aérea (Figura 16d), verificando que a região B apresenta um menor volume gasto de água e obtendo a mesma fitomassa verde que a região A.

A partir do modelo desenvolvido, foi possível analisar o comportamento do acúmulo da fitomassa seca aérea, em que pode inferir que ocorreu o maior desenvolvimento para os tratamentos irrigados com ATM (Figura 17).

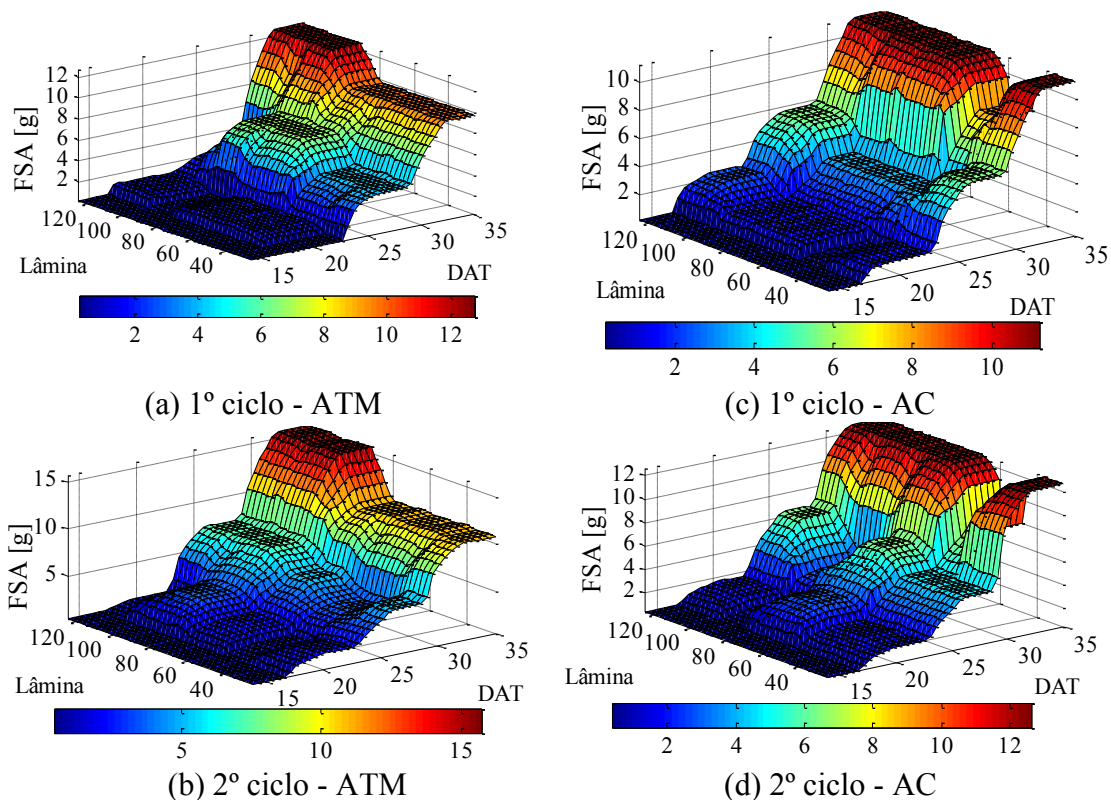


Figura 17. Fitomassa seca aérea da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipos de água, sendo avaliada ao longo do ciclo.

Em ambos os ciclos foi verificado o comportamento similar quando submetido à irrigação com ATM, em que seus maiores incrementos ocorreram quando foram irrigados com a taxa de reposição próximo de 100% da ETC (Figura 17a e c), quando irrigado com AC, observou-se que houve também em ambos os ciclos o efeito muito similar, que próximo à taxa de reposição 50% da ETC, se diferiu das demais ao final do ciclo. (Figura 17b e d).

Assim, para melhor visualização do comportamento da irrigação em função das DAT de avaliação foram elaborados, a partir da Figura 50, os mapas de contorno (Figura 18).

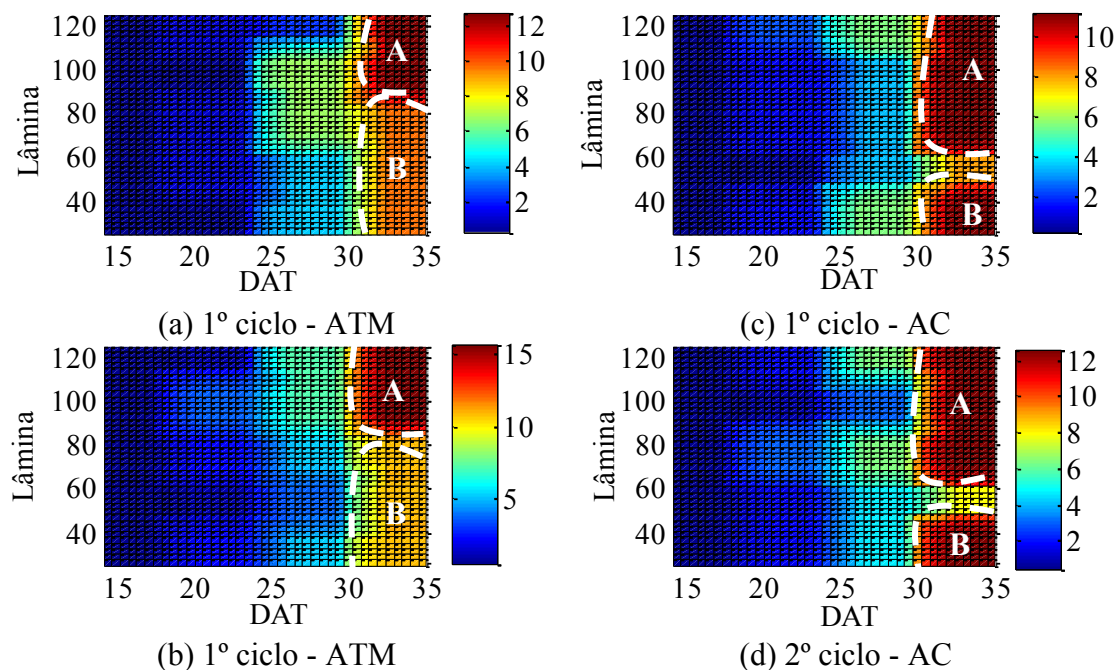


Figura 18. Mapa de contorno para o desenvolvimento da fitomassa seca aérea da cultura da alface submetida em diferentes lâminas de irrigação.

Verifica-se que foi muito próximo o efeito em ambos os ciclos e tipo de água e que ocorreu o maior incremento nos tratamentos irrigados com ATM. Pode-se observar que a irrigação com ATM acúmulo foi maior na região A, que se encontra próximo às lâminas de reposição de 90 a 125% da ETC (Figura 18a e b), enquanto a região B apresentou os menores acúmulos.

Já na irrigação que utilizou AC, a região A e B ambos os ciclos apresentaram o maior acúmulo da fitomassa seca aérea (Figura 18c e d).

No sistema radicular da cultura da alface verificou-se que a fitomassa verde de raiz apresentou maior desenvolvimento quando submetida à irrigação utilizando ATM, sendo que o comportamento foi similar para ambos os ciclos (Figura 19).

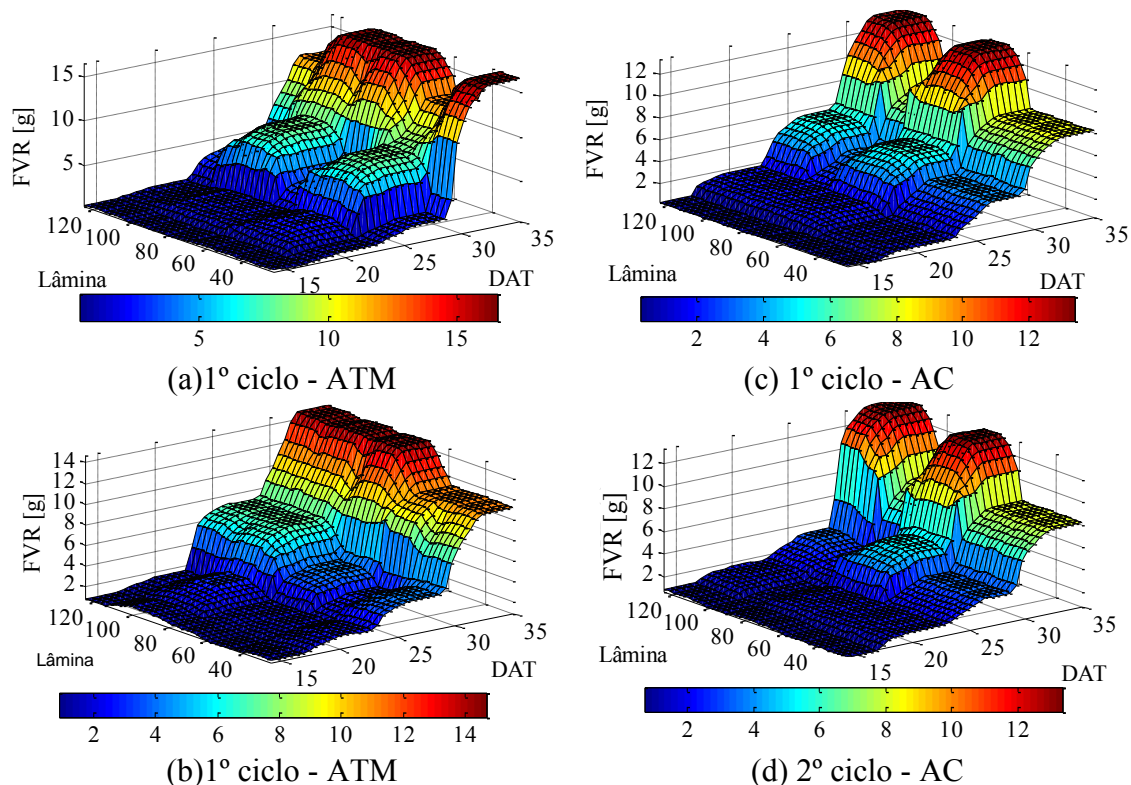


Figura 19. Fitomassa verde de raiz da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipos de água, sendo avaliada ao longo do ciclo.

A irrigação com ATM apresentou o maior desenvolvimento do sistema radicular quando irrigada com as taxas de 75% e 100% da ET_c , tal fato foi verificado em ambos os ciclos (Figura 19a e b).

Na irrigação com AC, notou-se que houve o mesmo comportamento em ambos os ciclos, no qual as regiões próximas as taxas de reposição de 75% e 100% da ET_c obtiveram os maiores acúmulos de fitomassa seca aérea (Figura 19c e d).

Os mapas de contorno da fitomassa seca aérea podem ser observados na Figura 20.

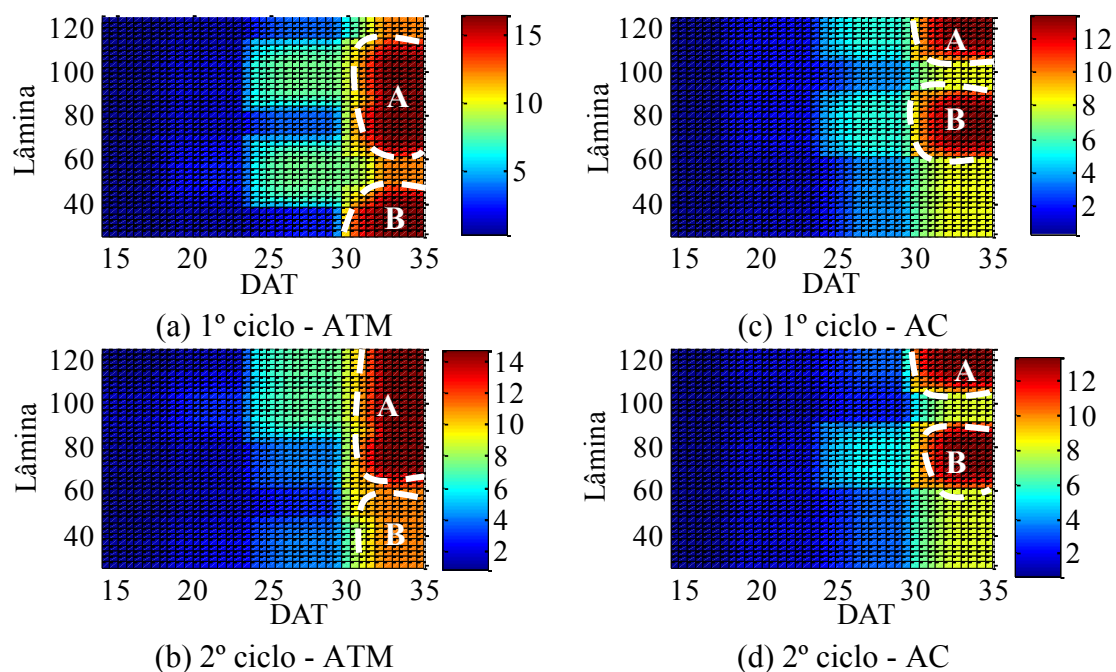


Figura 20. Mapas de contorno para o desenvolvimento da fitomassa verde raiz da cultura da alface submetida em diferentes lâminas de irrigação.

Em ambos os ciclos submetidos à irrigação com ATM, ocorreu o maior acúmulo na região A, que estão próximos à faixa de 75 a 100% da ET_c, sendo superiores aos tratamentos irrigados com AC (Figura 20a e b).

Já em relação na irrigação AC verifica-se que houve duas regiões (A e B) que apresentaram as maiores fitomassa verde de raiz. As demais foram inferiores no acumulado de fitomassa. As taxas de reposição de 80 e 125% da ET_c (Figura 20c e d).

Para o sistema radicular, também foi realizada a aferição da fitomassa seca de raiz (Figura 21), que ocorreu um comportamento similar ao ocorrido com a fitomassa verde de raiz.

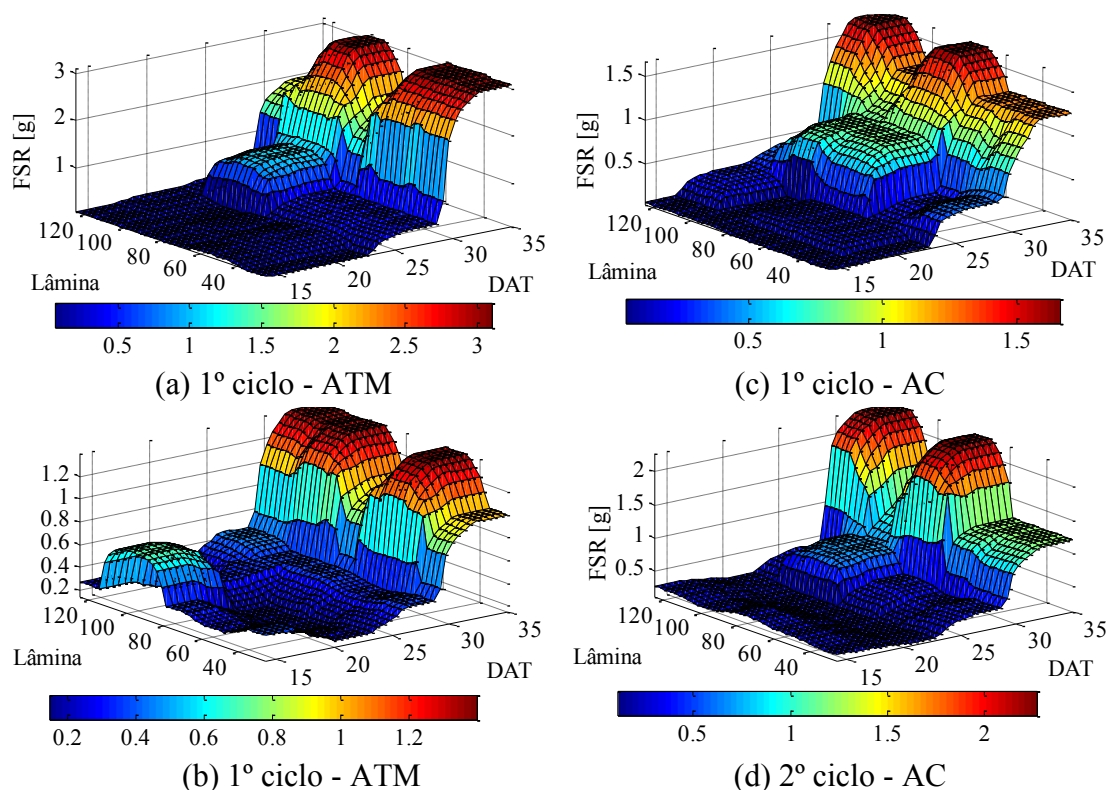


Figura 21. Fitomassa seca de raiz da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipos de água, sendo avaliada ao longo do ciclo.

Foi possível inferir que no 1º ciclo, quando submetido à irrigação com ATM, ocorreu maior acúmulo próximo às taxas de reposição de 50 e 100% da ETc (Figura 21a). Já para o 2º ciclo ocorreu o maior incremento quando irrigado com a taxa de reposição de 50%, 100% e 125% da ETc (Figura 21b).

Quando a irrigação foi com AC, verificou-se efeito similar em ambos os ciclos, no qual se pode destacar o maior desenvolvimento próximo às taxas de reposição entre 75% e 125% da ETc (Figura 21c e d).

A partir dos gráficos tridimensionalmente foi possível elaborar os mapas de contorno, da cultura da alface quando submetidas a diferentes taxas de reposição e avaliadas ao longo do ciclo (Figura 22).

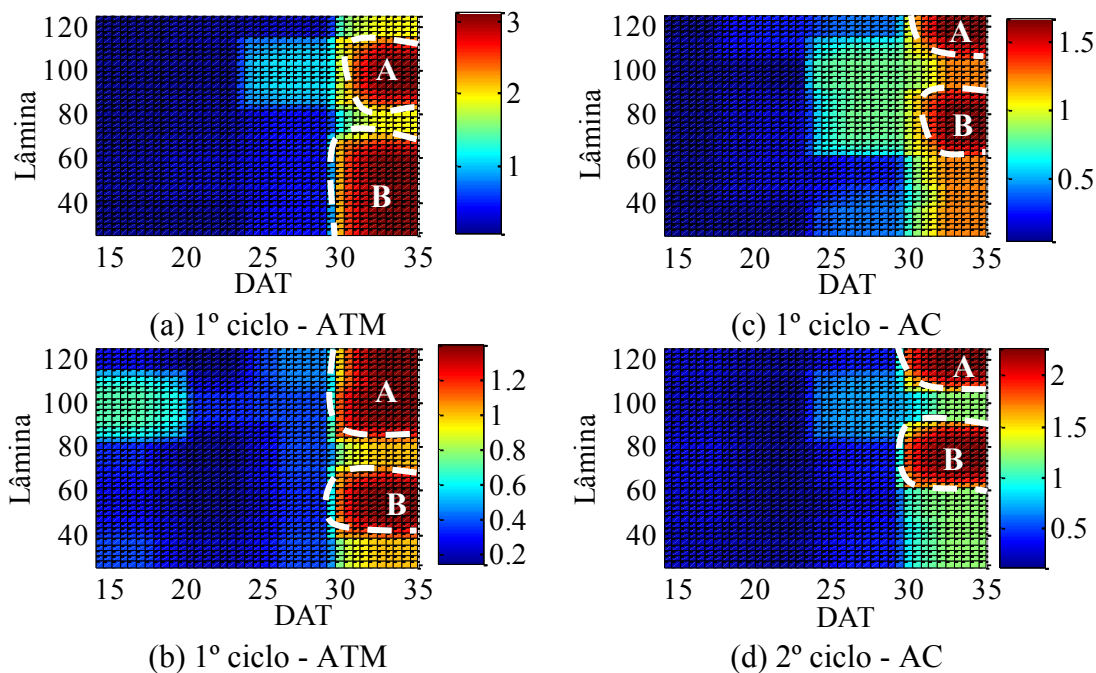


Figura 22. Mapas de contorno para o desenvolvimento da fitomassa verde aérea da cultura da alface submetida em diferentes lâminas de irrigação.

O comportamento foi similar quando submetida à irrigação com ATM, entre a região A próxima à lâmina de 100% e a região B próxima à taxa de 50% da ETc, estas apresentaram o maior acúmulo na fitomassa seca de raiz (Figura 22a e b).

Já na irrigação com AC, notou-se que ocorreu o comportamento muito similar nos dois ciclos. Pode-se observar que a região A próximo à lâmina de 125% da ETc e a região B próxima à taxa de reposição de 75% da ETc obtiverem os maiores acúmulos (Figura 22c e d).

A partir dos resultados apresentados foi possível inferir que ao submeter a água em um campo magnético, houve desenvolvimento mais eficaz da cultura da alface. Deste modo, foi possível observar que dentre as características biométricas analisadas, o número de folhas e fitomassa verde aérea apresentaram significativa redução nos dias de seu ciclo, atingindo a mesma produção quando submetida à irrigação com AC.

Ao analisar o comportamento da água em contato com campos magnéticos, constatou-se que ocorrem alterações em suas propriedades, sendo que as principais observadas em pesquisas foram a adsorção de água em superfícies (OZEKI et al., 1996), solubilidade de alguns minerais (BOGATIN et al., 1999; GEHR et al., 1995; HASSON et al., 1985; HERZOG et al., 1989), tensão superficial (JOSHI et al., 1966) e cristalização e precipitação de sais (KATSUKI et al., 1996; KRONENBERG, 1985).

Bogatin et al. (1999) observaram que ao submeter a água ao campo magnético ocorreu a desgaseificação, que resultou no aumento da permeabilidade no solo, onde acarreta o aumento da eficiência da irrigação. Khoshravesh et al. (2011) ao submeterem a ATM, constataram que ocorreu maior umidade do solo, quando comparado a AC. Tais alterações na umidade do solo proporcionado pela irrigação com ATM favoreceram a absorção de macro e micronutrientes pela cultura da alface (Capítulo 4).

As alterações provocam o desenvolvimento maior na cultura da alface, que atingiu o mesmo valor de produção com menor volume irrigado de ATM, quando comparada com a irrigação AC, reduzindo o volume total de água aplicado. Além disso, constatou-se que ocorreu a possibilidade na redução do ciclo, pois os tratamentos irrigados com ATM, atingiram a mesma fitomassa verde aérea irrigada com água convencional dos 35 DAT, antes de completar os mesmos 35 DAT.

O fato do aumento da produção quando submetidos à irrigação com ATM foi constatado por diversas pesquisas que confirmaram que é uma tecnologia com alto potencial para a redução do volume aplicado de água, em que podemos destacar as culturas do aipo, vagem e ervilha (MAHESHWARI; GREWAL, 2009), trigo (HOZAYN; QADOS, 2010), pinhão manso (LOPES et al., 2007), milho (AODA; FATTAH, 2011), tabaco (ALADJADJIYAN; YLIEVA, 2003), pepino (PÉREZ et al., 2011), ervilha (SAYED, 2014), tomate (SELIM; EL-NADY, 2011), trigo (KORDAS, 2002), lentilha e ervilha (MARTINÉZ et al., 2009), pimenta (RAWBDEH et al., 2014) e tomate (SOUZA et al. 2005; SELIM; EL-NADY, 2011).

A partir do modelo *fuzzy* gerado, foi possível verificar de forma geral o comportamento do desenvolvimento da cultura da alface quando submetida a diferentes tipos de água e lâminas de irrigação, simulando valores que não foram analisados experimentalmente. Dentro do ambiente do Matlab, após a elaboração do sistema baseado em regras *fuzzy*, realizaram-se simulações dentro do intervalo pré-estabelecido para cada variável de entrada (lâmina de irrigação (25 a 125% da ETc) e dias após transplante (14 a 35 DAT)).

Análise da intensidade de associação dos modelos

Com o modelo *fuzzy* desenvolvido e com as equações de regressão polinomiais múltiplas, foi possível verificar o grau de intensidade de associação dos modelos

com os dados coletados a campo, que foram utilizados como parâmetros de análises à correlação de Pearson (r), erro quadrado médio (EQM) e o índice “ d ” de Willmott. Frente aos resultados obtidos, pode-se inferir que os modelos *fuzzy* foram mais precisos (Tabela 13).

Tabela 13. Análise de intensidade de associação dos modelos *fuzzy* e de regressão com os dados coletados a campo, para as variáveis biométricas da cultura da alface, submetidas a diferentes lâminas de irrigação e avaliado ao longo do ciclo, para cada tipo de água.

	Variável	Modelo	1º ciclo			2º ciclo		
			EQM	r	d	EQM	r	d
NF	ATM	<i>fuzzy</i>	1,20	0,99*	0,986	1,86	0,96*	0,999
		regressão	1,46	0,98*	0,773	2,15	0,94*	0,998
	AC	<i>fuzzy</i>	4,44	0,98*	0,947	7,53	0,95*	0,998
		regressão	5,61	0,83*	0,932	50,67	0,73*	0,978
FVA	ATM	<i>fuzzy</i>	385,68	0,98*	0,967	912,11	0,96*	0,955
		regressão	423,46	0,96*	0,523	944,75	0,93*	0,090
	ATM	<i>fuzzy</i>	248,56	0,98*	0,999	993	0,95*	0,998
		regressão	426,06	0,96*	0,212	1053,7	0,93*	0,753
FSA	ATM	<i>fuzzy</i>	1,03	0,97*	0,771	0,97	0,98*	0,975
		regressão	1,09	0,96*	0,764	1,02	0,96*	0,9
	AC	<i>fuzzy</i>	0,24	0,97*	0,89	0,49	0,98*	0,97
		regressão	0,25	0,94*	0,03	0,80	0,96*	0,13
FVR	ATM	<i>fuzzy</i>	1,26	0,98*	0,87	0,74	0,98*	0,74
		regressão	1,77	0,94*	0,09	1,62	0,96*	0,23
	AC	<i>fuzzy</i>	1,01	0,96*	0,94	0,56	0,97*	0,92
		regressão	1,06	0,84*	0,50	0,58	0,95*	0,08
FSR	ATM	<i>fuzzy</i>	0,10	0,96*	0,99	0,01	0,94*	0,99
		regressão	0,14	0,92*	0,51	0,02	0,92*	0,41
	AC	<i>fuzzy</i>	0,02	0,96*	0,97	0,04	0,95*	0,92
		regressão	0,03	0,93*	0,94	0,05	0,90*	0,89

Legenda: NF: número de folha; FVA: fitomassa verde aérea; FSA: fitomassa seca aérea; FVR: fitomassa verde de raiz; FSR: fitomassa seca de raiz e “ d ” de Willmott, * significativo para $\alpha = 5\%$.

Os modelos *fuzzy* apresentaram maior grau de associação com os dados coletados a campo do que as regressões polinomiais múltiplas, sendo que foi possível verificar tais resultados a partir dos testes estatísticos aplicados, que comprovaram tal ajuste. Para o valor do erro médio quadrado, notou-se que para ambos os tipos de água, assim como nos dois ciclos, ocorreu o menor valor.

O coeficiente de correlação apresentou valor mais próximo de 1, assim sendo, mais próximo aos dados coletados e o valor da exatidão do modelo, através do

cálculo do valor do “d” de “Wilmott”, também apresentou os maiores valores. Também foi determinado o *p* valor para verificar a significância dos modelos. Para todos os casos analisados foi encontrado o valor de $p < 0,005$.

Carozzi et al. (2013) utilizaram a modelagem *fuzzy* para a determinação da resposta da produção do milho e verificaram que ocorreu o menor erro quando comparado com a análise de regressão. Zhang et al. (2013) inferiram que o modelo *fuzzy* obteve os resultados mais precisos na determinação da absorção de fósforo pelas plantas. Polat et al. (2015) verificaram que a aplicação da lógica *fuzzy* possibilitou determinar com maior precisão as áreas que apresentam riscos de contaminação. Weber et al. (2014) observaram que a modelagem *fuzzy* para a determinação da dureza do milho apresentou resultados mais preciso.

Conclusões

A partir dos modelos estatísticos foi possível verificar que a irrigação, utilizando ATM, apresentou maior desenvolvimento para a cultura ao longo do ciclo. Em ambos os ciclos, o comportamento foi similar em que a fitomassa verde aérea e o número de folhas foram as principais características da cultura da alface que obtiveram maior incremento.

Ocorreu a possível redução no volume de água gasto para atingir produção igual quando submetido à irrigação AC. Deste modo, tal tecnologia possibilita o aumento da produtividade de alimentos.

O modelo *fuzzy* desenvolvido apresentou um ajuste melhor quando comparado com os resultados da intensidade de associação dos modelos estatísticos de regressão polinomiais múltiplos com os dados coletados a campo, em que se observou a redução do EQM e o aumento no valor do *r* e do “d” de Wilmott.

Então, verifica-se que a modelagem *fuzzy* proporciona menor erro de ajuste das curvas, apresentando como uma modelagem de análise do comportamento das variáveis testadas experimentalmente na área de ciências agrárias.

Referências

- ALADJADJIYAN, A.; YLIEVA, T. Influence of stationary magnetic field on the early stages of the development of tobacco seeds. **Journal of Central European Agriculture**, v. 4, n. 2, p. 1-8, 2003.
- ALLOUCHE, J. The sustainability and resilience of global water and food systems: Political analysis of the interplay between security, resource scarcity political system and global trade. **Food Policy**, v. 36, p. 3-8, 2011.
- ANDRIYAS, S.; MACKEE, M. Recursive partitioning techniques for modeling irrigation behavior. **Environmental Modelling & Software**, v. 47, p. 207-217, 2013.
- AODA, M. I; FATTAH, M. A. The Interactive Effects of Water Magnetic Treatment and Deficit Irrigation on Plant Productivity and Water Use Efficiency of Corn (*Zea Mays* L.). **The Iraqi Journal of Agricultural Sciences**, v. 42, p. 164-179, 2011.
- BLANCO-FERNÁNDEZ, A. CASALS, M.R.; COLUBI, A.; CORRAL, N.; GARCÍA-BÁRZANA, M.; GIL, M. A.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, G.; LÓPEZ, M.T.; LUBIANO, M.A.; M. MONTENEGRO, M.; RAMOS-GUAJARDO, A. B.; DE LA ROSA DE SÁ, A, S.; SINOVA, B. A distance-based statistical analysis of *fuzzy* number-valued data. **International Journal of Approximate Reasoning**, v. 55, p. 1487-1501, 2014.
- BOGATIN, J.; BONDARENKO, N. P.; GAK, E. Z.; ROKHINSON, E. F.; ANANYEV, I.P., Magnetic treatment of irrigation water experimental results and application conditions, **Environmental Science and Technology**, v. 33, p. 1280-1285, 1999.
- BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 26, p. 211-234, 1964.
- CAROZZI, M.; BREGAGLIO, S.; SCAGLIA, B.; BERNARDONI, E.; ACUTIS, M.; CONFALONIERI, R. The development of a methodology using *fuzzy* logic to assess the performance of cropping systems based on a case study of maize in the Po Valley. **Soil Use and Management**, v. 29, p. 576-585, 2013.
- CARVALHO, W. A.; ESPÍNDOLA, C. R.; PACCOLA, A. A. **Levantamento de solos da Fazenda Lageado** - Estação Experimental "Presidente Médici". Boletim Científico- Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, v. 1, p. 1-95, 1983
- 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.
- CHACHI, J.; TAHERI, S. M.; ARGHAMI, N. R. A hybrid *fuzzy* regression model and its application in hydrology engineering. **Applied Soft Computing**, v. 25, p. 149-158, 2014.

CHUNG, E.; KIM, Y. Development of *fuzzy* multi-cereal approach to prioritize locations of treated wastewater use considering climate change scenarios. **Journal of Environmental Management**, v. 146, p. 505-516, 2014.

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. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, Embrapa Produção de Informação, 2006. 286p

DECCACHE, A.; KNOX, J. W.; WEATHERHEAD, E. K.; DANESHKHAH, A.; HESS, T. M. Implementing precision irrigation in a humid climate - recent experiences and on-going challenges. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 135-143, 2015.

FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; McMANUS, C. M.; MENEZES, A. M. Mineralização de esterco de ovinos e sua influência na produção de alface. **Horticultura Brasileira**, v. 30, p. 175-179, 2012.

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.

GEHR, R., Z. A.; ZHAI, J.; A. FINCH, S. R. R. Reduction of soluble mineral concentrations in CaSO₄ saturated water using a magnetic field. **Water Research**, v. 29, n.3, p. 933-940, 1995.

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.

GRIFFITHS, H.; PARRY, M. A. J. Plant Responses to Water Stress. **Annals of Botany**, v. 89, p. 801-802, 2002.

HAIR, J. F. ANDERSON, R. E.; BLACK, W. C.; TATHAM, R. L. **Análise Multivariada de Dados**. 5ªEd. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HANJRA, M. A.; QURESHI, M. E. Global water crisis and future food security in an era of climate change. **Food Policy**, v. 35, p. 365-377, 2010.

HASSON, D.; BRAMSON, D. Effectiveness of magnetic water treatment in suppressing CaCO₃ scale deposition. **Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.**, v. 24 p. 588-592, 1985.

HERRERA, J.; IBEAS, A.; SEN, M. L. Identification and control of integrative MIMO systems using pattern search algorithms: An application to irrigation channels. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 26, p. 334-346, 2013.

HERZOG, R. E.; SHI, Q.; PATIL, J. N.; KATZ, J. L. Magnetic water treatment. The effect of iron on calcium carbonate nucleation and growth. **Langmuir**, v. 5, n. 3, p. 861-867, 1989.

HIRATA, A. C. S.; HIRATA, E. K.; GUIMARÃES, E. C.; RÓS, A. B.; MONQUERO, P. A. Plantio direto de alface americana sobre plantas de cobertura dessecadas ou roçadas. **Bragantia**, v. 73, n. 2, p. 178-183, 2014.

HOSHMAND, R. **Statistical methods for environmental and agricultural sciences**. CRC Press, 1997.

HOZAYN, M.; QADOS, A. M. S. A. Irrigation with magnetized water enhances growth, chemical constituent and yield of chickpea. **Agriculture and biology journal of north America**, v. 1, n. 5, p. 671-676, 2010.

ISLAM, S.; KUNDU, S.; SHORAN, J.; SABIR, N.; SHARMA, K. FAROOQI, S.; SINGH, R.; AGARWAL, H. O.; CHATURVEDI, K. K.; SHARMA, R. K.; SHARMA, A. K. Selection of wheat (*Triticum aestivum*) variety through expert system. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 82, n. 1, p. 39, 2012.

JENSEN, C. R. influence of soil water stress on wilting and water relations of differently osmotically adjusted wheat plants. **New Phytologist**, v. 81, p. 15-24, 1981.

JONG, C. H.; TAY, K. M.; LIM, C. P. Application of the *fuzzy* Failure Mode and Effect Analysis methodology to edible bird nest processing. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 96, p. 90-108, 2013.

JOSHI, K. M.; KAMAT, P. V. Effect of magnetic field on the physical properties of water. **Indian Chemical Society**, v. 43, p. 620-622, 1966.

KATSUKI, A.; TOKUNAGA, R.; WATANABE, S. I.; TANIMOTO, Y. The effect of high magnetic field on the crystal growth of benzophenone. **Chemistry Letters**, v. 8, p. 607-608, 1996.

KESHWANI, D. R.; JONES, D. D.; MEYER, G. E.; BRAND, R. M Rule-based Mamdani-type fuzzy modeling of skin permeability. **Applied Soft Computing**, v. 8, n. 1, p. 285-294, 2008.

KHOSHNEVISAN, B.; RAFIEE, S.; OMID, M.; MOUSAZADEH, H. Prediction of potato yield based on energy inputs using multi-layer adaptive neuro-fuzzy inference system. **Measurement**, v. 47, p. 521-530, 2014.

KHOSHRAVESH, M.; MOSTAFAZADEH-FARD, B.; MOUSAVI, S. F. KIANI, A. R. Effects of magnetized water on the distribution pattern of soil water with respect to time in trickle irrigation. **Soil Use and Management**, v. 27, p. 515-522, 2011.

KISI, O. Applicability of Mamdani and Sugeno *fuzzy* genetic approaches for modeling reference evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 504, p. 160-170, 2014.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha. Verlag Justus Perthes. 1928. Wallmap 150cmx200cm.

KORDAS, L. The Effect of Magnetic Field on Growth, Development and the Yield of Spring Wheat. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 11, n. 5, p. 527-530, 2002.

KRAMER, J.; KANDEL, A. On accurate localization and uncertain sensors. **International Journal of Intelligent Systems**, v. 27, p. 429-456, 2012.

KRONENBERG, K. J. Experimental Evidence for Effects of Magnetic Fields on Moving Water and Fuels. **IEEE Trans. Magnetics**, v. 21, p. 2059-2061, 1985.

LABABIDI, H. M. S.; BAKER, C. G. J. **Fuzzy modelling**. In: CÁNOVAS, G. V. B.; et al. Handbook of Food and Bioprocess Modeling Technique, CRC Press, 2006, p. 452-494.

LATTIN, J.; CARROLL, J. D.; GREEN, P. E. **Análise de dados multivariados**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

LEMMON, H. Comax: an expert system for cotton crop management. **Computer Science in Economics and Management**, v. 3, n. 2, p. 177-185, 1990.

LEVIDOW, L.; ZACCARIA, D.; MAIA, R.; VIVAS, E.; TODOROVIC, M.; SCARDIGNO, A. Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovate practices. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 84-94, 2014.

LOPES, G. N.; KROETZ, V. J.; ALVES, J. M. A.; SMIDERLE, O. J. Irrigação magnética. **Agro@ambiente On-Line**, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2007.

MAHESHWARI, B. L.; GREWAL, H. S. Magnetic treatment of irrigation water: Its effects on vegetable crop yield and water productivity. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1229-1236, 2009.

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.

MARTÍNEZ, E.; FLÓREZ, M.; MAQUEDA, R.; CARBONELL, M. V.; AMAYA, J. M. Pea (*Pisum sativum*, L.) and Lentil (*Lens culinaris*, Medik) Growth Stimulation Due to

Exposure to 125 and 250 mT Stationary Fields. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 18, n. 4, p. 657-663, 2009.

MATHWORKS. Inc. **Logic Fuzzy toolbox user's guide**, version 8.4.0. Natick, MathWorks, Inc., 2014.

MINITAB, I. N. C. **MINITAB statistical software**. Minitab Release, v. 17, 2014.

NELSEN, T. C. The state of statistics in agricultural science. **Journal of agricultural, biological, and environmental statistics**, v.7, n. 3, p. 313-319, 2002.

NORTON, D. B.; SCHERRENBERG, S. M.; VAN LIER, J. B. Reclamation of used urban waters for irrigation purposes - A review of treatment technologies. **Journal of Environmental Management**, v. 122, p. 85-98, 2013.

OSHE, S.; DOURADO-NETO, D.; MANFRON, P. A.; SANTOS, O. S. Qualidade de cultivares de alface produzidos em hidroponia. **Scientia Agrícola**, v. 58, p. 181-185, 2001.

OZEKI, S.; MIYAMOTO, J.; ONO, S.; WAKAI, C.; WATANABE, T. Water-Solid Interactions Under Steady Magnetic Fields. Magnetic-Field-Induced Adsorption and Desorption of Water. **Journal of Physical Chemistry**, v. 100, n. 10, p. 4205, 1996.

PAGANO, M.; GAUVREAU, K. **Princípios de Bioestatística**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2012.

PATEL, A. V.; MOHAN, B. M. Some numerical aspects of center of area defuzzification method. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 132, p. 401-409, 2002.

PATIL, J. K.; KUMAR, R. Advances in image processing for detection of plant diseases. **Journal of Advanced Bioinformatics Applications and Research**, v. 2, n. 2, p. 135-141, 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.

PERUZZI, N. J.; SCALA, N. L., MACARI, M., FURLAN, R.L., MEYER, A.D., FERNANDEZ-ALARCON, M. F., KROETZ NETO, F.L., SOUZA, F.A. *Fuzzy* modeling to predict chicken egg hatchability in commercial hatchery. **Poultry Science**, p. 2710-2717, 2012.

PFEIFFER, L.; LIN, C. Y. C. Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence. **Journal of Environmental Economics and Management**, v.67, p.189-208, 2014.

PFEIFFER, L.; LIN, C. Y. C. Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 67, p. 189-208, 2014.

PINK, D. A. C.; KEANE, M. E. **Lettuce: *Lactuca sativa* L.**, In Genetic Improvement of Vegetable Crops, edited by G. KALLOOB.O. BERGH, Pergamon, Amsterdam, 1993, p. 543-571.

POLAT, S.; AKSOY, A.; UNLU, K. A. *Fuzzy* Rule Based Remedial Priority Ranking System for Contaminated Sites. **Groundwater**, v. 53, p. 317-327, 2011

PREMA, K.; KUMAR, N. S.; DASH, S. S.; CHOWDARY, S. **Online control of remote operated agricultural robot using fuzzy controller and virtual instrumentation.** In: Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), 2012 International Conference on. IEEE, 2012. p. 196-201.

PUTTI, F. F. **Produção da cultura de alface irrigada com água tratada magneticamente.** 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado - Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas Botucatu, Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP. 2014.

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

RAJU, K. S.; KUMAR, D. N. *Fuzzy* data envelopment analysis for performance evaluation of an irrigation system. **Irrigation and Drainage**, v. 62, p. 170-180, 2013.

RAWABDEH, H.; SHIYAB, S.; SHIBL, R. The Effect of Irrigation by Magnetically Water on Chlorophyll and Macroelements uptake of Pepper (*Capsicum annuum* L.). Jordan **Journal of Agricultural Sciences**, v. 10, n. 2, p. 205-21, 2014

REN, J. **Nozzle fuzzy controller of agricultural spraying robot aiming toward crop rows.** In: Computer and Computing Technologies in Agriculture III. Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 198-206.

RIBEIRO, A. C. S.; FREITAS, A. L. P. Análise de regressão múltipla para identificação de fatores relevantes na qualidade do transporte rodoviário intermunicipal de passageiros. **Caderno do IME- Série Estatística**, v. 32, p.15-31, 2012.

RIVAS-PEREZ, R.; FELIU-BATLE, V.; CASTILLO-GARCIA, F. J.; LINARES-SAEZ, A. Mathematical model for robust control of an irrigation main canal pool. **Environmental Modeling & Software**, v. 51, p. 207-220, 2014.

ROSS, T. J. *Fuzzy logic with engineering applications.* 607p. 2010.

SALA, F. C.; COSTA, C. P. 'GLORIOSA': Cultivar de alface americana tropicalizada. **Horticultura Brasileira**, v. 26, p. 409-410, 2008.

SAYED, H.; EL SAYED, A. Impact of Magnetic Water Irrigation for Improve the Growth, Chemical Composition and Yield Production of Broad Bean (*Vicia faba* L.) Plant. **American Journal of Experimental Agriculture**, v. 4, n. 4, p. 476-496, 2014.

SELIM, A. F. H.; EL-NADY, M. F. Physio-anatomical responses of drought stressed tomato plants to magnetic field. **Acta Astronautica**, v. 69, n.7, p. 387-396, 2011.

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.

SNYDER, R. L.; PEDRAS, C.; MONTAZAR, A.; HENRY, J. M.; ACKLEY, D. Advances in ET-based landscape irrigation management. **Agricultural Water Management**, n. 147, p. 187-197, 2015.

SORESHJANI, M. H.; KARGAR, A.; NIAKI, S. A. N.; MARKADEH, G. A. Classical and fuzzy controllers for a hybrid flow controller. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 24, p. 1034-1046, 2014.

SOUZA, A. DE; GARCÍA, D.; SUEIRO, L.; LICEA, L.; PORRAS, E Pre-sowing magnetic treatment of tomato seeds: effects on the growth and yield of plants cultivated late in the season. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 3, n. 1, p. 113-122, 2005

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 4^o ed. Sunderland: Sinauer Associates, Inc. Publishers, 2009. 848p.

TEJEDA, M. T.; ARREDONDO, J.; PÉREZ-STAPLES, D.; RAMOS-MORALES, P.; LIEDO, P.; DÍAZ-Fleischer, F. Effects of size, sex and teneral resources on the resistance to hydric stress in the tephritid fruit fly *Anastrepha ludens*. **Journal of insect physiology**, v. 70, p. 73-80, 2014.

TIAN, Y.; ZHENG, Y.; WU, B.; WU, X.; LIU, J.; ZHENG, C. Modeling surface water-groundwater interaction in arid and semi-arid regions with intensive agriculture. **Environmental Modelling & Software**, v. 63, p. 170-184, 2015.

TOUATI, F.; AL-HITMI, M.; BENHMED, K.; TABISH, R. A *fuzzy* logic based irrigation system enhanced with wireless data logging applied to the state of Qatar. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 98, p. 233-241, 2013.

VOROSMARTY, C. J.; MACINTYRE, P. B.; GESSNER, M. O.; DUDGEON, D.; PRUSEVICH, A.; GREEN, P.; GLIDDEN, S.; BUNN, S. E.; SULLIVAN, C. A.;

LIERMANN, C. R.; DAVIES, P. M. Global threats to human water security and river biodiversity. **Nature**, v. 467, p. 1-8, 2010.

WEBER, C.; PRA, A. L. D.; PASSONI, L. I.; RABAL, H. J.; TRIVI, M.; AGUERRE, G. J. P. Determination of maize hardness by biospeckle and *fuzzy* granularity. **Food Science & Nutrition**, v. 2, p. 557-564, 2014

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)**, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

YEN, J.; LANGARI, R. **Fuzzy Logic: Intelligence, Control and Information**, EUA, Prentice-Hall. 1999, 548 p.

ZADEH, L. A. *Fuzzy sets*. **Information and control**, v. 8, n.3, p. 338-353, 1965.

ZAVALA, A. A. Z.; BOLFARINE, H.; DE CASTRO, M. Consistent estimation and testing in heteroscedastic polynomial errors-in-variables models. **Annals of the Institute of Statistical Mathematics**, v. 59, n. 3, p. 515-530, 2007.

ZHANG, T.; PAGE, T.; HEATHWAITE, L.; BEVEN, K.; OLIVER, D. M.; HAYGARTH, P. M. Estimating phosphorus delivery with its mitigation measures from soil to stream using *fuzzy* rules. **Soil Use and Management**, v. 29, p. 187-198, 2013.

Capítulo II “MODELAGEM *FUZZY* DO CRESCIMENTO DA ALFACE IRRIGADA COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE”

Resumo

O objetivo do presente artigo foi elaborar um modelo que utilizou sistemas baseados em regras *fuzzy* para o desenvolvimento da cultura da alface, submetida à diferentes taxas de reposição hídrica, bem como à água tratada magneticamente. Também foi realizado a comparação com o modelo de regressão polinomial múltiplo. Para as comprovações, foram conduzidos dois ciclos da cultura da alface em casa de vegetação, submetido à reposição hídrica de 75%, 100% e 125% da ETc. Avaliou-se semanalmente o número de folhas, fitomassa verde e seca aérea e fitomassa verde e seca de raiz a fim de determinar a taxa de crescimento. E para realizar as comparações entre os modelos, foram aplicados testes estatísticos de correlação, erro quadrado médio e exatidão do modelo. De forma geral, foi possível inferir que houve o desenvolvimento mais acentuado para os tratamentos irrigados com água tratada magneticamente em que ocorreu o adiantamento do ciclo. Para a comparação do modelo *fuzzy* com os dados coletados a campo, foi possível inferir que ocorreu o ajuste mais exato quando comparado com os resultados obtidos a partir do modelo de regressão polinomial múltiplo.

Palavras-chave: Regressão, ajuste, lógica *fuzzy* e eficiência.

Abstract

Current paper elaborates a fuzzy-based model for the development of lettuce crops submitted to different water repositions and utilizing magnetically treated water and compared to

multiple regression polynomial model. Two lettuce crop cycles were conducted in a greenhouse with water reposition rates 75%, 100% and 125% ETc. Assessments were done weekly to determine growth rates. Variables comprised number of leaves, aerial green and dry phytomass, and the roots' green and dry phytomass. Statistical tests were employed to compare models. It may be inferred that a sharper development occurred for treatments irrigated with magnetically treated water in which the cycle was anticipated. In comparing the fuzzy model with field data, a more exact adjustment occurred when compared to results given by multiple regression polynomial models.

Keywords: Regression fit, fuzzy logic magnetic water efficiency.

Introdução

A alface é umas das hortaliças mais comercializadas e consumidas no Brasil (TEXEIRA et al., 2014). Apresenta baixo valor calórico e custo, está presente em várias dietas em que favorece enormemente seu consumo. Esta hortaliça apresenta o status de componente imprescindível nas saladas dos brasileiros (FERNANDES et al., 2002; PAULUS et al., 2012).

O aumento da população mundial vem gerando certa preocupação, em vários aspectos, principalmente em relação à produção de alimentos, pois ocorre a necessidade de se produzir mais com menos recursos. Existem pesquisas que desenvolvem métodos para reduzir o ciclo das culturas ou cultivares mais resistente às questões hídricas, a fim de levar a maior produção de alimentos para suprir a demanda.

Porém, sabe-se que diversos fatores podem inibir o crescimento, tais como pH do solo, teor de umidade no solo, adubação, temperatura etc (DAVIES et al., 2000; HIMELICK, 2004; NARISAWA et al., 2005; WANG et al., 2012; WANG et al., 2011; WATSON; SHEN et al., 2011).

Buscam-se tecnologias para reduzir o tempo do ciclo das culturas, que se destacam a aplicação de CO₂ (BURGESS; HUANG, 2014), adubação orgânica e química (BARTON et al., 2006; CHEMURA, 2014), época de plantio e irrigação (GAVEH et al., 2011), frequência de irrigação (TA et al., 2012) e águas residuárias (PINTO et al., 2010; RODDA et al., 2011).

A aplicação do tratamento magnético da água utilizada para a irrigação é outra tecnologia que vêm apresentando resultados satisfatórios por meio de pesquisas. Outras diversas pesquisas apontam o aumento significativo na produtividade e qualidade. Podem-se destacar pesquisas que envolvem as culturas do milho (AODA; FATTAH, 2011), feijão (SAYED, 2014), pinhão manso (LOPES et al., 2007) e tomate (MOHMED, 2013; SELIM; EL-NADY, 2011), as quais apresentaram aumento significativo na produção.

Tal fato do aumento da produtividade pode ser oriundo do processo de indução do campo magnético na água, o qual sabe que ocorrem alterações, tais como o valor da adsorção de água em superfícies (OZEKI et al., 1996) e tensão superficial (JOSHI et al., 1966).

O crescimento da planta pode ser mensurado por meio da fitomassa verde aérea, o qual flutua em reposta às alterações do status hídrico do solo. Logo é um indiciador de como está ocorrendo o crescimento da planta (TAIZ; ZAEIGER, 2009), com isso, o déficit hídrico é um dos fatores intrínsecos no desenvolvimento.

Outro fato que pode agravar o crescimento é a umidade do ar que acarreta a redução da atividade dos estômatos e dificultar o desenvolvimento das plantas (FANOURLAKIS et al., 2013). Asama e Söber (2011) verificaram em seis diferentes condições de umidade que as plantas apresentaram desregulamentação estomacal, com consequente desidratação foliar. Rosenvald et al. (2014) verificaram que o aumento do aquecimento global causará redução no nível de umidade do ar, prejudicando a taxa de fotossíntese.

A temperatura exerce papel fundamental no crescimento vegetativo, e pode afetar a taxa fotossintética, pois acarreta a diminuição da produção de energia e assim estabiliza o crescimento. A exposição a curtos espaços de tempo a estresses térmico subletais (dentro das faixas letais) pode levar à termotolerância induzida, em que pode levar à senescência ou mesmo a um retardamento no crescimento (JAISWAL et al., 2014; LAZA et al., 2015; MATHIEU et al., 2014; TAIZ; ZAIGER, 2009).

Muitas vezes tais fatores analisados não podem ser representados em modelos estatísticos, pois são fatores que não foram controlados via experimentação. Fica difícil sua compreensão, pois as curvas dos modelos de regressão não ilustram. Neste capítulo, visou-se a aplicação da modelagem *fuzzy* para verificar o comportamento dentro

das faixas testadas experimentalmente, o efeito da variação das lâminas de irrigação e tipo de água.

As pesquisas buscaram a comprovação dos efeitos do tratamento magnético no desenvolvimento da cultura da alface, sendo utilizada a modelagem matemática *fuzzy*. De acordo com Zadeh (1965), trata-se de uma modelagem matemática que permite trabalhar com pontos de imprecisão.

Deve-se ressaltar que a lógica *fuzzy* permite diversas áreas de aplicações, como os sistemas especialistas, que visa à conversação do conhecimento empírico adquirido pela experiência em uma determinada área para algoritmos computacionais (SHAW; SIMÕES, 2011).

Também se destacam as aplicações em controladores, os quais visam a resolução de problema de automação de processos, que certos casos buscam a solução de problemas que a modelagem convencional não consegue otimizar a resposta (SHAW; SIMÕES, 2011; GOMIDE; GUDWIN, 1994)

A modelagem *fuzzy* permite compreender e analisar situações que a modelagem matemática convencional limita-se em modelar por fatores exógenos que interferem nas repostas do modelo, assim os modelos *fuzzy* permitem observar com maior precisão.

Dentro dos modelos desenvolvidos nas ciências agrárias, as análises, via regressão polinomiais, buscam a generalização dos resultados, em que os pontos testados, via experimento, são aproximados e aumentam o erro do modelo. Deste modo, a modelagem *fuzzy* permite verificar o comportamento das situações testadas via experimentação.

Na área agrônômica, diversas aplicações são encontradas, em determinação de cultivo de orquídeas (PUTTI et al., 2014), determinação da taxa de clorofila (PEREIRA et al., 2009), determinação da evapotranspiração (KISI; KERMANI, 2014; DOGAN, 2009), avaliação de solo (KURTENER; SUKHANOV, 2014), qualidade de água (NASIRI et al., 2007), previsão de chuva-vazão (SENAVIRATNE et al., 2014), irrigação e conservação na agricultura (GIUSTI; MARSILI-LIBELLI, 2015), zona de manejo de nutrientes (FU et al., 2010) e gestão da produção de algodão (PAPAGEORGIU et al., 2009).

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo *fuzzy*, visando estimar os valores das variáveis biométricas da cultura da alface em todos os valores intermediários entre as taxas mínima e máxima dos níveis de reposição hídrica adotadas e

dias após o transplântio, bem como uma metodologia específica de modelagem do experimento realizado para a elaboração do sistema *fuzzy* proposto.

Material e métodos

Descrição do experimento

O experimento foi desenvolvido em ambiente protegido, situado no Departamento de Engenharia Rural da Unesp, Faculdade Ciências Agrônômicas, Fazenda Experimental Lageado, localizada no município de Botucatu, São Paulo, cujas coordenadas geográficas são: latitude 22° 51' S, longitude 48° 26' W e altitude de 786 m. De acordo com a classificação de Köppen (KÖPPEN; GEIGER, 1928), a região apresenta clima do tipo Cfa (clima subtropical úmido). Foi realizado o experimento durante os meses de janeiro a abril de 2013, quando foram conduzidos dois ciclos com início subsequente da cultura da alface.

Na casa de vegetação instalou-se uma estação automática para a aferição da temperatura e umidade relativa do ar, e um tanque classe A para determinar a evaporação da água, as Figuras 23 e 24 apresentam a temperatura e umidade média diária e a evaporação.

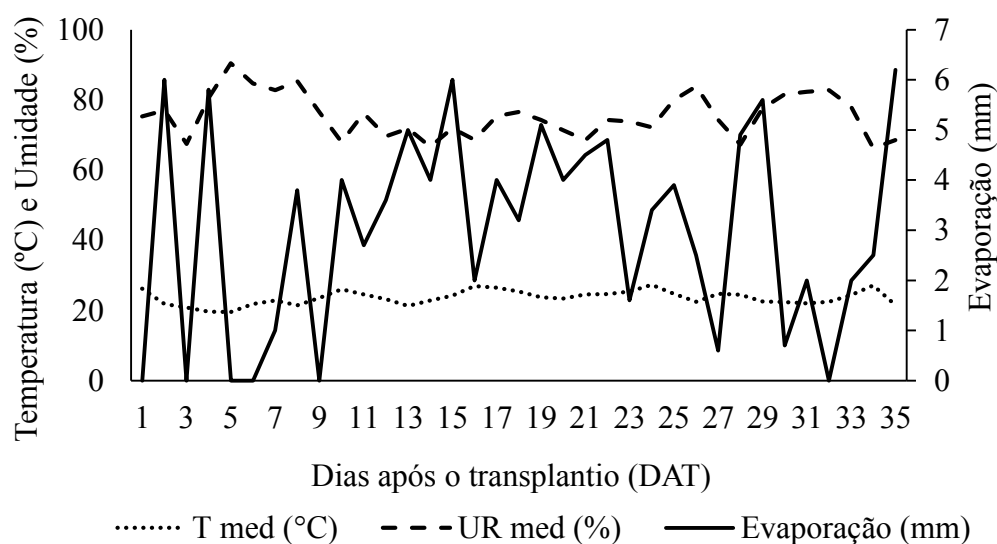


Figura 23. Evaporação diária média do tanque classe A, temperatura do ar e umidade médias relativas do ar, registrados diariamente dentro do ambiente protegido no período de avaliação da cultura da alface para o 1º ciclo.

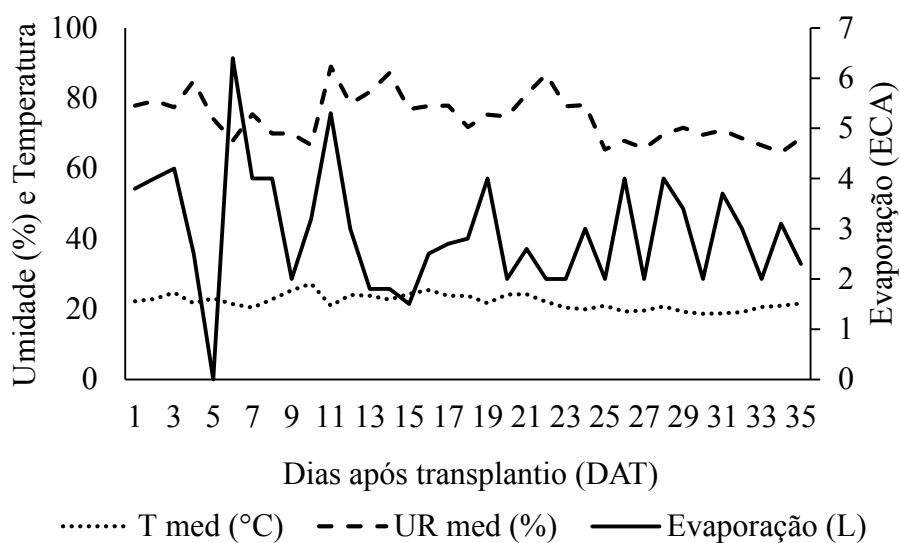


Figura 24. Evaporação diária média do tanque classe A, temperatura do ar e umidade média relativa do ar, registrados diariamente dentro do ambiente protegido no período de avaliação da cultura da alface para o 2º ciclo.

Para a determinação do coeficiente de correção do tanque classe A foi realizada a partir do método proposto por Snyder (1992), em que se desconsiderou a velocidade do vento, por estar em um ambiente protegido, assim como a bordadura. Calculou-se a evaporação (Kp) da seguinte forma:

$$Kp = 0,482 + 0,024 \ln(B) - 0,00376 \cdot V + 0,0045 \cdot UR, \quad (10)$$

em que B é a bordadura da área de vegetação em torno do tanque (m), V é a velocidade do vento a 2 m de altura (km dia^{-1}) e UR é a média da umidade relativa (%).

Realizou-se o teste de uniformidade para determinar distribuição de água do sistema de irrigação, em que o procedimento adotado foi o proposto por Merriam e Keller (1978) selecionando-se quatro linhas laterais, sendo a primeira, situada a 1/3 do início; a segunda situada a 2/3 e a última linha do sistema de irrigação. Dentro de cada linha lateral, selecionaram-se quatro emissores, sendo eles: o primeiro, situado a 1/3 do início, o situado a 2/3 e o último emissor, assim se coletaram as vazões dos emissores e calculou-se o coeficiente de uniformidade pela seguinte equação:

$$CU = \frac{q_{25}}{q_a} \quad (11)$$

em que, CU é o coeficiente de uniformidade de distribuição, q_{25} é a média das 25% menores vazões coletadas ($L h^{-1}$), q_a é a média das vazões coletadas ($L h^{-1}$).

A evapotranspiração da cultura foi determinada pela equação,

$$ETc = Kc \cdot Kp \cdot Eca \quad (12)$$

em que, ETc é a evapotranspiração da cultura ($mm \text{ dia}^{-1}$), Kc é o coeficiente da cultura [-], Kp é o coeficiente do tanque [-], Eca é a evaporação do tanque classe A ($mm \text{ dia}^{-1}$).

O coeficiente de cultura adotado foi o recomendado pelo FAO (1998) (Tabela 14).

Tabela 14. Coeficiente da cultura da alface. (FAO 56,1998)

Cultura	Kc		
	Início	Meia estação	Final
Alface	0,7	1,00	0,95

Fonte: FAO 56 (1998).

Para o cálculo da lâmina a ser aplicada, foi necessário determinar a intensidade de aplicação (I) do sistema, que foi dado pela equação:

$$IA = \frac{q}{Sg \cdot SI} \quad (13)$$

em que, SI é o espaçamento entre linha (m), Sg é o espaçamento entre gotejadores(m) e q é a vazão do emissor.

Assim, determinou-se o tempo de irrigação pela seguinte equação:

$$Ti = \frac{Etc}{Ea.IA} \quad (14)$$

em que, Ti é o tempo de irrigação (min), Etc é a evapotranspiração da cultura de referência (mm dia^{-1}), Ea é a eficiência de aplicação da água do sistema (adimensional) e I é a intensidade de aplicação.

O solo da casa de vegetação apresentou as seguintes características químicas: $\text{pH (CaCl}_2) = 5,9$; $\text{MO} = 24 \text{ g dm}^{-3}$; $\text{P (resina)} = 191 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{K} = 4,8 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{Ca} = 68 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{Mg} = 25 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{H+Al} = 17 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{SB} = 67 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{B} = 0,51 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{Cu} = 4,8 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{Fe} = 20 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{Mn} = 10,10 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{Zn} = 8 \text{ mmolc dm}^{-3}$ $\text{CTC} = 114 \text{ mmolc dm}^{-3}$; $\text{V} = 85\%$.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, com seis tratamentos em esquema fatorial 3×2 e cinco repetições, sendo a repetição uma planta de alface. Os tratamentos foram constituídos por três lâminas de irrigação (75, 100 e 125% da Etc) e dois tipos de água (água tratada magneticamente e convencional), sendo que se realizaram quatro avaliações ao longo do ciclo (14, 21, 28 e 35 Dias Após o Transplântio). Para o tratamento magnético da água foi utilizado o equipamento Sylocymol Rural. E foram construídos dois sistemas de irrigação localizados independentes, a fim de não terem interferência dos tipos de água.

Os parâmetros biométricos avaliados foram o número de folhas, fitomassa verde e seca da parte aérea, fitomassa verde e seca da raiz e também o comprimento de raiz.

Método de elaboração do sistema *fuzzy*

A modelagem matemática *fuzzy*, proposta no presente capítulo, buscou explicitar as características da produção agrônômica da cultura da alface em função do manejo de irrigação na utilização do tratamento magnético da água.

De acordo com Putti (2013), tal manejo foi realizado utilizando-se tipos de tratamento de água (água convencional (AC) e água tratada magneticamente (ATM)) e foram realizadas avaliações ao longo do ciclo (Dias Após o Transplântio (DAT)), enquanto que as características da produtividade agrônômica a serem utilizadas neste

trabalho foram as variáveis biométricas, dados por número de folha (NF), fitomassa verde aérea (FVA), fitomassa seca aérea (FSA), fitomassa verde de raiz (FVR) e fitomassa seca de raiz (FSR).

O modelo elaborado *fuzzy* considerou as lâminas mais próximas que o produtor adota, que são a de 75%, 100% e 125% da ETc, sendo que foram analisadas isoladamente.

Considerando-se um modelo de características agrônômicas desta forma, tem-se $f: X_1 \times X_2 \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^5$, com $y = f(x)$, em que \mathbb{R} é o conjunto dos números reais; em que $x = (x_1, x_2)$ é definido por $x_1 =$ Dias Após Transplântio (DAT) e $x_2 =$ tipo de água adotado na irrigação (água convencional (0) ou água tratada magneticamente (1)), com $x_1 \in X_1 = [14, 35]$, $x_2 \in X_2 = \{0,1\}$; e $y = (y_1, \dots, y_5)$, é definido pelas médias dos valores das características biométricas, a saber $y_1 = \overline{NF}$, $y_2 = \overline{PVA}$, $y_3 = \overline{PVA}$, $y_4 = \overline{PSA}$ e $y_5 = \overline{PVR}$.

Pelo fato de um dos conjuntos apresentar variáveis discretas, os resultados serão apresentados em dois gráficos bidimensionais, um para cada variável de resposta em cada ciclo, também serão realizadas para as lâminas de irrigação de 75, 100 e 125% da ETc a saber:

- Grupo 1 - gráficos das funções $F_1^0: \{0\} \times [14; 35] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_1^0(0, y) = f_1(0, y)$, em que o contradomínio de F_1^0 são relativos ao número de folhas; $F_1^1: \{1\} \times [14; 35] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_1^1(0, y) = f_1(1, y)$, no qual o contradomínio de F_1^1 são relativos ao número de folhas;
- Grupo 2 - gráficos das funções $F_2^0: \{0\} \times [14; 35] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_2^0(0, y) = f_2(0, y)$, em que o contradomínio de F_2^0 são relativos à fitomassa verde aérea; $F_2^1: \{1\} \times [14; 35] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_2^1(0, y) = f_2(1, y)$, em que o contradomínio de F_2^1 são relativos à fitomassa verde aérea;
- Grupo 3 - gráficos das funções $F_3^0: \{0\} \times [14; 35] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_3^0(0, y) = f_3(0, y)$, em que o contradomínio de F_3^0 são relativos à fitomassa seca aérea; $F_3^1: \{1\} \times [14; 35] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_3^1(0, y) = f_3(1, y)$, em que o contradomínio de F_3^1 são relativos à fitomassa seca aérea;
- Grupo 4 - gráficos das funções $F_4^0: \{0\} \times [14; 35] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_4^0(0, y) = f_4(0, y)$, em que o contradomínio de F_4^0 são relativos à fitomassa verde de raiz; $F_4^1: \{1\} \times [14; 35] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_4^1(0, y) = f_4(1, y)$, em que o contradomínio de F_4^1 são relativos à fitomassa verde de raiz;
- Grupo 5 - gráficos das funções $F_5^0: \{0\} \times [14; 35] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_5^0(0, y) = f_5(0, y)$, em que o contradomínio de F_5^0 são relativos à fitomassa seca de raiz; $F_5^1: \{1\} \times [14; 35] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_5^1(0, y) = f_5(1, y)$, em que o contradomínio de F_5^1 são relativos à fitomassa seca de raiz;

Na Figura 25 pode ser visualizado o modelo proposto em que se observam as entradas e as saídas.

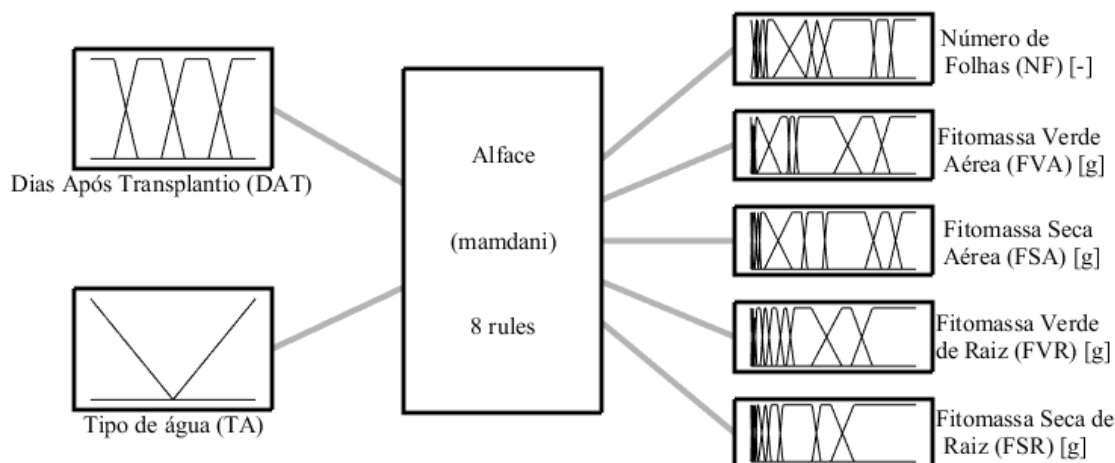


Figura 25. Sistema baseado em regras *fuzzy* para a avaliação da cultura da alface, irrigada com diferentes tipos de água e dias após transplantio e como variáveis de saída número de folhas, fitomassa verde aérea, fitomassa seca aérea, fitomassa verde de raiz, fitomassa seca de raiz.

Para a variável Dias Após o Transplantio (DAT), adotaram-se quatro avaliações ao longo do ciclo, pelo experimento agrônômico realizado, sendo realizada 14, 21, 28 e 35 DAT, foram denominadas de P1, P2, P3 e P4. Para a determinação dos quatros conjuntos *fuzzy*, que foram do tipo trapezoidal, houve a necessidade do cálculo dos delimitadores, e adotou-se de forma análoga a descrita no Capítulo 1 (Figura 6 (p. 28) e a Tabela 5 (p.28)).

No desenvolvimento dos conjuntos *fuzzy*, para a variável tipo de água, adotou-se um conjunto *fuzzy* com função de pertinência do tipo triangular, por se tratar de uma variável “discreta”. Logo, nas simulações realizadas, foi somente utilizado o valor que apresente o grau de pertinência igual a 1, a saber: tipo de água igual = 0 (água convencional) ou tipo de água = 1 (água tratada magneticamente).

Adotaram-se dois conjuntos, para a variável de entrada “lâmina de irrigação” (AC e ATM) (Tabela 15 e Figura 26).

Tabela 15. Definições dos conjuntos *fuzzy* com suas respectivas funções de pertinência da variável de entrada “tipo de água”.

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
AC	Triangular	[-0,5 0 0,5]
ATM	Triangular	[0,5 1 1,5]

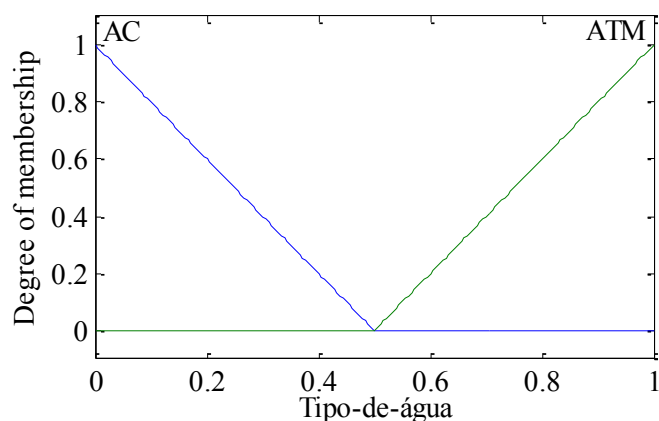


Figura 26. Funções de pertinência definidas para os conjuntos *fuzzy* da variável de entrada “tipo de água”.

Nas variáveis de saída do modelo *fuzzy*, adotaram-se as que apresentaram diferenças significativas, sendo o número de folhas, fitomassa verde da parte aérea, fitomassa seca da parte aérea, fitomassa verde de raiz e fitomassa seca de raiz. Na determinação dos delimitadores foi realizada de forma análoga à descrita Capítulo 1, que considerou dez conjuntos *fuzzy* do tipo trapezoidal.

A base de regra do sistema *fuzzy*, proposto neste capítulo, foi semelhante à implementada no Capítulo 1, em que foi adaptada de Cremasco et al. (2010) e Gabriel Filho et al. (2011), sendo elaborados oito pares de regras (*Dias após transplantio x Tipo de água*) e associada às cinco variáveis de saída (Tabela 16).

Tabela 16. Combinações das variáveis de entrada com os pontos de grau de pertinência 1 associados aos conjuntos *fuzzy* para a construção da base de regras.

Variáveis de entrada			
Dias após Transplantio			
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1	Tipo de água	
P1	14	AC	
P2	21	AC	
P3	28	AC	
P4	35	AC	
P1	14	ATM	
P2	21	ATM	
P3	28	ATM	
P4	35	ATM	

Legenda: ATM: água tratada magneticamente; AC: água convencional; P1: 14 DAT; P2: 21 DAT; P3: 28 DAT; P4: 35 DAT;

Deste modo, calculou-se o maior grau de pertinência de cada mediana a cada tratamento e assim associando ao conjunto *fuzzy* que pertence, e associado às variáveis de entrada. No cálculo da inferência, adotou-se o método proposto por Mandani e para a defuzzyficação do sistema considerou-se o método aéreo ou centroide.

Para a análise preliminar dos dados, foram adotados os pressupostos do Capítulo 1, em que se realizou o teste de normalidade e da homocedasticidade. Assim, foi possível desenvolver os modelos de regressões polinomiais múltiplas. Após a determinação das equações, foi possível analisar o grau de intensidade de associação entre os modelos desenvolvidos com os dados coletados a campo, sendo utilizados como parâmetro os valores do erro quadrado médio (EQM), coeficiente de correlação de Pearson (r) e o índice “d” de Wilmott et al. (1985).

Para o desenvolvimento dos sistemas baseados em regras *fuzzy* (SBRF), foi utilizado o *software* Matlab, versão 8.4 (2014), que por meio dele realizaram-se as simulações das variáveis de repostas. A partir das simulações realizadas no Matlab, juntamente com as dos modelos de regressões, foi possível a elaboração dos gráficos, os quais foram desenvolvidos em planilha eletrônica do pacote Microsoft Office. Para o cálculo dos modelos de regressões múltiplas utilizou-se o *software* estatístico Minitab, versão 17.0 (2014).

Resultados e discussão

Equações de ajuste

A partir da verificação dos pressupostos (homocedasticidade e normalidade) dos dados coletados em campo, foram desenvolvidos os modelos estatísticos que melhor se ajustaram. Para as determinações dos modelos utilizados no presente trabalho, foram eleitos os que apresentaram menor valor de p e maior valor de R^2 , que geraram as equações polinomiais múltiplas que podem ser visualizadas na Tabela 17.

Tabela 17. Equações de ajuste do modelo estatístico utilizando regressão polinomial múltipla.

% da ETC	Variável	Ciclo	$y = \beta_0 + ax_1 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3$					R ²
			β_0	a	a_1	a_2	a_3	
75	NF	1º	44,4*	1,35*	- 5,88*	0,224*	- 0,0022	0,97*
		2º	-17,65*	3,5*	2,98*	-0,121*	0,0019	0,92*
	FVA	1º	-4,4	22,24*	5,56*	- 0,747	0,0231	0,96*
		2º	-479,2*	75,16*	68,94*	- 3,478*	0,06	0,90*
	FSA	1º	10,69*	0,34*	-1,45*	0,00548	- 0,00043	0,96*
		2º	5,95*	-0,33*	-0,82*	0,032*	- 0,000145	0,96*
	FVR	1º	-10,45*	0,89*	1,62*	- 0,085*	0,0016	0,87*
		2º	-15,32*	1,51	2,48*	-0,129*	0,0022	0,85*
	FSR	1º	-2,22*	0,02*	0,364*	- 0,0192	0,000344	0,82*
		2º	-1,9*	0,31*	-0,08	-0,0165*	0,000296	0,85*
100	NF	1º	28,875*	3,65	- 3,38*	0,12	- 0,00063	0,92*
		2º	-15,02*	3,85*	2,55*	- 0,1	0,0016	0,92*
	FVA	1º	-10,81*	54,39*	4,81*	- 0,758	0,0237	0,91*
		2º	-354,8*	91,84*	48,30*	- 2,457*	0,0444	0,82*
	FSA	1º	77,68*	57,39*	- 8,39*	- 0,14	0,015	0,87*
		2º	-8,33*	1,02*	3,45	- 0,056	0,00122	0,88*
	FVR	1º	- 4,12*	2,26*	0,619	- 0,041	0,001	0,87*
		2º	-12,52*	2,72*	1,83*	- 0,0925	0,00165	0,85*
	FSR	1º	-1,86*	0,38*	0,28*	- 0,015	0,0003	0,82*
		2º	2,43*	0,24	- 0,25*	0,0078*	-0,00005	0,75*
125	NF	1º	-10,95*	- 0,1	2,52*	- 0,137	0,0029	0,94*
		2º	-14,6*	1,2*	2,55*	- 0,094	0,00145	0,92*
	FVA	1º	-351,6*	- 11,8*	58,26*	- 3,12	0,0567	0,93*
		2º	71,91*	15,18*	- 7,9*	0,0754	0,0081	0,96*
	FSA	1º	-10,23*	- 0,83	1,71*	- 0,0924	0,0017	0,91*
		2º	10,63*	0,85	- 1,51*	0,0571	- 0,00037	0,95*
	FVR	1º	-25,26*	- 1,23	3,86*	- 0,18	0,003	0,91*
		2º	-4,25*	0,74	0,82*	- 0,05	0,0011	0,91*
	FSR	1º	-3,64*	- 0,15*	0,57*	- 0,0286	0,000474	0,86*
		2º	1,47*	0,05	- 0,13*	0,0034	-0,0000001	0,90*

Legenda: NF número de folha; FVA fitomassa verde aérea; FSA fitomassa seca aérea; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seca de raiz; x_1 tipo de água; x_2 Lâmina de irrigação e * significativo para $\alpha = 5\%$.

Sistema *fuzzy* desenvolvido

A partir da construção das funções de pertinência de saída do modelo *fuzzy* elaborado, foi possível observar nas Figuras 27 a 32 os conjuntos de pertinência para cada variável biométrica em seu respectivo ciclo.

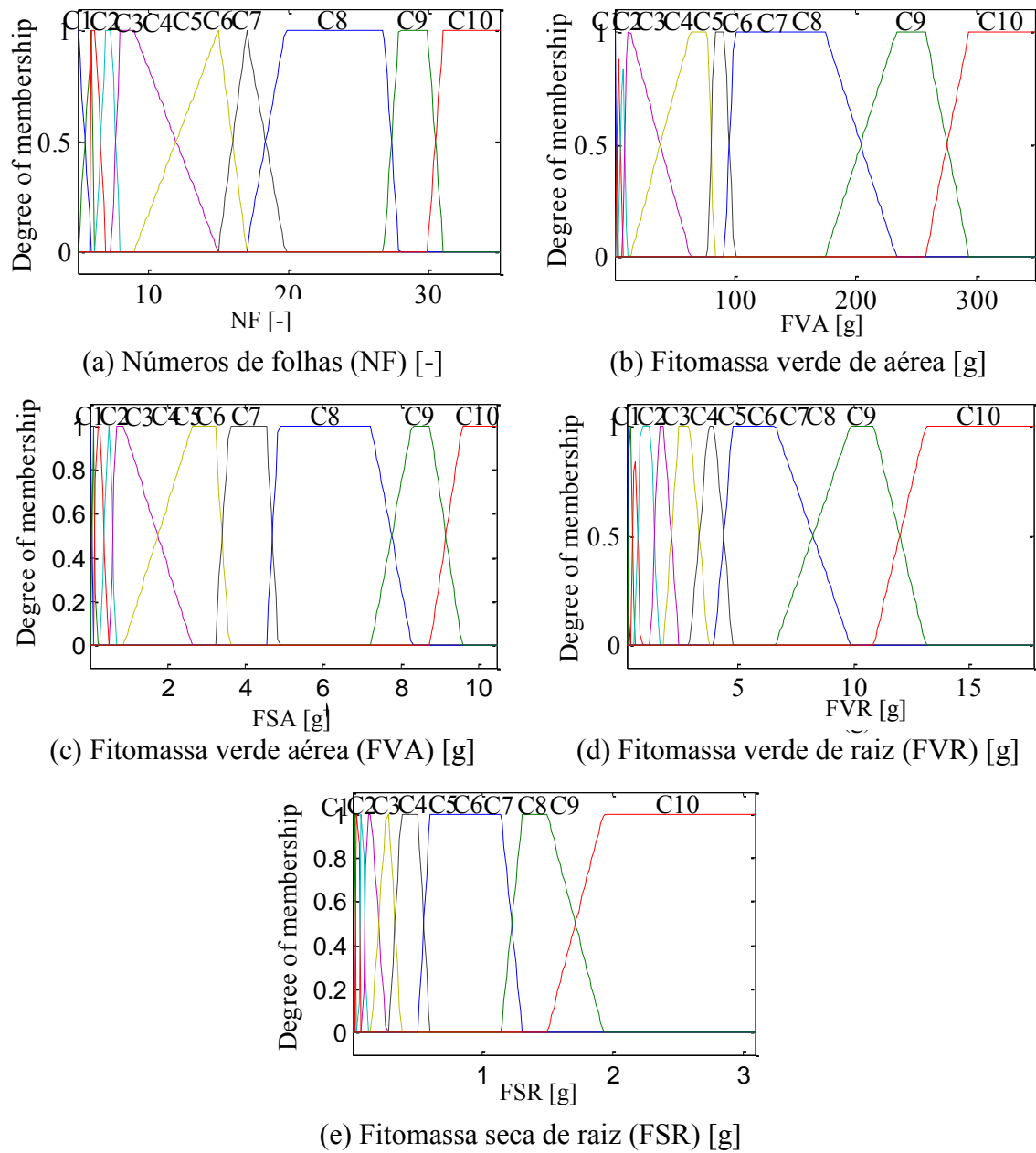


Figura 27. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura da alface avaliadas ao longo do ciclo, na lâmina de 75% da ETc, para o 1º ciclo.

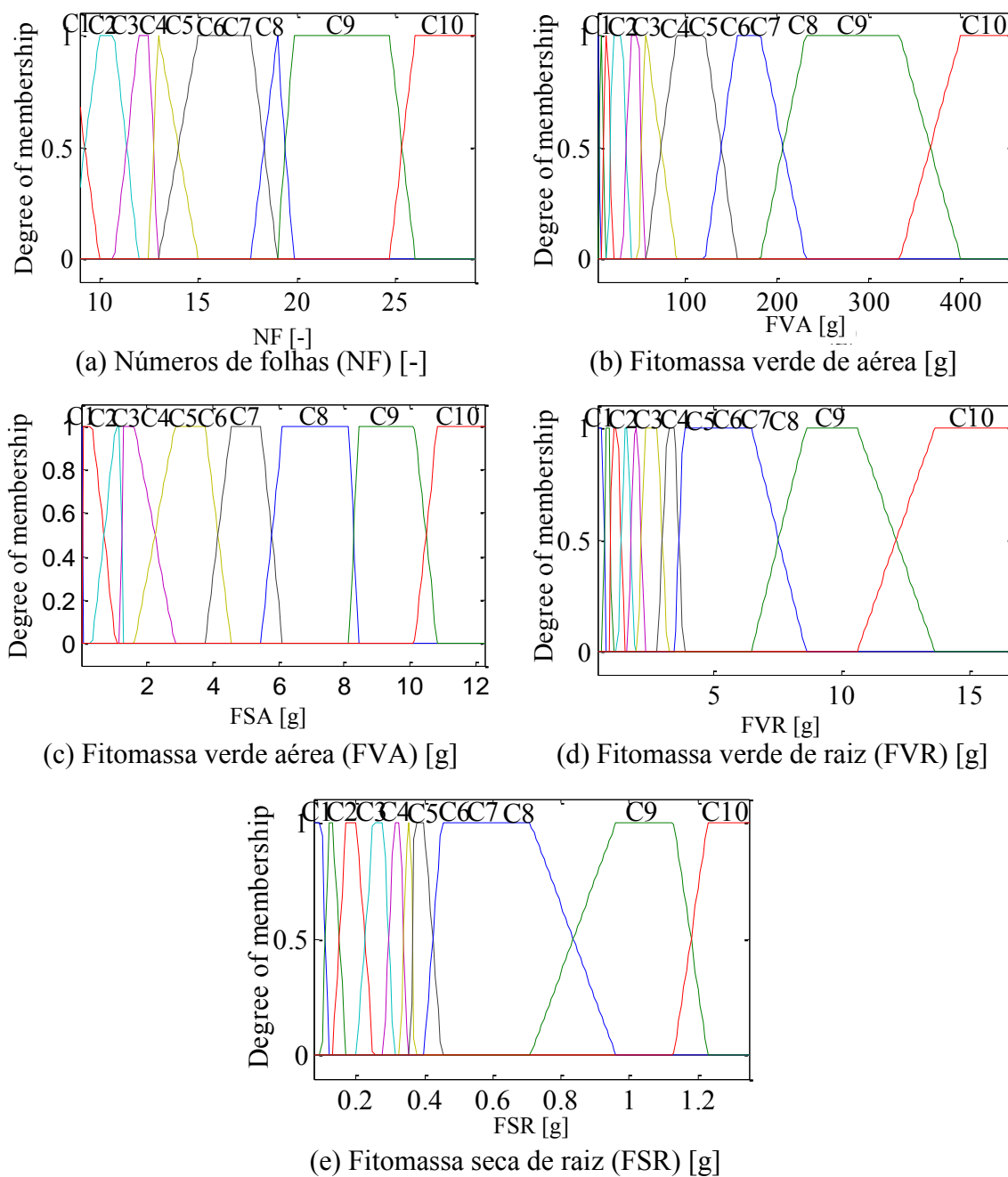


Figura 28. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura da alface avaliadas ao longo do ciclo, na lâmina de 75% da ETc, para o 2º ciclo.

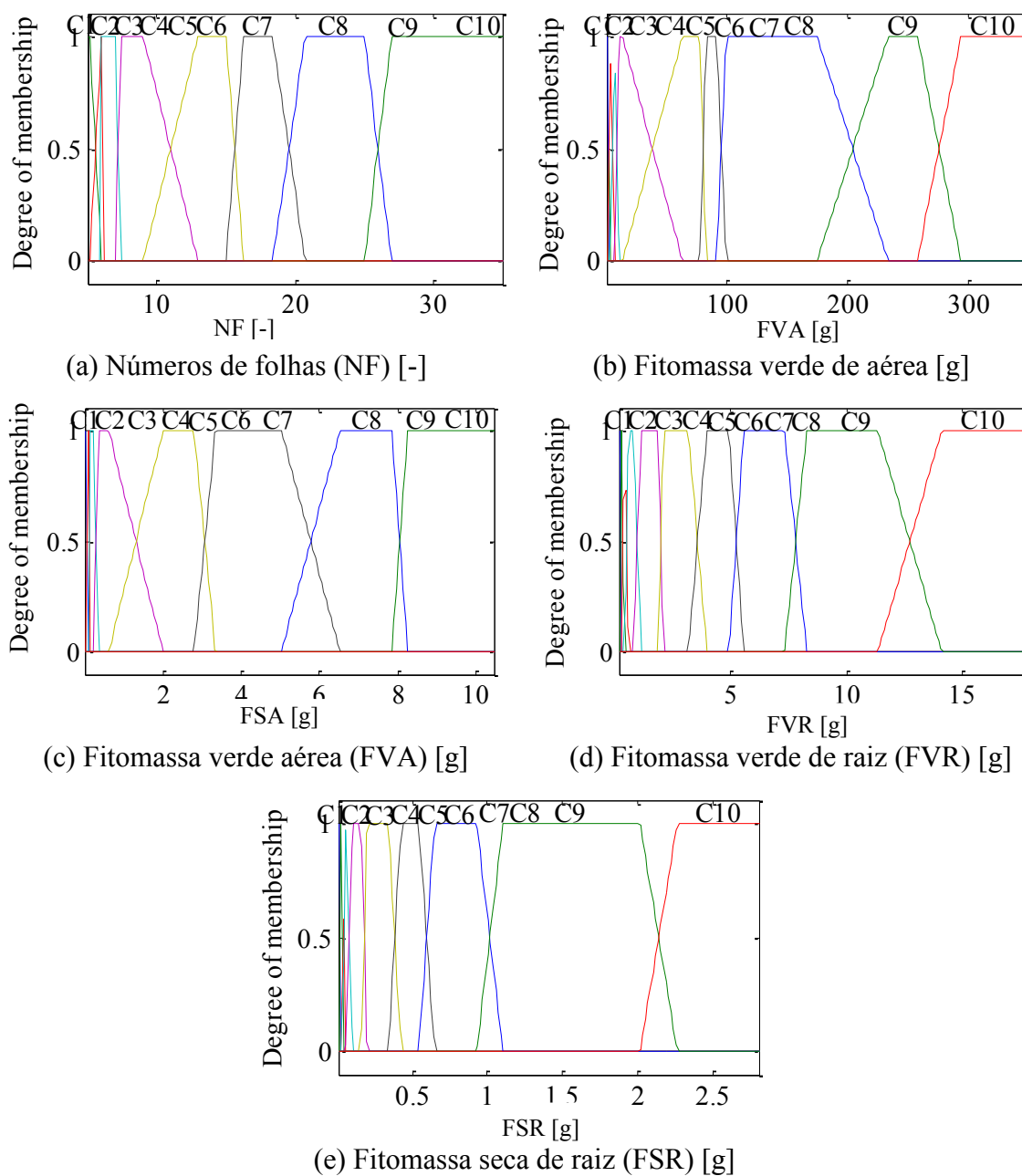


Figura 29. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura da alface avaliadas ao longo do ciclo, na lâmina de 100% da ETc, para o 1º ciclo.

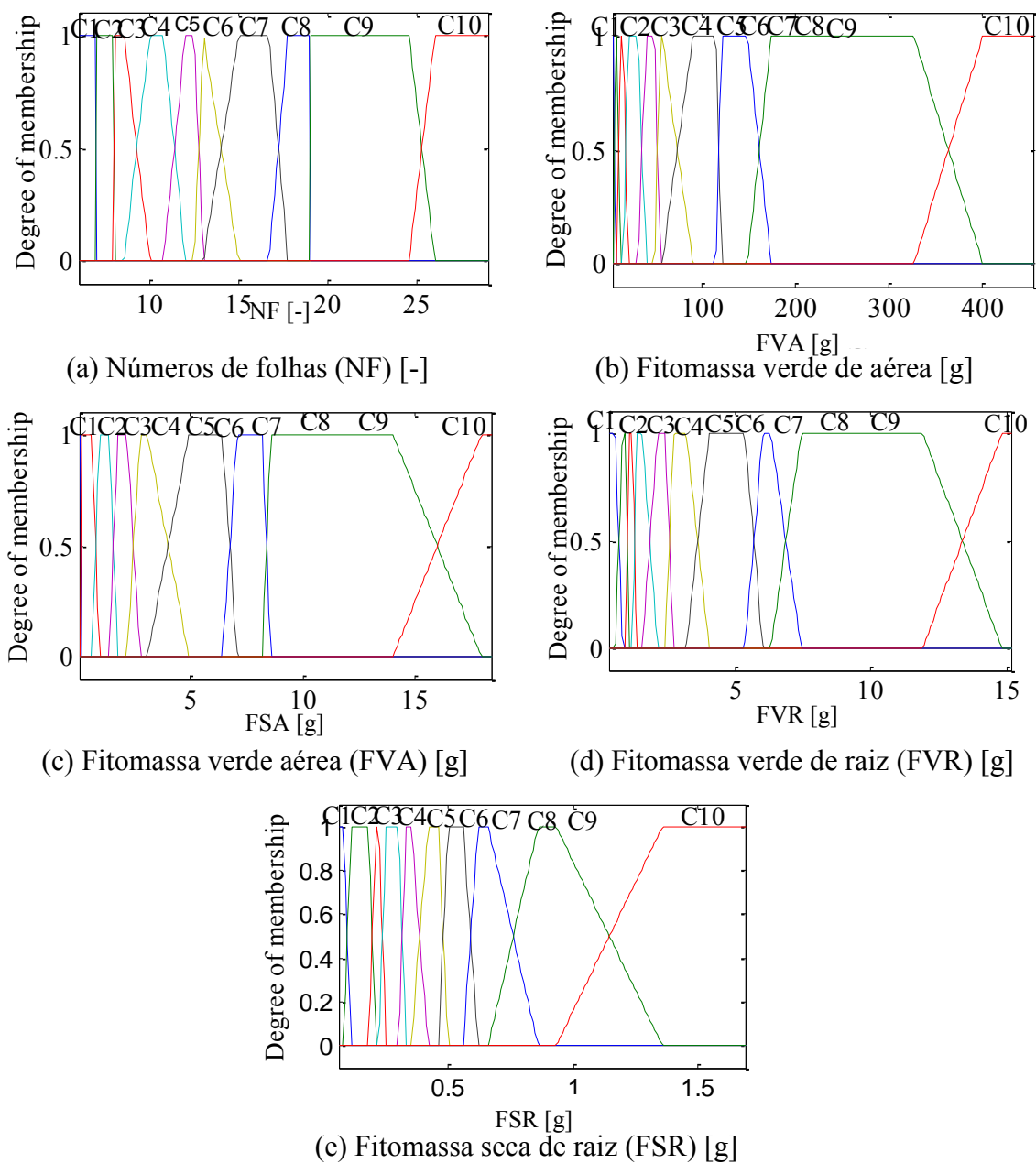


Figura 30. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura da alface avaliadas ao longo do ciclo, na lâmina de 100% da ETc, para o 2º ciclo.

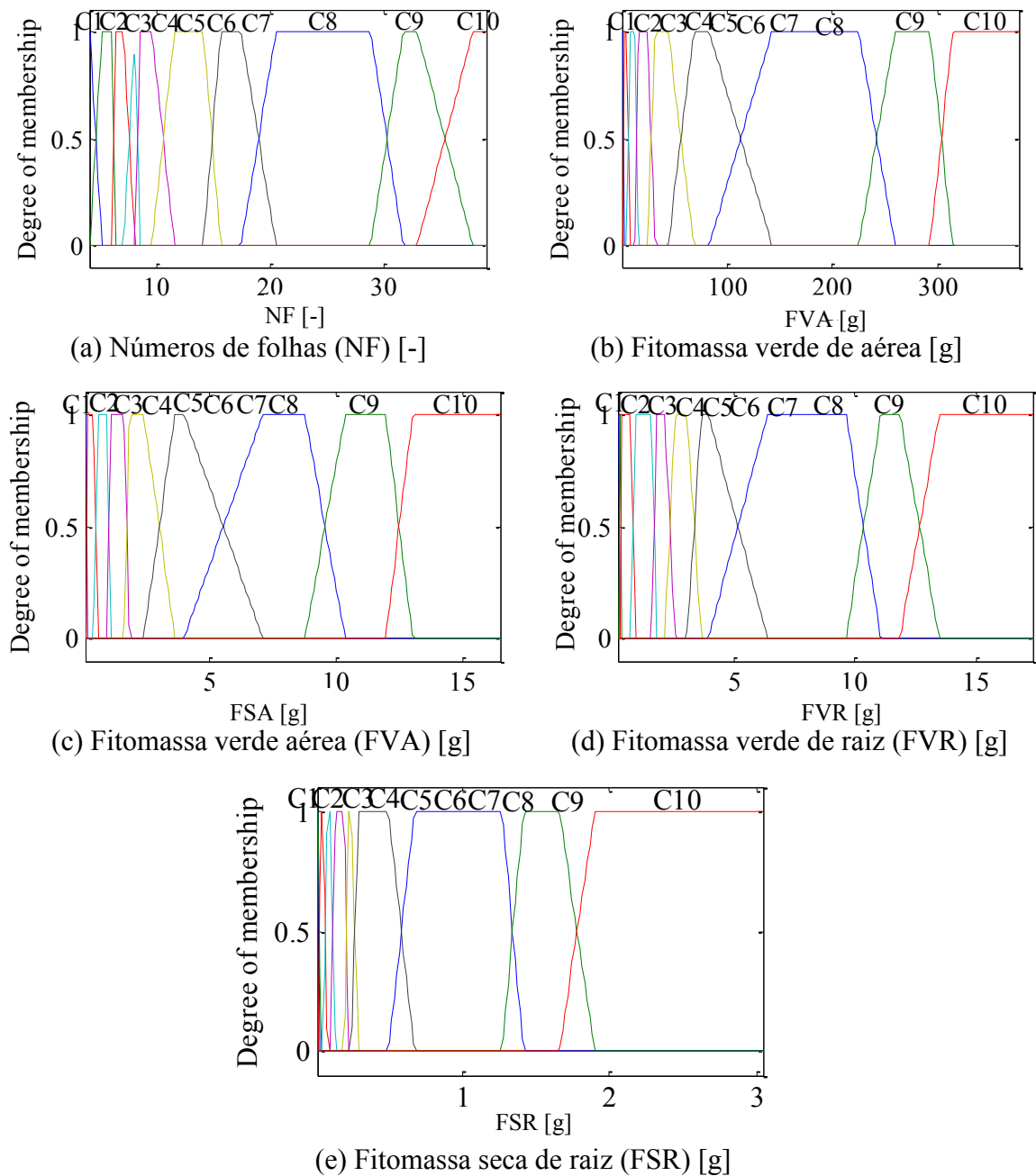


Figura 31. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura da alface avaliadas ao longo do ciclo, na lâmina de 125% da ETc, para o 1º ciclo.

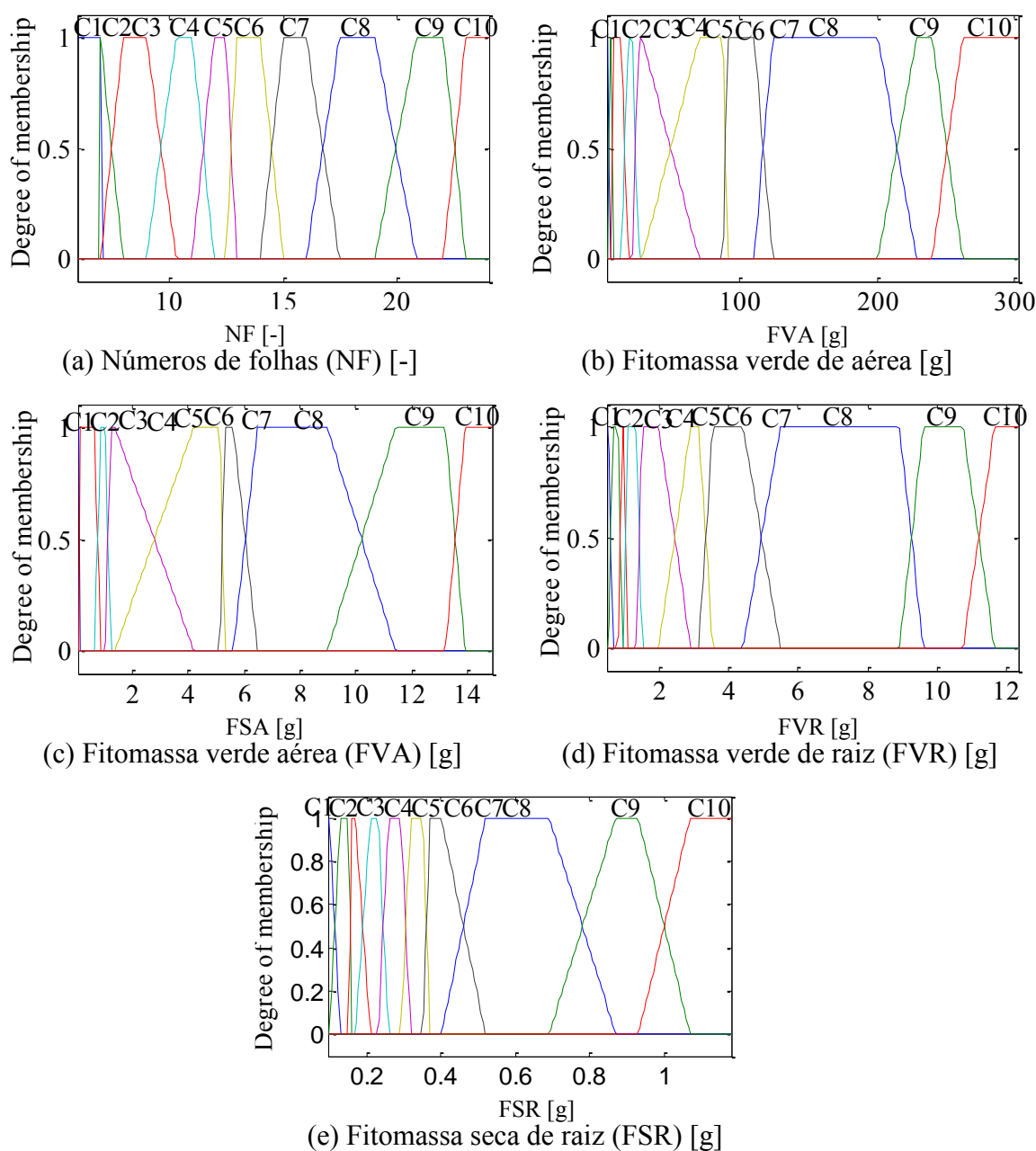


Figura 32. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura da alface avaliadas ao longo do ciclo, na lâmina de 125% da ETc, para o 2º ciclo.

As funções de pertinência foram elaboradas a partir das variáveis biométricas analisadas; foi possível associar o maior grau de pertinência para cada avaliação que foi realizada para a cultura da alface, quando submetida à irrigação com ATM e AC, sendo realizado analogamente para cada ciclo conduzido do experimento. A partir da associação, foi elaborada a base de regras, em que está apresentada nas Tabelas 18 a 23.

Tabela 18. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy* para a lâmina de irrigação 75% da ETc do 1º ciclo.

Variáveis de entrada				Variáveis de saída									
Dias Após Transplântio		Tipo de água	NF	CF	FVA	CF	FSA	CF	FVR	CF	FSR	CF	
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1												
P1	14	AC	6	C3	1,98	C2	0,12	C2	0,26	C2	0,03	C2	
P2	21	AC	8	C5	7,54	C5	0,52	C5	1,17	C6	0,12	C5	
P3	28	AC	17	C6	87,34	C7	4,23	C7	3,32	C8	0,28	C7	
P4	35	AC	31	C9	294,69	C9	9,18	C9	13,13	C9	1,51	C10	
P1	14	ATM	6	C3	1,32	C3	0,09	C3	0,26	C2	0,02	C2	
P2	21	ATM	7	C5	8,39	C4	0,55	C5	1,74	C5	0,08	C5	
P3	28	ATM	15	C7	76,69	C8	3,31	C8	3,86	C7	0,41	C7	
P4	35	ATM	28	C10	234,64	C10	8,29	C10	9,14	C10	1,47	C10	

Legenda: ATM: água tratada magneticamente; AC: água convencional; P1: 14 DAT; P2: 21 DAT; P3: 28 DAT; P4: 35 DAT; NF número de folha; FVA fitomassa verde aéreo; FSA fitomassa seco aéreo; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassaseco de raiz e CF; conjunto *fuzzy*

Tabela 19. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy* para a lâmina de irrigação 100% da ETc do 1º ciclo.

Variáveis de entrada			Variáveis de saída									
Dias Após Transplântio		Tipo de água	NF	CF	FVA	CF	FSA	CF	FVR	CF	FSR	CF
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1											
P1	14	AC	5	C4	1,72	C2	0,10	C2	0,25	C2	0,02	C2
P2	21	AC	6	C5	2,28	C5	0,14	C5	0,63	C5	0,05	C5
P3	28	AC	19	C7	118,12	C7	5,44	C7	5,12	C7	0,64	C7
P4	35	AC	39	C9	351,35	C9	12,14	C9	14,13	C9	2,27	C9
P1	14	ATM	6	C2	1,01	C3	0,06	C3	0,25	C2	0,02	C3
P2	21	ATM	7	C4	4,70	C4	0,32	C4	0,92	C4	0,06	C5
P3	28	ATM	15	C8	53,44	C8	2,80	C8	3,11	C8	0,31	C8
P4	35	ATM	27	C10	200,14	C10	8,26	C10	7,95	C10	1,03	C10

Legenda: ATM: água tratada magneticamente; AC: água convencional; P1: 14 DAT; P2: 21 DAT; P3: 28 DAT; P4: 35 DAT; NF número de folha; FVA fitomassa verde aéreo; FSA fitomassa seco aéreo; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seco de raiz e CF; conjunto *fuzzy*.

Tabela 20. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy* para a lâmina de irrigação 125% da ETc do 1º ciclo.

Variáveis de entrada			Variáveis de saída									
Dias Após Transplântio		Tipo de água										
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1		NF	CF	FVA	CF	FSA	CF	FVR	CF	FSR	CF
P1	14	AC	6	C2	1,59	C2	0,09	C2	0,31	C2	0,03	C2
P2	21	AC	8	C5	7,17	C5	0,48	C5	0,89	C5	0,09	C6
P3	28	AC	14	C7	41,02	C8	2,10	C8	2,51	C8	0,25	C8
P4	35	AC	35	C9	292,28	C10	11,48	C10	11,24	C10	1,66	C10
P1	14	ATM	5	C3	1,06	C3	0,07	C3	0,25	C3	0,02	C2
P2	21	ATM	8	C5	17,15	C4	1,12	C4	1,80	C4	0,18	C4
P3	28	ATM	16	C7	78,06	C7	3,88	C7	3,87	C6	0,41	C7
P4	35	ATM	32	C10	291,60	C10	12,20	C10	12,26	C9	1,60	C10

Legenda: ATM: água tratada magneticamente; AC: água convencional; P1: 14 DAT; P2: 21 DAT; P3: 28 DAT; P4: 35 DAT; NF número de folha; FVA fitomassa verde aéreo; FSA fitomassa seco aéreo; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seco de raiz e CF; conjunto *fuzzy*

Tabela 21. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy* para a lâmina de irrigação 75% da ETc do 2º ciclo.

Variáveis de entrada			Variáveis de saída									
Dias Após Transplântio		Tipo de água										
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1		NF	CF	FVA	CF	FSA	CF	FVR	CF	FSR	CF
P1	14	AC	8	C2	10,60	C2	0,07	C2	0,98	C2	0,03	C5
P2	21	AC	13	C4	43,28	C4	1,20	C5	1,53	C4	0,12	C2
P3	28	AC	17	C7	123,08	C6	3,98	C8	2,95	C7	0,28	C6
P4	35	AC	26	C9	400,81	C9	9,01	C10	13,70	C9	1,32	C10
P1	14	ATM	7	C3	4,50	C3	0,04	C3	0,69	C3	0,02	C6
P2	21	ATM	10	C7	19,68	C5	1,18	C5	1,18	C4	0,08	C3
P3	28	ATM	13	C8	55,24	C8	5,36	C7	3,27	C7	0,41	C7
P4	35	ATM	19	C10	225,28	C10	10,27	C9	7,21	C10	1,47	C9

Legenda: ATM: água tratada magneticamente; AC: água convencional; P1: 14 DAT; P2: 21 DAT; P3: 28 DAT; P4: 35 DAT; NF número de folha; FVA fitomassa verde aéreo; FSA fitomassa seco aéreo; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seco de raiz e CF; conjunto *fuzzy*

Tabela 22. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy* para a lâmina de irrigação 100% da ETc do 2 ° ciclo.

Variáveis de entrada			Variáveis de saída									
Dias Após Transplântio		Tipo de água										
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1		NF	CF	FVA	CF	FSA	CF	FVR	CF	FSR	CF
P1	14	AC	8	C2	10,60	C2	0,08	C2	1,35	C2	0,46	C3
P2	21	AC	13	C4	43,28	C4	1,85	C4	2,81	C3	0,28	C2
P3	28	AC	17	C7	123,08	C6	6,41	C7	4,84	C6	0,34	C7
P4	35	AC	26	C9	400,81	C9	18,00	C9	14,85	C9	1,37	C9
P1	14	ATM	7	C3	4,50	C3	0,03	C3	0,56	C4	0,21	C7
P2	21	ATM	10	C7	19,68	C5	0,90	C5	1,06	C6	0,08	C5
P3	28	ATM	13	C8	55,24	C8	2,97	C8	2,46	C8	0,46	C5
P4	35	ATM	19	C10	151,88	C10	8,40	C10	6,54	C10	0,67	C10

Legenda: ATM: água tratada magneticamente; AC: água convencional; P1: 14 DAT; P2: 21 DAT; P3: 28 DAT; P4: 35 DAT; NF número de folha; FVA fitomassa verde aéreo; FSA fitomassa seco aéreo; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seco de raiz e CF; conjunto *fuzzy*

Tabela 23. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy* para a lâmina de irrigação 125% da ETc do 2 ° ciclo.

Variáveis de entrada			Variáveis de saída									
Dias Após Transplântio		Tipo de água										
Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1		NF	CF	FVA	CF	FSA	CF	FVR	CF	FSR	CF
P1	14	AC	7	C3	5,28	C3	0,04	C2	0,69	C3	0,23	C2
P2	21	AC	12	C5	21,08	C5	0,99	C5	1,41	C5	0,13	C3
P3	28	AC	15	C7	109,32	C7	5,50	C7	4,60	C7	0,41	C6
P4	35	AC	23	C10	262,59	C9	13,94	C9	11,49	C9	1,02	C9
P1	14	ATM	7	C3	6,51	C2	0,05	C2	0,90	C2	0,25	C2
P2	21	ATM	11	C5	22,42	C5	1,08	C5	1,32	C5	0,16	C5
P3	28	ATM	14	C7	89,36	C8	5,15	C8	3,19	C8	0,32	C8
P4	35	ATM	19	C10	223,81	C10	9,77	C10	9,10	C10	0,75	C10

Legenda: ATM: água tratada magneticamente; AC: água convencional; P1: 14 DAT; P2: 21 DAT; P3: 28 DAT; P4: 35 DAT; NF número de folha; FVA fitomassa verde aéreo; FSA fitomassa seco aéreo; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seco de raiz e CF; conjunto *fuzzy*

As três primeiras linhas da Tabela 23 representam as seguintes relações; as demais linhas são representadas de forma análoga:

- Se (DAT é “P1”) e (tipo de água “AC”) então (NF é “C3”, FVA é “C2”, FSA é “C2”, FVR é “C2” e FSR é “C2”);
- Se (DAT é “P1”) e (tipo de água “AC”) então (NF é “C5”, FVA é “C5”, FSA é “C5”, FVR é “C5”, FSR é “C6” e CR é “C5”);
- Se (DAT é “P1”) e (tipo de água “AC”) então (NF é “C6”, FVA é “C7”, FSA é “C8”, FVR é “C7” e FSR é “C7”).

Simulação do modelo

Após a elaboração do modelo *fuzzy*, foi possível implementar simulações de diversos cenários no Matlab, com variação do tipo de água ao longo do ciclo para cada taxa de reposição analisada. Também foram elaboradas as simulações das equações de regressão, que possibilitou elaborar as Figuras 39 a 47, para as variáveis de saída.

No desenvolvimento dos modelos *fuzzy* e de regressão para a verificação do desenvolvimento da cultura da alface, pode-se determinar que para os tratamentos irrigados com ATM ocorreu a colheita antecipada, quando comparada com o irrigado com AC.

Para a taxa de reposição de 75% da ETc, verificou-se que o número de folhas para a irrigação com ATM apresentou maior incremento (Figura 33).

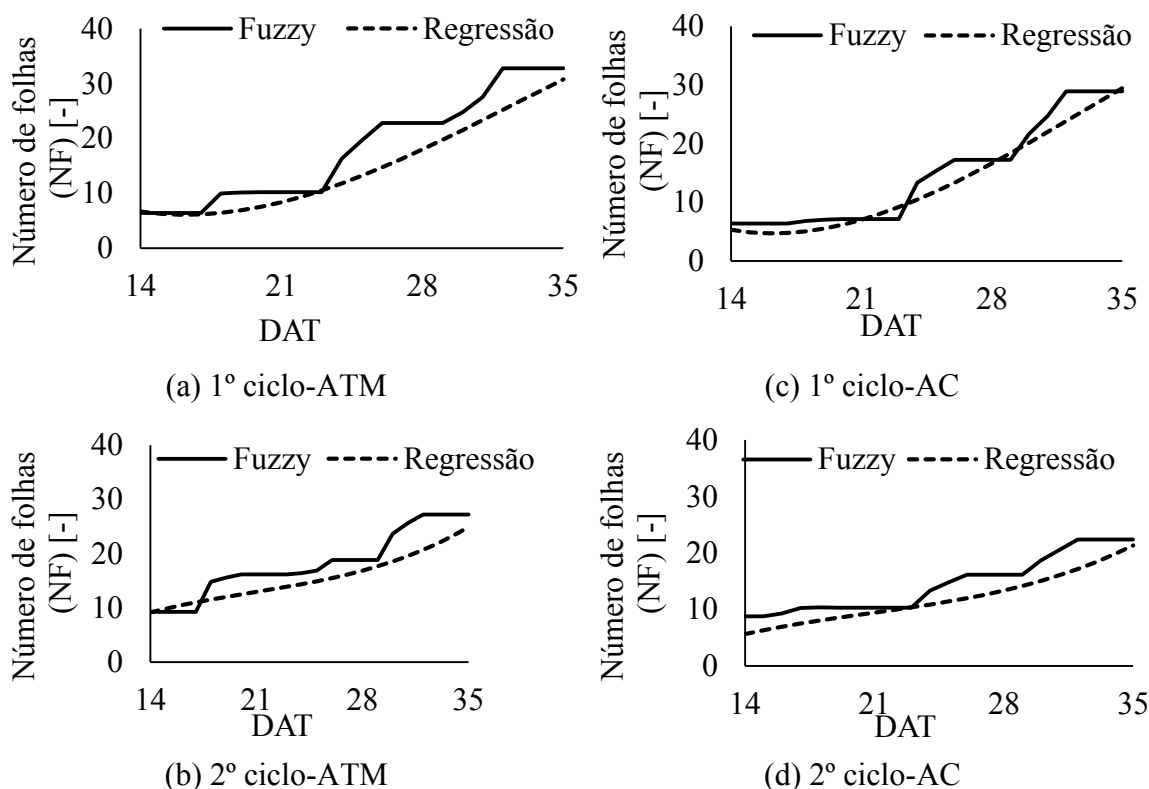


Figura 33. Modelos *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento do número de folhas da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 75% da ETC.

No 1º ciclo, houve um incremento no número de folhas superior, para os tratamentos irrigados com ATM, a produção foi em torno de 35 folhas no final do ciclo, enquanto o irrigado com AC produziu apenas 30 folhas (Figuras 33a e b). Deve-se ressaltar que o mesmo número de folhas atingido ao final do ciclo para os tratamentos irrigados com AC foi produzido com aproximadamente quatro dias antes ao ser irrigado com ATM.

Efeito similar foi observado para o 2º ciclo, onde ocorreu o maior acúmulo para os tratamentos irrigados com ATM; também se verificou a redução nos dias, que foram em torno de quatro dias (Figuras 33c e d).

Na análise da fitomassa verde aérea pode-se verificar que o comportamento foi muito similar ao do número de folhas, pois os tratamentos irrigados com ATM apresentaram maior desenvolvimento (Figura 34).

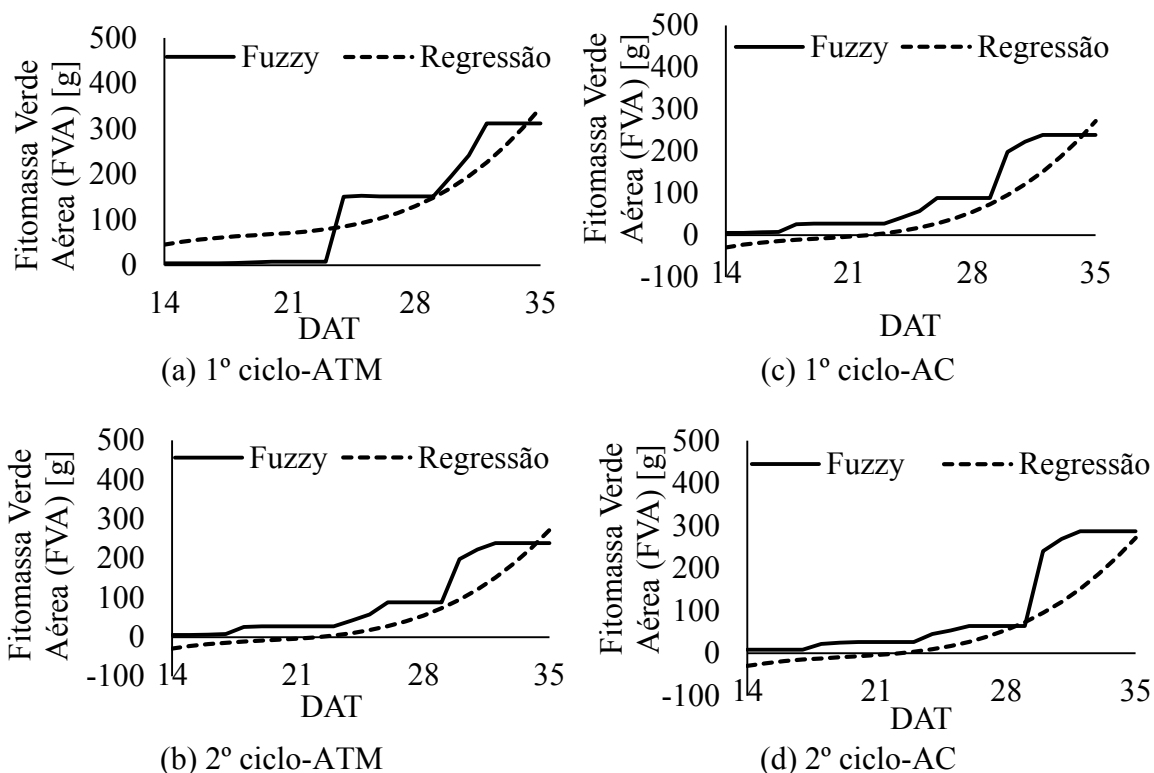


Figura 34. Modelos *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento do fitomassa verde aérea da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 75% da ETc.

Utilizando os modelos *fuzzy* e de regressão, verificou-se que houve maior desenvolvimento da cultura ao ser submetida à irrigação com ATM. No 1º ciclo, o maior incremento e a redução foram de três dias do ciclo quando irrigado com ATM, para atingir a mesma produção irrigada com AC (Figuras 34a e b).

Ao realizar a análise do 2º ciclo, notou-se que ocorreu maior incremento para o tratamento que foi irrigado com AC (Figuras 34c e d).

Para a fitomassa seca aérea, pode-se inferir que obteve um resultado similar ao ocorrido com a fitomassa verde aérea, pois os tratamentos irrigados com água convencional apresentaram maior acúmulo, conforme podemos observar na Figura 35.

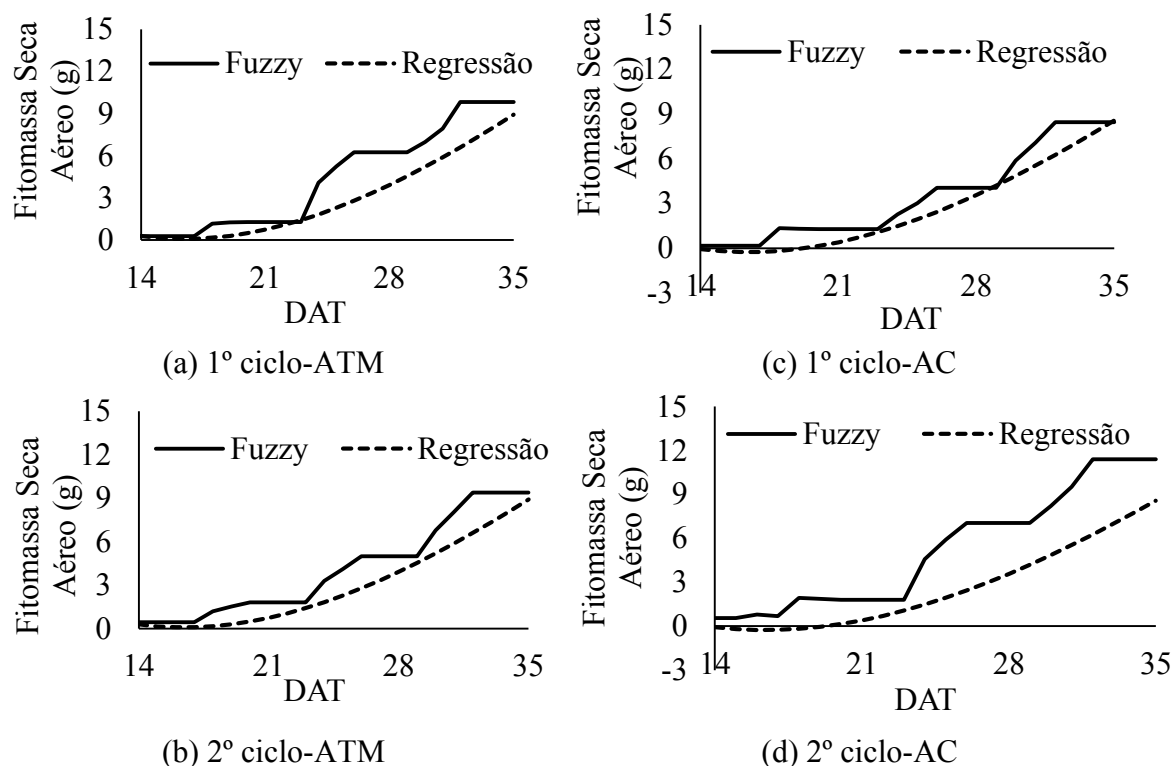


Figura 35. Modelos *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento do fitomassa seca de aérea da cultura da alfaca irrigada com a taxa de reposição de 75% da ETc.

Observa-se que para o 1º ciclo ocorreu maior incremento para o tratamento irrigado com ATM, a fitomassa seca aérea está diretamente relacionada com a fitomassa verde aérea (Figuras35a e b). O efeito contrário para o 2º ciclo, em que o tratamento irrigado com AC, apresentou maior desenvolvimento (Figuras35c e d).

Na análise do modelo *fuzzy* e das equações de regressão foi possível verificar que a da fitomassa verde de raiz apresentou resultados diferentes para cada ciclo (Figura 36).

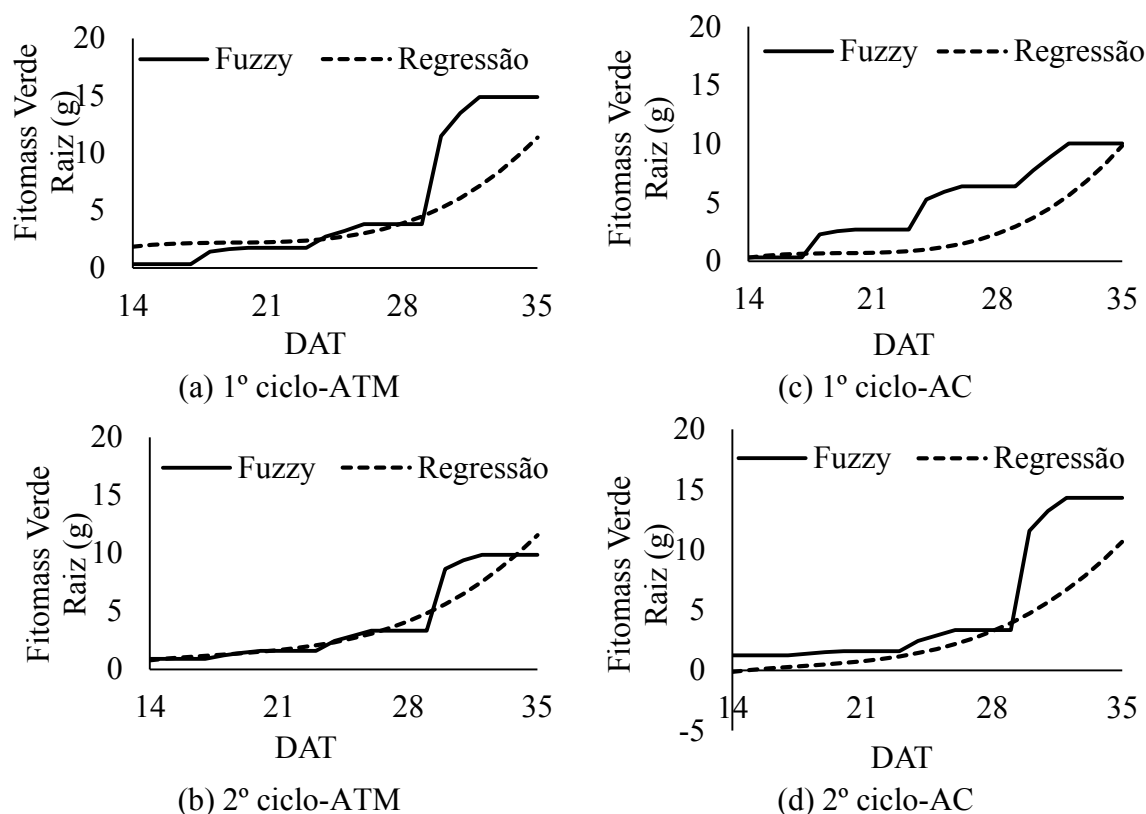


Figura 36. Modelos *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa verde de raiz da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 75% da ETC.

A partir do modelo *fuzzy*, foi possível verificar que houve para o 1º ciclo o maior desenvolvimento da fitomassa verde de raiz quando submetido à irrigação com ATM (Figuras 36a e b). Já no 2º ciclo, nota-se o efeito contrário, em que houve o maior desenvolvimento para o tratamento irrigado com AC (Figuras 36c e d).

Para a fitomassa seca aérea de raiz, verificou-se que em ambos os ciclos ocorreram o acúmulo muito próximo para os tipos de água, sendo que também se pode observar comportamento de desenvolvimento ao longo do ciclo muito semelhante após os 28 DAT, ocorre aumento na fitomassa, como pode observar na Figura 37.

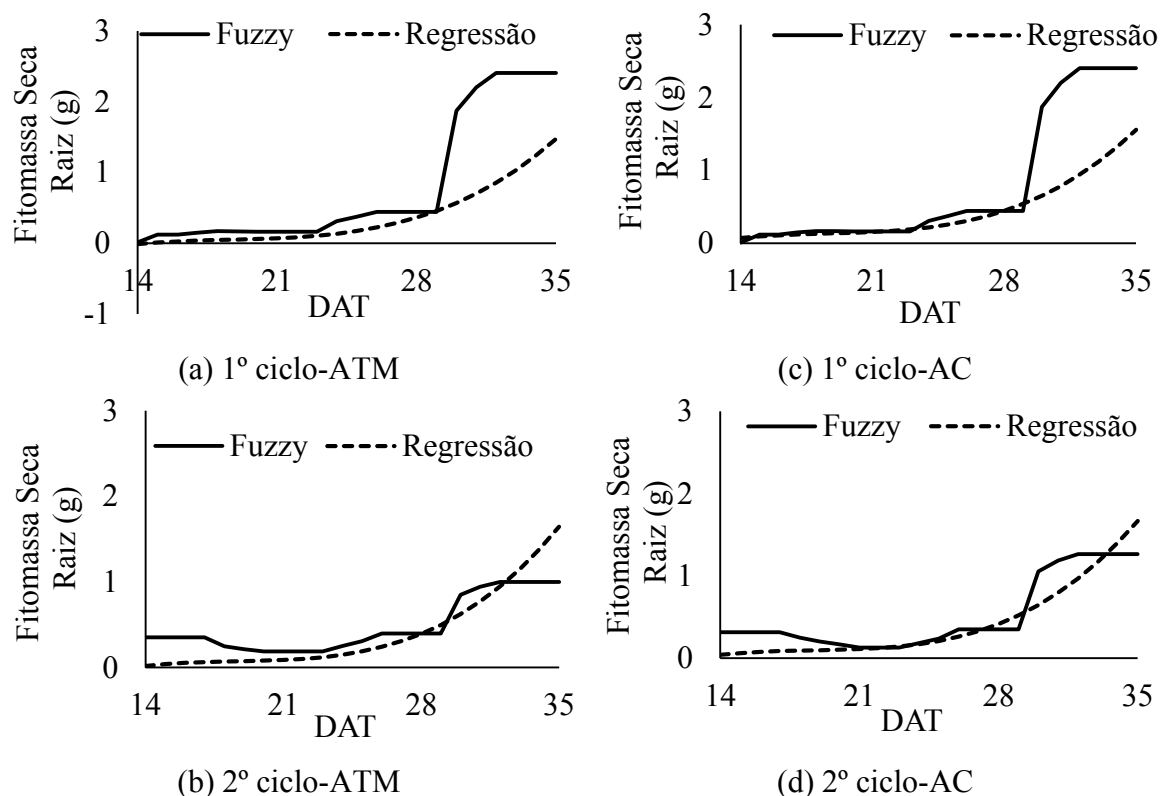


Figura 37. Modelos *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa seca de raiz da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 75% da ETC.

Assim, conforme ocorrido com a fitomassa verde raiz, observou-se o comportamento similar para a fitomassa seca de raiz, pois para o 1º ciclo, o tratamento irrigado com ATM apresentou maior desenvolvimento (Figuras 37a e b). Porém, para o 2º ciclo não foi verificado o mesmo efeito, sendo que a irrigação com AC apresentou maior incremento (Figuras 37c e d).

Na análise do modelo *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento da cultura da alface submetida à reposição de 100% da ETC, foi possível verificar que, de forma geral, os tratamentos irrigados com ATM apresentaram seu desenvolvimento mais atenuado, sendo que ao final do ciclo ocorreu maior produção, assim como observado para o número de folhas (Figura 38).

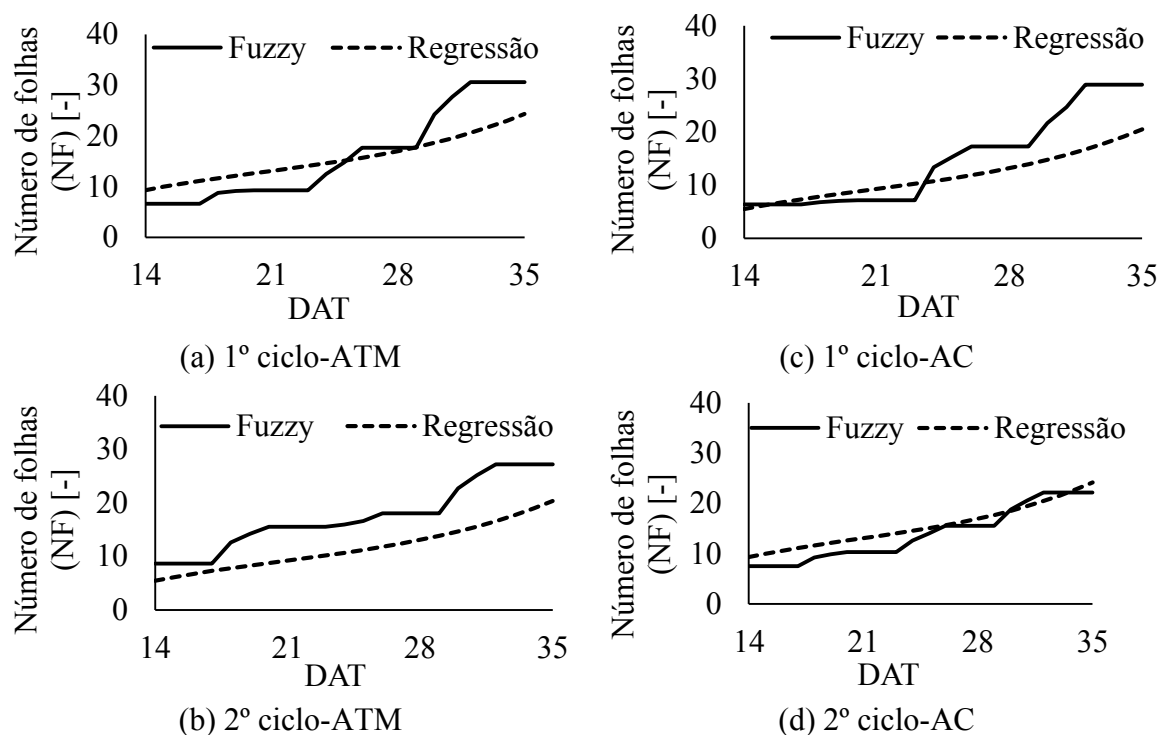


Figura 38. Modelos *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento, o número de folhas da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 100% da ETc.

A partir do modelo de regressão foi possível inferir que ocorreu para o 1º ciclo maior acúmulo para o tratamento irrigado com ATM, sendo que para atingir o mesmo número de folhas aos 35DAT irrigado com AC, seriam necessários três dias a menos (Figuras 38a e b).

Já para o 2º ciclo, notou-se que ocorreu o efeito similar ao 1º ciclo, em que também houve o maior número de folhas para o tratamento irrigado com ATM, sendo que também ocorreu a redução de quatro dias para atingir a mesma produção obtida aos 35DAT irrigado com AC (Figuras 38c e d).

A partir do modelo *fuzzy* e da análise de regressão para o desenvolvimento da fitomassa verde área, pode-se verificar que ocorreu maior desenvolvimento para os tratamentos irrigados com água tratada magneticamente (Figura 39).

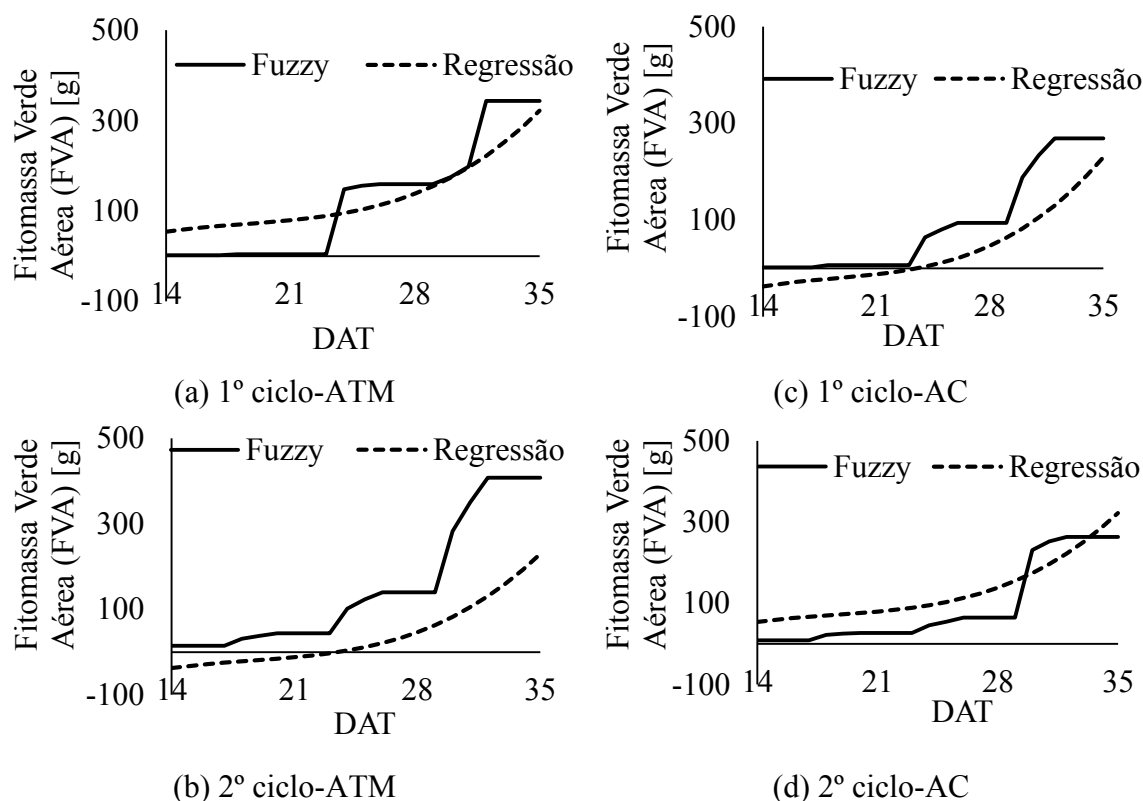


Figura 39. Modelos *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento, a fitomassa verde aérea da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 100% da ETc.

Foi possível inferir que a partir do modelo *fuzzy* ocorreu o maior desenvolvimento para os tratamentos irrigados com ATM. Assim, para o 1º ciclo notou-se que houve redução de seis dias para obter a mesma produção aos 35 DAT irrigados com AC (Figuras 39a e b).

Assim, tal efeito foi verificado para o 2º ciclo, em que também houve a redução de cinco dias, sendo que os tratamentos irrigados com ATM apresentaram produção superior quando comparado ao irrigado com AC (Figuras 39c e d).

A variável fitomassa seca aérea apresentou o comportamento muito próximo em ambos os ciclos, sendo muito similar à fitomassa verde aérea, conforme podemos inferir na Figura 40.

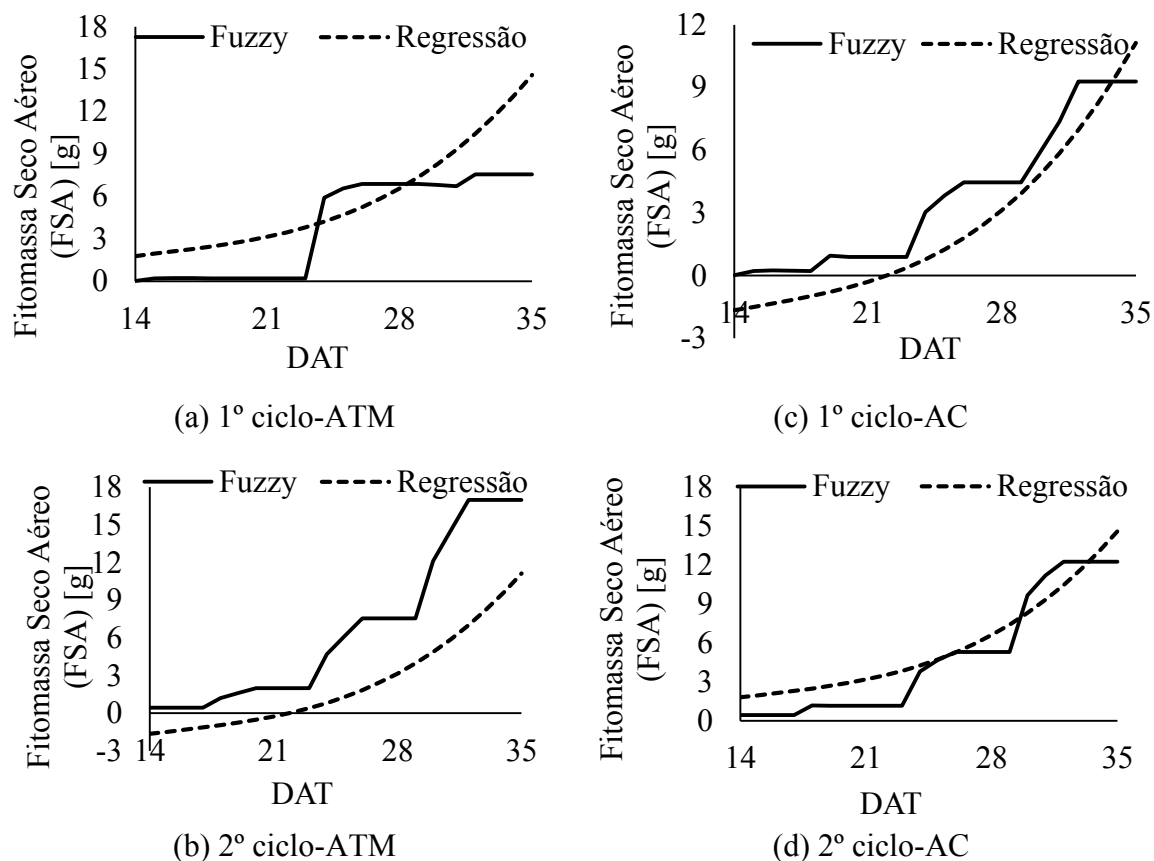


Figura 40. Modelos *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa seca aérea da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 100% da ETc.

O modelo de regressão desenvolvido para analisar o comportamento da fitomassa seca ao longo do ciclo, verificou-se que no 1º ciclo houve maior acúmulo para os tratamentos irrigados com AC (Figuras 40a e b). Assim, observa-se o comportamento do 2º ciclo que verificou a ocorrência do efeito antagônico, em que houve maior acúmulo para o tratamento irrigado com ATM (Figuras 40c e d).

A partir da modelagem *fuzzy* para o desenvolvimento da fitomassa verde de raiz, verificou-se que ATM apresentou maior desenvolvimento quando comparado com a irrigação com AC, conforme se verifica na Figura 41.

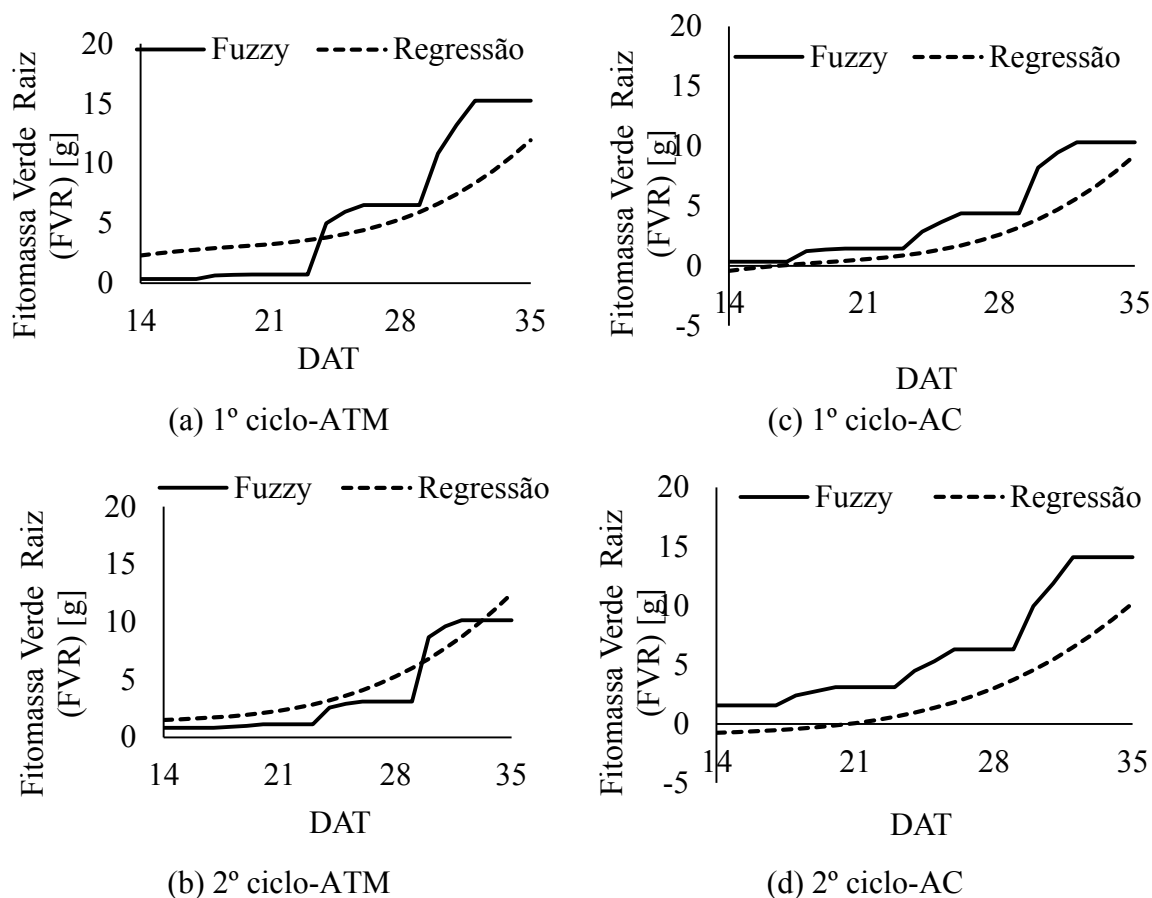


Figura 41. Modelos *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa verde raiz da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 100% da ETc.

Com a modelagem elaborada para analisar o desenvolvimento da fitomassa verde de raiz da cultura da alface, verificou-se que para o 1º ciclo ocorreu maior acúmulo quando submetido à irrigação com ATM (Figuras 41a e b).

Ao analisar o 2º ciclo, verificou-se que houve desenvolvimento mais acentuado para os tratamentos irrigados com AC. Deste modo, acarretou-se o efeito antagônico (Figuras 41c e d).

Para a fitomassa seca de raiz verificou-se que o comportamento foi antagônico conforme ilustra a Figura 42.

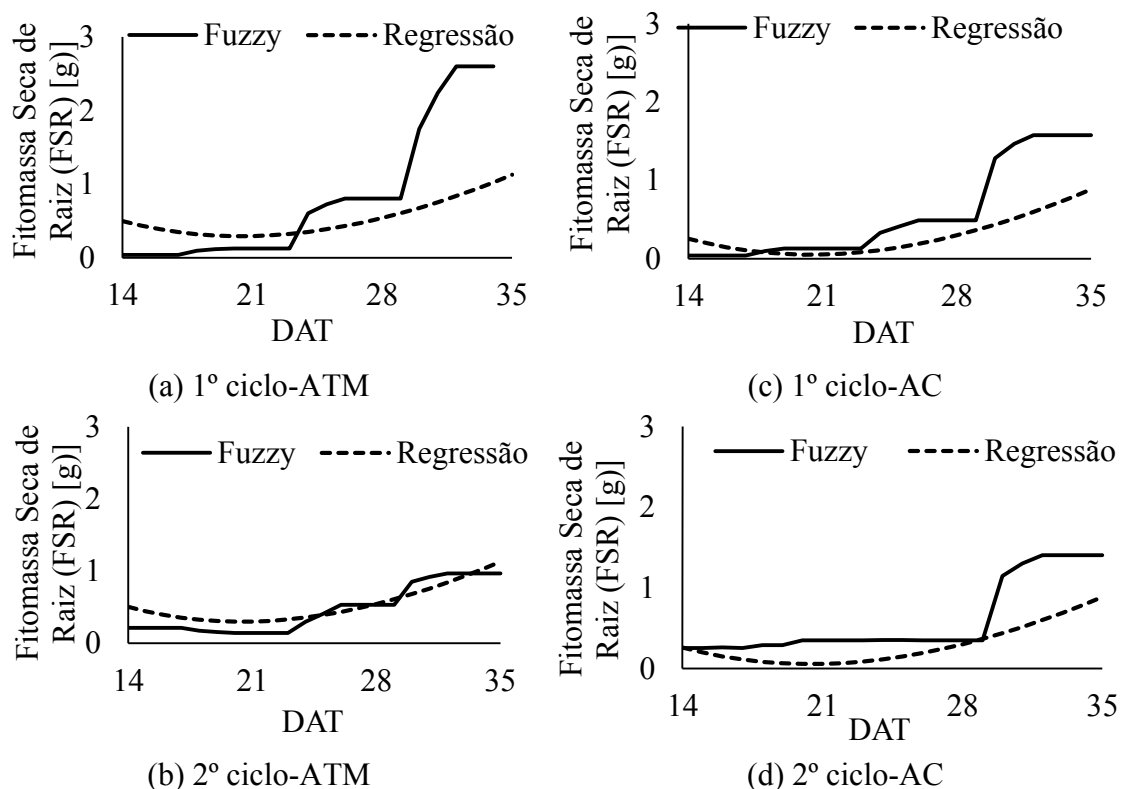


Figura 42. Modelos *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa seca raiz da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 100% da ETc.

A partir do modelo de regressão foi possível inferir que no 1º ciclo ocorreu maior acúmulo para os tratamentos irrigados com ATM, quando comparado ao tratamento com AC (Figuras 42a e b).

Já para o 2º ciclo, verificou-se que ocorreu praticamente o mesmo acúmulo de fitomassa de raiz para ambos os tratamentos (Figuras 42c e d).

A partir da elaboração do modelo *fuzzy* para a taxa de reposição de 125% da ETc foi possível verificar o comportamento da cultura da alface ao longo do ciclo, submetido à irrigação com ATM e AC.

Para a variável número de folha foi possível inferir que em ambos os ciclos o efeito foi próximo, em que ocorreu o maior acúmulo para os tratamentos irrigados com ATM, conforme podemos inferir na Figura 43.

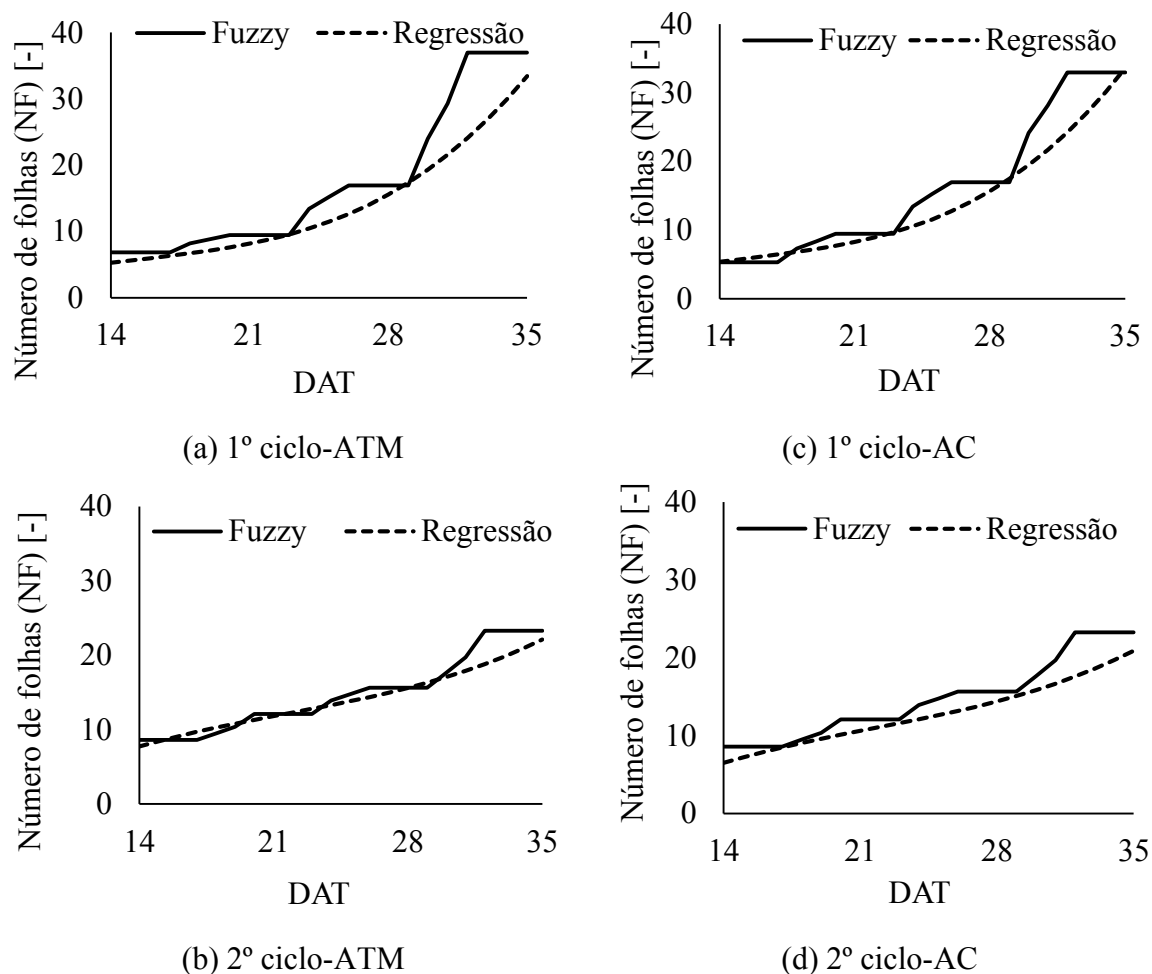


Figura 43. Modelos *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento o número de folhas da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 125% da ETc.

Para o modelo de regressão desenvolvido para o número de folhas no 1º ciclo, observou-se maior acúmulo para os tratamentos irrigados com ATM (Figuras 43a e b). Para atingir a mesma produção do tratamento irrigado com AC aos 35DAT, seriam necessários aproximadamente cinco dias a menos, pois houve redução nos dias do ciclo.

Na análise do 2º ciclo, nota-se que o número de folhas foi próximo aos 35DAT, assim não diferindo (Figuras 43c e d).

Ao analisar a fitomassa verde aérea foi possível inferir que ocorreu de forma geral maior acúmulo para os tratamentos irrigados com ATM (Figura 44).

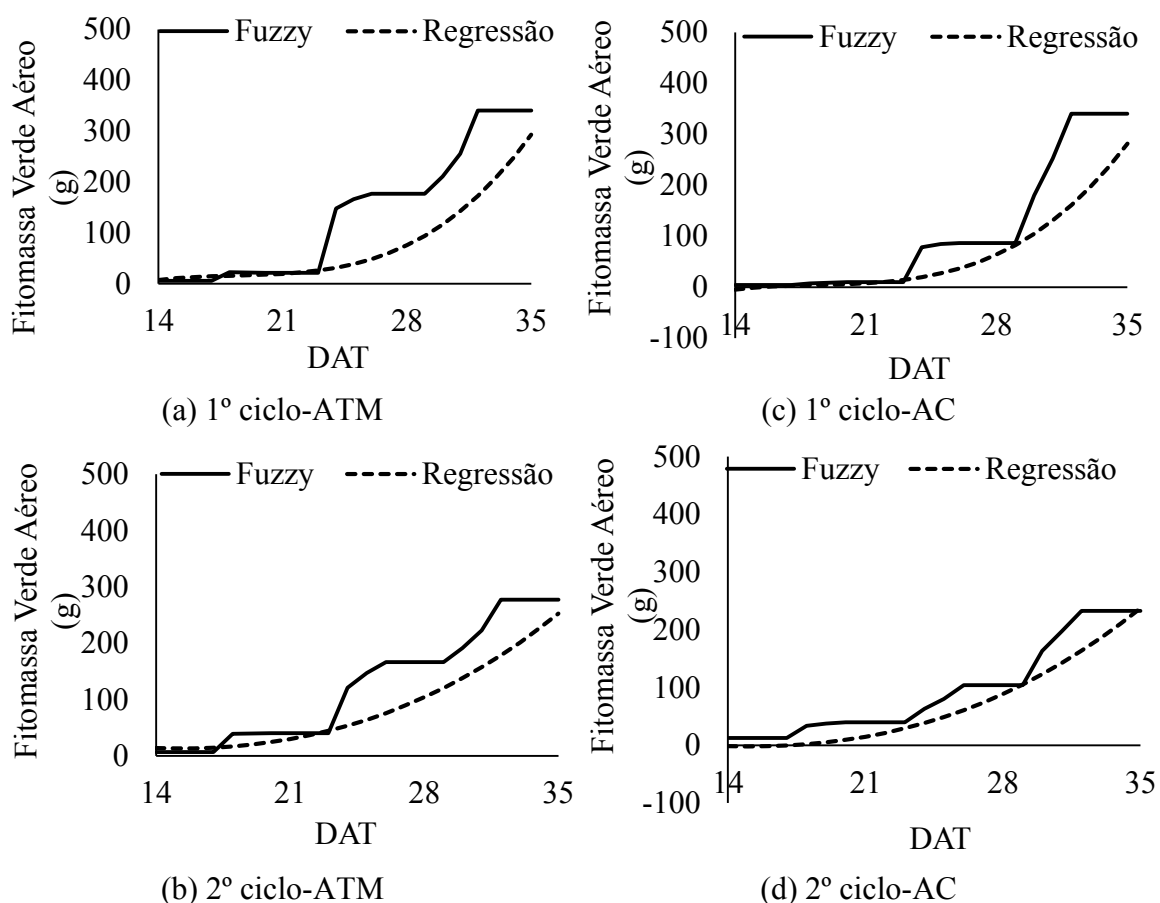


Figura 44. Modelos *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa verde aérea da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 125% da ETc.

No 1º ciclo, foi possível analisar a partir da elaboração do modelo de regressão que a fitomassa verde aérea não apresentou diferenças aos 35 DAT entre os tratamentos (Figuras 44a e b).

Porém, para o 2º ciclo, verificou-se que a ATM quando irrigada acumulou maior fitomassa verde aérea, sendo que se pode inferir que ocorreu redução de aproximadamente seis dias para atingir a mesma fitomassa aos 35 DAT quando submetida à irrigação com AC (Figuras 44c e d).

Para a análise da fitomassa seca aérea, verificou que houve o comportamento muito próximo ao ocorrido com a fitomassa verde aérea, o qual se pode observar na Figura 45.

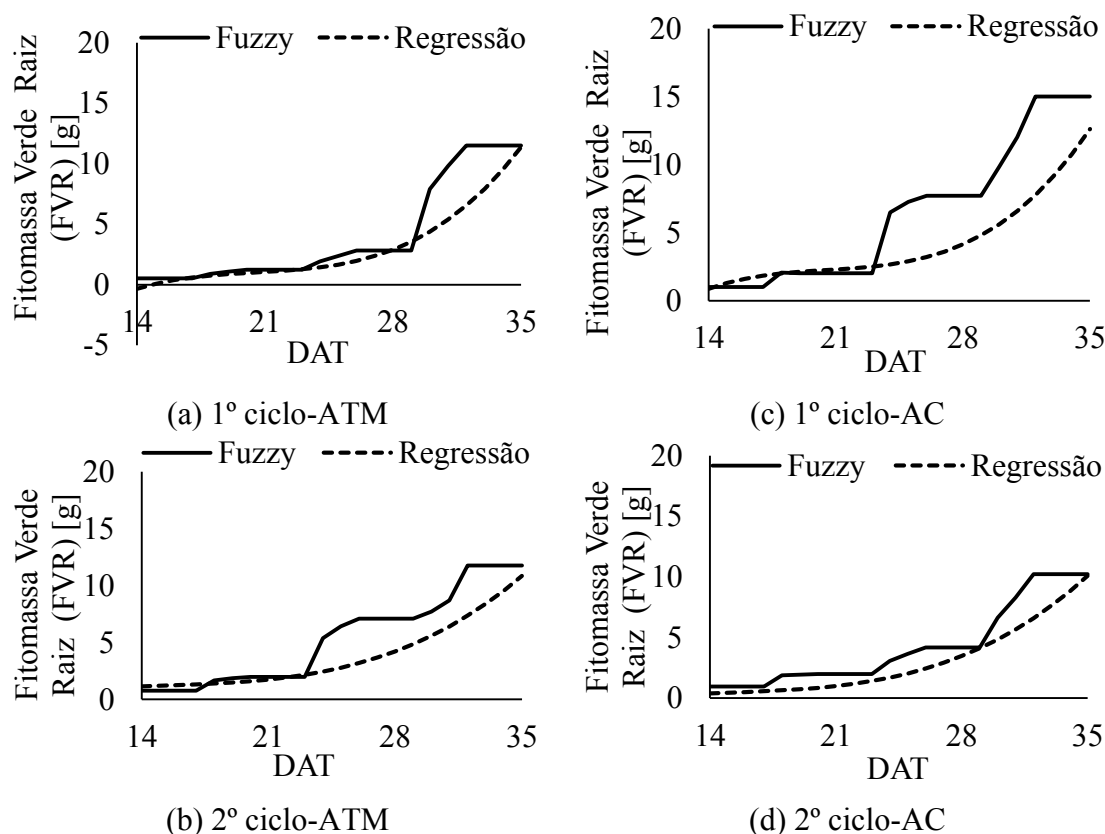


Figura 46. Modelos *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa verde de raiz da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 125% da ETc.

Na determinação do desenvolvimento da fitomassa verde de raiz, observou-se que para o 1º ciclo ocorreu maior acúmulo quando irrigado com AC (Figuras 46a e b). Porém, no 2º ciclo, pode-se observar que ocorreu o desenvolvimento mais acentuado para os tratamentos irrigados com ATM (Figuras 46c e d).

Ao analisar o comportamento da fitomassa seca de raiz, por meio do modelo de regressão foi possível observar que os tratamentos irrigados com ATM apresentaram maior desenvolvimento, conforme observado na Figura 47.

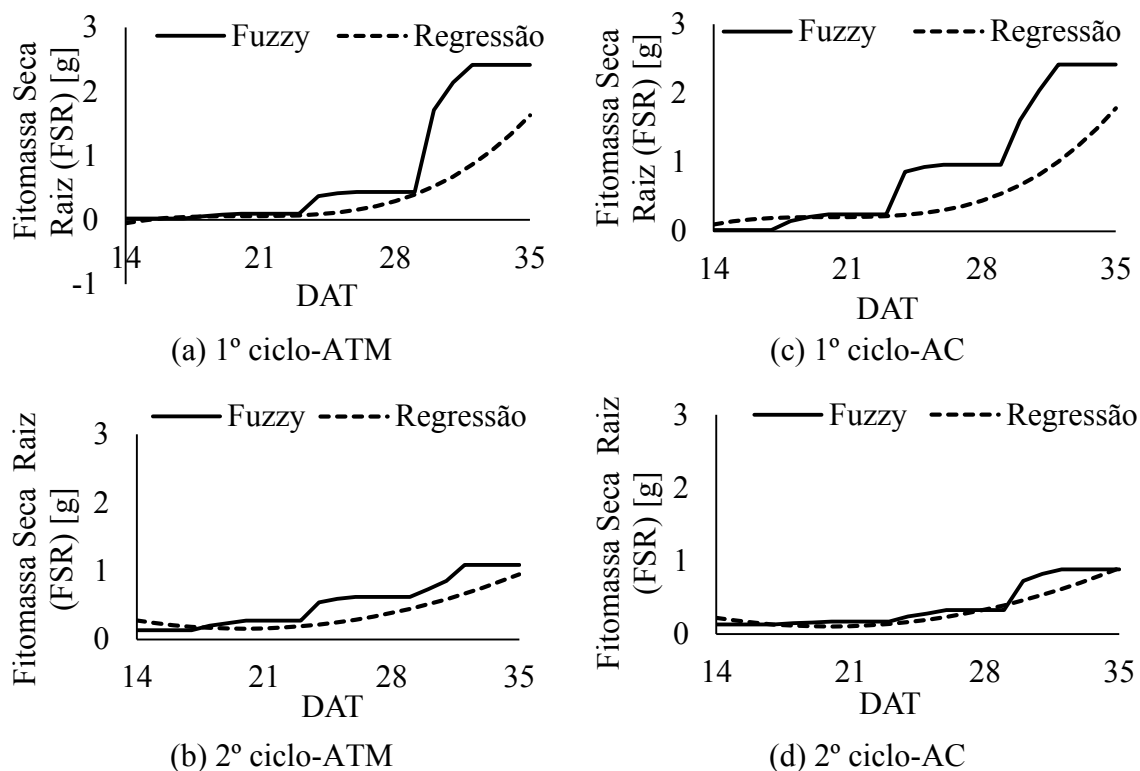


Figura 47. Modelos *fuzzy* e de regressão para o desenvolvimento da fitomassa seca de raiz da cultura da alface irrigada com a taxa de reposição de 125% da ETc.

O comportamento foi similar ao ocorrido com a fitomassa verde de raiz, no qual podemos inferir que para o 1º ciclo para ambos os tipos de água, observa-se que o comportamento do desenvolvimento foi semelhante, em que após os 28DAT ocorre maior acúmulo, aos 35DAT verifica-se que ocorre o acúmulo muito próximo (Figuras 47a e b).

Já para o 2º ciclo observou-se, em relação ao primeiro, que ocorreu menor acúmulo de fitomassa seca de raiz, isso pode ser oriundo do menor desenvolvimento das plantas, pelo período de condução do experimento ter sido mais frio, assim reduzindo o desenvolvimento do radicular (Figuras 47c e d).

A partir dos resultados apresentados, pode-se inferir que o desenvolvimento da cultura da alface apresentou maior incremento ao longo do ciclo, pois, conforme, observou-se em diversas condições em que ocorreu o adiantamento do ponto de colheita, sendo que o padrão seria a colheita aos 35 DAT quando irrigado com AC.

O fato do maior desenvolvimento da cultura da alface, quando submetida à irrigação magnética, pode ser oriundo das condições do solo que sofrem alteração. Estudos apontam que ocorre mais facilmente a disponibilização da água, em que

pelo enfraquecimento do potencial matricial, em função das alterações da adesão e coesão das partículas do solo (AMIRI; DADKHAH, 2006; BOGATIN et al., 1999; HOZAYN et al., 2014; KHOSHRAVESH et al., 2011; LIN; YOTAVAT, 1990; MOSTAFAZADEH FARD et al., 2011; NORAN et al., 1995; OTSUKA; OZEKI, 2006;)

Assim, como já descrito no Capítulo 2, em que houve maior absorção de macro e micronutrientes, corroborou-se com o desenvolvimento mais rápido da cultura. Pois, a maior disponibilidade de água no solo pode certamente ter favorecido o desenvolvimento da mesma.

Autores como Souza et al. (2005) vêm pesquisando o desenvolvimento de culturas quando irrigadas com ATM e observaram que para a cultura do tomate houve um incremento significativo no crescimento, assim como maior produtividade ao final do ciclo.

Hozayn e Qados (2010) verificaram que ocorreu aumento no desenvolvimento das plantas de linhaça, sendo que também foi constatado o incremento nos teores de pigmentos fotossintéticos e nos totais de fenóis e indol.

Para as culturas da ervilha, aipo e vagem foram constatados resultados que corroboram com os obtidos no presente artigo, em que houve incremento significativo da produtividade, assim como o melhor desenvolvimento das plantas (MAHESHWARI; GREWAL, 2009).

A cultura da jojoba (*Simmondsia chinensis* L.) apresentou o desenvolvimento mais acelerado quando irrigado com ATM, em que se verificou que houve também o aumento da qualidade e da produção (AL-KHAZAN et al., 2011).

Depois de desenvolvidos os sistemas *fuzzy*, no Toolbox *Fuzzy* Matlab, foi possível gerar combinação dentro do intervalo das avaliações realizadas no experimento agrônômico (14 a 35 DAT) para as lâminas de irrigação de 75, 100 e 125% da ETc, e para os tipos de água (água convencional e água tratada magneticamente), como realizado anteriormente nas figuras de cada resposta do modelo. Aplicou-se o método de desfuzzyficação de Mandani, que geraram as respostas das variáveis de saída dos sistemas *fuzzy*.

Análise de intensidade dos modelos

Pela elaboração dos modelos baseados em regras *fuzzy* e dos modelos de regressão polinomiais múltipla, foi possível compará-los cada um com os dados coletados a campo. Sendo que para realizar tais comparações foram utilizadas técnicas de análises, tais como a determinação da correlação, da exatidão do modelo e o erro quadrático médio do modelo. A partir da aplicação de tais parâmetros foi possível inferir que o modelo *fuzzy* apresentou maior precisão do que o modelo de regressão quando comparados com os dados coletados a campo (Tabela 24).

Tabela 24. Análise da intensidade de associação dos modelos *fuzzy* e da regressão polinomial múltipla com os dados coletados a campo, para as variáveis biométricas da cultura da alface submetidas a diferentes lâminas de irrigação e tipo de água.

% da ETc	Variável	Modelo	1º Ciclo			2º Ciclo			
			EQM	r	d	EQM	r	d	
75	NF	<i>fuzzy</i>	1,63	0,99*	0,99	1,30	0,98*	0,99	
		regressão	1,97	0,98*	0,8	160	0,97*	0,98	
	FVA	<i>fuzzy</i>	182,89	0,99*	0,97	1091,77	0,97*	0,97	
		regressão	403,60	0,98*	0,94	1369,85	0,94*	0,94	
	FSA	<i>fuzzy</i>	0,21	0,99*	0,96	1,98	0,99*	0,81	
		regressão	0,23	0,97*	0,95	2,08	0,85*	0,80	
	FVR	<i>fuzzy</i>	1,94	0,96*	0,81	1,43	0,96*	0,85	
		regressão	2,14	0,93*	0,80	2,07	0,91*	0,79	
	FSR	<i>fuzzy</i>	0,06	0,90*	0,71	0,014	0,96*	0,93	
		regressão	0,07	0,89*	0,67	0,018	0,88*	0,90	
	100	NF	<i>fuzzy</i>	3,17	0,96*	0,98	2,47	0,97*	0,983
			regressão	7,55	0,95*	0,95	2,66	0,92*	0,982
FVA		<i>fuzzy</i>	810	0,96*	0,87	1761	0,93*	0,78	
		regressão	995	0,90*	0,85	2270	0,89*	0,72	
FSA		<i>fuzzy</i>	0,82	0,96*	0,87	1,91	0,94*	0,86	
		regressão	1,10	0,94*	0,84	2,84	0,93*	0,80	
FVR		<i>fuzzy</i>	2,00	0,96*	0,78	1,13	0,93*	0,90	
		regressão	2,34	0,92*	0,76	2,21	0,85*	0,80	

125	FSR	<i>fuzzy</i>	0,06	0,89*	0,78	0,03	0,98*	0,87
		regressão	0,08	0,86*	0,56	0,02	0,96*	0,85
	NF	<i>fuzzy</i>	2,38	0,99*	0,987	1,72	0,97*	0,988
		regressão	3,22	0,98*	0,983	1,78	0,96*	0,987
	FVA	<i>fuzzy</i>	729	0,97*	0,90	207	0,98*	0,97
		regressão	825	0,96*	0,88	234	0,97*	0,96
	FSA	<i>fuzzy</i>	0,94	0,97*	0,92	0,57	0,99*	0,96
		regressão	1,47	0,96*	0,88	0,69	0,98*	0,95
	FVR	<i>fuzzy</i>	1,15	0,97*	0,90	0,65	0,98*	0,969
		regressão	1,37	0,91*	0,88	0,75	0,97*	0,965
	FSR	<i>fuzzy</i>	0,078	0,96*	0,73	0,006	0,97*	0,97
		regressão	0,070	0,85*	0,09	0,007	0,95*	0,96

Legenda: NF número de folha; FVA fitomassa verde aérea; FSA fitomassa seca aérea; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seca de raiz e d de Willmott, *significativo para $\alpha = 5\%$.

Pelos testes aplicados entre os modelos, observou-se que o modelo *fuzzy* se destacou em relação a um ajuste mais preciso, pois quando comparado o valor EQM, notou-se que em todas as análises dos dois ciclos, houve redução no valor. Também se verificou o valor da correlação dos dados por meio da determinação do r, em que para todas as variáveis houve o aumento do valor. Deve-se ressaltar que também ocorreu o aumento para o valor da exatidão do modelo, que foi determinado utilizando o teste de “d” de Willmott.

A aplicação dos modelos baseados em regras *fuzzy* para a determinação da evaporação apresentou resultados com menor erro quadrado médio e também com maior valor de r (COBANER, 2013). Para a determinação da produtividade do solo em função de suas características físicas e químicas, Duru et al. (2010) verificaram que os sistemas *fuzzy* apresentaram as melhores respostas. Também foram constatados por Bressan et al. (2008) que os modelos *fuzzy* para a determinação do risco por infestação de plantas daninhas em lavouras foram mais precisos.

Conclusão

Pelo modelo de regressão desenvolvido para aferir o desenvolvimento da cultura da alface quando submetida à irrigação com ATM, pode-se confirmar que houve efeito positivo. Deve-se ressaltar que além de um incremento na

produção ocorreu a redução nos dias do ciclo, quando se buscou atingir a mesma produção aos 35 DAT irrigadas com AC, podendo aumentar o número de ciclo da cultura e também a redução no volume aplicado ao longo ciclo da água.

Verificando tal efeito pela redução média de cinco dias por ciclo, houve a possibilidade de aumentar de dez para 12 ciclos anuais da cultura alface, considerando em média 35 dias até o ponto de colheita. E na comparação entre os modelos foi possível inferir que o modelo *fuzzy* apresentou um ajuste mais preciso, que ocorreu a redução do valor do EQM, e o aumento no valor do “d” de Willmott, assim como o aumento do valor do r, demonstrando-se uma poderosa ferramenta de análise de experimento na área de ciências agrárias.

Referências

- AASAMAA, K.; SÖBER, A. Stomatal sensitivities to changes in leaf water potential, air humidity, CO₂ concentration and light intensity, and the effect of abscisic acid on the sensitivities in six temperate deciduous tree species. **Environmental and Experimental Botany**, v. 71, p. 72-78, 2011
- AL-KHAZAN, M.; ABDULLATIF, B. M.; AL-ASSAF, N. Effects of magnetically treated water on water status, chlorophyll pigments and some elements content of Jojoba (*Simmondsia chinensis* L.) at different growth stages. **African Journal of Environmental Science and Technology**, v. 5, n. 9, p. 722-731, 2011.
- AMIRI, M. C.; DADKHAH, A. A. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 278, n. 1, p. 252-255, 2006.
- AODA, M. I; FATTAH, M. A. The Interactive Effects of Water Magnetic Treatment and Deficit Irrigation on Plant Productivity and Water Use Efficiency of Corn (*Zea Mays* L.). **The Iraqi Journal of Agricultural Sciences**, v. 42, p. 164-179, 2011.
- BARTON, L.; WAN, G. G. Y.; COLMER, T. D. Turfgrass (*Cynodon dactylon* L.) sod production on sandy soils: I. Effects of irrigation and fertiliser regimes on growth and quality. **Plant and Soil**, v. 284, p. 129-145, 2006.
- BOGATIN, J.; BONDARENKO, N. P.; GAK, E. Z.; ROKHINSON, E. E.; ANANYEV, I. P. Magnetic treatment of irrigation water: experimental results and application conditions. **Environmental Science & Technology**, v. 33, n. 8, p. 1280-1285, 1999.
- BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 26, p. 211-234, 1964.

- 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.
- BURGESS, P.; HUANG, B. Growth and physiological responses of creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera*) to elevated carbon dioxide concentrations. **Horticulture Research**, v. 1, 2014.
- CARVALHO, W. A.; ESPÍNDOLA, C.R.; PACCOLA, A.A. Legenda atualizada do **Boletim** CI. FCA/UNESP, Botucatu, n. 1, 1983. 95p.
- CHEMURA, A. The growth response of coffee (*Coffea arabica* L) plants to organic manure, inorganic fertilizers and integrated soil fertility management under different irrigation water supply levels. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 3, n. 2, p. 1-9, 2014.
- COBANER, M. Evapotranspiration estimation by two different neuro-*fuzzy* inference systems. **Journal of Hydrology**, v. 398, p. 292-302, 2011.
- 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.
- DAVIES, W. J.; BACON, M. A.; STUART THOMPSON, D.; SOBEIH, W.; RODRIGUEZ, L. G. Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: exploitation of the plants' chemical signaling system and hydraulic architecture to increase the efficiency of water use in agriculture. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 350. p. 1617-1626, 2000
- DOGAN, E. Reference evapotranspiration estimation using adaptive neuro-*fuzzy* inference systems. **Irrigation and Drainage**, v. 58, n. 5, p. 617-628, 2009.
- DURU, N.; DÖKMEN, F.; CANBAY, M. M.; KURTULUŞ, C. Soil productivity analysis based on a *fuzzy* logic system. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 90, p. 2220-2227, 2010.
- FANOURAKIS, D.; HEUVELINK, E.; CARVALHO, S. M. P. A comprehensive analysis of the physiological and anatomical components involved in higher water loss rates after leaf development at high humidity. **Journal of Plant Physiology**, v. 170, n. 10, p. 890-898, 2013.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the united Nation). **Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements -FAO - Irrigation and drainage**. Local: FAO, 1998. 56p.

FERNANDES, A. A., MARTINEZ, H. E. P., PEREIRA, P. R. G.; FONSECA, M. C. M. Produtividade, acúmulo de nitrato e estado nutricional de cultivares de alface hidropônica, em função de fontes de nutrientes. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 2, p. 195-200, jun. 2002.

FU, Q.; WANG, Z.; JIANG, Q. Delineating soil nutrient management zones based on *fuzzy* clustering optimized by PSO. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 51, p. 1299-1305, 2010.

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 Agricola**, v. 31, n. 4 p. 813-825, 2011.

GAVEH, E. A.; TIMPO, G. M.; AGODZO, S. K.; SHIN, D. H. Effect of Irrigation, Transplant Age and Season on Growth, Yield and Irrigation Water Use Efficiency of the African Eggplant. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 52, n. 1, p.13-28, 2011.

GIUSTI, E.; LIBELLI, S. M. A *Fuzzy* Decision Support System for irrigation and water conservation in agriculture, **Environmental Modelling & Software**, v. 63, p. 73-86, 2015.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica *fuzzy*. **SBA Controle & Automação**, v. 4, n. 3, p. 97-115, 1994.

HOZAYN, M.; MONEM, A. A. A.; ELWIA, T. A. E. F.; EL-SHATAR, M. M. Future of magnetic agriculture in arid and semi arid regions (CASE STUDY). **Scientific Papers. Series A. Agronomy**, v. 58, p. 197-208, 2014

HOZAYN, M.; QADOS, A. M. S. A. Irrigation with magnetized water enhances growth, chemical constituent and yield of chickpea. **Agriculture and biology journal of north America**, v. 1, n. 5, p. 671-676, 2010.

JAISSWAL, A. K.; ELAD, Y.; GRABER, E. R.; FRENKEL, O. Rhizoctonia solani suppression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 69, p. 110-118, 2014.

JOSHI, K. M.; KAMAT, P. V. Effect of Magnetic Field on the Physical Properties of Water. **Indian Chemical Society**, v. 43, p. 620-622, 1966.

KHOSHRAVESH, M.; MOSTAFAZADEH-FARD, B.; MOUSAVI, S. F.; KIANI, A. R. Effects of Magnetized Water on The Distribution Pattern of Soil Water With Respect to Time In Trickle Irrigation. **Soil Use Management**, v. 27, p. 515-522, 2011.

KISI, O.; ZOUNEMAT-KERMANI, M. Comparison of Two Different Adaptive Neuro-*Fuzzy* Inference Systems in Modelling Daily Reference Evapotranspiration. **Water Resources Management**, p. 1-21, 2014.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha. Verlag Justus Perthes. 1928. Wallmap 150cmx200cm.

KURTENER, D. D.; SUKHANOV, P. Evaluation of Agricultural Soil Resources Using *Fuzzy* Modeling. **Journal of Agricultural Science**, v. 6, n. 4, p. p199, 2014.

LABABIDI, H. M. S.; BAKER, C. G. J. *Fuzzy* modelling. In: CÁNOVAS, G. V. B. et al. **Handbook of Food and Bioprocess Modeling Technique**, 2006, p. 452-494.

LAZA, M. R. C.; SAKAI, H.; CHENG, W.; TOKIDA, T.; PENG, S.; HASEGAWA, T. Differential response of rice plants to high night temperatures imposed at varying developmental phases. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 209, p. 69-77, 2015.

LIN, I. J.; YOTVAT, J. Exposure of Irrigation and Drinking Water to a Magnetic Field With Controlled Power and Direction. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 83. p. 525-526, 1990.

LOPES, G. N.; KROETZ, V. J.; ALVES, J. M. A.; SMIDERLE, O. J. Irrigação magnética. **Agro@ambiente On-Line**, v. 1, n. 1, 2007.

MAHESHWARI, B. L.; GREWAL, H. S. Magnetic treatment of irrigation water: Its effects on vegetable crop yield and water productivity. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1229-1236, 2009.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a *Fuzzy* Logic Controller. **Internacional Journal Man-Machine Studies**, v. 7, p. 1-13, 1975.

MATHIEU, A. S.; LUTTS, S.; VANDOORNE, B.; DESCAMPS, C.; PÉRILLEUX, C., DIELEN, V.; QUINET, M. High temperatures limit plant growth but hasten flowering in root chicory (*Cichorium intybus*) independently of vernalisation. **Journal of plant physiology**, v. 171, n. 2, p. 109-118, 2014.

MATHWORKS. Inc. **Logic Fuzzy toolbox user's guide**, version 8.4.0. Natick, MathWorks, Inc., 2014.

MERRIAM, J. L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation. a guide for management**. Logan: Utah State University, 1978. 271p.

MINITAB, I. N. C. **MINITAB statistical software**. Minitab Release, v. 17, 2014.

MOHAMED, A. I. Effects of Magnetized Low Quality Water on Some Soil Properties and Plant Growth. **International Journal of Research in Chemistry and Environment**, v. 3, n. 2, p. 140-147, 2013.

MOSTAFAZADEH-FARD, B.; KHOSHRAVESH, M.; MOUSAVI, S.F. E KIANI, A. R. Effects of Magnetized Water and Irrigation Water Salinity on Soil Moisture Distribution in

Trickle Irrigation. **Journal of irrigation and drainage engineering**. v. 137, p. 398-402, 2011.

NARISAWA, K.; SHIMURA, M.; USUKI, F.; FUKUHARA, S.; HASHIBA, T. Effects of pathogen density, soil moisture, and soil pH on biological control of clubroot in Chinese cabbage by *Heteroconium chaetospora*. **Plant disease**, v. 89, n. 3, p. 285-290, 2005.

NASIRI, F.; MAQSOOD, I.; HUANG, G.; FULLER, N. Water quality index: A *fuzzy* river-pollution decision support expert system. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 133, n. 2, p. 95-105, 2007.

NORAN, R.; SHANI, U.; LIN, I. The effect of irrigation with magnetically treated water on the translocation of minerals in the soil. **Magnetic and Electrical Separation**, v.7, n. 2, p. 109-122, 1995.

OTSUKA, I.; OZEKI, S. Does magnetic treatment of water change its properties?. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 110, n. 4, p. 1509-1512, 2006.

OZEKI, S.; MIYAMOTO, J.; ONO, S.; WAKAI, C.; WATANABE, T. Water-Solid Interactions Under Steady Magnetic Fields. Magnetic-Field-Induced Adsorption and Desorption of Water. **Journal of Physical Chemistry**, v. 100, n. 10, p. 4205, 1996.

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.

PATEL, A. V.; MOHAN, B. M. Some numerical aspects of center of area defuzzification method. **Fuzzy Sets and Systems**, v.132, p. 401-409,2002.

PAULUS, D.; PAULUS, E.; NAVA, G. A.; MOURA, C. A. Crescimento, consumo hídrico e composição mineral de alface cultivada em hidroponia com águas salinas. **Revista Ceres**, v. 59, n. 1, p. 110-117, 2012.

PEREIRA, G.C.; EVSUKOFF, A.; EBECKEN, N. F.F. *Fuzzy* modelling of chlorophyll production in a Brazilian upwelling system. **Ecological Modelling**, v. 220, n. 12, p. 1506-1512, 2009.

PINTO, U.; MAHESHWARI, B.L.; GREWAL, H.S. Effects of greywater irrigation on plant growth, water use and soil properties. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, p. 429-435, 2010.

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

RODDA, N.; SALUKAZANA, L.; JACKSON, S. A. F.; SMITH, M. T. Use of domestic greywater for small-scale irrigation of food crops: Effects on plants and soil. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 36, p. 1051-1062, 2011.

ROSENVALD, K.; TULLUS, A.; OSTONEN, I.; URI, V.; KUPPER, P. AOSAAR, J. The effect of elevated air humidity on young silver birch and hybrid aspen biomass allocation and accumulation-Acclimation mechanisms and capacity. **Forest Ecology and Management**, v. 330, p. 252-260, 2014.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. 607p. 2010.

SAYED, H. El SAYED A. Impact of magnetic water irrigation for improve the growth, chemical composition and yield production of broad bean (*Vicia faba* L.) plant. **American Journal of Experimental Agriculture**, v. 4, n. 4, p. 476-496, 2014.

SELIM, A. F. H.; EL-NADY, M, F. Physio-anatomical responses of drought stressed tomato plants to magnetic field. **Acta Astronautica**, v. 69, n. 7, p. 387-396, 2011.

SENAVIRATNE, G. M. M. M. A.; UDAWATTA, R. P.; ANDERSON, 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.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, W.; ZHANG, F. F. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant physiology**, v. 156, n. 3, p. 997-1005, 2011.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem Fuzzy**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2011.

SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 118, p. 977-980, 1992.

SOUZA, A.; GARCÍA, D.; SUEIRO, L.; LICEA, L.; PORRAS, E. Pre-sowing magnetic treatment of tomato seeds: effects on the growth and yield of plants cultivated late in the season. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 3, n. 1, p. 113-122, 2005.

TA, T. H.; SHIN, J. H.; NOH, E. H.; SON, J. E. Transpiration, Growth, and Water Use Efficiency of Paprika Plants (*Capsicum annuum* L.) as Affected by Irrigation Frequency, **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 53, n. 2, p. 129-134, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 4^o ed. Sunderland: Sinauer Associates, Inc. Publishers, 2009. 848p.

TEIXEIRA, M. C.; SCOPELLI, K. S.; DOS REIS, R. A.; De ARAÚJO, F. P. Ocorrência De Enteroparasitos Em Amostras De Alface (*Lactuca Sativa*) Comercializadas Em Caxias Do Sul, RS. **Revista Agrocientífica**, v. 1, n. 1, p. 43-50, 2014.

WANG, H.; WU, Z.; CHEN, Y.; YANG, C.; SHI, D. Effects of salt and alkali stresses on growth and ion balance in rice (*Oryza sativa* L.). **Plant Soil Environ**, v. 57, n. 6, p. 286-294, 2011.

WANG, J., BAI, Z.; YANG, P. Sodic Soil Properties and Sunflower Growth as Affected by Byproducts of Flue Gas Desulfurization. **Plos One**, v. 7, n. 12, p. 1-8, 2012.

WANG, J.; BAI, Z.; YANG, P. Sodic soil properties and sunflower growth as affected by byproducts of flue gas desulfurization. **PloS One**, v. 7, n. 12, p. e52437, 2012.

WATSON, G.W.; HIMELICK, E. B. Effects of soil pH, root density, and tree growth regulator treatments on pin oak chlorosis. **Journal of Arboriculture**, p. 172-178, 2004.

YEN, J.; LANGARI, R. **Fuzzy Logic: Intelligence, Control and Information**, EUA, Prentice-Hall. 1999, 548 p.

ZADEH, L. A. *Fuzzy sets*. **Information and control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.

Capítulo III “MODELAGEM *FUZZY* DA PRODUTIVIDADE DA ALFACE IRRIGADA COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE”

Resumo

O aumento da demanda por alimentos e a otimização do uso da terra está gerando certa preocupação, porém pesquisadores vêm desenvolvendo técnicas para alavancar os índices produtivos. Uma dessas técnicas que vem sendo estudada é o tratamento magnético da água. Porém, pela complexidade em avaliações estatísticas para a real demonstração dos efeitos observados, modelos matemáticos *fuzzy* estão sendo empregados para auxiliar os pesquisadores. Assim, o objetivo do presente trabalho foi verificar os reais benefícios que o tratamento magnético da água apresentou para a cultura da alface, por meio de modelos *fuzzy*, os quais foram comparados com os modelos de regressão. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em que se adotou um delineamento em blocos casualizados, onde foram adotadas cinco lâminas de irrigação (25%, 50%, 75%, 100% e 125% da ETC) e dois tipos de água (tratada magneticamente e convencional). De forma geral, observou-se que ocorreu maior desenvolvimento para os tratamentos irrigados com água tratada magneticamente. Os modelos matemáticos *fuzzy* desenvolvidos apresentaram ajuste mais refinado aos dados coletados a campo, quando comparados com os modelos de regressão. Desta forma, a aplicação da lógica *fuzzy* para avaliação de experimentação agrônômica apresentou modelos dos resultados mais próximos aos valores observados, demonstrando que tal metodologia de modelagem é mais eficiente que a análise de regressão.

Palavras-chave: Regressão, ajuste, alimentos, magnetização e nebulosa.

Abstract

Although increase in food demand and the optimization of soil use have been a great concern worldwide, researchers have developed techniques to enhance production indexes. Water magnetic treatment is one of the techniques under analysis. However, due to complex statistical assessments for the true demonstration of effects, fuzzy mathematical models are being employed. Current analysis verifies the true benefits that water magnetic treatment provides for lettuce crops, through fuzzy models compared to regression ones. A randomized design experiment, conducted in a greenhouse, featured 5 irrigation levels (25% 50%, 75%, 100% and 125% ETc) and 2 types of water (treated magnetically and conventional). As a rule, greater development occurred for treatments irrigated with magnetically treated water. Fuzzy mathematical models provided more refined adjustments to field-collected data when compared to regression models. Since the application of fuzzy logic to evaluate agronomic experiments provided result models which were closer to observed rates, modeling methodology proved to be more efficient than the regression analysis.

Keywords: regression, fit, food, magnetization and hazy.

Introdução

Com uma expectativa populacional mundial em torno de 9,6 bilhões de pessoas (ONU, 2014), o aumento na produção alimentar, que deveria ocorrer concomitantemente a ela, tem gerado preocupações. Segundo a FAO (*Food and Agriculture Organization*) 2014, um aumento de 70% seria necessário na produção agrícola em relação aos níveis atuais, porém uma discussão recorrente é sobre o uso da terra. Para atingir tais índices, o uso do solo deve ser intensificado a fim de gerar consequências imensuráveis.

Especialistas alegam sobre o uso sustentável da terra e da água em um futuro breve, já que 70% do consumo mundial da água acontecem na agricultura. Além desses fatos, recentemente com as mudanças climáticas ocorridas, autores de diversos países vêm estudando o impacto que pode ocorrer ou ocorreu na agricultura, por exemplo, os estudos de Casa e Ovando (2014), El-Fadel et al. (2012), Pouget et al. (2012), Taylor et al. (2012), Grafton et al. (2012), Howells et al. (2013), Sacks et al. (2009), Gans (2012) e Trnka et al. (2011).

Portanto, com esta preocupação, os irrigantes vêm adotando técnicas mais sofisticadas para aumentar a eficiência na aplicação de água (LEVIDOW et al., 2014). Mostafazadeh-Fard et al. (2011) observaram que foi possível aumentar a eficiência da aplicação da água quando submetida ao campo magnético. Khoshravesh et al. (2011) inferiram que a frequência de irrigação foi alterada e houve redução na umidade do solo.

Diante dessas consequências das mudanças provocadas pela magnetização da água, diversos autores apresentaram resultados em suas publicações explanando a ocorrência significativa de incrementos. Podemos exemplificar para a cultura do aipo, vagem e ervilha (MAHESHWARI; GREWAL, 2009), trigo (HOZAYN; QADOS, 2010), pinhão manso (LOPES et al., 2007), milho (AODA; FATTAH, 2011), tabaco (ALADJADJIYAN; YLIEVA, 2003), pepino (PÉREZ et al., 2011), ervilha (SAYED, 2014), tomate (SELIM; EL-NADY, 2011), trigo (KORDAS, 2002), lentilha e ervilha (MARTINÉZ et al., 2009), pimenta (RAWBDEH et al., 2014) e tomate (SOUZA et al., 2005; SELIM; EL-NADY, 2011).

Para a análise de variáveis contínuas, é recomendada a análise por meio de regressão, que assim é possível observar o comportamento dentro da amplitude verificada no experimento. De forma genérica, o comportamento da variável dependente (y) em relação às variáveis independentes (x) apresenta-se de diversas maneiras: linear (1º grau), quadrática (2º grau), cúbica (3º grau), quártica (4º grau), exponencial, logarítmica etc. Há ainda quando ocorre o caso de existir mais de uma variável independente (x) que interfere diretamente na variável dependente, neste caso as regressões lineares múltiplas e polinomiais múltiplas (LATTIN, 2008; PINHEIRO, 2008; PAGANO; GAUVREAU, 2008).

A análise de regressão é uma forma de modelar matematicamente e de ajuste de curva em experimentação e utilizadas amplamente nas áreas de ciências agrônomicas para verificar os efeitos das variáveis dependentes (SVIERCOSKI, 2011).

Os experimentos realizados foram analisados diante de técnicas estatísticas para verificar as diferenças significativas. Da mesma forma, pela complexidade de analisar efeitos da experimentação, técnicas de modelagem matemática vêm sendo empregadas. Desde modo, a modelagem baseada em regras *fuzzy* vem contribuir para apresentar os resultados, bem como a modelagem entre os intervalos pontuais analisados (BLANCO-FERNÁNDEZ et al., 2014; COPPI et al., 2006; ROSS, 2010).

A modelagem proposta no presente trabalho visa utilizar sistema baseado em regras *fuzzy* para também modelar as curvas de reposta, mas buscando uma

precisão maior que a tradicional análise de regressão comumente utilizada nas ciências agronômicas.

Entretanto, deve-se ressaltar que a utilização dos modelos baseados em regras *fuzzy* vem sendo de grande importância em diversas áreas (sociais, exatas, agrárias) para explicar fatos que a matemática clássica não consegue modelar. Assim, os sistemas baseados em regras *fuzzy* apresentam uma gama de aplicações para solucionar tais fatos até antes não explicado.

Tais modelos são em geral utilizados em aplicações de sistema especialistas, buscando extrair informações de pessoa e transferir para um algoritmo, os controladores *fuzzy*, visando a automação dos processos com respostas mais eficientes, e modelagem *fuzzy*, que facilita a interpretação de resultados e apresentando soluções que a antes observadas.

Devem-se destacar os modelos com as aplicações de sistemas especialistas, que se buscam traduzir expressões verbais, vagas e imprecisas e qualitativas, comum na comunicação humana em valores numéricos (GUPTA, 1991; SIMÕES; SHAW, 2011; MARÇAL; SUSIN, 2005; ZADEH, 1983). Em que diversas aplicações podem ser destacadas, tal como realizada por Mollo Neto et al. (2014) para o diagnóstico preventivo de laminite em bovinos leiteiros. Já Laasri et al. (2015) desenvolveram um sistema especialista para a detecção de sinal sísmico. Li et al. (2015) aplicaram a lógica *fuzzy* por meio do sistema especialista para a avaliação de desempenho de saúde, segurança e meio ambiente. Koiwanit et al. (2014), para monitoramento e diagnóstico da emissão de amônia da pós-combustão, utilizaram sistemas especialistas baseado em regras *fuzzy*, em que apresentaram alta eficiência nas respostas.

Dentro da temática *fuzzy*, destaca-se a aplicação de controladores *fuzzy*, que buscam resolver problemas que demandam capacidade do controlador em adaptar-se a mudanças não lineares do sistema controlado (SIMÕES; SHAW, 2011). Os controles *fuzzy* são eficientes em casos de difícil modelagem e construção de controles convencionais.

Diversas aplicações nas ciências agrárias vêm auxiliando produtores a automatizar os processos. Podemos destacar Bahat et al. (2000) e Touati et al. (2013) que desenvolveram os controladores *fuzzy* para a automatização dos sistemas de irrigação. Já Poyen et al. (2015), também desenvolvendo sistema para a automação da irrigação, verificaram a redução na aplicação de água. Hahn (2011) verificou que as altas temperaturas e baixas umidades do ar prejudicavam o desenvolvimento do tomate em casas de vegetações,

por isso desenvolveu um controlador *fuzzy* para que as variáveis fossem controladas, mantendo nas condições ideais de cultivo do tomate. Tais controladores também foram desenvolvidos para a aclimatização de aves por Ghaleh et al. (2015), em que observaram a redução da mortalidade das aves. Na aquicultura, o aquecimento de água, está diretamente ligado à recirculação de água, em que pode levar ao aumento da mortalidade dos alevinos, assim Farghally et al. (2014) desenvolveram um controlador *fuzzy* que foi capaz de manter a temperatura em condições ideais.

A modelagem *fuzzy* permite ao cientista verificar condições incertas e nebulosas, pela complexidade do entendimento do fato observado; a modelagem pode apresentar condições que tornem mais clara a compreensão. Neste caso, muitos experimentos são analisados pontualmente por meio de técnicas que não apresentam o comportamento entre os pontos analisados. Por isso, a modelagem permite o entendimento dos intervalos intermediários. Podem-se destacar diversas aplicações recentes nas ciências agrárias, tais como modelos na área de análise de condições para cultivo de orquídeas (PUTTI et al., 2014), crescimento de mosquitos (CASTANHO et al., 2014), sistema de suporte à adubação nitrogenada (PAPADOPOULOS et al., 2011), crescimento dinâmicos de populações (BARROS et al., 2000) e produção de clorofila (PEREIRA et al., 2009).

O objetivo do trabalho deste capítulo foi desenvolver uma modelagem *fuzzy* visando estimar os valores das variáveis biométricas da cultura da alface em tipos de água e em todos os valores intermediários entre as taxas mínima e máxima dos níveis de reposição hídrica adotadas, bem como elaborar uma metodologia específica para o experimento realizado para a elaboração do sistema *fuzzy*.

Material e métodos

Descrição do experimento

O experimento foi realizado durante os meses de janeiro a abril de 2012 quando foram conduzidos dois ciclos com inícios subsequentes da cultura da alface em ambiente protegido, situado no Departamento de Engenharia Rural da Unesp, Faculdade Ciências Agrônômicas, Fazenda Experimental Lageado, localizado no município de Botucatu, São Paulo, cujas coordenadas geográficas são: latitude 22° 51' S, longitude 48° 26' W e altitude de 786 m (ESCOBEDO et al., 2009). De acordo com a classificação de

Köppen (KÖPPEN; GEIGER, 1928), a região apresenta clima do tipo Cfa (clima subtropical úmido).

Os parâmetros climáticos foram registrados por uma estação meteorológica automática (Tabela 25).

Tabela 25. Parâmetros climáticos coletados durante a relação do experimento.

Parâmetros		Ciclo-1	Ciclo-2
Temperatura (°C)	Mínima	16,29±3,80	16,08±3,25
	Máxima	34,40±3,99	31,15±6,38
	Média	23,63±2,04	21,60±3,96
Umidade relativa do ar (%)	Mínima	43,22±9,85	41,96±12,84
	Máxima	92,60±3,28	89,88±14,70
	Média	75,48±6,22	72,88±12,88
Evaporação do Período (mm)		105,4	102,6

As avaliações foram realizadas em quatro momentos distintos, sendo a primeira aos 14 dias após o transplante (DAT), aos 21, aos 28 e aos 35.

O solo da casa de vegetação foi classificado de acordo com Embrapa 2006, como Nitossolo Vermelho Distrófico Latossólico, apresentando moderada estrutura média/argilosa.

O solo foi analisado no laboratório de fertilidade do solo (FCA-Botucatu), apresentou as seguintes características químicas: pH (CaCl₂) = 5,9; M.O. = 24 g.dm⁻³; P (resina) = 191 mg.dm⁻³; K = 4,8 mmolc.dm⁻³; Ca = 68 mmolc.dm⁻³; Mg = 25 mmolc.dm⁻³; H+Al = 17 mmolc.dm⁻³; SB = 67 mmolc.dm⁻³; B = 0,51 mmolc.dm⁻³; Cu = 4,8 mmolc.dm⁻³; Fe = 20 mmolc.dm⁻³; Mn=10,10 mmolc.dm⁻³; Zn = 8 mmolc.dm⁻³ CTC = 114 mmolc.dm⁻³; V = 85%.

O solo foi preparado, utilizando um trator com uma enxada rotativa, a fim de revolver uma camada superficial de aproximadamente 30 cm. Posteriormente, delimitaram-se os canteiros que foram preparados com enxada. O combate de plantas daninhas foi realizado manualmente quando necessário.

A semeadura foi efetuada em bandejas de poliestireno expandido, com três sementes por célula. O desbaste ocorreu aos 14 dias após a semeadura permanecendo uma planta por célula. O transplante das mudas para os canteiros foi realizado no espaçamento de 25 cm × 25 cm, quando estas apresentavam de quatro a cinco folhas definitivas. As parcelas experimentais mediam 1,2 m de largura por 3 m de comprimento,

totalizando 3,6 m², com quatro linhas de plantio. As plantas das linhas laterais foram desconsideradas para avaliação (efeito bordadura), sendo consideradas apenas as plantas localizadas nas linhas centrais.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, com dez tratamentos em esquema fatorial 5 × 2 e cinco repetições, sendo a repetição uma planta de alface. Os tratamentos foram constituídos das lâminas de irrigação correspondente à reposição de 25%, 50%, 75%, 100% e 125% da taxa de evaporação da cultura (ET_c) e duas formas de irrigação, tratada magneticamente (ATM) e água convencional (AC).

Para a magnetização da água, utilizou-se o equipamento Sylocymol rural da empresa Timol. Foram implantados dois sistemas independentes de irrigação por gotejamento (1 para cada tipo de água), que era constituído de uma linha principal e fitas gotejadoras inseridas diretamente sendo as fitas do tipo Amandi, fabricado pela Petroísa Irrigações Ltda. A mangueira possuía espaçamento de 0,30 m entre gotejadores, sendo sua vazão média de 1,47 L.h⁻¹, quando submetido a 10 m.c.a. de pressão.

A irrigação e a aferição do tanque classe A foram realizadas diariamente às 8 h, sendo possível determinar o tempo de irrigação, utilizando-se a seguinte equação:

$$Ti = 6000 \cdot \frac{Kc \cdot Kp \cdot Eca \cdot Sl \cdot Sg \cdot TR}{Ei \cdot Vg} \quad (15)$$

em que Ti é o tempo de irrigação, Kc é o coeficiente de cultura, Kp é o coeficiente de tanque, Eca é a evaporação do tanque “Classe A” (mm.dia⁻¹), Sl é o espaçamento entre laterais (m); Sg é o espaçamento entre gotejadores (m), Tr é o turno de irrigação, Ei é a eficiência de irrigação (%) e Vg é a vazão de gotejadores (L.h⁻¹).

O cálculo da lâmina total de irrigação a ser aplicada foi realizado a partir do método proposto por Snyder (1992); deve-se ressaltar que foi desconsiderado o vento dentro da casa vegetação, em que é dado o coeficiente do tanque (Kp) pela seguinte equação:

$$Kp = 0,0482 + 0,024 \ln(B) - 0,00376 \cdot V + 0,0045 \cdot UR, \quad (16)$$

em que Kp é o coeficiente de tanque, B é a bordadura da área de vegetação em torno do tanque (m), V é a velocidade do vento a 2 m de altura ($m.s^{-1}$) e UR é a média da umidade relativa (%).

Os valores do Kc utilizados foram de acordo com a FAO (1998), em que é adotado 0,7 no início do ciclo 1, na meia estação do ciclo e 0,95 no final do ciclo.

Foram avaliados o número de folhas (NF), a fitomassa verde da parte aérea (FVA), a fitomassa seca da parte aérea (FSA), a fitomassa verde da raiz (FVR), a fitomassa seca da raiz (FSR) e o comprimento de raiz (CR).

Método de elaboração do sistema *fuzzy* e da análise de regressão

Para a elaboração da modelagem matemática *fuzzy*, foi desconsiderada a variável comprimento de raiz (CR), pois não apresentaram efeito significativo da lâmina de irrigação e do tipo de água ($p < 0,05$), assim se consideraram as demais variáveis (número de folhas (NF), fitomassa verde da parte aérea (FVA), fitomassa seca da parte aérea (FSA), fitomassa verde da raiz (FVR), fitomassa seca da raiz (FSR)).

A modelagem matemática *fuzzy*, proposta nesta presente secção, buscou explicar características da produção agrônômica da cultura da alface em função do manejo de irrigação na utilização do tratamento magnético da água nos intervalos intermediários aos dos níveis dos fatores do experimento agrônômicos realizado, a saber $[25k\%, 25(k + 1)\%]$, $1 \leq k \leq 4$. Nos níveis $25k\%$, $1 \leq k \leq 4$, são estimados valores a partir dos conjuntos de dados coletados, sendo realizada uma modelagem de forma análoga para cada ciclo.

De acordo com Putti (2013), tal manejo foi realizado utilizando-se de diferentes níveis de irrigação para cada tratamento de água (ATM e AC) e diferentes lâminas de irrigação, enquanto que as características da produtividade agrônômica a serem utilizadas neste trabalho foram as variáveis biométricas, dados por NF, FVA, FSA, FVR e FSR.

Considerando-se um modelo de características agrônômicas desta forma, a função que representa o modelo descrito, é $f: X_1 \times X_2 \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^5$, com $y = f(x)$, em que \mathbb{R} é o conjunto dos números reais; em que $x = (x_1, x_2)$ é definido por $x_1 =$ taxa de

reposição hídrica (% da ETc) e $x_2 =$ tipo de água adotado na irrigação (água convencional (1) ou água tratada magneticamente (1)), com $x_1 \in X_1 = [25\%, 125\%]$ e $x_2 \in X_2 = \{0,1\}$; e $y = (y_1, \dots, y_6)$, é definido pelas médias dos valores das características biométricas, a saber $y_1 = \overline{NF}$, $y_2 = \overline{FVA}$, $y_3 = \overline{FVA}$, $y_4 = \overline{FSA}$ e $y_5 = \overline{FVR}$.

Este sistema baseado em regras *fuzzy* representa a função $F: [25,125] \times \{0,1\} \rightarrow \mathbb{R}^5$, $F(x, y) = (f_1(x, y), f_2(x, y), f_3(x, y), f_4(x, y), f_5(x, y))$, em que o produto cartesiano que representa o domínio das lâminas de irrigação (25 a 125% da ETc) e dos tipos de água adotado (0 para água convencional e 1 para água tratada magneticamente) e, no qual o contradomínio \mathbb{R}^5 representam as cinco variáveis de resposta avaliadas no experimento.

Como um dos conjuntos apresentou variáveis discretas, os resultados serão apresentados em dois gráficos bidimensionais, um para cada variável de resposta em cada ciclo, a saber:

- Grupo 1 - gráficos das funções $F_1^0: [25; 125 \times \{0\}] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_1^0(0, y) = f_1(0, y)$, no qual o contradomínio de F_1^0 é relativo ao número de folhas; $F_1^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_1^1(0, y) = f_1(1, y)$, no qual o contradomínio de F_1^1 é relativo ao número de folhas;
- Grupo 2 - gráficos das funções $F_2^0: [25; 125 \times \{0\}] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_2^0(0, y) = f_2(0, y)$, no qual o contradomínio de F_2^0 é relativo à fitomassa verde aérea; $F_2^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_2^1(0, y) = f_2(1, y)$, no qual o contradomínio de F_2^1 é relativo à fitomassa verde aérea;
- Grupo 3 - gráficos das funções $F_3^0: [25; 125 \times \{0\}] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_3^0(0, y) = f_3(0, y)$, no qual o contradomínio de F_3^0 é relativo à fitomassa seca aérea; $F_3^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_3^1(0, y) = f_3(1, y)$, no qual o contradomínio de F_3^1 é relativo à fitomassa seca aérea;
- Grupo 4 - gráficos das funções $F_4^0: [25; 125 \times \{0\}] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_4^0(0, y) = f_4(0, y)$, no qual o contradomínio de F_4^0 é relativo à fitomassa verde de raiz; $F_4^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_4^1(0, y) = f_4(1, y)$, no qual o contradomínio de F_4^1 é relativo à fitomassa verde de raiz;
- Grupo 5 - gráficos das funções $F_5^0: [25; 125 \times \{0\}] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_5^0(0, y) = f_5(0, y)$, no qual o contradomínio de F_5^0 é relativo à fitomassa seca de raiz; $F_5^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_5^1(0, y) = f_5(1, y)$, no qual o contradomínio de F_5^1 é relativo à fitomassa seca de raiz;

As variáveis de saída foram escolhidas elegendendo-se as variáveis das análises biométricas, observadas que não apresentaram diferenças significativas ($p < 0,001$), de acordo com Putti (2013).

A Figura 48 representa o modelo proposto em que se observam as entradas e as saídas.

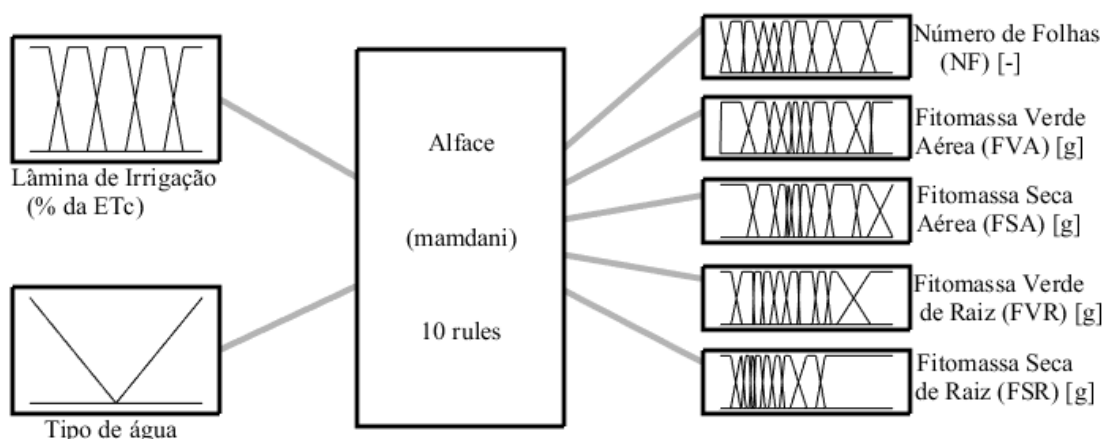


Figura 48. Sistema baseado em regras *fuzzy* para a avaliação da cultura da alface, submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipos de águas, para as variáveis de saída, número de folhas (NF), fitomassa verde aérea (FVA), fitomassa seca aérea (FSA), fitomassa verde de raiz (FVR) e fitomassa seca de raiz (FSR).

Para a variável de entrada Lâminas de Irrigação, consideraram-se cinco níveis, referentes às taxas de reposição de 25, 50, 75, 100 e 125% da ETc, que foram representadas por cinco conjuntos *fuzzy* denominadas respectivamente por L1, L2, L3, L4 e L5. De forma análoga realizada no Capítulo 1, adotaram-se os delimitadores das funções de pertinência de cada conjunto.

Para a variável de entrada “Tipo de Água”, adotaram-se dois conjuntos *fuzzy* com função triangular, porque o experimento desenvolvido utilizou dois tipos de água (“água convencional e água tratada magneticamente”); as funções de pertinência foram propostas no Capítulo 2.

Para as variáveis de saída do sistema *fuzzy* deste capítulo, adotou-se de forma análoga ao Capítulo 1 o método de determinação dos delimitadores de cada função de pertinência. Foram consideradas apenas as variáveis que apresentaram diferenças significativas frente a diferentes lâminas de irrigação e ao longo do ciclo. Diante do exposto foram consideradas as variáveis: número de folhas, fitomassa verde aérea, fitomassa seca aérea; fitomassa verde de raiz e fitomassa seca de raiz.

A base de regras do sistema *fuzzy* foi desenvolvida de forma análoga ao Capítulo 1, em que foram calculados os maiores graus de pertinência de cada mediana dos tratamentos, associando as variáveis de entrada com as de saída, como proposta por Cremasco et al. (2010) e Gabriel Filho et al. (2011) e aplicada nos Capítulos 1 e 2 (Tabela 26).

Tabela 26. Combinações das variáveis de entrada com pontos de grau de pertinência 1 associados aos conjuntos *fuzzy* para a construção da base de regras.

Tipo de água	Lâmina de irrigação	
	Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência 1 associado
AC	L1	25%
AC	L2	50%
AC	L3	75%
AC	L4	100%
AC	L5	125%
ATM	L1	25%
ATM	L2	50%
ATM	L3	75%
ATM	L4	100%
ATM	L6	125%

O método de inferência adotado no modelo foi análogo ao proposto no Capítulo 1, que foi o proposto por Mamdani e Assilian (1975), e para o cálculo da desfuzzyficação do sistema, foi considerado o método centro de área ou centroide. Utilizou-se o *software* Matlab, versão 8.4 (2014) para o desenvolvimento dos sistemas baseados em regras *fuzzy* (SBRF), por meio dele realizaram-se as simulações das variáveis de repostas.

Para o desenvolvimento das equações de regressão polinomiais múltiplas foram desenvolvidas de forma análoga ao Capítulo 1, em que previamente analisaram os pressupostos (normalidade, homocedasticidade), assim obtiveram as repostas dos modelos, que foram comparados com os dados coletados a campo.

Já para o cálculo da intensidade de associação dos modelos, tanto o modelo *fuzzy* quanto as repostas das equações de regressão foram comparadas com os dados coletados a campo, assim determinaram o erro quadrado médio, correlação de Pearson e o índice “d” de Willmott, como proposto no Capítulo 1.

Resultados e discussão

Equações de ajuste do modelo de regressão

Com os dados coletados, verificaram-se os pressupostos da normalidade e da homocedasticidade, os quais foram acatados, deste modo não houve a necessidade da transformação dos dados. Assim, determinaram-se as equações que ajustaram os dados, sendo possível verificar o comportamento das variáveis dependentes em

relação às variáveis independentes. Na Tabela 8 pode-se observar que apenas o comprimento de raiz não apresentou ajuste aos modelos de regressão.

Tabela 27. Coeficientes de regressão e determinação das equações de estimativa das variáveis biométricas da cultura alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipo de água.

Variável	Ciclo	$y = \beta_0 + ax_1 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3$					R ²
		β_0	a	a_1	a_2	a_3	
NF	1º	41,74*	6,08*	-71,61*	98,85*	-39,4*	0,64*
	2º	19,4*	1,84	-14,49	31,08*	-14,93	0,34*
FVA	1º	370,1*	70,63	-950,25*	1435,97*	602,54*	0,49*
	2º	228,46*	-501,20*	31,88	940,56*	424,09	0,26*
FSA	1º	13,49*	1,67*	-33,91*	50,44	-20,33*	0,46*
	2º	11,66*	1,93*	-24,18*	42,93*	-19,05	0,31*
FVR	1º	13,31*	-27,73	3,26*	42,57*	-17,91	0,26*
	2º	1,9*	23,46	3,01*	-25,7*	9,09*	0,43*
FSR	1º	1,81*	0,88*	-1,93	2,50*	-1,14	0,55*
	2º	0,41*	0,15	1,68*	-1,58*	0,41*	0,18*

Legenda: NF número de folha; FVA fitomassa verde aéreo; FSA fitomassa seco aéreo; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seco de raiz; x_1 tipo de água; x_2 lâmina de irrigação e * significativo para $\alpha = 5\%$.

A partir das equações de regressão acima determinadas, foi possível elaborar os gráficos, os quais estão apresentados juntamente com as curvas do sistema baseado em regras *fuzzy*, sendo possível verificar o comportamento das curvas de ambos os modelos.

Sistema *fuzzy* elaborado

A partir da metodologia de elaboração das funções de pertinência das variáveis de saída, para cada ciclo, foram elaborados os conjuntos *fuzzy* que permitiram a classificação de cada tratamento (maior grau de pertinência), assim podendo ser realizada a elaboração da base de regras (Figuras 49 e 50). Em apêndice podem se observar os pontos que determinam os vértices de cada conjunto *fuzzy*.

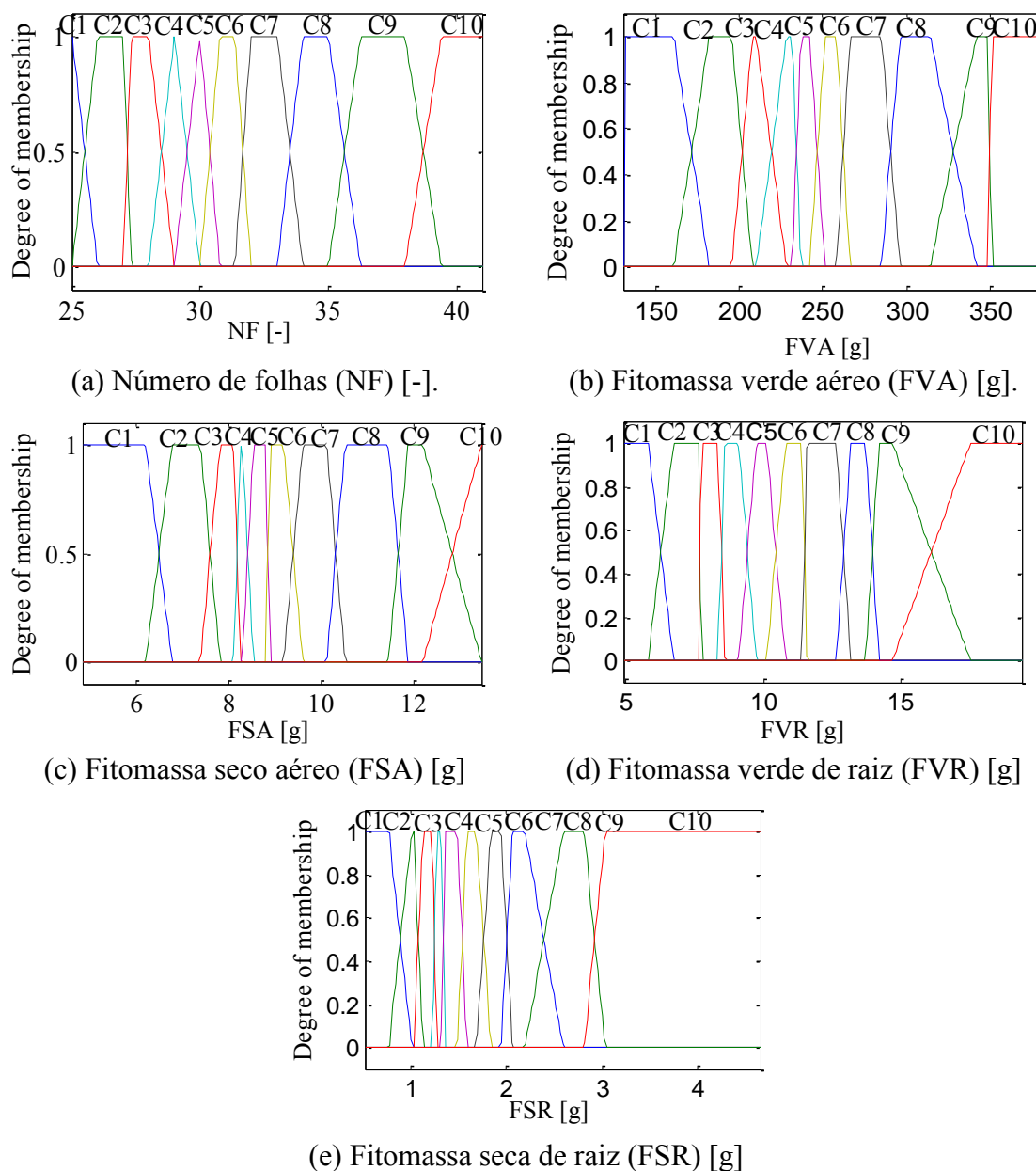


Figura 49. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a diferentes tipos de água e lâminas de irrigação, para o 1º ciclo.

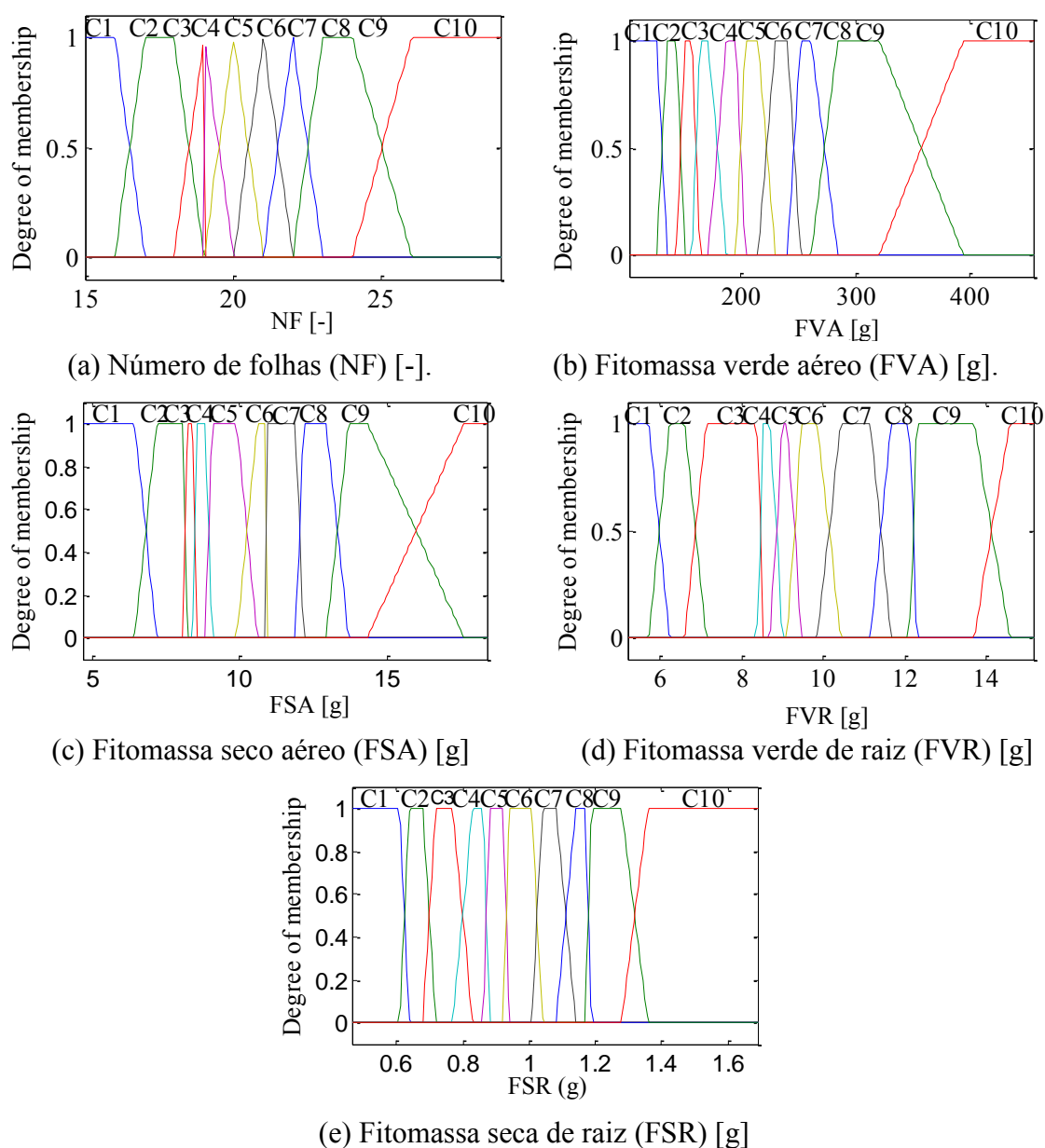


Figura 50. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a diferentes tipos de água e lâminas de irrigação, para o 2º ciclo.

Após definidas as funções de pertinência, foi possível elaborar a base de regras do sistema *fuzzy*. Para isso, associou-se o maior grau de pertinência para a variável biométrica referente ao tipo de tratamento que foi aplicado para a cultura da alface. Assim, foi possível verificar em que situação se encontrava a variável em análise comparando-a com os demais tratamentos. As Tabelas 30 e 31 apresentam as regras *fuzzy*, para os 1º e 2º ciclos, respectivamente.

Tabela 28. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy*, para o 1º ciclo da cultura da alface submetida em diferentes taxas de reposição e tipo de água.

Variáveis de saída			Variáveis de saída									
Tipo de Água	Lâmina de irrigação											
Tipo de água	Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1	NF	Conjunto <i>fuzzy</i>	FVA	Conjunto <i>fuzzy</i>	FSA	Conjunto <i>fuzzy</i>	FVR	Conjunto <i>fuzzy</i>	FSR	Conjunto <i>fuzzy</i>
AC	L1	25%	30	C6	236,2	C5	8,42	C5	7,74	C3	1,02	C3
AC	L2	50%	25	C2	186,1	C2	7,45	C3	7,48	C3	1,19	C4
AC	L3	75%	28	C4	234,6	C5	8,28	C5	9,86	C5	1,47	C6
AC	L4	100%	27	C3	200,1	C3	8,26	C4	7,95	C3	1,03	C3
AC	L5	125%	30	C6	291,5	C8	12,20	C10	12,26	C8	1,42	C6
ATM	L1	25%	33	C8	266,3	C7	8,99	C6	13,61	C9	2,58	C9
ATM	L2	50%	30	C6	217,1	C4	8,31	C5	11,55	C7	2,59	C9
ATM	L3	75%	31	C6	294,6	C8	9,17	C7	13,12	C8	1,50	C6
ATM	L4	100%	39	C10	351,3	C10	12,13	C10	14,13	C9	2,27	C9
ATM	L5	125%	35	C9	292,2	C8	11,47	C9	11,23	C7	1,66	C7

Legenda: L1: lâmina de 25% da ETc; L2: lâmina de 50% da ETc; L3: lâmina de 75% da ETc; L4: lâmina de 100% da ETc; L5: lâmina de 125% da ETc; ATM: água tratada magneticamente; AC: água convencional; NF número de folha; FVA fitomassa verde aéreo; FSA fitomassa seco aéreo; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seco de raiz.

Tabela 29. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy*, para o 2º ciclo da cultura da alface submetida em diferentes taxas de reposição e tipo de água.

Variáveis de saída			Variáveis de saída									
Tipo de Água	Lâmina de irrigação											
Tipo de água	Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência associado a 1	NF	Conjunto <i>fuzzy</i>	FVA	Conjunto <i>fuzzy</i>	FSA	Conjunto <i>fuzzy</i>	FVR	Conjunto <i>fuzzy</i>	FSR	Conjunto <i>fuzzy</i>
AC	L1	25%	18	C3	170,2	C5	7,12	C2	6,03	C2	0,63	C2
AC	L2	50%	21	C8	251,1	C8	12,12	C8	11,76	C8	1,01	C7
AC	L3	75%	19	C4	225,2	C7	10,27	C6	6,83	C3	1,14	C8
AC	L4	100%	19	C4	151,8	C3	8,39	C4	6,53	C3	0,66	C3
AC	L5	125%	19	C4	229,7	C7	9,77	C6	9,10	C6	0,74	C4
ATM	L1	25%	19	C4	170,4	C5	9,15	C5	9,11	C6	0,85	C5
ATM	L2	50%	19	C4	142,1	C3	7,85	C3	8,99	C5	1,03	C7
ATM	L3	75%	20	C7	164,0	C4	9,00	C5	13,60	C10	0,93	C6
ATM	L4	100%	26	C10	400,0	C10	18,00	C10	14,85	C10	1,36	C10
ATM	L5	125%	23	C9	262,5	C9	13,93	C9	11,48	C8	1,01	C7

Legenda: L1: lâmina de 25% da ETc; L2: lâmina de 50% da ETc; L3: lâmina de 75% da ETc; L4: lâmina de 100% da ETc; L5: lâmina de 125% da ETc; ATM: água tratada magneticamente; AC: água convencional; NF número de folha; FVA fitomassa verde aéreo; FSA fitomassa seco aéreo; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seco de raiz.

Como exemplo, as três primeiras linhas da Tabela 29 representam as relações, as demais linhas são interpretadas de forma análoga.

- Se (lâmina de irrigação é “L1”) e (tipo de água “AC”) então (NF é ao “C3”, FVA é “C5”, o FSA é “C2”, a FVR é “C2”, o FSR é “C2”);
- Se (a lâmina de irrigação é “L2”) e (tipo de água “AC”) então (o NF pertence é “C8”, FVA é “C8”, o FSA é “C8”, a FVR é “C8”, o FSR é “C7”);
- Se (a lâmina de irrigação é “L3”) e (tipo de água “AC”) então (o NF pertence é “C4”, FVA é “C7”, o FSA é “C6”, a FVR é “C3”, o FSR é “C8”).

Simulação do modelo

Depois de desenvolvidos os modelos *fuzzy*, foi implementada a função *evalfis*, que possibilita simular cenários dentro do ambiente Matlab, assim foi possível verificar os níveis intermediários de irrigação para cada tipo de água, antes não observados experimentalmente. Também se realizaram as simulações para os modelos de regressão múltiplas, possibilitando a elaboração dos gráficos abaixo para as variáveis de saída.

O resultado dos modelos de regressão, desenvolvido para o número de folha, é apresentado na Figura 51. Pode-se observar que, de forma geral, a irrigação utilizando água tratada magneticamente apresentou maior incremento.

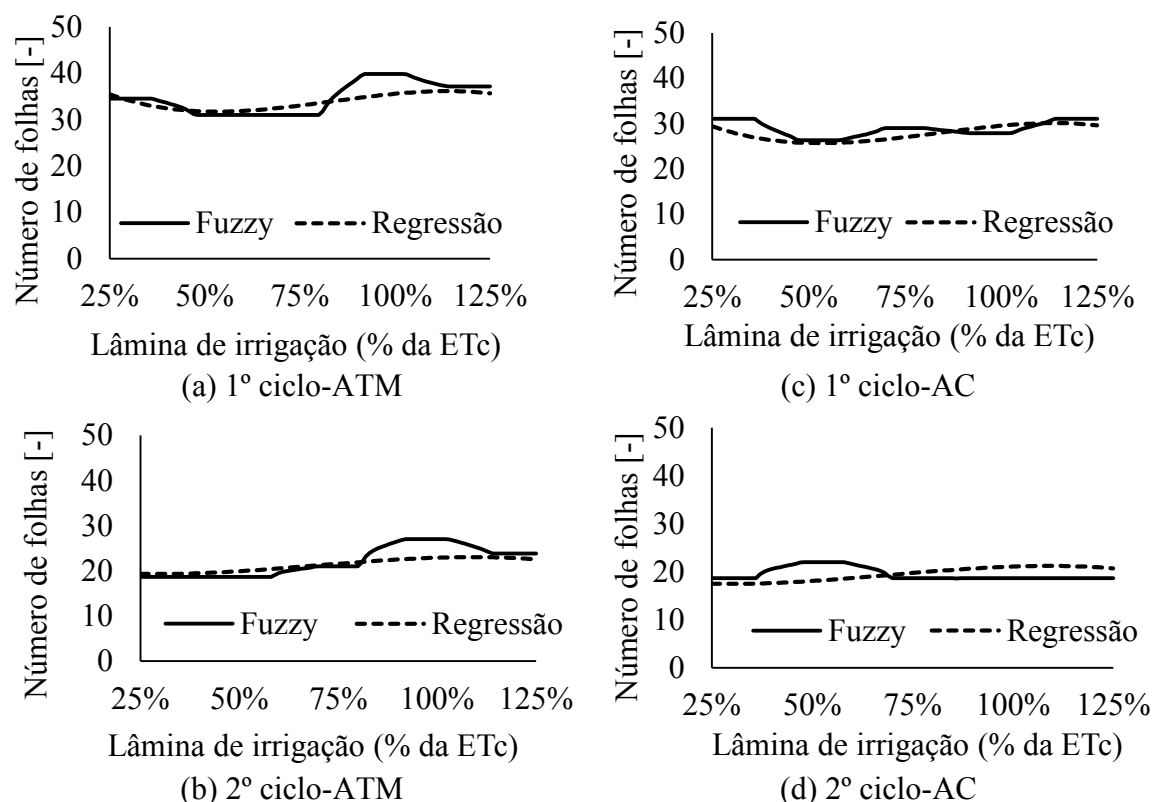


Figura 51. Modelos *fuzzy* e de regressão do número de folhas de plantas submetidas a diferentes níveis de reposição hídrica e com ATM (a) 1º ciclo, (b) 2º ciclo; AC (c) 1º ciclo e (d) 2º ciclo.

A partir dos modelos de regressão, para a análise do 1º ciclo, foi possível determinar que a máxima produção para os tratamentos irrigados com ATM ocorreu próximo à lâmina de reposição de 91% da ETc, atingindo a produção de 40 folhas (Figura 51a). Já para os tratamentos irrigados com AC, a produção foi em torno de 31 folhas sendo irrigado com 113% da ETc (Figura 51c), acarretando em aumento na máxima produção de 28%.

Já na análise do 2º ciclo, pode observar que o efeito da lâmina de irrigação foi similar ao 1º ciclo, pois a máxima produção do número de folhas ocorreu com a lâmina de reposição de 90% da ETc quando irrigada com ATM, em que ocorreu um acúmulo em torno de 27 folhas (Figura 51b). Já para a irrigação com AC, notou-se que a máxima produção de folhas ocorreu próximo à taxa da lâmina de 50% da ETc, acumulando 22 folhas (Figura 51d). Deste modo, ocorreu um incremento de 22% para a máxima produção do número folhas quando irrigada com ATM.

Com os modelos desenvolvidos, foi possível verificar que tais resultados corroboram com diversos autores, pois o aumento provado pela irrigação com

ATM é pelas alterações em suas propriedades físicas e químicas, as quais provocam alteração em sua dinâmica no solo (KHOSHRAVESH et al., 2011; LIN; YOTAVAT, 2011; OZEKI et al., 1996; NAESHER, 2008; ZHOU et al., 2000). Deve-se ressaltar que, de acordo com Otsuka e Ozeki (1990), não foram verificadas diferenças das propriedades químicas e físicas quando as águas foram submetidas a diferentes intensidades de força gerada pelo campo magnético.

Verificou-se que a relação água-solo-planta é alterada quando ocorre a irrigação com ATM. Amiri e Dadkhah (2006), Mostafazadeh-Fard et al., (2011) e Khoshravesh et al. (2011) verificaram que houve a redução da umidade do solo, facilitando deste modo a disponibilidade de água para as plantas.

De acordo com Noran et al. (1995) e Mohmed (2013), a ATM favorece maior disponibilidade dos minerais no solo e reduz o potencial osmótico do solo, beneficiando a absorção de íons e consequentemente proporcionando maior desenvolvimento das plantas ou redução no volume de água aplicado.

Diversos autores verificaram o aumento significativo do número de folhas quando as culturas foram submetidas às irrigações com ATM, tais como as culturas do aipo, ervilha e vagem (MAHESHWARI; GREWAL, 2009), trigo (HOZAYN; QADOS, 2010), pinhão manso (LOPES et al., 2007), milho (AODA; FATTAH, 2011), tabaco (ALADJADJIYAN; YLIEVA, 2003), pepino (PÉREZ et al., 2011), ervilha (SAYED 2014) e tomate (SELIM; EL-NADY, 2011).

A fitomassa verde aérea apresentou alta relação com o número de folhas, com o comportamento bem próximo em ambos os ciclos, verificando-se maior desenvolvimento quando irrigada com ATM. (Figura 52).

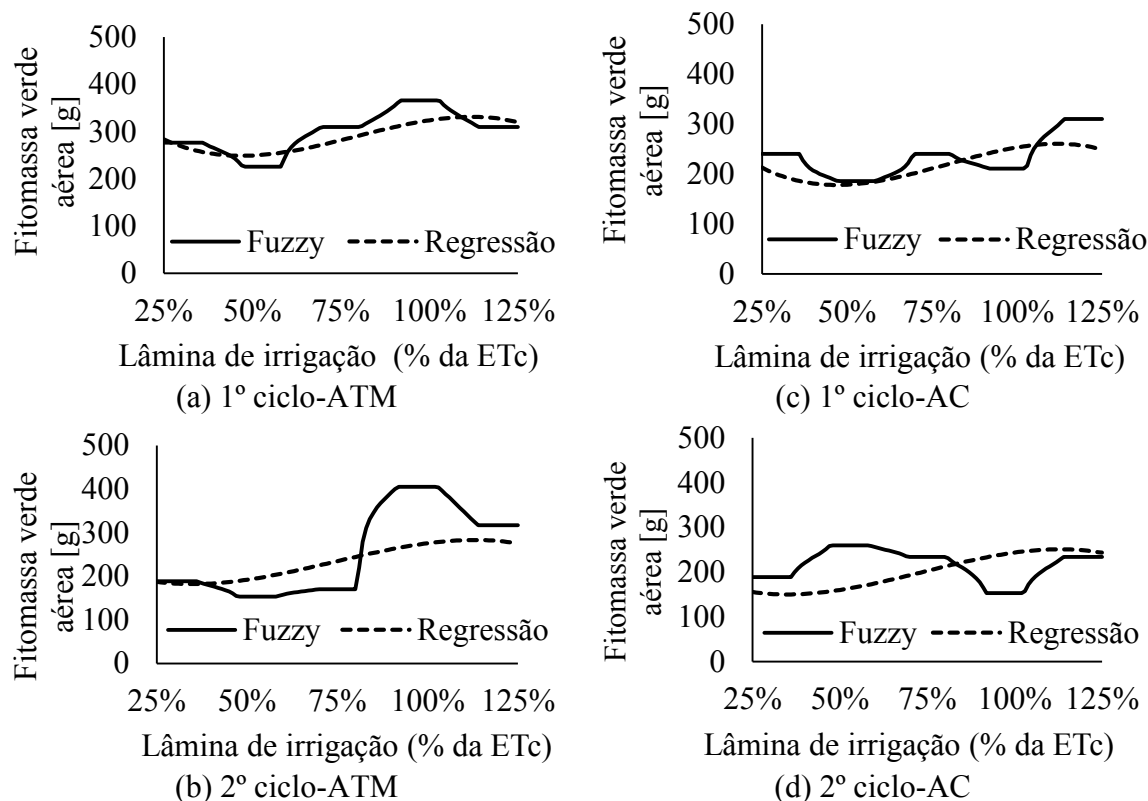


Figura 52. Modelos *fuzzy* e de regressão da fitomassa verde aérea de planta submetida em diferentes níveis de reposição hídrica.

A partir das equações de regressão, foi possível inferir que os tratamentos submetidos à irrigação com ATM apresentaram maior desenvolvimento, sendo que a máxima fitomassa verde aérea foi de $366,49 \text{ g.planta}^{-1}$ irrigado com 91,67% da ETc (Figura 52a). Os tratamentos irrigados com AC apresentaram máximo acúmulo em torno de $309 \text{ g.planta}^{-1}$, com taxa de reposição de 113% da ETc (Figura 52c). Deve-se ressaltar que, para atingir a mesma produção máxima da alface irrigada com AC, seria necessário apenas uma taxa de reposição de 70% da ETc irrigada com ATM.

Ao analisar o 2º ciclo, observou-se que houve acúmulo de $405 \text{ g.planta}^{-1}$ quando irrigado a uma taxa de reposição de 90% da ETC e ATM (Figura 52b). Porém, quando submetido à irrigação com AC, verificou-se acúmulo de $259,86 \text{ g.planta}^{-1}$ com a taxa de reposição de 50%, constatando que houve incremento para a máxima produção de 50% da ETc.

É possível inferir que o tratamento magnético da água apresenta benefícios para a agricultura. Hozayn et al. (2014) verificaram que a utilização de água

tratada magneticamente apresenta um potencial para enfrentar a escassez de água para a agricultura.

Para a cultura do feijão, Moussa (2011) observou incremento significativo para a fitomassa fresca da planta e na produtividade utilizando irrigação com ATM, corroborando com o observado por Qados e Hozan (2010).

A irrigação, utilizando ATM, apresenta diversos benefícios como os observados na literatura, que compreendem desde o aumento de produtividade até mesmo na qualidade dos alimentos. Assim, foi verificado aumento significativo na produção das culturas do trigo (KORDAS, 2002), lentilha e ervilha (MARTINÉZ et al., 2009), pimenta (RAWBDEH et al., 2014), tomate (SOUZA et al., 2005; SELIM e EL-NADY, 2011) e milho (AODA; FATTAH, 2011).

O acúmulo da fitomassa seca aérea apresentou comportamento similar à fitomassa verde aérea, sendo que os maiores acúmulos ocorreram para os tratamentos irrigados com ATM, e próximos às taxas de reposição de 90% da ETC, podendo verificar o aumento do acúmulo da FSA (Figura 53).

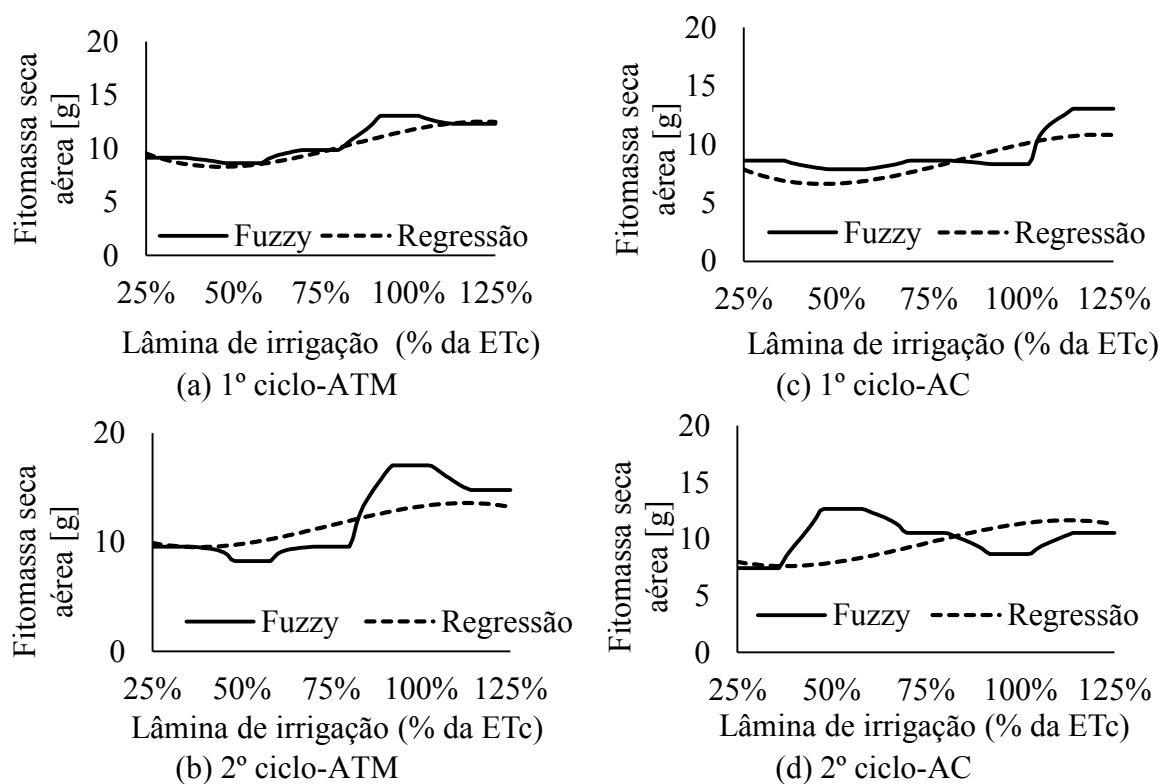


Figura 53. Modelos *fuzzy* e de regressão da fitomassa seca aérea de planta submetida em diferentes níveis de reposição hídrica.

Com as equações de regressão desenvolvidas, foi possível inferir que para o 1º ciclo, ocorreu o maior acúmulo de fitomassa seca aérea para ambos os tipos de água adotada na irrigação. Porém, houve diferença na taxa de reposição, em que a irrigação utilizando AC atingiu a maior fitomassa com lâmina de irrigação de 113% da ETc, enquanto a irrigação com ATM, ocorreu com 91% da ETc (Figuras 53a e c).

Já para o 2º ciclo, verificou-se maior incremento para os tratamentos irrigados com ATM (Figura 53b), em que se verificou a fitomassa em torno de 17 g.planta⁻¹, com a taxa de reposição de 90%. Já quando irrigado com AC, notou-se acúmulo de 12,6 g.planta⁻¹ com a taxa de reposição de 50 % da ETc (Figuras 53b e d).

A fitomassa seca aérea está diretamente relacionada com a fitomassa verde aérea e foi observado por Sayed (2014), que as plantas da ervilha quando submetidas à irrigação com ATM apresentaram aumento em seu acúmulo de fitomassa seca. Mohamed (2013) também encontrou resultados em que houve maior acúmulo para a cultura do tomate, também verificado por Selim e El-Nady (2011).

O sistema radicular apresentou maior desenvolvimento quando submetido à irrigação com água tratada magneticamente. Para a variável de resposta fitomassa verde de raiz, onde o maior acúmulo ocorreu na faixa de 75 a 100% da ETc, quando submetido à irrigação com ATM (Figura 54).

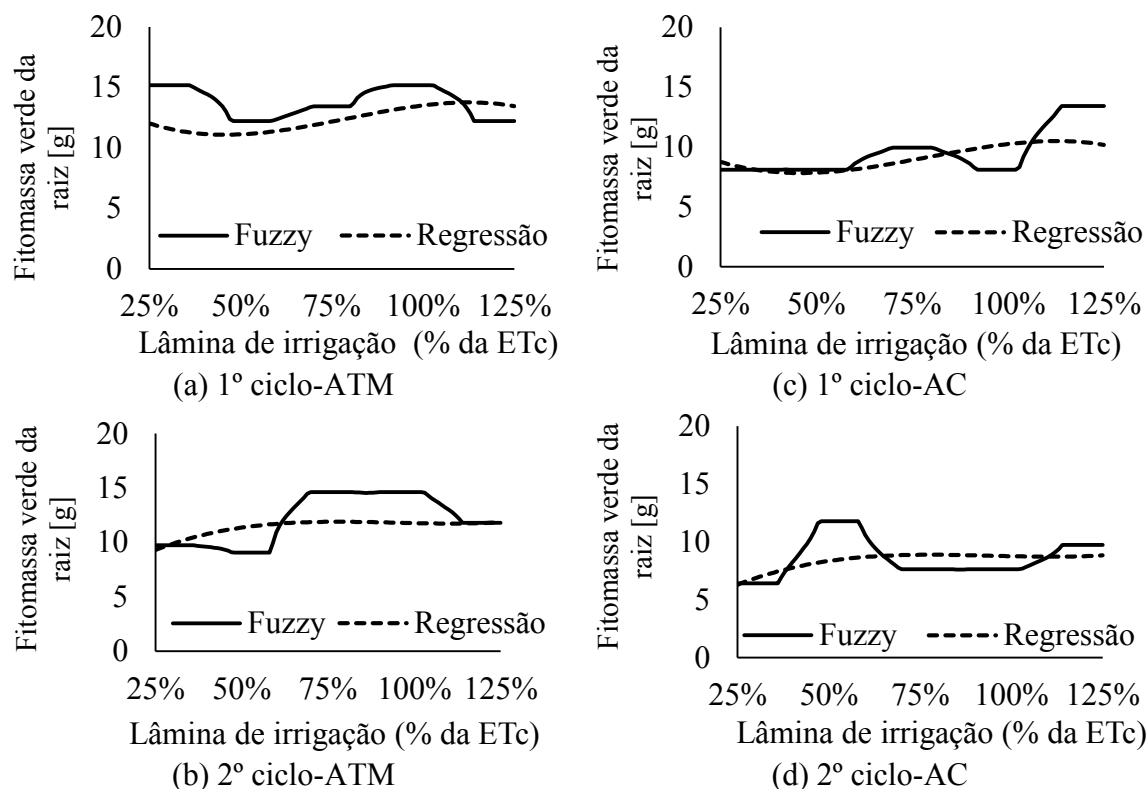


Figura 54. Modelos *fuzzy* e de regressão da fitomassa verde da raiz de planta submetida em diferentes níveis de reposição hídrica.

Com o modelo *fuzzy* desenvolvido, foi possível verificar que o tratamento utilizando ATM atingiu máxima produção de $15,19 \text{ g.planta}^{-1}$, quando irrigado com 25% da ETc (Figura 54), já para o irrigado com AC atingiu máxima fitomassa de $13,43 \text{ g.planta}^{-1}$ com a lâmina de irrigação de 113% da ETc (Figura 54c).

Para o 2º ciclo, verificou-se que a máxima fitomassa ocorreu quando foi submetida à irrigação com ATM, em que houve um acúmulo de $14,63 \text{ g.planta}^{-1}$, sendo irrigado com a taxa de reposição de 70% da ETc. Porém, ao submeter a irrigação com AC, ocorreu o maior acúmulo para a taxa de reposição de 47% com valor de $11,80 \text{ g.planta}^{-1}$.

Mohamed (2013) verificou que a ATM altera as características químicas do solo (pH e CE), podendo facilitar o desenvolvimento do sistema radicular, como ocorreu para a cultura do tomate.

Maheshwari e Grewal (2009) verificaram que para as culturas da salsa e ervilha, houve incremento significativo na fitomassa verde de raiz quando submetido à irrigação com ATM, tais como verificaram Lopes et al. (2007) para a cultura do pinhão

manso, Aoda e Fattah (2011) para cultura do milho e Qados e Hozayn (2010) para a cultura da lentilha e ervilha.

A fitomassa seca do sistema radicular apresentou um comportamento muito similar ao ocorrido com a fitomassa verde, em que o maior acúmulo ocorreu quando irrigado com ATM (Figura 55).

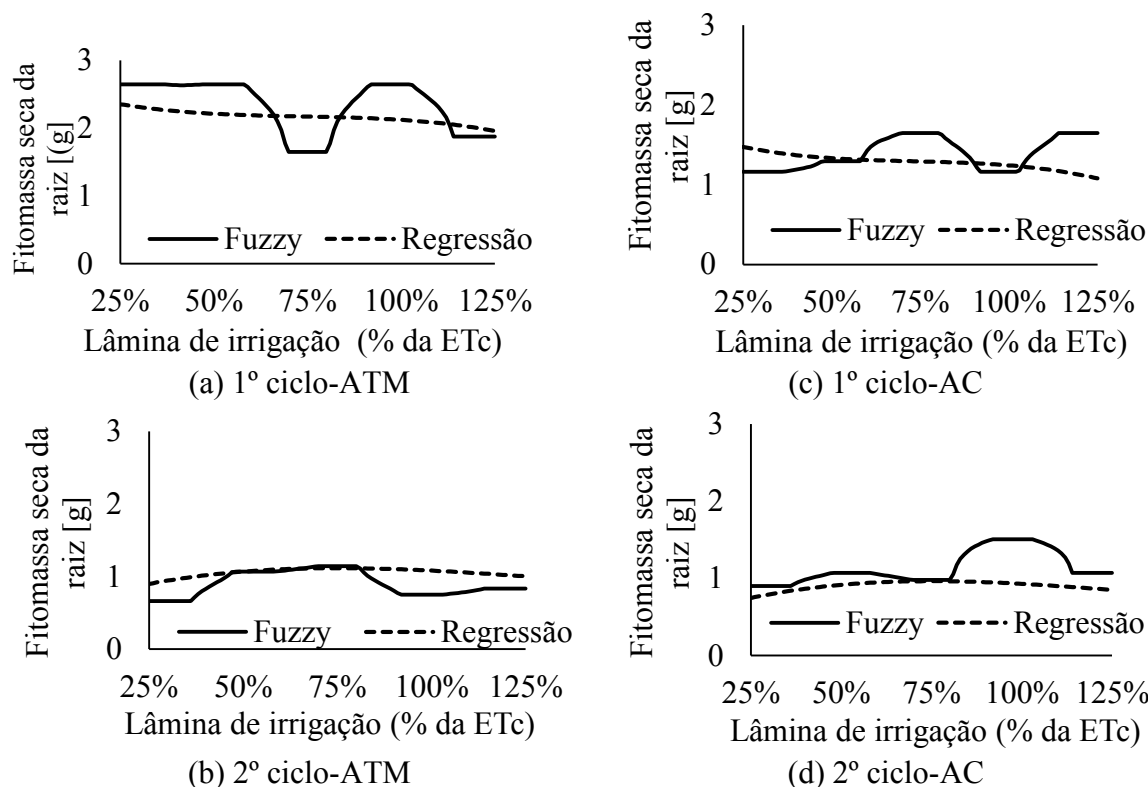


Figura 55. Modelos *fuzzy* e de regressão da fitomassa seca da planta submetida em diferentes níveis de reposição hídrica.

Foi possível verificar que, a partir do modelo de regressão desenvolvido, ambos os ciclos apresentaram maior acúmulo quando irrigado com ATM; para o primeiro ciclo chegou a ocorrer um acúmulo de $2,65 \text{ g.planta}^{-1}$ para a taxa de reposição de 25% da ETc, e enquanto que para o segundo ciclo, o acúmulo foi de $1,64 \text{ g.planta}^{-1}$ para uma taxa de reposição de 69% da ETc. Porém, quando irrigado com AC, verificou-se menor acúmulo em ambos os ciclos, sendo apenas de $1,51 \text{ g.planta}^{-1}$ para o 1º ciclo e a taxa de reposição de 91%, já para o segundo ciclo verificou acúmulo de $1,14 \text{ g.planta}^{-1}$ para a taxa de 68% da ETc.

Moussa (2011) constatou que a cultura do feijão, quando submetida à irrigação com ATM, apresentou maior incremento na fitomassa seca de raiz. Maheshwari e Grewal (2009) observaram que também houve incremento para a cultura da salsa, assim

como Selim e El-Nady (2011) verificaram o mesmo comportamento para a cultura do tomate. Selim e El-Nady (2011) observaram que a cultura do tomate apresentou maior desenvolvimento do sistema radicular quando irrigado com água tratada magneticamente. Corroborando também com os resultados obtidos, Sayed (2014) também constatou maior desenvolvimento do sistema radicular para a cultura da ervilha.

A partir da implementação do sistema baseado em regras *fuzzy* no Matlab, possibilitou-se a geração de combinações dentro do intervalo pré-estabelecido para as variáveis de entrada, no caso tipo de água (convencional ou tratada magneticamente) e lâminas de irrigação (25 a 125% da ETc), como realizado anteriormente nas figuras de cada resposta do modelo. Assim, aplicando o método de desfuzzyficação de Mamdani, são geradas automaticamente as respostas das variáveis de saída do sistema, sendo que nestas simulações podem-se verificar de forma precisa e pontual os efeitos das combinações das entradas do sistema *fuzzy*.

Análise da intensidade de associação dos modelos

Com o modelo *fuzzy* e os modelos de regressão foi possível realizar as comparações da intensidade de associação com os dados coletados a campo; deve-se ressaltar que todas as equações foram significativas ($p < 0,05$). Após os cálculos das regressões múltiplas calcularam-se os valores do EQM, “d” de Willmott, r (*fuzzy* e regressão polinomial). Tais comparações foram realizadas para as variáveis biométricas da cultura da alface quando submetidas em diferentes lâminas de irrigação e tipo de água, para cada ciclo.

Para as variáveis analisadas foi possível verificar a partir da Tabela 30 que o modelo *fuzzy* apresentou ajuste mais preciso quando comparado ao modelo de regressão, tal efeito foi semelhante em ambos os ciclos.

Tabela 30. Análise comparativa entre os dados coletados a campo com os modelos *fuzzy* e de regressão, para as variáveis biométricas da cultura da alface submetidas a diferentes lâminas de irrigação e tipo de água.

Variável	Modelo	1º ciclo			2º ciclo		
		EQM	r	d	EQM	r	d
N.F.	<i>fuzzy</i>	6,18	0,84*	0,993	2,99	0,81*	0,992
	regressão	7,93	0,77*	0,991	5,46	0,58*	0,986
P.V.A.	<i>fuzzy</i>	1502,58	0,81*	0,977	1498,88	0,89*	0,960
	regressão	2018,82	0,70*	0,969	5023,86	0,50*	0,890
P.S.A.	<i>fuzzy</i>	3,714	0,72 *	0,953	2,74	0,86*	0,973
	regressão	4,37	0,63*	0,945	7,00	0,56*	0,931
P.V.R.	<i>fuzzy</i>	6,71	0,70*	0,936	4,10	0,79*	0,951
	regressão	8,48	0,53*	0,921	8,68	0,36*	0,896
P.S.A.	<i>fuzzy</i>	0,303	0,72*	0,670	0,041	0,66*	0,495
	regressão	0,411	0,58*	0,730	0,064	0,30*	0,449

Legenda: NF número de folha; FVA fitomassa verde aérea; FSA fitomassa seca aérea; FVR fitomassa verde de raiz; FSR fitomassa seca de raiz e d de Willmott, * significativo para $\alpha = 5\%$.

De forma geral, pode-se inferir que o modelo *fuzzy* apresentou um ajuste melhor quando comparado com o modelo de regressão. Pois bem, verificou-se que para todas as variáveis nos dois ciclos, o comportamento foi igual. Em que ocorreu a redução do valor do EQM para o modelo baseado em lógica *fuzzy*.

Assim, foi verificado o valor da exatidão do modelo, por meio do cálculo do “d” de Willmott, em que também foi verificado para todas as variáveis em ambos os ciclos o aumento do valor para o modelo *fuzzy*, tal fato ocorreu analogamente para o valor do r.

Também se deve ressaltar que ao calcular o valor de p para os modelos, foram verificados que todos são significativos. Assim, pode-se destacar que os modelos são representativos para os dados observados.

O ajuste mais preciso também foi observado por Rahmanian et al. (2011), após desenvolverem um modelo para simular a remoção de elementos químicos em meio aquoso, e verificaram que o sistema apresentou ser mais preciso, e também apresentou um valor menor de EQM e r. Tais resultados também foram observados por Papadopoulos et al. (2011), em que o modelo *fuzzy* para decisão da adubação nitrogenada teve a precisão maior que a regressão. Giusti et al. (2015) verificaram que o modelo *fuzzy* de suporte para a decisão da irrigação apresentou ser mais preciso que os modelos de regressão.

Conclusão

O tratamento magnético da água resultou em aumento na produção da cultura da alface, assim como no sistema radicular. Também, verificou-se que pelo desenvolvimento da planta, pode-se atingir a mesma produção máxima da alface irrigada com AC, com volume inferior com ATM, sendo que tal técnica pode alavancar a produção de alimentos e otimizar o uso da terra.

O modelo *fuzzy* apresentou um ajuste melhor quando comparado com os dados coletados a campo do que o modelo de regressão. Para todas as variáveis analisadas, os valores do EQM apresentaram redução, o coeficiente de correlação apresentou um aumento no valor, assim como o aumento no valor da exatidão do modelo. A aplicação da lógica *fuzzy* pode ser uma ferramenta utilizada para a avaliação do comportamento de experimentos, pois de forma geral apresentou resultados mais precisos, pois os ajustes das curvas ficaram mais próximos dos dados observados que a regressão.

Referências

- ALADJADJIYAN, A.; YLIEVA, T. Influence of stationary magnetic field on the early stages of the development of tobacco seeds. **Journal of Central European Agriculture**, v. 4, n. 2, p. 1-8, 2003.
- AMIRI, M. C.; DADKHAH, A. A. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment. **Colloids and Surfaces A**, v. 278, p. 252-255, 2006.
- AODA, M. I. É.; FATTAH, M. A. The interactive effects of water magnetic treatment and deficit irrigation on plant productivity and water use efficiency of corn. **The Iraqi Journal of Agricultural Sciences**, v. 42, p. 164-179, 2011.
- BAHAT, M.; INBAR, G.; YANIV, O.; SCHNEIDE, M. A *fuzzy* irrigation controller system. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 13, p. 137-145, 2000.
- BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C.; TONELLI, P. A. *Fuzzy* modelling in population dynamics. **EcologicalModelling**, v. 128, p. 27-33, 2000.
- BLANCO-FERNÁNDEZ, A. CASALS, M.R.; COLUBI, A.; CORRAL, N.; GARCÍA-BÁRZANA, M.; GIL, M. A.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, G.; LÓPEZ, M.T.; LUBIANO, M.A.; M. MONTENEGRO, M.; RAMOS-GUAJARDO, A. B.; DE LA ROSA DE SÁA, S.; SINOVA, B. A distance-based statistical analysis of *fuzzy* number-valued data. **International Journal of Approximate Reasoning**, v. 55, p. 1487-1501, 2014.

- CASA, A. C. L.; OVANDO, G. G. Climate change and its impact on agricultural potential in the central region of Argentina between 1941 and 2010. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 195, p. 1-11, 2013.
- 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.
- COPPI, R.; GIL, M.A.; KIERS, H. A. L. The *fuzzy* approach to statistical analysis **Computational statistics & data analysis**, v. 51, p. 1-14, 2006.
- 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.
- DEEPAK, R. K.; JONES, D. D.; MEYER, G. E.; Brand, R. M.; Rule-based Mamdani-type *fuzzy* modeling of skin permeability. **Applied Soft Computing**, v. 8, p. 285-294, 2008.
- DOURADO NETO, D.; LIER, Q. D. 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.
- EL-FADEL, M.; GHANIMEH, S.; MAROUN, R.; ALAMEDDINE, I. Climate change and temperature rise: Implications on food-and water-borne diseases. **Science of the Total Environment**, v. 437, p. 15-21, 2012.
- ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SORAES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v. 86, p. 299-309, 2009.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília**, Embrapa Produção de Informação, 2006. 286p
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2014. Disponível em: <<http://www.fao.org/home/en/>> Acesso em: 20 mar. 2015.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nation). **Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements - FAO** - Irrigation and drainage. Local: FÉ, 1998. 56p.
- FARGHALLY, H. M.; ATIA, D. M.; EL-MADANY, H. T.; FAHMY, F. H. Fuzzy Logic Controller based on geothermal recirculating aquaculture system. **Egyptian Journal of Aquatic Research**, v. 40, p. 103-109, 2014.
- PÉREZ, R. A. Q.; ALEMÁN, E. I.; RICARDO, F.A. S.; REGUEIFEROS, I. FERNÁNDEZ, G. M. L. Effect of the water treated with static magnetic field on *Meloidogyne* spp. in *Cucumis sativus* in greenhouse. **Centro Agrícola**, v. 38, n. 4, p. 83-87, 2011.

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 Agricola**, v. 31, n. 4 p. 813-825, 2011.

GHALEH, E. M.; OMID, M.; KEYHANI, A.; DALVAND, M. J. Comparison of *fuzzy* and on/off controllers for winter season indoor climate management in a model poultry house. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 110, p. 187-195, 2015

GRAFTON, R. Q.; PITTOCK, J.; DAVIS, R.; WILLIAMS, J.; FU, G.; WARBURTON, M.; UDALL, B.; MCKENZIE, R.; YU, X.; CHE, N.; CONNELL, D.; JIANG, Q.; KOMPAS, T.; LYNCH, A.; NORRIS, R.; POSSINGHAM, H.; QUIGGIN, J. Global insights into water resources, climate change and governance. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 4, p. 315-321, 2012.

GUPTA, M. M. Twenty-five years of fuzzy sets and systems: A tribute to Professor Lotfi A. Zadeh. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 40, p. 109-413, 1991.

HAHN, F. *Fuzzy* controller decreases tomato cracking in greenhouses. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 77, p. 21-27, 2011.

HOWELLS, M.; HERMANN, S.; WELSCH, M.; BAZILIAN, M.; SEGERSTRÖM, R.; ALFSTAD, T. GIELEN, D.; ROGNER, H.; FISCHER, G.; VELTHUIZEN, H. V.; WIBERG, D.; YOUNG, C.; ROEHL, R. A.; MUELLER, A.; STEDUTO, P.; RAMMA, I. Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 7, p. 621-626, 2013.

HOZAYN, M.; QADOS, A. M. S. A. Irrigation with magnetized water growth, chemical constituent and yield of chickpea (*Cicerarietinum* L.) **Agriculture and Biology Journal of North America**, v. 1, n. 4, p. 671-676, 2010.

HOZAYN, M.; QADOS, A. M. S. A. Irrigation with magnetized water enhances growth, chemical constituent and yield of chickpea. **Agriculture and biology journal of north America**, v.1, n. 5, p. 671-676, 2010.

HOZAYN, M.; ABD EL MONEM, A. A.; ABD EL-FATAH ELWIA, T.; EL-SHATAR, M.M. Future of magnetic agriculture in arid and semi-arid regions. **Scientific papers series a agronomy**, v. 57, p. 197-204, 2014

KHOSHRAVESH, M.; MOSTAFAZADEH-FARD, B.; MOUSAVI, S. F.; KIANI, A. R. Effects of magnetized water on the distribution pattern of soil water with respect to time in trickle irrigation. **Soil use management**, v. 27, n. 4, p. 515-522, 2011.

KOIWANIT, J.; SUPAP, T.; CHAN, C.; GELOWITZ, D.; IDEM, R.; Pontiwachwuthikul, P. An expert system or monitoring and diagnosis of Ammonia emissions from the post-combustion carbon dioxide capture process system. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 26, p. 158-168, 2014.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cm x 200cm.

- KORDAS, L. The Effect of Magnetic Field on Growth, Development and the Yield of Spring Wheat. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 11, n. 5, p. 527-530, 2002.
- LAASRI, E. H. A.; AKHOUAYRI, E. S.; AGLIZ, D.; ZONTA, D. ATMAN, A. A *fuzzy* expert system for automatic seismic signal classification. **Expert Systems with Applications**, v. 42, p. 1013-1027, 2015.
- LATTIN, J.; CARROLL, J. D.; GREEN, P. E. **Análise de dados multivariados**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.
- LEVIDOW, L.; ZACCARIA, D.; MAIA, R.; VIVAS, E.; TODOROVIC, M.; SCARDIGNO, A. Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 84-94, 2014.
- LI, W.; LIANG, W.; ZHANG, L.; TANG, Q. Performance assessment system of health, safety and environment based on experts weights and *fuzzy* comprehensive evaluation. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 35, p. 95-103, 2015.
- LOPES, G. N.; KROETZ, V. J.; ALVES, J. M. A.; SMIDERLE, O. J. Irrigação magnética. **Agro@ambiente On-Line**. v. 1, n. 1, 2007.
- LYN, J.; YOTVAT, J. Exposure of irrigation and drinking water to a magnetic field with controlled power and direction. **Journal of magnetism and magnetic materials**, v. 83, p. 525-526, 1990.
- MAHESHWARI, B. L.; GREWAL, H. S. Magnetic treatment of irrigation water: Its effects on vegetable crop yield and water productivity. **Agricultural Water Management**. v. 96, p. 1229-1236, 2009.
- 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.
- MARÇAL, R. F. M., SUSIN, A. A. **O emprego de inteligência artificial como ferramenta de apoio à tomada de decisão na manutenção industrial**. In: III Seminário Catarinense – ABRAMAN 2005. Joinville/SC.
- MARTÍNEZ, E.; FLÓREZ, M.; MAQUEDA, R.; CARBONELL, M. V.; AMAYA, J. M. Pea (*Pisum Sativum*, L.) and Lentil (*Lens culinaris*, Medik) Growth Stimulation Due to Exposure to 125 and 250 mT Stationary Fields. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 18, n. 4, p. 657-663, 2009.
- MATHWORKS. Inc. **Logic Fuzzy toolbox user's guide**, version 8.4.0. Natick, MathWorks, Inc., 2014.
- MINITAB, I. N. C. **MINITAB statistical software**. Minitab Release, v. 17, 2014.
- MOHAMED, A. I. Effects of Magnetized Low Quality Water on Some Soil Properties and Plant Growth. **International journal of research in chemistry and environment**. v. 3, n. 2, p. 140-147, 2013.

MOLLO NETO, M. NAAS, I. A.; CARVALHO, V.C.; CONCEIÇÃO, A. H. Q. Preventive diagnosis of dairy cow lameness. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 3, p. 577-589, 2014.

MOSTAFAZADEH-FARD, B.; KHOSHRAVESH, M.; MOUSAVI, S.F. E KIANI, A. R. Effects of Magnetized Water and Irrigation Water Salinity on Soil Moisture Distribution in Trickle Irrigation. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 137, p. 398-402, 2011.

MOUSSA, H. R. The Impact of Magnetic Water Application for Improving Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Production, **New York Science Journal**, v. 4, n. 6, 2011.

NASHER, S. H. The effect of magnetic water on growth of chick-pea seeds. **Engineers and Technology**, v. 26, n. 9, p. 1-4, 2008.

NORAN, R.; SHANI, U.; LIN, I. The effect of irrigation with magnetically Treated water on the translocation of Minerals in the soil. **Magnetic and Electrical Separation**, v. 7, p. 109-122, 1995.

ONU - Organizações das Nações Unidas. 2014. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/apesar-de-reducao-uma-em-cada-oito-pessoas-ainda-sofre-de-fome-cronica-no-mundo-diz-onu/>>. Acesso em: 15 mar. 2015.

OTSUKA, I.; OZEKI, S. Does magnetic treatment of water change its properties? **The Journal of physical chemistry letters B**, v. 110, p. 1509-1512, 2006.

OZEKI, S.; MIYAMOTO, J.; ONO, S.; WAKAI, C.; WATANABE, T. Water-Solid Interactions Under Steady Magnetic Fields. Magnetic-Field-Induced Adsorption and Desorption of Water. **Journal of Physical Chemistry**, v. 100, n. 10, p. 4205. 1996.

PAGANO, M.; GAUVREAU, K. **Princípios de Bioestatística**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2012.

PAPADOPOULOS, A.; KALIVAS, D.; HATZICHRISTOS, T. Decision support system for nitrogen fertilization using fuzzy theory. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 78, p. 130-139, 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.

PINHEIRO, L. S. **Regressão polinomial conjunta na avaliação da sazonalidade da produção forrageira em clones intra-interespecíficos de Capim-elefante**. 2008. 54 f. Dissertação (Mestrado - Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Campos dos Goytacazes, RJ-2008.

POUGET, L. ESCALER, I.; GUIU, R.; ENNIS, S. M.; VERSINI, P. A. Global Change adaptation in water resources management: The Water Change project. **Science of the total environment**, v. 440, p. 186-193, 2012.

POYEN, E. F. B.; ROY, S.; GHOSH, A.; BANDYOPADHYAY, R. Automated Irrigation by an ANN Controller. **Procedia Computer Science**, v. 46, p. 257-267, 2015.

PUTTI, F. F. **Produção da cultura de alface irrigada com água tratada magneticamente**. 2014. 123 f. Dissertação (Mestrado - Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas Botucatu, Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP. 2014.

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

RAHMANIAN, B.; PAKIZEH, M.; ESFANDYARI, M.; HESHMATNEZHAD, F.; MASKOOKI, A. *Fuzzy* modeling and simulation for lead removal using micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF). **Journal of Hazardous Materials**, v. 192 p. 585-592, 2011.

RAWABDEH, H.; SHIYAB, S.; SHIBL, R. The Effect of Irrigation by Magnetically Water on Chlorophyll and Macroelements uptake of Pepper (*Capsicum annuum* L.). Jordan **Journal of Agricultural Sciences**, v. 10, n. 2, p. 205-214, 2014.

ROSS, T. J. *Fuzzy logic with engineering applications* CRC Press. 607p. 2010.

SACKS, W. J.; COOK, B. I.; BUENNING, N.; LEVIS, S.; HELKOWSKI, J. H. Effects of global irrigation on the near-surface climate. **Climate Dynamics**, v. 33, n. 2-3, p. 159-175, 2009.

SAYED, H.; EL SAYED, A. Impact of Magnetic Water Irrigation for Improve the Growth, Chemical Composition and Yield Production of Broad Bean (*Vicia faba*L.) Plant. **American Journal of Experimental Agriculture**, v. 4, n. 4, p. 476-496, 2014.

SELIM, A. F. H.; EL-NADY, M. F. Physio-anatomical responses of drought stressed tomato plants to magnetic field. **Acta Astronautica**, v. 69, p. 387-396, 2011.

SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 118, p. 977-980, 1992.

SVIERCOSKI, R. F. **Matemática aplicada às ciências agrárias**. Minas Gerais: Editora UFV, 2011.

SOUZA, A. DE; GARCÍA, D.; SUEIRO, L.; LICEA, L.; PORRAS, E Pre-sowing magnetic treatment of tomato seeds: effects on the growth and yield of plants cultivated late in the season. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 3, n. 1, p.113-122, 2005

TAYLOR, R. G.; SCANLON, B.; DÖLL, P.; RODELL, M.; BEEK, R. V.; WADA, Y.; LONGUEVERGNE, L.; LEBLAN, M.; FAMIGLIETTI, J. S.; EDMUNDS, M.; KONIKOW, L.; GREEN, T. R.; CHEN, J.; TANIGUCHI, M.; BIERKENS, M. F. P.; MACDONALD, A.; FAN, Y.; MAXWELL, R. M.; YECHIELI, Y.; GURDAK, J. J.; ALLEN, D. M.; SHAMSUDDUHA, M.; HISCOCK, K.; YEH, P. J. F.; HOLMAN, I.; TREIDEL, H. Ground water and climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 4, p. 322-329, 2012.

TOUATI, F.; AL-HITMI, M.; BENHMED, K.; TABISH, R. A fuzzy logic based irrigation system enhanced with wireless data logging applied to the state of Qatar. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 98, p. 233-241, 2013.

TRNKA, M.; OLESEN, J. E.; KERSEBAUM, K. C.; SKJELVÅG, A. O.; EITZINGER, J.; SEGUIN, B.; PELTONEN-SAINIO, P.; RÖTTER, R.; IGLESIAS, A.; ORLANDINI, S.; DUBROVSKÝ, M.; HLAVINKA, P.; BALEK, J.; ECKERSTEN, H.; CLOPPET, E.; CALANCA, P.; GOBIN, A.; VUČETIĆ, V.; NEJEDLIK, P.; KUMAR, S.; LALIC, B.; MESTRE, A.; ROSSI, F.; KOZYRA, J.; ALEXANDROV, V.; SEMERÁDOVÁ, D.; ŽALUD, Z. Agroclimatic conditions in Europe under climate change. **Global Change Biology**, v. 17, n. 7, p. 2298-2318, 2011.

YET, C. T. Weighted trapezoidal and triangular approximations of *fuzzy* numbers. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 160, p. 3059-3079, 2009.

ZADEH, L.A. The role of *fuzzy* logic the management of uncertainty in expert systems. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 1983, 1965.

ZHOU, K. X. ; LU, G. W. ; ZHOU, Q. C. ; SONG, J. H. ; JIANG, S. T. ; XIA, H. R. Monte Carlo simulation of liquid water in a magnetic field. **Journal of Applied Physics**, v. 89, p. 1802-1805, 2000.

Capítulo IV “MODELAGEM *FUZZY* DA AVALIAÇÃO NUTRICIONAL DA ALFACE IRRIGADA COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE”

Resumo

A atual preocupação com a produção de alimentos com níveis adequados de nutrientes e vitaminas motiva pesquisadores a otimizar recursos limitados de fertilizantes. Tecnologias são pesquisadas para alavancar produções visando suprir a demanda mundial de alimentos. A utilização de água tratada magneticamente na irrigação pode ser uma técnica capaz de atender tal demanda. Os objetivos do presente trabalho foram analisar os efeitos nos teores de macro e micronutrientes em folhas da alface quando utilizada água tratada magneticamente em diferentes lâminas de água na cultura da alface, por meio dos modelos *fuzzy* e também por meio de modelos estatísticos, além de verificar o ajuste dos modelos com os dados coletados a campo. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em que se adotou um delineamento em blocos inteiramente casualizados com cinco repetições, sendo cinco lâminas da água de irrigação e dois tipos de água. Para a determinação dos teores, foram coletadas amostras da alface, as quais foram lavadas e, em seguida, deixadas em estufa de circulação de ar forçada por 72 h a 65°C, depois de realizadas as determinações dos teores em laboratório. De forma geral, pode-se observar que ocorreu maior absorção para os tratamentos irrigados com água tratada magneticamente, e também que se observaram os efeitos das lâminas de irrigação. Deve-se ressaltar que os modelos utilizando lógica *fuzzy* apresentaram resultados mais precisos que os modelos estatísticos, no qual ocorreu redução dos valores do erro quadrado e o aumento do valor da exatidão do modelo e da correlação dos valores.

Palavras-chave: Incerteza, nutrição mineral, enriquecimento alimentar, magnético

Abstract

Current concern in the production of food with the proper protein and vitamin levels has motivated researchers to optimize fertilizers' limited resources. Several technologies have been researched and improved to enhance production and supplement food demands worldwide. Magnetically treated water in irrigation proved to be a technique that may attend to such demands. Current research analyzes the effects on macro and micro-nutrient rates when magnetically treated water is employed at different levels on lettuce crops, by fuzzy models, compared to statistical models. Results may be determined within the variations of irrigation levels. The totally randomized experiment with 5 replications, or rather, 5 irrigation levels and 2 types of water, was conducted in a greenhouse. Rates were determined by collecting lettuce samples, which were washed and kept in a forced-air buffer for 72 hours at 65°C, after rates were determined in the laboratory. A greater absorption occurred for the treatment irrigated with magnetic water. Likewise, the effects on irrigation levels were also detected. The models that employed fuzzy logic provided better results when compared to statistical models, in which reduction of square error rates occurred, coupled to an increase in the exactness rate of the model and of the correlation of rates.

Keywords: Uncertainty, mineral nutrition, food enrichment, magnetic.

Introdução

A produção da alface (*Lactuca Sativa L.*) aumenta vem crescendo, principalmente pela expansão das lanchonetes *fast-food* e pelo aumento do consumo humano, e sabe-se que é fonte de vitaminas e sais minerais, e com baixo custo associado, acarretando em ter as características da folhosa mais consumida no Brasil (HIRATA et al. 2014; SALA; COSTA, 2009; ZIECH et al., 2014).

Os teores de nutrientes na alface variam de acordo com as condições em que ocorre o cultivo, tais como o pH, umidade do solo, temperatura, índice pluviométrico, teor de matéria orgânica, fertilidade do solo, entre outros que determinam a absorção (JONES, 2012; FAGERIA et al. 2011; FAGERIA, 1974).

Na absorção de nutrientes pelas plantas do solo é fundamental que o sistema apresente certa proporção de água para que ocorra a transferência de elementos químicos, nutrientes e entre outras substâncias pelas raízes (RAIJ, 2011).

Tais elementos em que as plantas necessitam para completar seu ciclo de vida são denominados essenciais, os quais se destacam: boro, cobre, ferro, manganês, zinco, enxofre, magnésio, cálcio, potássio, fósforo e nitrogênio e suas absorções são afetadas diretamente pelas condições do solo (RAIJ, 2011; FERNANDES, 2006).

De acordo com Raij (2011), a absorção pode ocorrer por três processos: interceptação radicular, fluxo de massa e difusão. No desenvolvimento do sistema radicular, ao encontrar os nutrientes ocorre a absorção pelo processo de interceptação. Também ocorre a absorção de água, em que estão contidos os nutrientes; esta solução é absorvida pelo processo e fluxo de massa. Finalmente, pela absorção de nutrientes, cria-se um gradiente de concentração na solução do solo próximo à região das raízes, gerando o movimento por difusão dos nutrientes (FAQUIM, 1994; RAIJ, 2011; JONES, 2012; MENGEL et al., 2001). Para verificar a real situação da nutrição de plantas, é utilizada a parte aérea por apresentar maior homogeneidade nos teores dos nutrientes.

A absorção é influenciada diretamente pela tensão no solo, interferindo no desenvolvimento das plantas pelos baixos valores absorvidos de nutrientes. Deste modo, existem tecnologias que favorecem o aumento da umidade do solo ou a redução no volume de água aplicada e a manutenção da umidade ideal para o processo de absorção. Com isso, pesquisas que utilizam o tratamento magnético da água comprovam efeito do aumento da umidade do solo e a redução no volume aplicado (MOSTAFAZADEH-FARD et al., 2011; KHOSHRAVESH et al., 2011).

Os solos irrigados com água tratada magneticamente proporcionaram o aumento dos teores de nutrientes nas plantas, que conseqüentemente acarretaram no aumento significativo tanto da produção quanto da qualidade dos alimentos em diversas cultivares (HOZAYN et al., 2014).

Para verificar se variáveis testadas experimentalmente apresentaram efeito na cultivar, utilizam-se as análises estatísticas para a comprovação. Frente a tal fato, tais análises detêm um erro no momento de elaborar os resultados (CLEWER; SCARISBRICK, 2013; MEAD et al., 2002).

As análises estatísticas para comprovações de experimentações vêm sendo aperfeiçoadas com a utilização de metodologias computacionais capazes de predizer

com maior precisão valores estimados. Dentro das análises estatísticas mais comumente aplicadas nas ciências agrárias, destacam-se os modelos de regressões polinomiais múltiplas, os quais apresentam respostas em função das variáveis controladas no experimento. Entretanto, muitas vezes a imprecisão do modelo faz com que a resposta não reproduza de fato o que foi verificado. Buckley (2006) verificou que tal imprecisão poderia ser reduzida frente à aplicação da lógica *fuzzy*, em que as respostas seriam mais precisas.

Deste modo, técnicas matemáticas e computacionais devem ser empregadas para as análises de experimentos agrícolas, para que se possa diminuir e obter maior precisão nos resultados (MATT, 2011).

Frente a considerações observadas, o presente trabalho visa aplicar um sistema baseado em regras *fuzzy*, para também ajustar as curvas e visa também maior precisão frente aos modelos tradicionais de regressão, técnica comumente aplicada nas ciências agrárias.

Devem-se ressaltar outras aplicações da teoria *fuzzy*, como os controladores *fuzzy*, que visam à automação de processos, que o controle é realizado por meio de regras linguísticas que interligam de modo impreciso, situações com as ações a serem tomadas (BUCKLEY, 1992; SHAW; SIMÕES, 2011).

Outra aplicação da teoria *fuzzy* que comumente é utilizada para a resolução de imprecisão são os sistemas especialistas, que buscam transferir o conhecimento altamente específico de uma pessoa em regras, as quais regem um sistema capaz de interpretar e fornecer com certa precisão as informações para a tomada de decisão (SHAW; SIMÕES, 2001; ROSS, 2010). Podem-se destacar aplicações, como energia (ZHAI; WILLIAMS, 2012), evaporação (GOYAL et al., 2014) e monitoramento de irrigação (HU et al., 2006), os resultados foram satisfatórios frente às análises convencionais.

A modelagem *fuzzy* vem sendo estudada e aplicada em diversas áreas, sendo que seus resultados de forma geral proporcionam análises mais refinadas quando comparadas com os resultados obtidos por meio da estatística clássica (AKBARI; REZAEI 2010; LI et al., 2007; BLANCO-FERNANDEZ et al., 2013, 2014; PITERBARG, 2011; VIERTIL, 2011).

Deve-se destacar que aplicações utilizadas com a modelagem *fuzzy* para a avaliação nutricional dos solos obtiveram resultados satisfatórios de produtividade, tais como os resultados obtidos por Davatgar et al. (2012), em que realizaram a adubação do solo a partir dos resultados do modelo *fuzzy*.

Scharer et al. (2006) desenvolveram um modelo baseado em regras *fuzzy* para a previsão da exportação de fósforo do solo para as plantas, podendo prever adubações mais precisas.

Chachi et al. (2014) verificaram que os modelos *fuzzy* apresentaram resultados mais precisos para a determinação do modelo de vazão de rios. Também constatado por Muzzioli et al. (2015) que previram a volatilização de gás com maior precisão do que os modelos de regressão.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia e um modelo *fuzzy* visando estimar os valores das variáveis nutricionais da cultura da alface em tipos de água e em todos os valores intermediários entre as taxas mínima e máxima dos níveis de reposição hídrica adotadas.

Descrição do experimento

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação no Departamento de Engenharia Rural da Unesp, Faculdade Ciências Agrônomicas, Fazenda Experimental Lageado, localizada no município de Botucatu, São Paulo, a 786m de altitude. De acordo com classificação de Köppen (KÖPPEN; GEIGER, 1928), a região apresenta clima do tipo Cfa (clima subtropical úmido).

A casa de vegetação era caracterizada por ser do tipo túnel, com dimensões de 27 m de comprimento; 7 m de largura e altura das laterais de 1,7 m e no centro de 3 m, sendo a cobertura feita com filme de polietileno aditivado transparente, com 150µm de espessura. As laterais são de tela “sombrite” com 30% de sombreamento, objetivando a interceptação de insetos e animais. A estufa é posicionada, em seu comprimento, no sentido norte/sul.

Durante os meses de março e abril, período de realização do experimento, observou-se que a temperatura média foi de 23,6°C e 21,6°C, e a umidade relativa do ar de 75,4% e de 72,8%, respectivamente. De acordo com Embrapa (2006), o solo apresentou características moderadas da sua estrutura, sendo classificada como Nitossolo Vermelho Distrófico Latossólico.

Empregou-se o delineamento em blocos casualizados (DBC), sendo dez tratamentos com cinco repetições analisadas aos 35 dias após o transplântio (DAT). Os tratamentos foram constituídos de cinco lâminas de irrigação, baseadas na evapotranspiração

(ETc), L1, L3, L3, L4 e L5, referente a 25, 50, 75, 100 e 125% da ETc, respectivamente, e foram aplicados dois tipos de água, sendo um denominado água convencional (AC) e outra água tratada magneticamente (ATM).

No tratamento magnético da água foi utilizado o equipamento Sylocymol Rural da empresa Timol, o qual tinha a capacidade de realizar o tratamento para 5 m³ a cada 30 min, sendo possível atender a demanda da cultura.

As parcelas experimentais foram constituídas por canteiros, os quais apresentavam as dimensões 1,2 m de largura por 3 m de comprimento, totalizando 3,6 m², com quatro linhas de plantio, em que se adotou o espaçamento de 25 cm × 25 cm, totalizando 40 plantas; descartou-se a bordadura, perfazendo um total útil de 16 plantas.

O sistema de irrigação adotado foi por gotejamento, sendo as linhas principais constituídas por tubulações de 1 polegada, e as fitas gotejadoras foram inseridas diretamente, que apresentavam emissores com vazão de 1,47 L h⁻¹, quando submetido a uma pressão de 10 m.c.a., que era regulada por meio de uma válvula reguladora de pressão inserida na saída da bomba.

No cálculo da determinação da lâmina de irrigação aplicada diariamente, considerou-se a evaporação (*ECA*), medida por meio do tanque classe A, e aplicou-se o coeficiente de porcentagem para fracionar as lâminas (0,25; 0,50; 0,75; 1; 1,25) (*f*) e a eficiência do sistema de aplicação do sistema, assim se calcula pela seguinte equação:

$$LI = \frac{ECA \cdot f}{Ei} \quad (17)$$

em que, *LI* é a lâmina de irrigação aplicada para cada tratamento (mm); *ECA* é a evaporação do tanque “classe A” (mm dia⁻¹); *f* é a fração de evaporação de cada tratamento; *Ei* é a eficiência de irrigação (%).

Para determinar o tempo de irrigação para repor a evapotranspiração, na fração determinada para cada tratamento, deve-se conhecer espaçamento entre emissores e linhas e a vazão de cada emissor, assim se calcula por meio da seguinte equação:

$$Ti = \frac{LI \cdot EP \cdot EE}{q} \quad (18)$$

em que T_i é tempo de irrigação (h), LI é a lâmina de irrigação aplicada para cada tratamento (mm), EE é o espaçamento entre emissores (m), EP é o espaçamento entre plantas (m) e q é a vazão média dos emissores ($L h^{-1}$).

Os valores do Kc utilizados foram de acordo com a FAO (1998), em que se usa 0,7 no início, 1 na meia estação e 0,95 no final. No experimento foi utilizada a variedade Verônica, do tipo crespa.

O preparo das mudas ocorreu em badeiras de isopor de 128 células em que se semeou em substrato Tropstrato HA-Hortaliças, em que inseriu duas sementes por células e após a germinação ocorreu o desbaste. Após 30 dias, as mudas apresentaram cinco folhas definitivas e foram transplantadas nos canteiros, sendo que na primeira semana não foi realizada a diferenciação das lâminas.

Para a quantificação dos teores de macro e micronutrientes, todas as folhas foram lavadas com água destilada e secas em estufa de circulação forçada de ar por 72 h, a $65^{\circ}C$. Após a secagem, foram trituradas em um moinho, acondicionadas em sacos de papel devidamente identificadas e enviadas ao Laboratório de Nutrição Mineral de plantas, no Departamento de Recursos Naturais, da Faculdade de Ciências Agrônomicas-Unesp/Botucatu.

Quantificou-se aos 35 DAT o teor dos seguintes macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), e dos micronutrientes ferro (Fe), boro (B), cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn) no tecido vegetal da parte aérea, de acordo com a metodologia de Malavolta et al. (1994) e Korndörfer et al. (2004).

Método de elaboração do sistema *fuzzy*

Tal como considerado no Capítulo 1, a análise preliminar dos dados foi estabelecida considerando-se modelos de regressões polinomiais múltiplos, uma das técnicas mais comumente utilizadas para avaliações de experimentos com variáveis contínuas na área das ciências agrárias.

Para o desenvolvimento do sistema baseado em regra *fuzzy*, proposto neste Capítulo, será adotada a metodologia elaborada no Capítulo 1, pelo fato de que as variáveis de entrada do sistema serem as mesmas (Lâmina de Irrigação e Tipo de Água).

As variáveis de resposta adotadas no sistema baseado em regras *fuzzy* proposto neste capítulo, foram os teores de macro e micronutrientes (fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn)), que não apresentaram diferenças significativas frente aos tipos de águas e lâminas de irrigação.

A proposta do presente capítulo é explicar características da quantificação de absorção de macro e micronutrientes absorvidos pela cultura da alface em função do manejo de irrigação na utilização do tratamento magnético da água por meio da modelagem matemática *fuzzy*, nos intervalos intermediários dos níveis de irrigação analisados no experimento agrônômico realizado, a saber $[25k\%, 25(k + 1)\%]$, $1 \leq k \leq 4$. Sendo realizada uma modelagem de forma análoga para cada ciclo.

Realizou-se o manejo utilizando-se diferentes níveis de irrigação para cada tratamento de água (água tratada magneticamente (ATM) e água convencional (AC)) e diferentes lâminas de irrigação, dados pelo teor de macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (F), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), e dos micronutrientes ferro (Fe), boro (B), cobre (Cu), manganês (Mn), e zinco (Zn), de acordo com Putti (2013).

O modelo considerado para as características agrônômicas desta forma tem a função que representa o modelo descrito que é $f: X_1 \times X_2 \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^{10}$, com $y = f(\bar{x})$, em que \mathbb{R} é o conjunto dos números reais; e $x = (x_1, x_2)$ é definido por $x_1 =$ taxa de reposição hídrica (% da ETc) e $x_2 =$ tipo de água adotado na irrigação (água convencional (0) ou água tratada magneticamente (1)), com $x_1 \in X_1 = [25\%, 125\%]$ e $x_2 \in X_2 = \{0,1\}$; e $y = (y_1, \dots, y_{10})$, é definido pelas médias dos valores das características biométricas, a saber, $y_1 = \bar{P}$, $y_2 = \bar{K}$, $y_3 = \bar{Ca}$, $y_4 = \bar{Mg}$, $y_5 = \bar{S}$, $y_6 = \bar{B}$, $y_7 = \bar{Cu}$, $y_8 = \bar{Fe}$, $y_9 = \bar{Mn}$ e $y_{10} = \bar{Zn}$.

O sistema baseado em regras *fuzzy* representa a função

$$f: [25\%, 125\%] \times \{0, 1\} \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^{10},$$

$$F(x, y) = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, f_9, f_{10})(x, y),$$

em que o produto cartesiano que concebe o domínio dos tipos de água adotados (0 para água convencional e 1 para água tratada magneticamente) e das lâminas de irrigação (25 a 125% da ETc), em que o contradomínio é representado por \mathbb{R}^{10} , sendo as dez variáveis de resposta avaliadas no experimento.

Pelo conjunto “Tipo de Água” ser uma variável discreta, os resultados serão apresentados em dois gráficos bidimensionais, um para cada variável de resposta em cada ciclo, a saber:

- Grupo 1 - gráficos das funções $F_1^0: [25; 125] \times \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, $F_1^0(0, y) = f_1(0, y)$, no qual o contradomínio de F_1^0 é relativo ao teor de fósforo; $F_1^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_1^1(0, y) = f_1(1, y)$, no qual o contradomínio de F_1^1 é relativo ao teor de fósforo;
- Grupo 2 - gráficos das funções $F_2^0: [25; 125] \times \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, $F_2^0(0, y) = f_2(0, y)$, no qual o contradomínio de F_2^0 é relativo ao teor de potássio; $F_2^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_2^1(0, y) = f_2(1, y)$, no qual o contradomínio de F_2^1 é relativo ao teor de potássio;
- Grupo 3 - gráficos das funções $F_3^0: [25; 125] \times \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, $F_3^0(0, y) = f_3(0, y)$, no qual o contradomínio de F_3^0 é relativo ao teor de cálcio; $F_3^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_3^1(0, y) = f_3(1, y)$, no qual o contradomínio de F_3^1 é relativo ao teor de cálcio;
- Grupo 4 - gráficos das funções $F_4^0: [25; 125] \times \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, $F_4^0(0, y) = f_4(0, y)$, no qual o contradomínio de F_4^0 é relativo ao teor de magnésio; $F_4^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_4^1(0, y) = f_4(1, y)$, no qual o contradomínio de F_4^1 é relativo ao teor de magnésio;
- Grupo 5 - gráficos das funções $F_5^0: [25; 125] \times \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, $F_5^0(0, y) = f_5(0, y)$, no qual o contradomínio de F_5^0 é relativo ao teor de enxofre; $F_5^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_5^1(0, y) = f_5(1, y)$, no qual o contradomínio de F_5^1 é relativo ao teor de enxofre;
- Grupo 6 - gráficos das funções $F_6^0: [25; 125] \times \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, $F_6^0(0, y) = f_6(0, y)$, no qual o contradomínio de F_6^0 é relativo ao teor de boro; $F_6^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_6^1(0, y) = f_6(1, y)$, no qual o contradomínio de F_6^1 é relativo ao teor de boro;
- Grupo 7 - gráficos das funções $F_7^0: [25; 125] \times \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, $F_7^0(0, y) = f_7(0, y)$, no qual o contradomínio de F_7^0 é relativo ao teor de cobre; $F_7^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_7^1(0, y) = f_7(1, y)$, no qual o contradomínio de F_7^1 é relativo ao teor de cobre;
- Grupo 8 - gráficos das funções $F_8^0: [25; 125] \times \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, $F_8^0(0, y) = f_8(0, y)$, no qual o contradomínio de F_8^0 é relativo ao teor de ferro; $F_8^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_8^1(0, y) = f_8(1, y)$, no qual o contradomínio de F_8^1 é relativo ao teor de ferro;
- Grupo 9 - gráficos das funções $F_9^0: [25; 125] \times \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, $F_9^0(0, y) = f_9(0, y)$, no qual o contradomínio de F_9^0 é relativo ao teor de manganês; $F_9^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_9^1(0, y) = f_9(1, y)$, no qual o contradomínio de F_9^1 é relativo ao teor de manganês;
- Grupo 10 - gráficos das funções $F_{10}^0: [25; 125] \times \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, $F_{10}^0(0, y) = f_{10}(0, y)$, no qual o contradomínio de F_{10}^0 é relativo ao teor de zinco; $F_{10}^1: \{1\} \times [25; 125] \rightarrow \mathbb{R}$, $F_{10}^1(0, y) = f_{10}(1, y)$, no qual o contradomínio de F_{10}^1 é relativo ao teor de zinco;

Foi possível implementar o modelo *fuzzy* a partir determinação das variáveis de entrada e saída; na Figura 56 pode-se observar as entradas e as saídas do sistema *fuzzy* proposto.

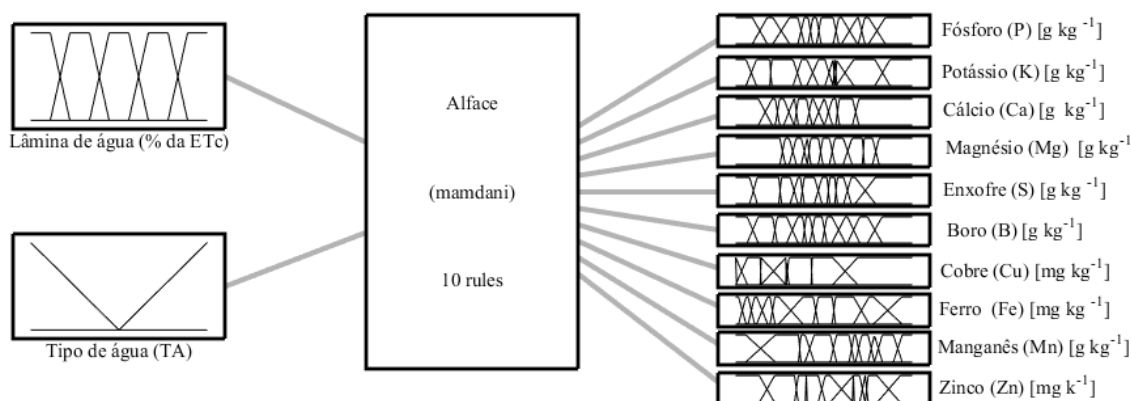


Figura 56. Sistema baseado em regras *fuzzy* para a avaliação da cultura da alface, em que apresentou como entrada a lâmina de irrigação e tipo de água e como variável de saída os teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, ferro, manganês, zinco.

Para a variável de entrada Tipo de Água, adotaram-se dois conjuntos *fuzzy* com função triangular, porque o experimento desenvolvido utilizou dois tipos de água (água convencional e água tratada magneticamente); as funções de pertinência foram propostas no Capítulo 2.

Já para a variável de entrada Lâminas de Irrigação, foram considerados cinco conjuntos *fuzzy*, com funções trapezoidais, sendo denominados por L1, L2, L3, L4 e L5, referente às taxas de reposição de 25, 50, 75, 100 e 125% da ETc; tais lâminas foram consideradas pelo fato de serem testadas no experimento agrônomico realizado por Putti (2013). Os delimitadores das funções de pertinência foram desenvolvidos de forma análoga ao contido no Capítulo 1.

A partir das análises nutricionais realizadas, adotou-se a utilização de dez variáveis (P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn). Tais variáveis não apresentaram diferenças significativas entre os fatores testados (tipo de água e lâmina de irrigação). De forma semelhante ao contido no Capítulo 1 definiram-se dez conjuntos *fuzzy* $C_n, n = 1, 2, \dots, 10$, em que se adotaramas funções de pertinência trapezoidais. Pelas variáveis de saída apresentarem amplitudes diferentes, foi realizada de forma análoga ao contido no Capítulo 1 a determinação dos delimitadores utilizados para o desenvolvimento das funções de pertinência.

Para a determinação da base de regras do sistema *fuzzy*, foi adotada a metodologia proposta em Cremasco et al. (2010) e Gabriel Filho et al. (2011) e descrita no Capítulo 3, em que, após a construção dos conjuntos *fuzzy*, foi possível calcular o maior grau de pertinência de cada mediana dos tratamentos, associando as variáveis de entrada com as

de saída. E para o cálculo da inferência foi aplicado o método desenvolvido por Mamdani e Assilian (1975) e para o cálculo da defuzzyficação do sistema foi considerado o método centro de área ou centroide.

Após a determinação da equação de ajuste do modelo de regressão e dos modelos baseados em regras, foi possível verificar a intensidade de associação dos modelos com os dados coletados a campo, em que para tal determinação foi utilizado como o erro quadrado médio (EQM), coeficiente de correlação de Pearson (r) e índice “d” de Willmott et al. (1985).

Para o desenvolvimento dos sistemas baseados em regras *fuzzy* (SBRF) foi utilizado o *software* Matlab, versão 8.4 (2014). Por meio dele realizaram-se as simulações das variáveis de repostas. A partir das simulações realizadas, juntamente com os resultados dos modelos de regressões polinomiais múltiplos, foi possível a elaboração dos gráficos, os quais foram desenvolvidos em planilha eletrônica do pacote Microsoft Office. Para o cálculo dos modelos de regressões polinomiais múltiplos utilizou-se o *software* estatístico Minitab, versão 17.0 (2014).

Resultados e discussão

Equações de ajustes dos modelos de regressão

Diante da verificação dos pressupostos para a determinação das regressões, observou-se que tanto a normalidade quanto a homocedasticidade foram atendidas para as variáveis que apresentaram ajustes. Nota-se que houve variáveis em determinados ciclos que as variáveis dependentes não se ajustaram às variáveis independentes. Os modelos estatísticos de regressão foram regidos por equações de 3º grau (Tabela 31).

Tabela 31. Coeficientes de regressão e determinação das equações de estimativa das variáveis biométricas da cultura alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipo de água.

Variável	Ciclo	$y = \beta_0 + ax_1 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3$					R ²
		β_0	a	a_1	a_2	a_3	
P	1°	5,68*	0,32*	- 5,13*	7,48*	- 3,12	0,18*
	2°	4,44*	- 0,27	- 4,98*	6,73*	2,16	0,39*
K	1°	87,97*	6,82*	3,55*	- 5,14	- 4	0,23*
	2°			ns			
Ca	1°	17,37*	8,67	12,51*	- 28,32	13,49*	0,64*
	2°			ns			
Mg	1°	6*	0,47	- 4,23*	4,23*	- 1,65	0,45*
	2°	5,45*	-0,04	- 7,45*	8,01*	- 2,82	0,31
S	1°	4,02*	0,19*	- 5,89	8,43*	- 65,73*	0,24*
	2°			ns			
B	1°	27,83*	1,36	- 65,73*	50,97*	23*	0,44*
	2°	19,17*	0,07	55,62*	- 86,68*	38,35*	0,21*
Cu	1°	0,48*	1,24	1,24*	- 7,94*	5,86*	0,25*
	2°	11,22*	1,36*	- 15,01*	20,85*	- 9,06	0,26*
Fe	1°	1755*	344,44*	-6711,8*	10954,9*	- 5226*	0,45*
	2°	-172,98*	72,2*	3936,9*	-6053,8*	2713*	0,32*
Mn	1°	68,06*	-0,4	- 42,92*	63,3*7	- 32,53	0,24*
	2°	37,84*	3,28	126,63*	- 224,51*	102,93	0,51*
Zn	1°	45,44*	3,84*	28,93	4*8	23,46*	0,35*
	2°			ns			

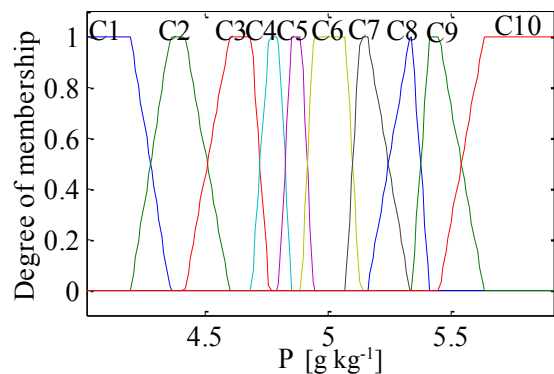
Legenda: N: nitrogênio; P: fósforo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; S: enxofre; B: boro; CU: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco; x_1 : tipo de água; x_2 : lâmina de irrigação e * significativo para $\alpha = 5\%$.

A partir das equações observadas na Tabela 31 foi possível verificar o comportamento das variáveis de saída dos modelos, e com tais dados foram elaborados os gráficos que estão apresentados nas Figuras 59 a 68, sendo que também foram elaboradas as curvas geradas pelo sistema baseado em regras *fuzzy*, deve-se ressaltar que ambas estão juntas.

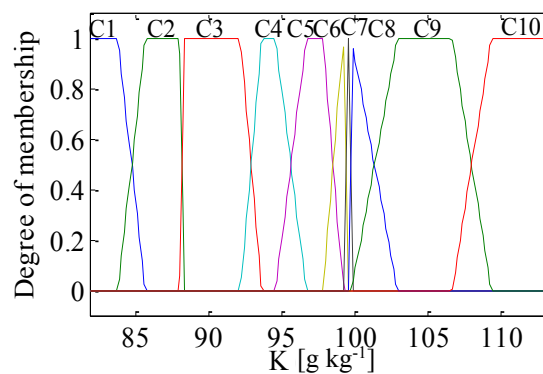
Sistema *fuzzy* desenvolvido

A elaboração das funções de pertinência de resposta da absorção de macro e micronutrientes pela cultura da alface foi realizada a partir da metodologia proposta, ilustrada na Tabela 34 e Figura 35. Tais funções, que representam a saída ou resposta dos modelos matemáticos deste trabalho, podem ser observados para os macros e micronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn). Nas Figuras 57 e 58 para os ciclos

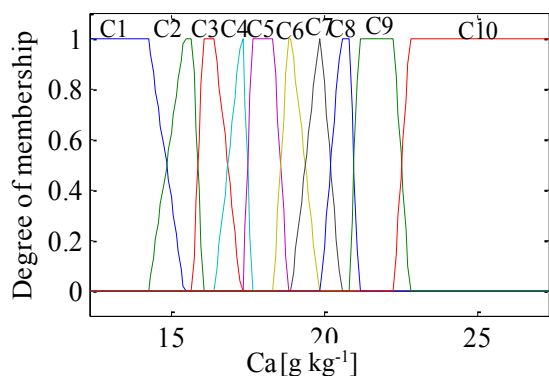
1 e 2, respectivamente, uma vez que as mensurações aferidas de tais elementos em cada ciclo foram diferentes.



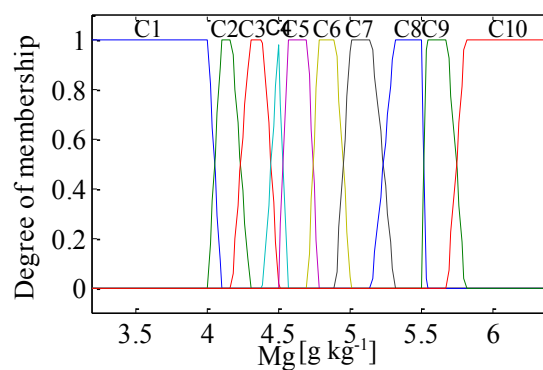
(a) Fósforo (P) [g kg^{-1}]



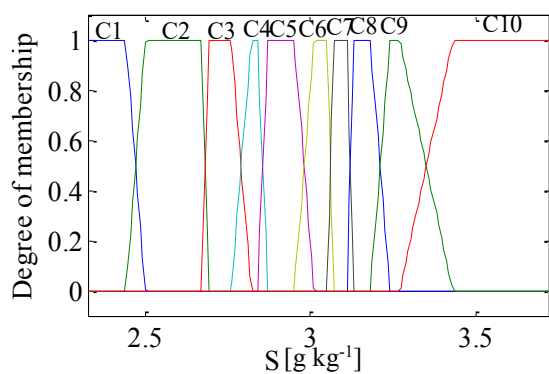
(b) Potássio (K) [g kg^{-1}]



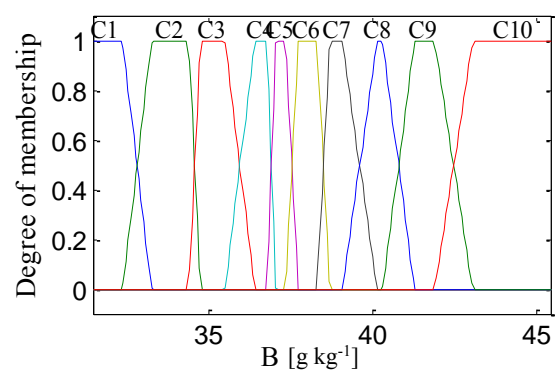
(c) Cálcio (Ca) [g kg^{-1}]



(d) Magnésio (Mg) [g kg^{-1}]



(e) Enxofre (S) [g kg^{-1}]



(f) Boro (B) [g kg^{-1}]

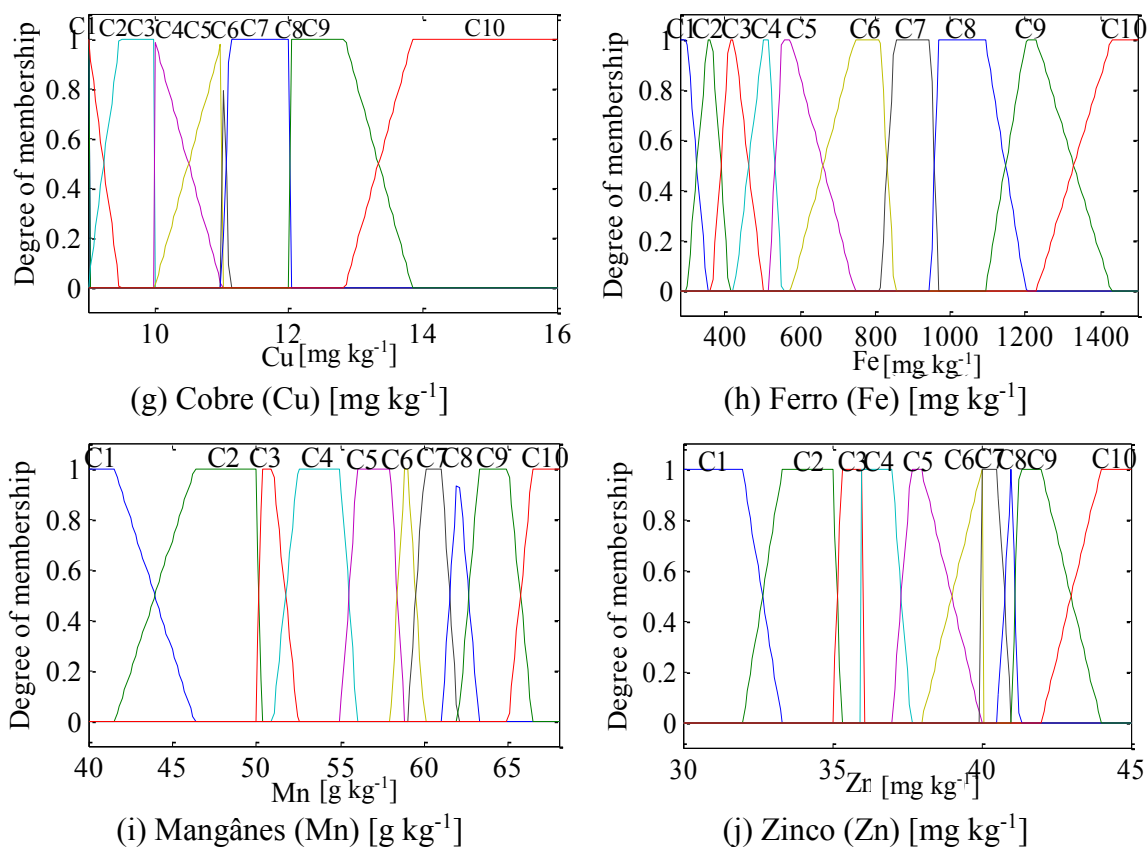
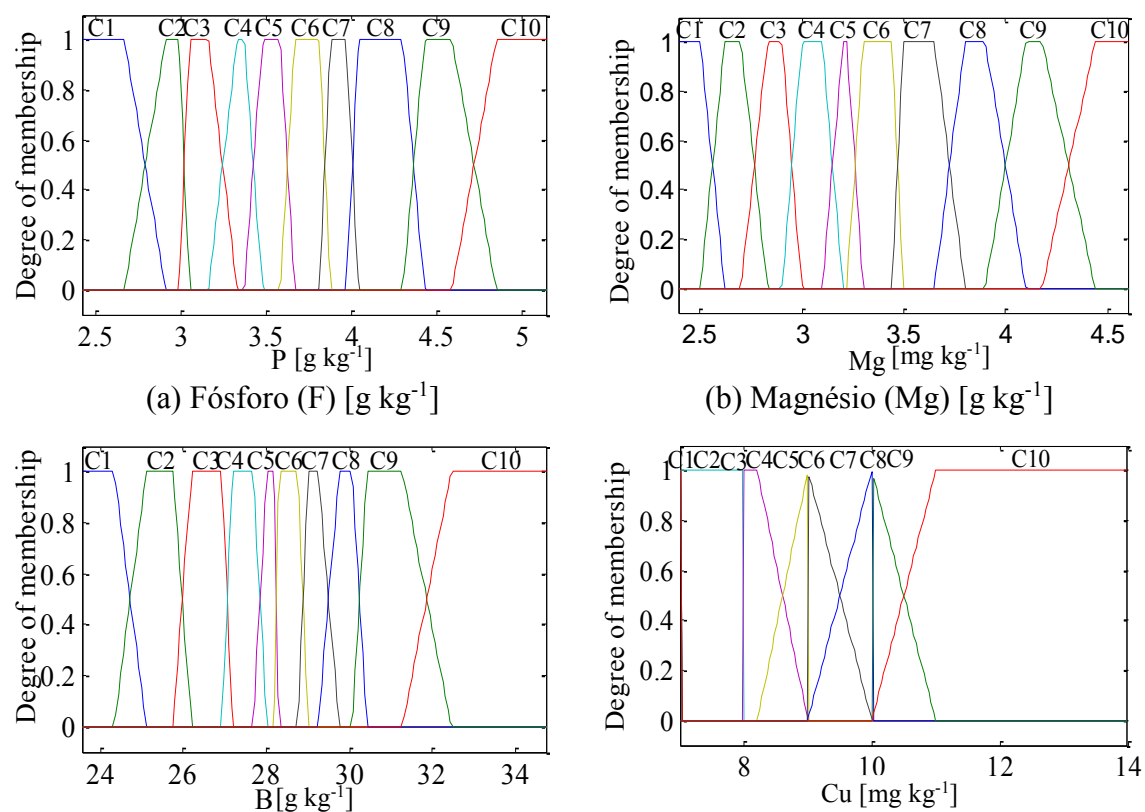


Figura 57. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a diferentes tipos de água e lâminas de irrigação.



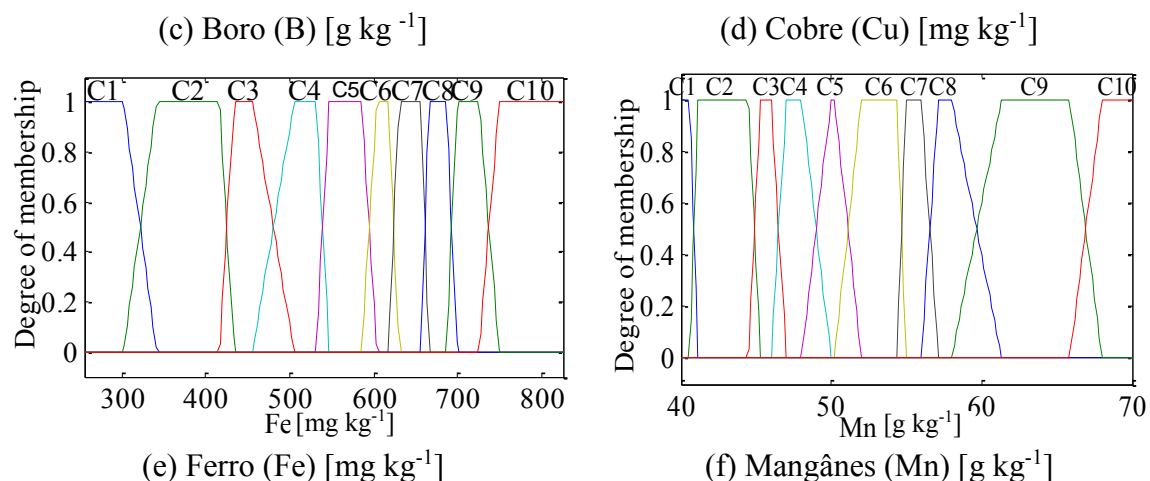


Figura 58. Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída da cultura da alface submetida a diferentes tipos de água e lâminas de irrigação.

A partir da elaboração das funções de pertinências, foi possível realizar a construção das bases de regras de cada sistema baseado em regras *fuzzy*. Considerou-se a mediana de cada tratamento como sendo a representação das amostras, associando-se posteriormente ao conjunto de pertinência com maior grau. Deste modo, foi possível determinar o conjunto *fuzzy* associado ao tratamento, determinando em que condição que se encontra o tratamento dentro do todo. A Tabela 32 apresenta as regras *fuzzy*, para o 1º ciclo, onde se constam as medianas que estão associadas a cada conjunto *fuzzy*.

Tabela 32. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy* para o 1º ciclo da cultura da alface submetida a diferentes lâminas de irrigação e tipos de água.

Variáveis de entrada			Variáveis de saída																						
Tipo de água	Lâmina de irrigação		N	CF	P	CF	K	CF	Ca	CF	Mg	CF	S	CF	B	CF	Cu	CF	Fe	CF	Mn	CF	Zn	CF	
	Conjunto <i>fuzzy</i>	Ponto com maior grau de pertinência associado a l																							
AC	L1	25%	30,31	C10	4,79	C6	88,5	C7	20,8	C9	5,6	C8	3,08	C10	37,0	C6	11	C7	810	C8	56	C10	40	C3	
AC	L2	50%	34,58	C6	4,38	C5	102,5	C5	17,3	C10	4,5	C9	2,99	C3	40,3	C10	11	C7	366	C5	61	C6	41	C2	
AC	L3	75%	34,44	C5	4,75	C8	99,3	C9	16,3	C8	4,1	C8	2,82	C7	38,4	C7	9	C4	839	C10	59	C4	41	C6	
AC	L4	100%	34,51	C9	4,68	C8	87,3	C8	13,3	C7	4,3	C6	2,68	C10	36,7	C8	9	C7	506	C10	51	C8	42	C4	
AC	L5	125%	33,25	C4	4,91	C9	85	C9	15,4	C5	4,2	C5	2,79	C5	36,2	C2	10	C10	462	C4	50	C2	37	C4	
ATM	L1	25%	35,63	C2	4,87	C5	99,5	C3	21,1	C9	5,1	C9	3,25	C7	37,5	C5	11	C7	954	C7	65	C5	35	C7	
ATM	L2	50%	33,6	C7	4,81	C2	96,7	C9	22,3	C5	5,5	C5	2,67	C6	42,4	C9	11	C7	557	C3	58	C8	33	C9	
ATM	L3	75%	33,11	C7	5,14	C4	99,8	C7	20,5	C4	5,2	C2	3,08	C4	38,4	C7	9	C4	1350	C7	53	C7	38	C9	
ATM	L4	100%	35	C7	5,33	C4	99,7	C3	19,8	C2	4,8	C3	3,38	C3	40,1	C5	11	C4	1230	C4	61	C4	36	C10	
ATM	L5	125%	32,55	C5	5,34	C6	99,8	C2	17,8	C2	4,6	C3	2,86	C4	33,1	C4	13	C6	505	C4	48	C3	36	C5	

Legenda: L1: lâmina de 25% da ETc; L2: lâmina de 50% da ETc; L3: Lâmina de 75% da ETc; L4: Lâmina de 100% da ETc; L5: lâmina de 125% da ETc; ATM: água tratada magneticamente; AC: água convencional; N: nitrogênio; P: fósforo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco e C: conjunto *fuzzy*

De forma análoga, foi realizado para o 2º ciclo o procedimento; sendo possível elaborar a base de regras da Tabela 33.

Tabela 33. Base de regras do sistema baseado em lógica *fuzzy* para o 2º ciclo, para a cultura da alface submetida em diferentes níveis de irrigação e tipos de água.

Tipo de água	Conjunto <i>fuzzy</i> Tipo de água	Ponto com maior grau de pertinência associado a l	Variáveis de entrada										Variáveis de entrada											
			N	CF	P	CF	K	CF	Ca	CF	Mg	CF	S	CF	B	CF	Cu	CF	Fe	CF	Mn	CF	Zn	CF
AC	L1	25%	24,92	C6	4,46	C1	51,7	C7	14,3	C6	4,4	C8	1,89	C7	28,04	C6	7	C10	428	C7	52	C10	29	C5
AC	L2	50%	33,11	C2	3,33	C3	83	C2	11,8	C9	3,2	C8	2,06	C2	31,13	C9	7	C7	669	C5	65	C9	35	C3
AC	L3	75%	25,41	C7	3,28	C7	63	C9	11,2	C6	3	C4	1,77	C6	25,97	C8	9	C4	583	C9	45	C8	26	C8
AC	L4	100%	24,71	C10	3,60	C8	62	C8	10,8	C9	2,9	C8	1,72	C10	26,32	C3	7	C10	290	C6	41	C5	29	C9
AC	L5	125%	32,83	C7	4,85	C7	75,6	C6	12,3	C3	3,5	C3	2,10	C5	29,07	C4	8	C4	720	C7	51	C2	32	C5
ATM	L1	25%	29,61	C3	2,54	C9	72,7	C2	12,3	C10	3,7	C10	1,93	C6	28,21	C5	10	C4	618	C3	67	C6	29	C5
ATM	L2	50%	22,19	C9	3,03	C4	55,1	C10	13,8	C5	3,8	C5	1,62	C8	29,97	C10	9	C4	536	C8	58	C10	27	C10
ATM	L3	75%	31,57	C4	3,85	C4	75,2	C4	12,3	C3	2,9	C4	1,91	C4	29,41	C3	7	C7	691	C6	56	C3	33	C2
ATM	L4	100%	34,3	C3	4,11	C6	74,4	C4	13,6	C2	3,8	C4	2,25	C3	26,32	C3	10	C4	600	C2	48	C2	34	C5
ATM	L5	125%	30,87	C9	3,90	C10	71	C9	11	C6	2,7	C7	1,85	C9	27,18	C7	7	C5	628	C10	42	C6	29	C7

Legenda: L1: lâmina de 25% da ETc; L2: lâmina de 50% da ETc; L3: Lâmina de 75% da ETc; L4: Lâmina de 100% da ETc; L5: lâmina de 125% da ETc; ATM: Água tratada magneticamente; AC: água convencional; N: nitrogênio; P: fósforo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; S: enxofre; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco e CF: conjunto *fuzzy*

As três primeiras linhas da Tabela 33 representam as seguintes relações, as demais linhas são interpretadas da mesma forma.

- Se (tipo de água é “AC”) e (a lâmina de irrigação é “L1”) então (o N é “C6”, P é “C1”, K é “C7”, Ca é “C6”, Mg é “C8”, S é “C7”, B é “C6”, Cu é “C10”, Fe é “C7”, Mn é “C10” e Zn é “C5”);
- Se (tipo de água é “AC”) e (a lâmina de irrigação é “L1”) então (o N é “C2”, P é “C3”, K é “C2”, Ca é “C9”, Mg é “C8”, S é “C2”, B é “C9”, Cu é “C7”, Fe é “C5”, Mn é “C9” e Zn é “C3”);
- Se (tipo de água é “AC”) e (a lâmina de irrigação é “L1”) então (o N é “C7”, P é “C7”, K é “C9”, Ca é “C6”, Mg é “C4”, S é “C6”, B é “C8”, Cu é “C4”, Fe é “C9”, Mn é “C8” e Zn é “C8”).

Simulação e discussão do modelo

Após a determinação das equações de ajustes dos dados observados em campo, foram realizadas as simulações para cada variável de saída. Também foi possível realizar simulações para os modelos *fuzzy* desenvolvidos, em que após implementados em ambiente computacional no *Software Matlab*, implementou-se a função *evalfis* que possibilitou gerar as combinações entre as variáveis de entrada (lâmina de irrigação e tipo de água), assim podendo observar os níveis intermediários, antes não observado experimentalmente.

Na Figura 59, observa-se o comportamento do teor de fósforo em função da lâmina de irrigação. Nota-se, em relação ao tipo de água, que o comportamento do 1º ciclo é semelhante as encontradas na regressão, porém para o 2º ciclo constatou comportamento diferente.

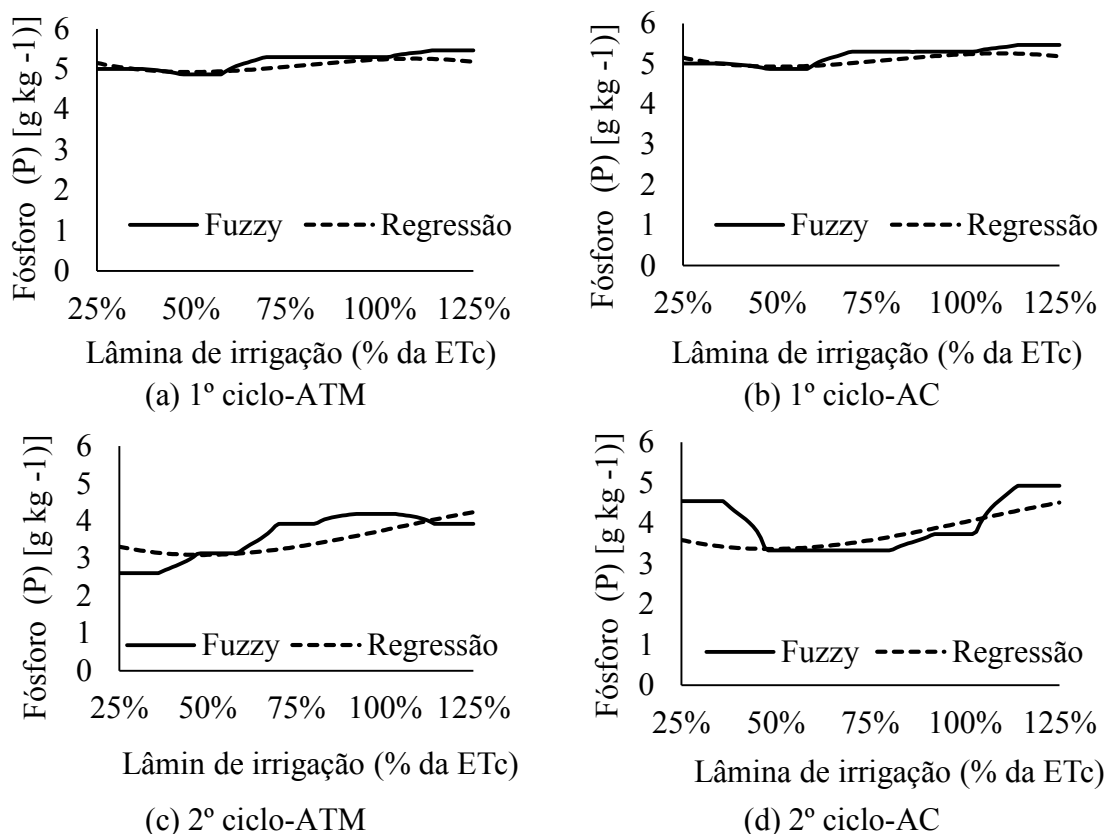


Figura 59. Modelos *fuzzy* e de regressão do fósforo da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição e com ATM no (a) 1º ciclo e no (c) 2º ciclo e com AC (b) 1º ciclo e no (d) 2º ciclo.

A partir da análise do modelo de regressão, é possível inferir que quando a cultura da alface foi submetida à irrigação com ATM, ocorre maior acúmulo de fósforo. Tal fato foi similar em ambos os ciclos, sendo que o máximo acumulado para o 1º ciclo ocorreu entre as lâminas de 113 a 125% da ETC, e para o 2º ciclo foi de 110 a 125% da ETC. Isso permite verificar que o aumento da umidade do solo favorece o fluxo de fósforo para as plantas, corroborando com Machado et al. (2011) e Costa et al. (2006), os quais constataram a alta correlação entre umidade do solo e processo de difusão do fósforo. Assim, por ATM proporcionar maior umidade do solo, acarreta em maior acúmulo de fósforo nas plantas.

Para o teor de potássio, verificou-se que para o 1º ciclo não houve diferença significativa em relação à lâmina de reposição hídrica, assim como o tipo de água adotado no manejo. Já para o 2º ciclo, houve maior acúmulo de potássio quando submetido à irrigação com AC (Figura 60).

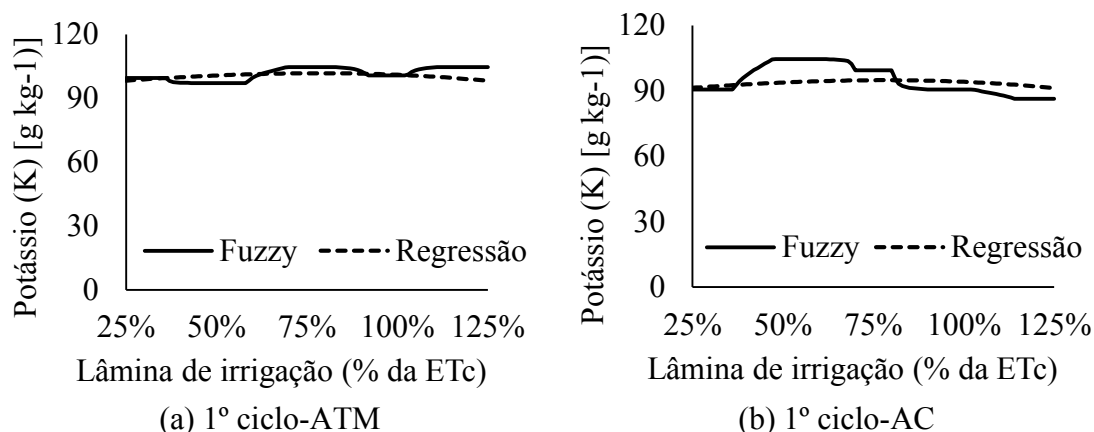


Figura 60. Modelos *fuzzy* e de regressão do potássio da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição e com ATM no (a) 1º ciclo e com AC (b) 2º ciclo.

O teor de potássio apresentou maior acúmulo para o tratamento irrigado com ATM entre as lâminas de 69,44 a 80,56 % da ETc, já quando irrigado com AC, obteve maior acúmulo entre a taxa de 47 a 58% da ETc, sendo superior. Isto pode ter ocorrido pela umidade do solo ser mais alta quando utilizada ATM, e conseqüentemente havido maior lixiviação, e reduzida a disponibilidade da absorção (WERLE et al., 2008). Esta interferência de absorção é pela redução do pH (WIETHÖLTER, 2007).

Assim, como verificado para o teor potássio, o cálcio também não apresentou diferenças significativas para o 1º ciclo, enquanto no 2º ciclo, verifica-se efeito similar do potássio, em que sucede o decréscimo do teor (Figura 61).

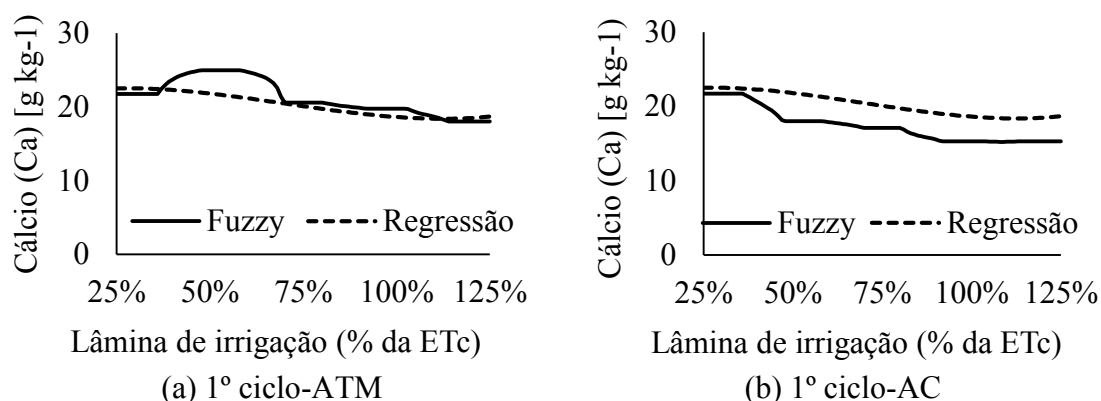


Figura 61. Modelos *fuzzy* e de regressão do cálcio da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição e com ATM no (a) 1º ciclo e com AC (b) 2º ciclo.

Foi observado que ocorreu maior acúmulo na taxa de reposição entre 47,22 a 58,33% da ETc para o 1º ciclo, nos tratamentos irrigados com ATM.

Observa-se que as diferentes taxas de reposição (%ETc) e ambos os tipos de água influenciaram a absorção do cálcio. De acordo com Farquim (2005), a absorção de cálcio é influenciada diretamente pelo pH do solo. E verificou a maior absorção das plantas nos tratamentos que foram irrigados com ATM, deste modo possa ser pela redução do pH provocado quando a água é induzida ao campo magnético.

A absorção do teor de magnésio foi influenciada diretamente pela lâmina de irrigação e também pelo tipo de água adotado na irrigação. De forma geral, houve redução no teor do magnésio em função do aumento da lâmina de irrigação, em ambos os ciclos (Figura 62).

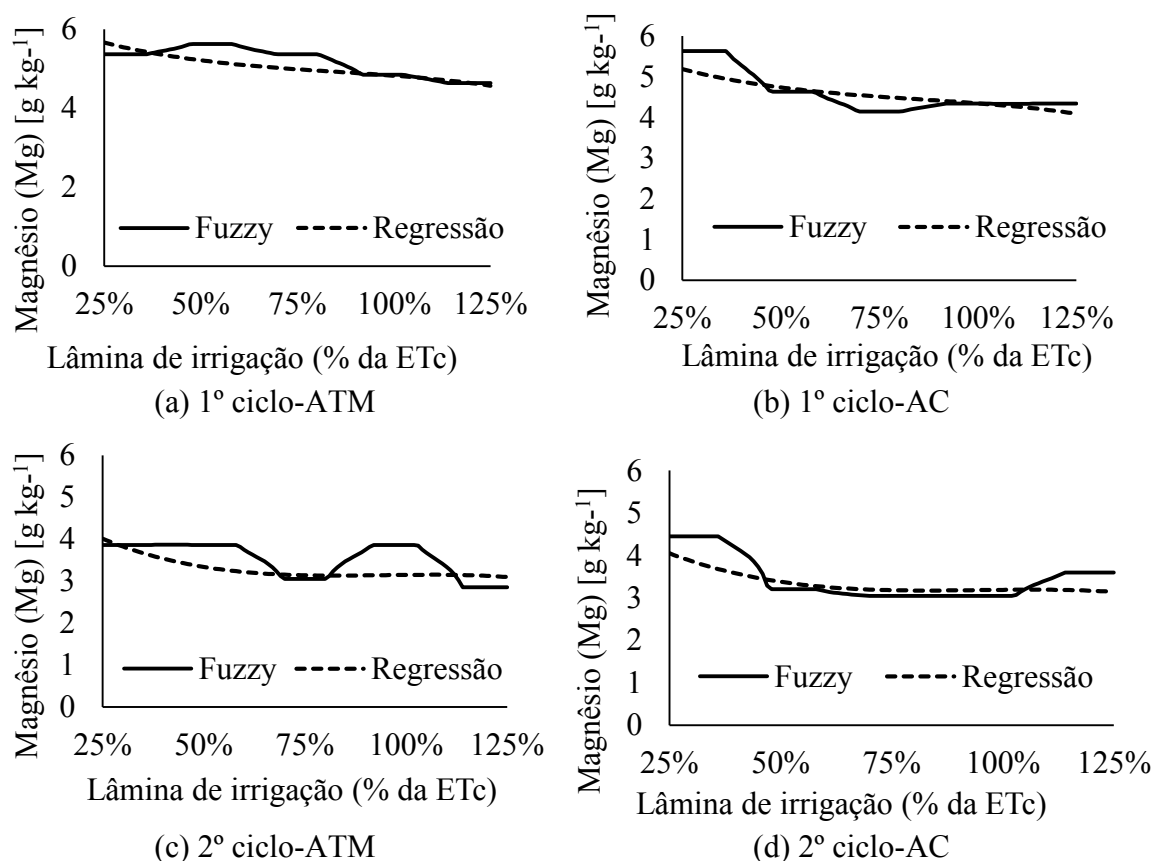


Figura 62. Modelos *fuzzy* e de regressão do magnésio da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição e com ATM no (a) 1º ciclo e no (c) 2º ciclo e com AC (b) 1º ciclo e no (d) 2º ciclo.

Os tratamentos irrigados com AC apresentaram o maior acúmulo máximo de magnésio nas lâminas entre 25 a 36% em ambos os ciclos. Porém, ao adotar a irrigação com ATM verificou-se que para o 1º ciclo houve o maior acúmulo entre as faixas de 47 a 58% da ETc, enquanto para o 2º ocorreu na lâmina de 41% da ETc.

O magnésio é absorvido pelos mesmos sítios do cálcio (RAIJ, 2011), assim apresentando um comportamento similar. Verificou-se que o aumento da lâmina de irrigação provocou redução no teor de magnésio absorvido, que foi verificado em ambos os ciclos. Ao analisar o tipo de água adotado, de forma geral, não foram verificadas grandes diferenças.

Gransee et al. (2013) observaram que a absorção de magnésio é influenciada diretamente pela umidade do solo. Assim, pode-se afirmar que outro fato que interferiu na absorção foi o pH, e sua faixa ideal foi em torno de 5 (MAAS; OGATA, 1971).

O teor de enxofre absorvido pela cultura da alface apresentou influências pelo tipo de água, assim como pelas lâminas de irrigação, apenas no 1º ciclo (Figura 63).

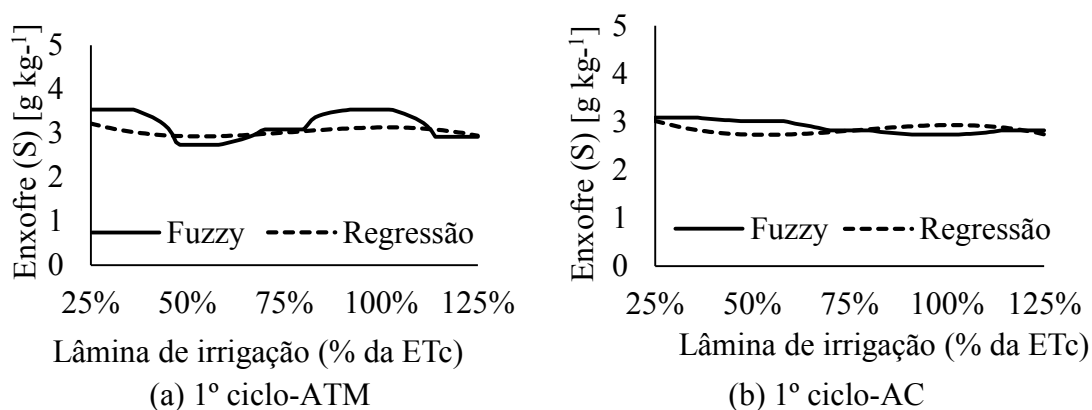


Figura 63. Modelos *fuzzy* e de regressão do enxofre da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição.

A partir da análise do modelo de regressão desenvolvido, observou-se a ocorrência da maior absorção de enxofre nos tratamentos irrigados com ATM. Os fatores que inibem a absorção do enxofre são a umidade e consequentemente a aeração, assim como o pH do solo (GERMIDA; JANZEN, 1993; HOROWITZ; MEURER, 2005; HOROWITZ; MEURER, 2006). Nota-se que para as menores lâminas de irrigação com ATM, houve o favorecimento da absorção do enxofre, pois é possível inferir que o aumento da umidade do solo e a aeração apresentaram as melhores condições. Também se verifica que entre a lâmina de 91,67 a 102,78% da ETc ocorreu o máximo acúmulo, provavelmente pelo aumento do pH da água, que pode ter ocasionado aumento no pH do solo (LIN; YOTVAT, 1990; MOSTAFAZADEH-FARD et al., 2011).

Já para os tratamentos irrigados com AC, verificou-se decréscimo de enxofre em relação ao aumento da lâmina de irrigação, corroborando com resultados similares na literatura (ESMEL et al., 2012; SINGH et al., 2014; PIRI et al., 2012), sendo o maior acúmulo na faixa de 25 a 36% da ETc.

Dentro da análise do teor de boro absorvido, é possível inferir que o comportamento frente ao tipo de água ou de lâmina de irrigação foi muito similar do enxofre (Figura 64).

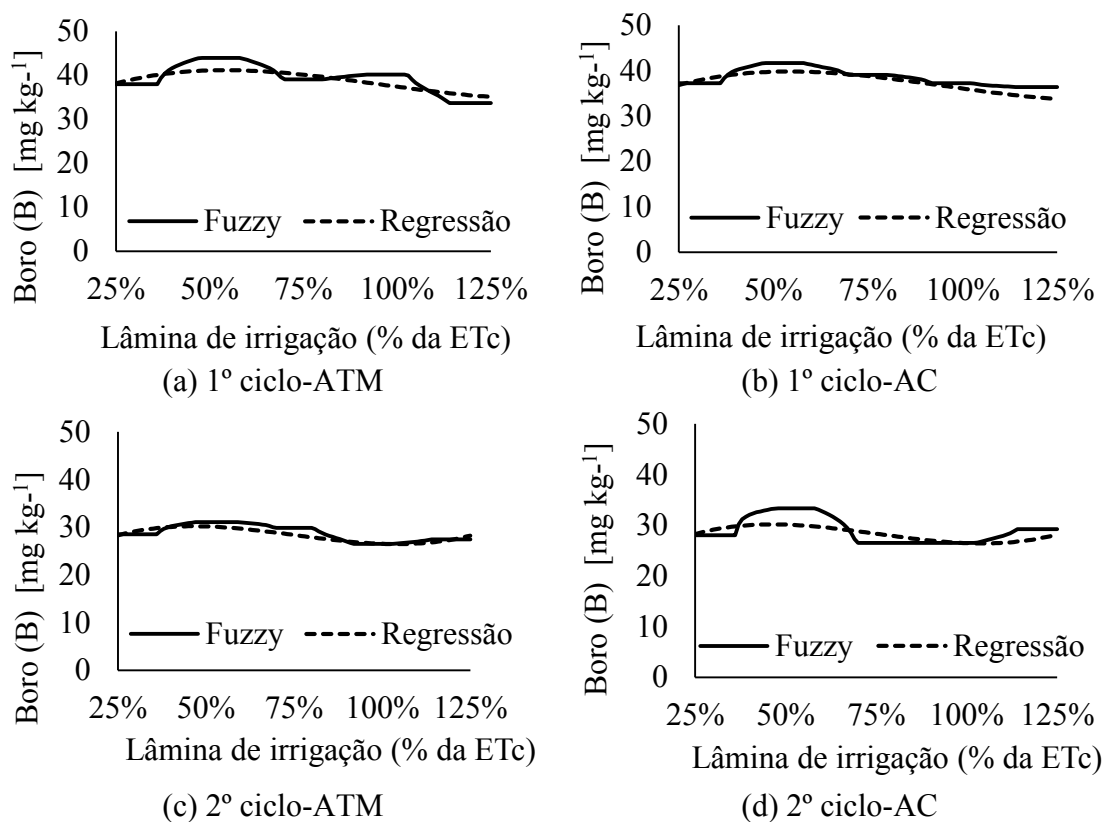


Figura 64. Modelos *fuzzy* e de regressão do boro da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição.

Foi possível verificar que o teor de boro absorvido pela cultura da alface diminui com o aumento da lâmina de irrigação, o que ocorreu possivelmente maior saturação do solo. O tipo de água adotado não causou inferência no resultado.

Pesquisas verificaram que a absorção de boro é fundamental para as plantas e diversos fatores interferem, tais como umidade, pH e temperatura do solo (BOWEN; NISSEN, 1976; GOLDBACH et al. 2001; HU; BROWN, 1997; HERRERA-RODRÍGUEZ et al., 2009; MATTIELLO et al., 2009)

O teor de cobre apresentou influência na absorção em função da lâmina de irrigação e do tipo de água adotado. A Figura 65 apresenta os resultados do modelo *fuzzy* e de regressão desenvolvidos.

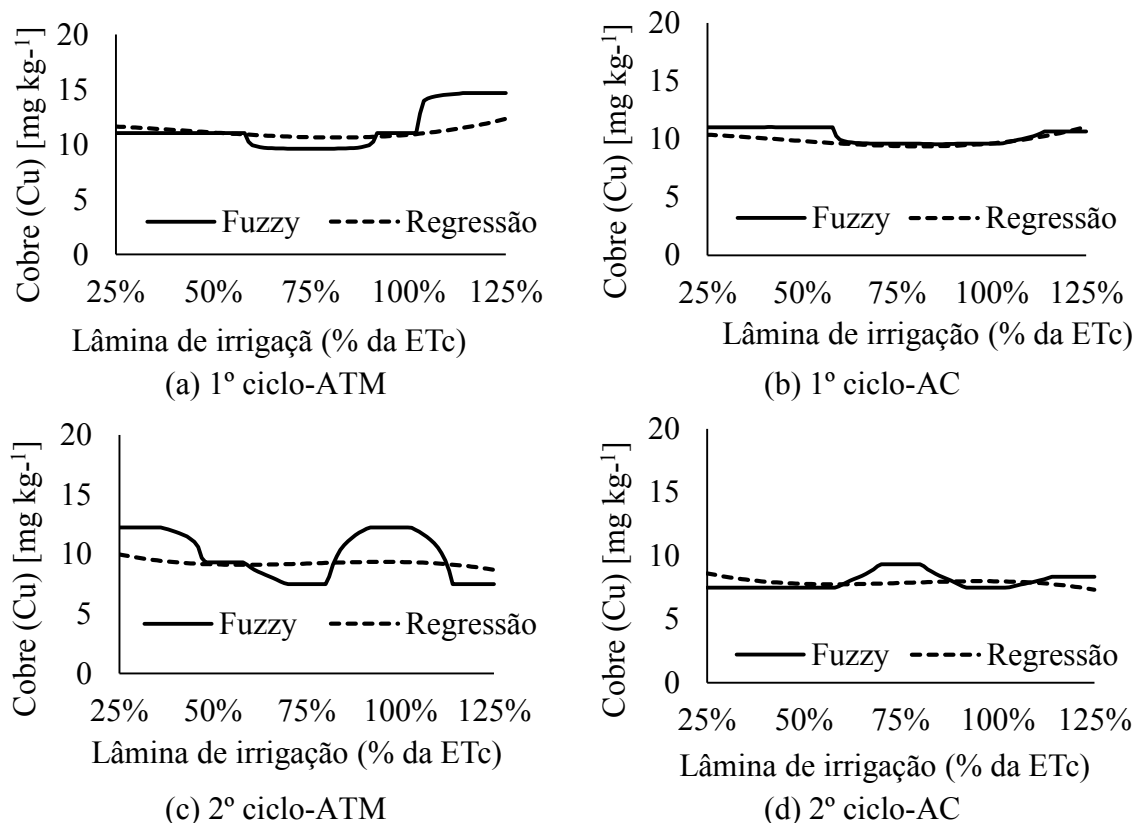


Figura 65. Modelos *fuzzy* e de regressão do cobre da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição.

Para acúmulo do cobre, verificou-se no 1º ciclo submetido à irrigação com ATM que a faixa entre 113 a 125% da ETc apresentou maior acúmulo, sendo para o 2º entre as taxas de 91,67 a 102,78% da ETc. Já para a irrigação com AC ocorreu o maior acúmulo na faixa de 41,66% da ETc para o 1º e no 2º entre as lâminas de reposição de 25 a 36,11% da ETc.

Foi possível inferir que a irrigação com ATM apresentou de forma geral maior absorção do cobre. Tal fato, provavelmente, é oriundo da maior disponibilidade de água no solo, provocada pela irrigação com ATM (KHOSHRAVESH et al., 2011). Deste modo, devido a ATM ter provocado a redução do pH, deste modo deixando a absorção do cobre na faixa ideal. Sendo um dos fatores mais intrínseco, já que a umidade do solo também

afeta a absorção do cobre (BOWEN, 1968; JARVIS; WHITEHEAD, 1983; MIYAZAWA et al., 2002).

O teor de ferro foi afetado quando submetido às diferentes lâminas de irrigação e tipo de água, o que pode ser observado na Figura 66, em que o tratamento irrigado com ATM apresentou maior acúmulo de ferro.

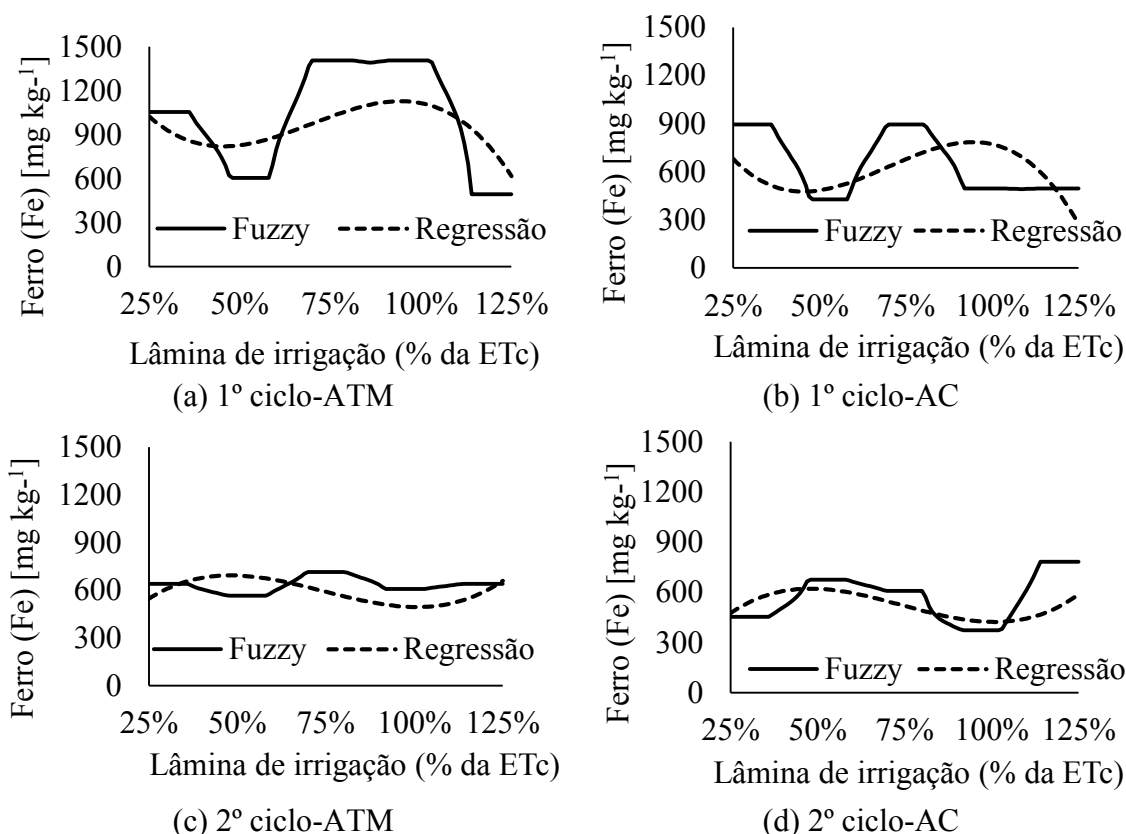


Figura 66. Modelos *fuzzy* e de regressão do ferro da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição.

A maior absorção de ferro quando irrigado com ATM ocorreu entre as faixas de 69 a 102,78% da ETC e de 69 a 80% da ETC, respectivamente, para o 1º e 2º ciclos. Ao adotar a irrigação com AC observa-se que as faixas de maior acúmulo ocorreram entre 69 a 80% da ETC e 113 a 125% da ETC, respectivamente, para o 1º e 2º ciclos.

Os tratamentos que foram irrigados com ATM, provavelmente, apresentaram redução no pH do solo, pois a água, quando induzida ao campo magnético, apresenta redução no pH da água (AMIRI; DADKHAH, 2006). O ferro apresentou maior disponibilidade para a planta quando encontrado em condições de menor pH, transformando formas iônicas em formas de óxidos e hidróxidos. Além disto, são melhores absorvidos e o

fato da umidade do solo irrigado com ATM pode ter ficado mais elevado o que favoreceu também a absorção (BASHIR et al., 2011; BROWN; CHANEY, 1971; ROBINSON, 1999; KOBAYASHI; NISHIZAWA, 2012; NAIR; IYENGAR, 2009; THOMINE; LANQUAR, 2011).

Para o teor de manganês, verificou-se que houve efeito de redução no teor para os tratamentos em função da lâmina de irrigação. Observa-se na Figura 67 o comportamento do teor do manganês em função dos tipos de água e de lâmina de irrigação.

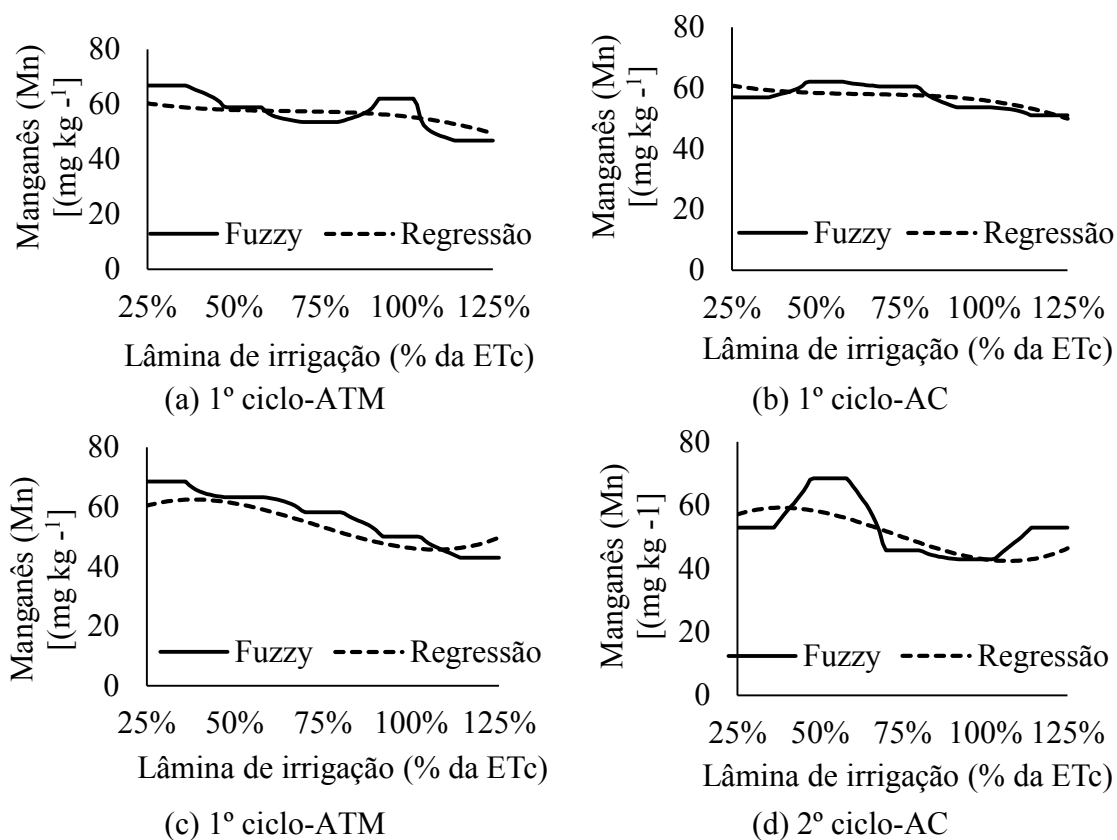


Figura 67. Modelos *fuzzy* e de regressão do manganês da cultura da alface cultivada em diferentes taxas de reposição.

Na análise do modelo de regressão, é possível inferir que os tratamentos irrigados com ATM apresentaram maior acúmulo de manganês. Em ambos os ciclos ocorreram de forma análoga o comportamento do teor de manganês, em que ao adotar a irrigação com ATM verificou-se que para a faixa entre 25 a 36% da ETC ocorreu o maior acúmulo. Já para o irrigado com AC, verificou-se que ocorreu entre as taxas de 47,33 a 58,33% da ETC.

Deve-se observar que o aumento na lâmina de irrigação provocou a redução no teor do manganês, pois o aumento da umidade do solo dificultou sua absorção (CAILLIATTE et al., 2010; FERNANDO et al., 2007; MILLALEO et al., 2010). O outro fator intrínseco para a absorção de manganês é o pH do solo (SOUZA et al., 2010; ZHAO et al., 2012) e pela irrigação com ATM apresentar o pH mais baixo, pode ter contribuído para que o solo se tornasse mais ácido favorecendo a absorção do manganês.

O teor de zinco não apresentou diferenças quando submetido aos diferentes tipos de água. Porém, observa-se que o aumento da lâmina de irrigação provocou redução no teor absorvido (Figura 68).

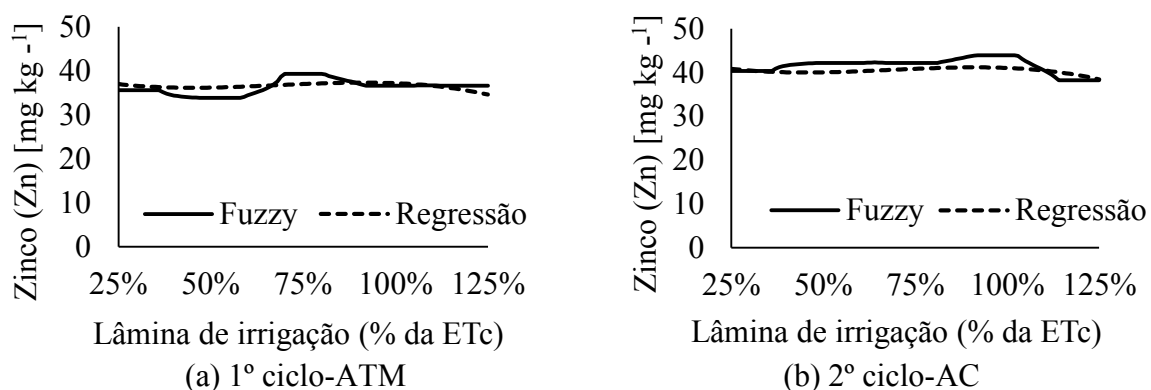


Figura 68. Modelos *fuzzy* e de regressão do zinco da cultura da alface cultivada em diferentes taxas.

O teor de zinco para o 2^o ciclo não apresentou diferenças significativas. Porém, no 1^o ciclo o aumento da umidade do solo reduziu o teor absorvido de zinco (HACISALIHOGU; KOCHIAN, 2003; NIELSEN, 2012; ROBSON, 1993, SADEGHZADEH, 2013; LIU et al., 2010), que acarretou em redução no teor. O efeito da irrigação com ATM não interferiu na absorção.

A partir da elaboração do sistema baseado em regras *fuzzy*, realizaram-se simulações das combinações intermediárias dentro do intervalo pré-estabelecido experimentalmente, para as lâminas de irrigação que variam de 25 a 125% da ETC e para tipo de água sendo convencional ou magnética. Assim, foi possível a aplicação do método de desfuzzyficação de Mamdani, que gerou as respostas de cada modelo para as variáveis de resposta.

Análise da intesidade de associação dos modelos

Com a elaboração do sistema baseado em regras *fuzzy* e dos modelos de regressão, foi possível realizar a comparação com os dados coletados no experimento agrônômico. Para a realização do cálculo da intesidade de associação dos modelos, adotou-se como critério o valor do EQM, “d” de Willmott. Na análise, foi possível inferir que o nitrogênio em ambos os ciclos não se ajustou ao modelo estatístico *fuzzy*. Os teores de potássio, cálcio, enxofre e zinco também não foram significativos, somente no 2º ciclo.

Foram verificados, que ambos os ciclos e em todas as variáveis que foram analisadas, que o modelo *fuzzy* apresentou um ajuste mais preciso, conforme podemos inferir a partir da Tabela 34.

Tabela 34. Análise comparativa entre os modelos *fuzzy* e de regressão linear para as variáveis biométricas da cultura da alface submetida às diferentes lâminas de irrigação e tipo de água.

Variáveis	Modelos	1º ciclo			2º ciclo		
		EQM	r	d	EQM	r	d
N	<i>fuzzy</i> regressão	ns			ns		
P	<i>fuzzy</i> regressão	0,132	0,55*	0,992	0,104	0,89*	0,989
		0,145	0,52*	0,993	0,280	0,63*	0,971
K	<i>fuzzy</i> regressão	41,48	0,61*	0,995	ns		
		45,82	0,48*	0,994			
Ca	<i>fuzzy</i> regressão	3,17	0,83*	0,990	ns		
		3,39	0,80*	0,989			
Mg	<i>fuzzy</i> regressão	0,205	0,73*	0,988	0,10	0,86*	0,986
		0,235	0,67*	0,987	0,252	0,56*	0,968
S	<i>fuzzy</i> regressão	0,054	0,72*	0,99	ns		
		0,07	0,49*	0,987			
B	<i>fuzzy</i> regressão	5,77	0,75*	0,995	4,37	0,61*	0,994
		6,21	0,66*	0,994	4,88	0,46*	0,993
Cu	<i>fuzzy</i> regressão	1,52	0,71*	0,985	1,61	0,74*	0,976
		2,15	0,50*	0,979	1,80	0,51*	0,972
Fe	<i>fuzzy</i> regressão	49159,2	0,82*	0,912	11935,8	0,72*	0,962
		72423,4	0,67*	0,871	13828,2	0,56*	0,956
Mn	<i>fuzzy</i> regressão	36,24	0,61*	0,988	25,63	0,86*	0,99
		41,59	0,49*	0,986	34,62	0,71*	0,987
Zn	<i>fuzzy</i> regressão	8,27	0,61*	0,993	ns		
		8,52	0,59*	0,994			

Legenda: ns: não significativo; d de Willmott; * significativo para $\alpha = 5\%$; N: nitrogênio; P: fósforo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; S: enxofre; B: boro; CU: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco.

Foi observado o mesmo comportamento para todas as variáveis que apresentaram o efeito do tipo de água e da variação das lâminas de irrigação, em que ocorreram os menores valores de EQM para os modelos *fuzzy* quando comparados com os dados observados em campo; também foi constatado que os modelos *fuzzy* apresentaram os maiores valores de r e “ d ” de Willmott. Deste modo, o modelo *fuzzy* apresentou ser mais preciso, pois o ajuste entre os dados coletados a campo com os modelados foi menor do que quando comparado com os valores obtidos a partir das equações de regressão.

Petkovic et al. (2015) verificaram que os modelos *fuzzy* apresentaram menor erro quadrado e um maior de r , quando comparado com os modelos de determinação de evapotranspiração, assim tornando-se uma ferramenta mais precisa. Para as propriedades produtoras de arroz, existe grande preocupação no consumo de água, Khoshnevisan et al. (2014) verificaram que o modelo *fuzzy* foi mais assertivo na previsão de consumo hídrico ao longo do ciclo, deste modo o modelo apresentou um erro menor quando comparado com os modelos clássicos.

Almeida et al. (2013) inferiram a partir do modelo *fuzzy* proposto foi mais preciso, quando comparado com os resultados do modelo de regressão para a avaliação do potencial da utilização de água residuária na agricultura. Massei et al. (2014), trabalhando com qualidade de água residuária destinada para a agricultura, verificaram que o modelo *fuzzy* desenvolvido foi mais incisivo do que os modelos utilizando regressão.

Conclusão

A irrigação utilizando ATM favoreceu a absorção dos macros e micronutrientes pelo proporcionalmente da maior umidade do solo, e a possível redução do pH do solo, deixando a planta em condições favoráveis para absorção. Também se pode ressaltar, que houve o efeito da variação da lâmina de irrigação, que proporcionando em muitos casos a redução da absorção e macro e micronutrientes, pois o aumento excessivo da umidade do solo pode ter contribuído para lixiviação, assim como a redução da aeração.

Os resultados obtidos que verificaram os resultados agronômicos foram modelados por equações de regressões. A partir da comparação dos modelos (*fuzzy* e regressão polinomial) com os dados coletados a campo, foi possível inferir que houve ajuste melhor, quando utilizado o modelo baseado em regras *fuzzy*, deve-se ressaltar que todas as variáveis apresentaram o mesmo comportamento em todos os parâmetros de comparação.

O melhor ajuste foi comprovado pela redução do valor do EQM, assim como o aumento do valor do “d” de Wilmott, que determinou que os modelos demonstraram ser mais exato e ter maior correlação.

Pode-se concluir que a aplicação do modelo *fuzzy* apresenta um alto potencial na avaliação do comportamento de experimentação na área de ciências agrárias, com ajustes melhores e com maior exatidão quando comparado com os resultados de ajuste da curva de regressão.

Referências

AKBARI, M. B.; REZAEI, A. Bootstrap testing *fuzzy* hypotheses and observations on *fuzzy* statistic. **Expert systems with applications**, v. 37, p. 5782-5787, 2010.

ALMEIDA, G.; VIEIRA, J.; SÁ, A. M.; KIPERSTOK, A.; CARDOSO, A. Estimating the potential water reuse based on *fuzzy* reasoning. **Journal of Environmental Management**, v. 128, p. 883-892, 2013.

AMIRI, M. C.; DADKHAH, A. A. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 278, n. 1, p. 252-255, 2006.

BASHIR, K.; ISHIMARU, Y.; SHIMO, H.; NAGASAKA, S.; FUJIMOTO M, TAKANASHI H, TSUTSUMI N, AN, G., NAKANISHI, H.; NISHIZAWA, N. K. The rice mitochondrial iron transporter is essential for plant growth. **Nature Communications** 2, v. 2, n. 322, p. 1-7, 2011.

BLANCO-FERNÁNDEZ, A.; CASALS, M. R.; COLUBI, A.; CORRAL, N.; GARCÍA-BÁRZANA, M.; GIL, M. A.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, G.; LÓPEZ, M. T.; LUBIANO, M. A.; MONTENEGRO, M.; RAMOS-GUAJARDO, A. B.; DE LA ROSA DE SÁA, S.; SINOVA, B. A distance-based statistical analysis of *fuzzy* number-valued data. **International journal of approximate reasoning**, v. 55, p. 1487-1501, 2014

BLANCO-FERNÁNDEZ, A.; CASALS, M. R.; COLUBI, A.; CORRAL, N.; GARCÍA-BÁRZANA, M.; GIL, M. A.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, G.; LÓPEZ, M. T.; LUBIANO, M. A.; MONTENEGRO, M.; RAMOS-GUAJARDO, A. B.; DE LA ROSA DE SÁA, S.; SINOVA, B. Random *fuzzy* sets: a mathematical tool to develop statistical *fuzzy* data analysis. **Iranian journal of fuzzy systems**, v. 10, n. 2, p. 1-28, 2013.

BOWEN, J. E. Absorption of copper, zinc, and manganese by sugarcane leaf tissue. **Plant physiology**, v. 44, n. 2, p. 255-261, 1968.

BOWEN, J. E. Absorption of Copper, Zinc, and Manganese by Sugarcane Leaf Tissue. **Plant Physiol.**, v. 44, p. 255-261, 1961.

- BOWEN, J. E.; Boron Uptake by Excised Barley Roots. **Plant Physiol**, v. 57, p. 353-357, 1976.
- BOWEN, J. E.; NISSEN, P. Boron Uptake by Excised Barley Roots. **Physiologia Plantarum**, v. 41, n. 2, p. 109-115, 1976.
- BROWN, J.C.; CHANEY, R.L. Effect of iron on the transport of citrate into the xylem of soybeans and tomatoes. **Plant physiology**, v. 47, n. 6, p. 836-840, 1971.
- BUCKLEY, J. J. **Fuzzy Probability and Statistics**. Studies in Fuzziness and Soft Computing. 1. ed. vol.196. New York: Springer, 2006, 270 p.
- BUCKLEY, J. J. Theory of the fuzzyController: An introduction. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 51, p. 249-258, 1992.
- CAILLIATTE, R.; SCHIKORA, A.; BRIAT, J. F.; MARI, S.; CURIE, C. High-affinity manganese uptake by the metal transporter NRAMP1 is essential for Arabidopsis growth in low manganese conditions. **The Plant Cell Online**, v. 22, n. 3, p. 904-917, 2010.
- CARVALHO, W. A.; ESPÍNDOLA, C. R.; PACCOLA, A. A. Levantamento de solos da Fazenda Lageado - Estação Experimental "Presidente Médici". **Boletim Científico - Faculdade de Ciências Agrônômicas**, Botucatu, v. 1, p. 1-95, 1983
- CHACHI, J.; TAHERI, S. M.; ARGHAMI, N. R. A hybrid *fuzzy* regression model and its application in hydrology engineering. **Applied Soft Computing**, v. 25, p. 149-153, 2014.
- CLEWER, A. G.; SCARISBRICK, D. H. **Practical statistics and experimental design for plant and crop science**. John Wiley & Sons, 2013.
- COSTA, J. P.; DE BARROS, N. F.; BASTOS, A. L.; DE ALBUQUERQUE, A. W. Fluxo difusivo de potássio em solos sob diferentes níveis de umidades e de compactação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 56-62, 2009.
- COSTA, J. P.; DE BARROS, N. F.; DE ALBUQUERQUE, A. W.; FILHO, G. M. e SANTOS, J. R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 828-835, 2006.
- 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.
- DAVATGAR, N.; NEISHABOURI, M. R.; SEPASKHAH, A. R. Delineation of site specific nutrient management zones for a paddy cultivated area based on soil fertility using fuzzy clustering. **Geoderma**, v. 173-174, p. 111-118, 2012.
- ESMEL, C. E.; SANTOS, B. M.; SIMONNE, E. H.; REHCIGL, J. E.; NOLING, J. W. Preplant Sulfur Fertilization Rates and Irrigation Programs on Tomato Growth and Yield. **HortTechnology**, v. 22, n. 4, p. 523-527, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, Embrapa Produção de Informação, 2006. 286p

FAGERIA, N. K. Absorption of magnesium and its influence on the uptake of phosphorus, potassium, and calcium by intact groundnut plants. **Plant and Soil**, v. 40, n. 2, p. 313-320, 1974.

FAGERIA, N. K; BALIGAR, V. C; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. Ed. 3, p.1- 564, 2011

FAO (Food and Agriculture Organization of the united Nation). **Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements** - FAO - Irrigation and drainage. Local: FAO, 1998. 56p.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: ESAL/FAEPE, 1994.

FARQUIM, V. **Nutrição Mineral de plantas**. 186 p. 2005.

FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006, 432 p.

FERNANDO, D. R., WOODROW, I. E., JAFFRÉ, T., DUMONTET, V., MARSHALL, A. T., e Baker, A. J. M. Foliar manganese accumulation by *Maytenus founieri* (*Celastraceae*) in its native New Caledonian habitats: populational variation and localization by X-ray microanalysis. **New Phytologist**, v. 177, n. 1, p. 178-185, 2007.

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.

GERMIDA, J. J.; JANZEN, H. H. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils. **Fertilizer research**, v. 35, n. 1-2, p. 101-114, 1993.

GOLDBACH, H. (Ed.). **Boron in plant and animal nutrition**. Springer, 2002.

GOLDBACH, H. E.; BROWN, P. H.; RERKASEM, B.; THELLIER, M.; WIMMER, M. A.; BELL, R. W. **Boron in Plant and Animal Nutrition**. 401p. 2001.

GOYAL, M. K; BHARTI, B.; QUILTY, J.; ADAMOWSKI, J.; PANDEY, A. Modeling of daily pan evaporation in sub-tropical climates using ANN, LS-SVR, *fuzzy* logic and ANFIS. **Expert systems with applications**, v. 43, p. 5267-5276, 2014

GRANSEE, A.; FÜHRS, H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. **Plant and Soil**, v. 368, n. 1-2, p. 5-21, 2013.

HACISALIHOGU, G.; KOCHIAN, L. V. How do some plants tolerate low levels of soil zinc? Mechanisms of zinc efficiency in crop plants. **New Phytologist**, v. 159, n. 2, p. 341-350, 2003.

- HERRERA-RODRÍGUEZ, M. B.; GONZÁLEZ-FONTES, A.; REXACH, J.; CAMACHO-CRISTÓBAL, J. J.; MALDONADO, J. M., e NAVARRO-GOCHICOA, M. T. Role of boron in vascular plants and response mechanisms to boron stresses. **Plant Stress**, v. 4, n. 2, p. 115-122, 2009
- HIRATA, A. C. S.; HIRATA, E. K.; GUIMARÃES, E. C.; RÓS, A. B.; MONQUERO, P. A. Plantio direto de alface americana sobre plantas de cobertura dessecadas ou roçadas. **Bragantina**, v. 73, n. 2, p. 178-183, 2014
- HOROWITZ, E. J.; MEURER, N. Oxidação do enxofre elementar em solos tropicais. **Ciência Rural**, v. 36, n. 3, 2006.
- HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Uso de enxofre elemental como fertilizante. **POTAFOS. Informaciones Agronómicas**, n. 112, p. 4-7, 2006.
- HOZAYN, M; ABD EL MONEM, A. A.; ABD EL-FATAH ELWIA, T.; EL-SHATAR, M. M. Future of magnetic agriculture in arid and semi arid regions. **Scientific papers series a agronomy**. v. 57, p. 197- 204, 2014
- HU, H.; BROWN, P. H. Absorption of boron by plant roots. **Plant and Soil**, v. 193, n. 1-2, p. 49-58, 1997.
- HU, H; JING, Z; HU, S. Unscented *fuzzy*-controlled current statistic model and adaptive filtering for tracking maneuvering targets. **Communication in nonlinear science and numerical simulation**, v. 11, p. 961-972, 2006.
- JARVIS, S. C.; WHITEHEAD, D. C. The absorption, distribution and concentration of copper in white clover grown on a range of soils. **Plant and soil**, v. 75, n. 3, p. 427-434, 1983.
- JONES JR, J. B. **Plant nutrition and soil fertility**. ed. 2, Boca Raton, FL, p.1-296, 2012
- JONES JR, J. Benton. **Plant nutrition and soil fertility manual**. CRC press, 2012.
- KHOSHNEVISAN, B.; RAFIEE, S.; OMID, M.; MOUSAZADEH, H. Prediction of potato yield based on energy inputs using multi-layer adaptive neuro-*fuzzy* inference system. **Measurement**, v. 47, p. 521-530, 2014.
- KHOSHNEVISAN, B.; RAJAEIFAR, M. A.; CLARK, S.; SHAMAHIRBAND, S.; ANUAR, N. B.; SHUIB, N. L. M.; GANI, A. Evaluation of traditional and consolidated rice farms in Guilan Province, Iran, using life cycle assessment and *fuzzy* modeling. **Science of the Total Environment**, v. 481, p. 242-251, 2014.
- KHOSHRAVESH, M.; MOSTAFAZADEH-FARD, B.; MOUSAVI, S. F. e KIANI, A. R. Effects of magnetized water on the distribution pattern of soil water with respect to time in trickle irrigation. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 4, p. 515-522, 2011.
- KOBAYASHI, T.; NISHIZAWA, N. K. Iron Uptake, Translocation, and Regulation in Higher Plants **Annual Review of Plant Biology**, v. 63, p. 131-152, 2012.

- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.
- LI, W.; ZHOU, J.; XIONG, X.; LU, J. A statistic-*fuzzy* technique for clustering load curves. **Transactions on power systems**, v. 22, n. 2, 2007
- LIN, I. J.; YOTVAT, J. Exposure of irrigation and drinking water to a magnetic field with controlled power and direction. **Journal of magnetism and magnetic materials**, v. 83, n. 1, p. 525-526, 1990.
- LIU, F.; TANG, Y; DU, R.; YANG, H.; WU, Q.; QIU, R. Root foraging for zinc and cadmium requirement in the Zn/Cd hyperaccumulator plant *Sedum alfredii*. **Plant and soil**, v. 327, n. 1-2, p. 365-375, 2010.
- MAAS, E. V.; OGATA, G. Absorption of magnesium and chloride by excised corn root. **Plant physiology**, v. 47, n. 3, p. 357-360, 1971.
- MAAT, H. The history and future of agricultural experiments. **NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 57, n. 3, p. 187-195, 2011.
- MACHADO, V. J.; de SOUZA, C. H. E.; de ANDRADE, B. B.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H. Availability curves of phosphorus in soils with different textures after application of increasing doses of monoammonium. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 1, 2011.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. 2. ed. Piracicaba. Potafos, 1997. 319p.
- MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a *Fuzzy* Logic Controller. **Internacional Journal Man-Machine Studies**, v. 7, p. 1-13, 1975.
- MASSEI, G.; ROCCHI, L.; PAOLOTTI, L.; GRECO, S.; BOGGI, A. Decision Support Systems for environmental management: A case study on wastewater from agriculture. **Journal of Environmental Management**, v. 146, p. 491-504, 2014.
- MATHWORKS. Inc. **Logic Fuzzy toolbox user's guide**, version 8.4.0. Natick, MathWorks, Inc., 2014.
- MATTIELLO, E. M.; RUIZ, H. A.; SILVA, I. R. DA, BARROS, N. F. DE; NEVES. J. C. L.; BEHLING, M. Transporte de boro no solo e sua absorção por eucalipto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 33, p. 1281-1290, 2009.
- MEAD, R.; CURNOW, R. N.; HASTED, A. M. **Statistical methods in agriculture and experimental biology**. CRC Press, 2002.
- MENGEL, K. et al. (Ed.). **Principles of plant nutrition**. Springer Science & Business Media, 2001.
- MILLALEO, R.; REYES-DÍAZ, M.; IVANOV, A. G.; MORA, M. L.; ALBERDI, M. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 10, n. 4, p. 470-481, 2010.

MINITAB, I. N. C. MINITAB statistical software. Minitab Release, v. 17, 2014.

MIYAZAWA, M.; GIMINEZ, S. M.; YABE, M. J. S.; OLIVEIRA, E. L.; KAMOGAWA, M. Y. Absorption and toxicity of copper and zinc in bean plants cultivated in soil treated with chicken manure. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 138, n. 1-4, p. 211-222, 2002.

MOSTAFAZADEH-FARD, B.; KHOSHRAVESH, M.; MOUSAVI, S. F.; KIANI, A. R. Effects of magnetized water and irrigation water salinity on soil moisture distribution in trickle irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 137, n. 6, p. 398-402, 2010.

MOSTAFAZADEH-FARD, B.; KHOSHRAVESH, M.; MOUSAVI, S. F.; KIANI, A. R. Effects of magnetized water and irrigation water salinity on soil moisture distribution in trickle irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 137, p. 398-402, 2011.

MUZZIOLI, S.; RUGGIERI, A.; BAETS, B. De. A comparison of *fuzzy* regression methods for the estimation of the implied volatility smile function. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 266, p. 131-143, 2006.

NAIR, K. M.; IYENGAR, V. Iron content, bioavailability e factors affecting iron status of Indians. **Indian Journal of Medical Research**, v. 130, n. 5, p. 634-645, 2009.

NIELSEN, F. H. History of zinc in agriculture. **Advances in Nutrition: An International Review Journal**, v. 3, n. 6, p.783-789, 2012.

PETKOVIC, D.; GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S.; SHAMSHIRBAND, S.; MOTAMEDI, S.; HASHIM, R.; BONAKDARI, H. Determination of the most influential weather parameters on reference evapotranspiration by adaptive neuro-*fuzzy* methodology. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 114, p. 277-284, 2015.

PIRI, I.; RAHIMI, A.; TAVASSOLI, A.; RASTEGARIPOUR, F.; e BABAEIAN, M. Effect of sulphur fertilizer on sulphur uptake and forage yield of Brassica juncea in condition of different regimes of irrigation. **African Journal of Agricultural Research**, v.7, n. 6, p. 958-963, 2012.

PITERBARG, L. I. Parameter estimation from small biased samples: **Fuzzy Sets vs Statistics**, v. 170, p. 1-21, 2011

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba**: International Plant Nutrition Institute, 2011, 420p.

ROBINSON, N. J.; PROCTER, C. M.; CONNOLLY, E. L., e GUERINOT, M. L. A ferric-chelate reductase for iron uptake from soils. **Nature**, v. 397, n. 6721, p. 694-697, 1999.

ROBSON, A. D. Zinc in soils and plants. **Development in Plant and Soil Science. Kluwer Acad. Publish**, v. 55, 1993.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. 607p. 2010.

SADEGHZADEH, B. A review of zinc nutrition and plant breeding. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 13, n. 4, p. 905-927, 2013.

SALA, F. C.; COSTA, C. P. Gloriosa: cultivar de alface americana tropicalizada. **Horticultura Brasileira**. v. 26, p. 409-410, 2008.

SCHARER, M.; PAGE, T.; EVEN, K. A *fuzzy* decision tree to predict phosphorus export at the catchment scale, **Journal of Hydrology**, v. 331, p. 484-494, 2006.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem Fuzzy**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2011.

SINGH, S. P.; SINGH, R.; SINGH, M. P. e SINGH, V. P. Impact of Sulfur Fertilization on Different Forms and Balance of Soil Sulfur and the Nutrition of Wheat in Wheat-Soybean Cropping Sequence in Tarai soil. **Journal of Plant Nutrition**, v. 37, n.4, p. 618-632, 2014.

SOUZA, L. H.; NOVAIS, R. F.; ALBUQUERQUE VILLANI, E. M. Efeito do pH do solo rizosférico e não rizosférico de plantas de soja inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* na absorção de boro, cobre, ferro, manganês e zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1641-1652, 2010.

THOMINE, S.; LANQUAR, V. Iron transport and signaling in plants. In: **Transporters and Pumps in Plant Signaling**. Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 99-131.

VIERTL, R. **Statistical methods for fuzzy data**. Austria, p.1-270, 2011.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2297-2305, 2008.

WIETHOLTER, S. Bases teóricas e experimentais de fatores relacionados com a disponibilidade de potássio do solo às plantas usando trigo como referência. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1011-1021, 2007.

YET, C. T. Weighted trapezoidal and triangular approximations of *fuzzy* numbers. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 160, p. 3059-3079, 2009.

ZHAI, P.; WILLIAMS, E. D. Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (PV) using *fuzzy* logic model. **Renewable energy**. v. 41, p. 350-357, 2012.

ZHAO, H.; WU, L.; CHAI, T.; ZHANG, Y.; TAN, J. e MA, S. The effects of copper, manganese and zinc on plant growth and elemental accumulation in the manganese-hyperaccumulator *Phytolacca americana*. **Journal of plant physiology**, v. 169, n. 13, p. 1243-1252, 2012.

ZIECH, A. R. D.; CONCEIÇÃO, P. C.; LUCHESE, A. V.; PAULUS, D.; ZIECH, M. F. Cultivo de alface em diferentes manejos de cobertura do solo e fontes de adubação. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 18, n. 9, p. 948-954, 2014.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

A partir do tratamento magnético da água aplicado via irrigação, para a cultura da alface, foi constatado por meio dos modelos de regressão polinomial que ocorreu maior desenvolvimento quando submetido a irrigação com ATM. Observou-se que devido às alterações ocorridas ao induzir a água ao campo magnético, constatou-se que ao final do ciclo às lâminas de irrigação em torno da faixa de 75% ETc obtiveram uma produção igual quando irrigado com 100% da ETc. Deste modo verificou-se a possibilidade de aplicar uma menor lâmina e assim reduzindo os custos com bombeamento de água e o desgaste do sistema de irrigação. Também, verificou-se que devido ao desenvolvimento da planta mais acentuado, pode-se atingir a mesma produção máxima da alface irrigada com AC, com um volume inferior com ATM, sendo que tal técnica pode alavancar a produção de alimentos e otimizar o uso da terra.

Para o crescimento da cultura da alface foi possível verificar que quando submetida a irrigação com ATM ocorreu um aumento na produção. Deve-se destacar que devido a um crescimento mais acentuado, possibilita a redução nos dias do ciclo, quando se buscou atingir a mesma produção aos 35 DAT irrigadas com AC. Assim, podendo aumentar o número de ciclos da cultura e também a redução no volume de água aplicado ao longo do ciclo. Observou-se uma redução média de cinco dias por ciclo, havendo a possibilidade de aumentar de 10 para 12 ciclos anuais da cultura alface, considerando em média 35 dias até o ponto de colheita.

Na determinação da produtividade em função das lâminas aplicadas ao longo do ciclo, houve um aumento na produtividade da cultura da alface, foi possível verificar tais resultados, devido ao aumento do número de folhas e principalmente por meio do aumento da fitomassa verde aérea. No sistema radicular, deve-se destacar que para o comprimento de raiz, não foi constatado diferenças. Porém para a variável fitomassa verde de raiz ocorreu um incremento quando submetido à irrigação com ATM.

Na determinação do acúmulo dos macros e micronutrientes, foi verificado que quando submetido à irrigação com ATM para a cultura da alface constatou-se que ocorreu uma maior absorção, devido a maior umidade do solo, e a possível redução do pH do solo, deixando as plantas em condições mais favoráveis para absorção. Também se pode ressaltar, que houve o efeito da variação da lâmina de irrigação, que proporciona a redução da absorção e macro e micronutrientes, pois o aumento excessivo da umidade do

solo pode ter contribuído para lixiviação, assim como a redução da aeração, neste caso devido à baixa absorção pode ter resultado em uma menor produção.

A partir da constatação dos efeitos das variações das lâminas de irrigações e dos tipos de água para as variáveis biométricas por meio dos modelos de regressão polinomial, foi possível desenvolver os modelos *fuzzy*.

Com os modelos *fuzzy* desenvolvidos foi possível analisar regiões intermediárias aos pontos específicos verificados por meio de experimento e tecer conclusões mais específicas, em que as análises via modelo de regressão não possibilitaria.

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

Assim, a partir das elaborações dos modelos, foi realizada a análise de intensidade de associação, em que comparou os resultados de ambos os modelos com os dados coletados a campo. Foi constatado que os modelos *fuzzy* apresentaram um ajuste melhor, para todas as variáveis, em que apresentaram o mesmo comportamento em todos parâmetros de comparação. Para todas as variáveis analisadas, os valores do EQM apresentaram redução, o coeficiente de correlação apresentou um aumento no valor e também o aumento no valor da exatidão do modelo.

Deste modo, observou-se que os modelos *fuzzy* apresentaram um ajuste melhor das curvas, e assim sendo possível inferir conclusões mais precisas sobre as respostas da cultura da alface quando submetida a irrigação com água tratada magneticamente e em diferentes lâminas de irrigação.

A aplicação da lógica *fuzzy* pode ser uma técnica mais precisa em ajustar as curvas de respostas, pois os ajustes das curvas ficaram mais próximos dos dados observados que a regressão. Pode-se concluir que a aplicação do modelo *fuzzy* apresenta um alto potencial na avaliação de experimentação na Área de Ciências Agrárias, com ajustes muito mais precisos e com maior exatidão quando comparado os modelos de regressão polinomial.