Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Desenvolvimento de uma rede sem fio de micro estações meteorológicas para o
manejo de irrigação

Thiago Alberto Cabral da Cruz

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2018

Thiago Alberto Cabral da Cruz
Engenheiro Mecatrônico

**Desenvolvimento de uma rede sem fio de micro estações meteorológicas para o manejo
de irrigação**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientadora:

Profa. Dra. **PATRICIA ANGÉLICA ALVES MARQUES**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2018

RESUMO

Desenvolvimento de uma rede sem fio de micro estações meteorológicas para o manejo de irrigação

A irrigação é considerada uma das mais importantes tecnologias empregadas para aumentar a produtividade e permitir maior eficiência e estabilidade na produção agrícola. A sua adoção deve ser baseada na viabilidade técnica e econômica do projeto, obtida por meio da análise detalhada e cuidadosa dos fatores climáticos, agrônômicos e econômicos envolvidos. O manejo eficiente pode ser definido como o uso criterioso dos recursos disponíveis para se atingir um determinado objetivo. No caso da irrigação, o manejo eficiente objetiva maximizar a produção vegetal com o menor custo possível, tanto em quesitos ambientais quanto econômicos. Para tanto, necessita-se do desenvolvimento de um sistema tecnologicamente eficiente, de reduzido custo e de facilidade de instalação e manutenção. Assim, uma rede inteligente de estações meteorológicas, capaz de monitorar o ambiente em tempo real, de adaptar-se aos diversos estágios fenológicos da planta, aos diversos solos e culturas e de comunicar-se entre si e com um servidor torna-se necessário. Este projeto teve como objetivo o desenvolvimento e emprego de uma rede de estações meteorológicas sem fio, de baixo custo e de fácil manutenção e implantação, para a determinação da evapotranspiração de referência, e do conteúdo de água no solo para o eficiente manejo de irrigação. Para que tal rede de sensores seja implantada, há a necessidade de que os módulos eletrônicos possuam microcontroladores de baixo consumo energético, uma vez que eles serão alimentados por baterias e painéis solares, e com capacidade para executar os algoritmos de inferência das variáveis de medida, de calibração e correção de tais medidas, de comunicação com os demais elementos da rede e de executar o controlador de irrigação, baseado em Redes Neurais Artificiais. A abordagem da inteligência artificial utilizada possui a capacidade de aprender e estimar parâmetros a partir de sua base de treinamento e das condições que a cercam. Além das capacidades do microcontrolador, o módulo dos sensores deverá possuir elementos para aferir a temperatura e a umidade do ambiente, a radiação solar, a temperatura e o conteúdo de água no solo, além de um módulo de comunicação sem fio. O sistema desenvolvido foi testado nas estufas do INCT-EI/ESALQ/USP manejando a irrigação da cultura do pimentão vermelho *Capsicum annuum* L. cv. All Big, durante o período de 25/01/2018 a 31/07/2018. Após o treinamento da rede neural artificial, o sistema desenvolvido determinou a evapotranspiração de referência com um coeficiente de determinação de 0,968, com um erro médio absoluto de 0,055 mm e com um valor-P de $1,02 \cdot 10^{-45}$ para um intervalo de confiança de 95%. Sendo assim, verificou-se que a rede de estações meteorológicas desenvolvida é capaz de estimar a evapotranspiração de referência a partir de dados provenientes de sensores de reduzido custo financeiro e com dados meteorológicos faltantes.

Palavras-chave: Evapotranspiração; Redes neurais artificiais; Eficiência no uso da água; Rede de sensores sem fio

ABSTRACT

Development of a wireless network of micro weather stations for irrigation management

Irrigation is considered one of the most important technologies used to increase productivity and to allow greater efficiency and stability in agricultural production. Its adoption must be based on technical and economic feasibility of the project, obtained by means of a detailed and careful analysis of the climatic, agronomic and economic factors involved. Efficient management can be defined as the judicious use of available resources to achieve a given goal. In the case of irrigation, efficient management aims to maximize plant production at the lowest possible cost, both in environmental and economic aspects. This requires the development of a technologically efficient system, which is low cost and ease of installation and maintenance. Thus, an intelligent network of weather stations capable of monitoring the environment in real time, adapting to the plant's various phenological stages, diverse soils and cultures and communicating with each other and with a server becomes necessary. This project aimed at the development and use of the wireless station network which is low cost, easy maintenance, and deployment for the determination of reference evapotranspiration and soil water content for efficient irrigation management. In order for such a sensor network to be implemented, there is a need for such modules to have low energy microcontrollers, since they will be powered by batteries and solar panels, and capable of performing the inference algorithms of the measurement, calibration, and correction of such measures, of communication with the other elements of the network and of executing the irrigation controller, based on Artificial Neural Networks. The artificial intelligence approach used has the capacity to learn and estimate parameters based on its training base and the conditions surrounding it. In addition to the capabilities of the microcontroller, the sensor module must have elements to measure ambient temperature and humidity, brightness, temperature and soil water content, as well as a wireless communication module. The developed system was tested in the greenhouses of INCT-EI/ESALQ/USP managing the irrigation of the red bell pepper crop *Capsicum annuum* L. cv. All Big, during the days of 01/25/2018 to 31/07/2010. After the artificial neural network training, the developed system determined reference evapotranspiration with a determination coefficient of 0.968, with an absolute mean error of 0.055 mm and a P-value of $1.02 \cdot 10^{-45}$ for a confidence interval of 95%. Thus, it was verified that the developed weather-station network is able to estimate the reference evapotranspiration with low-cost sensors and with missing meteorological data.

Keywords: Evapotranspiration; Artificial neural networks; Water-use efficiency; Wireless sensor networks

1. INTRODUÇÃO

Como afirmado por Lovarelli et al. (2016), a irrigação é a atividade humana que possui uma das maiores pegadas sobre os recursos hídricos, tanto em aspectos locais quanto globais (Pfister & Bayer, 2014). Contudo, muitos autores alegam que a irrigação propicia ganhos produtivos e é uma importante tecnologia na busca da eficiência e estabilidade na produção agrícola (Katsoulas et al., 2006; Monaghan et al., 2013). Portanto, é essencial que o manejo da irrigação busque o aumento da produção e também a redução do uso da água, evitando perdas seja por deriva, percolação e etc.

O balanço hídrico é uma das técnicas de manejo de irrigação mais adequada para a tarefa. Ela, basicamente, se consiste em determinar a quantia de água transferida para a atmosfera e armazenada na cultura para após, repô-la. Consequentemente, equipamentos que consigam medir esta quantia de água fazem-se necessários. Usualmente, utilizam-se estações meteorológicas em conjunto com a equação de Penman-Monteith (PM) modificada (Monteith, 1945), como recomendado pela FAO (*Food and Agriculture Organization* das Nações Unidas) no *Irrigation and drainage paper 56* (Allen et al., 1998). A equação de Penman-Monteith calcula a evapotranspiração de referência (ET_0) baseada na radiação líquida, no fluxo de calor do solo, na temperatura e umidade do ar, e na velocidade do vento a dois metros do solo. Para determinar a evapotranspiração da cultura, é necessário multiplicar ET_0 por um coeficiente de cultivo (K_c), que varia ao longo dos estágios fenológicos do cultivo.

Dois estorvos acompanham a técnica de balanço hídrico acima mencionada. O primeiro é a necessidade de pessoal especializado e bem treinado para calcular a ET_0 e determinar o K_c , julgando o estágio fenológico da cultura. O segundo é a necessidade de uma estação meteorológica próxima à área de cultivo, o que impõem ao produtor uma carga financeira comumente não suportada. Pois, segundo o trabalho de Alves et al. (2012) que cita o Censo Agropecuário de 2006 (Instituto Brasileiro de Agricultura e estatística - IBGE, 2009), apenas 8,05% das propriedades rurais brasileiras possuem renda bruta acima de 10 salários mínimos mensais e conseguiram gerar renda líquida positiva no ano de 2006.

Para se evitar tais empecilhos, o manejo de irrigação deve ser fácil de executar e deve possuir um custo financeiro baixo. Pois assim, o uso eficiente de água poderá ser feito por um grande número de produtores e a mitigação da poluição do ambiente e da água poderá ser alcançada.

Uma maneira viável de atingir estes requerimentos é a adoção de um sistema de manejo de irrigação que seja autônomo e inteligente. Tal sistema deve ser baseado em componentes de baixo custo e deve possuir a habilidade de identificar mudanças no ambiente e na cultura.

Pelo acima exposto, o objetivo deste projeto foi o desenvolvimento de uma rede de micro estações meteorológicas (MEM) que automaticamente calcula a evapotranspiração de referência, a partir de dados provenientes de sensores de baixo custo financeiro. Além dos sensores para medir a temperatura e a umidade relativa do ar e a radiação solar, as MEM possuem sensores de umidade e temperatura do solo assim como, um sensor para aferir a própria temperatura.

Como em sensores de baixo custo é a alta relação entre o ruído e o sinal de interesse, além da não linearidade da resposta do instrumento (Curto et al. 2018, Guo et al. 2018, Castell et al. 2017, Leal-Junior et al. 2018, Johnson et al. 2018), propôs-se para a estimativa da ET_0 um aproximador universal de funções (Hornik et al., 1989; Kosko, 1994) baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA) (Hecht-Nielsen, 1992). Por sua vez, a estimativa da evapotranspiração da cultura foi realizada através da fusão dos dados do sensor de umidade do solo com os sensores meteorológicos da micro estação meteorológica.

Inicialmente, para se verificar a capacidade da RNA em estimar a ET_0 a partir de dados ruidosos, uma simulação com os dados da estação meteorológica automática do LEB/ESALQ/USP de dezesseis anos foi realizada. Nesta simulação, os dados de radiação solar, temperatura e umidade do ar foram degradados através da aplicação de um fator de proporcionalidade - para representar a correlação do sinal do sensor com a variável meteorológica, de um fator de deslocamento - para mimetizar um possível erro na conversão analógico-digital e, de um erro aleatório variante no tempo - para simular o erro do sensor de baixo custo. A RNA não utilizou a velocidade do vento para calcular a ET_0 .

Verificada a habilidade da RNA em solucionar tal problemática, desenvolveu-se o hardware necessário para a confecção da rede de micro estações meteorológicas. Em seguida o sistema foi testado em casa agrícola do INCT-EI/ESALQ/USP no o manejo de irrigação do pimentão vermelho (*Capsicum annuum* L. cv. All Big), no período de 25/01/2018 a 31/07/2018. Comparando a lâmina de irrigação aplicada pelas MEM com a lâmina de irrigação calculada com os dados meteorológicos de uma estação da Campbell Scientific que se encontrava interna à casa de vegetação, verificou-se que é possível realizar o manejo eficiente de irrigação utilizando um sistema baseado em redes neurais artificiais e sensores de baixo custo.

2. CONCLUSÕES

- Sistemas Inteligentes, mais especificamente as Redes Neurais Artificiais e os Sistemas Adaptativos de Inferência Fuzzy, podem ser utilizados para estimar a evapotranspiração de referência, inclusive quando dados ruidosos são utilizados e ainda, quando nem todas as variáveis meteorológicas envolvidas no processo estão disponíveis.

- O sistema desenvolvido possui reduzido custo financeiro e, em conjunto com RNA, estima satisfatoriamente a evapotranspiração de referência, mesmo utilizando sensores de baixo custo.

- Há necessidade de se estabelecer um padrão construtivo para as MEM, mesmo que não exista a necessidade do posicionamento dos sensores a dois metros de altura, conforme recomendado pela FAO. Este fato emerge da necessidade de mitigar qualquer influência de animais ou da cultura nas estações que foram ou estão sendo treinadas. Contudo, o autor recomenda a disposição dos sensores como a FAO indica para que comparações dos dados possam ser realizadas por diversos pesquisadores em diversas localidades.

Como trabalho futuro imediato, o autor indica a estruturação física das MEM para que a avaliação do desempenho de estações cuja localização da aplicação seja diferente da localidade de treinamento. Indica-se também, a análise de estações cujo treinamento realizou-se através da cópia das matrizes de pesos sinápticos de estações previamente treinadas.

Outro trabalho a ser realizado é análise do algoritmo de determinação do fator de correção K_{corr} . Pois, neste projeto, sua admissão ou refutação não foi possível pelos quesitos de segurança imposto ao sistema quanto à lâmina de irrigação, que não poderia variar, para mais ou para menos, em 10%. Uma vez que, o algoritmo foi escrito para que os cálculos de K_{corr} mantivessem a umidade em um valor predeterminado.

REFERÊNCIAS

- Abtew W (1996) Evapotranspiration measurements and modelling for three wetland systems in south Florida 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, 32(3), 465-473
- Allen RG (1993) Evaluation of a temperature difference method for computing grass reference evapotranspiration. Report to Water Resources Development and Management Service Land and Water Development Division, **FAO**, Rome, Italy
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao**, Rome, 300(9), D05109
- Almeida OA (2010) Qualidade da água de irrigação. Cruz das Almas: **Embrapa Mandioca e Fruticultura**, 2010
- Aloni B, Peet M, Pharr M, Karni L (2001) The effect of high temperature and high atmospheric CO₂ on carbohydrate changes in bell pepper (*Capsicum annuum*) pollen in relation to its germination. **Physiologia Plantarum**, 112(4), 505-512
- Alves EDA, Souza GDS, Rocha DDP (2012) Lucratividade da agricultura. **Área de Informação da Sede-Artigo em periódico indexado (ALICE)**
- Araújo EN, Oliveira AP, Cavalcante LF, Pereira WE, Brito NM, Cynthia MDL, Silva ÉÉ (2007) Produção do pimentão adubado com esterco bovino e biofertilizante. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, 11(5), 466-470
- Asklany SA, Elhelow K, Youssef IK, El-Wahab MA (2011) Rainfall events prediction using rule-based fuzzy inference system. **Atmospheric Research**, 101(1-2), 228-236
- Bakshi UA, Godse AP (2009) Electronic Circuits-II. **Technical Publications**
- Barreto Filho A, Neto JD, de Matos JA, Gomes EM (2000) Desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão, instalado a nível de campo Field performance of a microsprinkler system. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, 4(3), 309-314
- Baturone I, Moreno-Velo FJ, Sánchez-Solano S, Ollero A (2004) Automatic design of fuzzy controllers for car-like autonomous robots. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, 12(4), 447-465
- Bell JP, Wellings SR, Hodnett MG, Koon PA (1990) Soil water status: a concept for characterising soil water conditions beneath a drip irrigated row crop. **Agricultural Water Management**, 17(1-3), 171-187
- Binfet J, Wilamowski BM (2001) Microprocessor implementation of fuzzy systems and neural networks. In **Neural Networks**, 2001. Proceedings. IJCNN'01. International Joint Conference on (Vol. 1, pp. 234-239). IEEE
- Bingül Z, Karahan O (2011) A Fuzzy Logic Controller tuned with PSO for 2 DOF robot trajectory control. **Expert Systems with Applications**, 38(1), 1017-1031
- Blaney HF, Criddle WD (1950) Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data. Soil Conservation Service Technical Paper 96. **Soil Conservation Service, US Dept. of Agriculture**, Washington, DC
- Box GEP (1954) The exploration and exploitation of response surfaces: some general considerations and examples. **Biometrics**, 1954, 10.1: 16-60
- Box GEP (1999) Statistics as a catalyst to learning by scientific method part II—A discussion. **Journal of Quality Technology**, 31(1), 16-29
- Box GEP, Wilson KB (1951) On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, 1951, 13.1: 1-45

- Box GEP, Youle PV (1955) The exploration and exploitation of response surfaces: an example of the link between the fitted surface and the basic mechanism of the system. **Biometrics**, 11(3), 287-323
- Brandão Filho JUT, Callegari O (1999) Cultivo de hortaliças de frutos em solo em ambiente protegido. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, 20(200/201), 64-68
- Cabello FP (1990) Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goleo, microaspersion, exudacion. **Mundi-Prensa**
- Carrijo OA, de SOUZA RB, Marouelli WA, de Andrade RJ (2004) Fertirrigação de hortaliças. **Embrapa Hortaliças-Circular Técnica (INFOTECA-E)**
- Carvalho JA, Rezende FC, Oliveira EC, Aquino R (2016) Pimentão cultivado em ambiente protegido sob diferentes tensões de água no solo. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 23, n. 3, p. 236-245
- Castell N, Dauge FR, Schneider P, Vogt M, Lerner U, Fishbain B, Bartonova A (2017) Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? **Environment international**, 99, 293-302
- Chaudhry N, Moyne J, Rundensteiner EA (1999) An extended database design methodology for uncertain data management. **Information sciences**, 121(1-2), 83-112
- Christiansen JE (1942) Irrigation by sprinkling. **California agricultural experimental station bulletin 670**. University of California, Berkeley, California
- Cole RH (1977) Time domain reflectometry. **Annual review of physical chemistry**, 28(1), 283-300
- Cunha A, Koubaa A, Severino R, Alves M (2007) Open-ZB: an open-source implementation of the IEEE 802.15.4/ZigBee protocol stack on TinyOS
- Curtis HL, Defandorf FM (1929) Dielectric constant and dielectric strength of elementary substances, pure inorganic compounds, and air., **International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry, and Technology**, 6, 73-107
- Curto A, Donaire-Gonzalez D, Barrera-Gómez J, Marshall JD, Nieuwenhuijsen MJ, Wellenius GA, Tonne C (2018) Performance of low-cost monitors to assess household air pollution **Environmental research** 163, 53-63.
- Dabbous BJ (1962) A study of sprinkler uniformity evaluation methods. **MS Thesis, Ag & Irrig Eng Dept, Utah State University**, Logan, UT
- Dalton FN, Herkelrath WN, Rawlins DS, Rhoades JD (1984) Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. **Science** 224, 898-990
- Dasgupta D, Michalewicz Z (2013) Evolutionary algorithms in engineering applications. **Springer Science & Business Media**
- Davis JL, Chudobiak WJ (1975) In situ meter for measuring relative permittivity of soils. **Geol. Surv. Can. Pap**, 75(1), 75-79
- Delfine S, Loreto F, Alvino A (2001) Drought-stress effects on physiology, growth and biomass production of rainfed and irrigated bell pepper plants in the Mediterranean region. **Journal of the American Society for Horticultural Science**. 126:297-304
- d'Inverno M, Luck M (2004) Understanding agent systems. **Springer Science & Business Media**
- Doorenbos J, Kassam AH (1994) Efeito da água no rendimento das culturas. **Volume 33 de Estudos FAO: Irrigação e Drenagem**. 306p
- Doorenbos J, Pruitt WO (1977) Crop water requirements: FAO Irrigation and Drainage Paper 24. **United Nations—Food and Agriculture Organization**, Rome, Italy, 34

- Droogers P, Allen RG (2002) Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. **Irrigation and drainage systems**, 16(1), 33-45
- Echer MM, Fernandes MCA, Ribeiro RLD, Peracchi AL (2002) Evaluation of Capsicum genotypes for resistance to the broad mite. **Horticultura Brasileira**. 20(2):217-221
- Emamgholizadeh S, Moslemi K, Karami G (2014) Prediction the groundwater level of bastam plain (Iran) by artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). **Water resources management**, 28(15), 5433-5446
- Erickson AN, Markhart AH (2001) Flower production, fruit set, and physiology of bell pepper during elevated temperature and vapor pressure deficit. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, 126(6), 697-702
- Erickson AN, Markhart AH (2002) Flower developmental stage and organ sensitivity of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) to elevated temperature. **Plant, Cell & Environment**, 25(1), 123-130
- Erlingsson S, Baltzer S, Baena J, Bjarnason G (2009) Measurement techniques for water flow. In **Water in road structures** (pp. 45-67). Springer, Dordrecht
- Evelt SR (2003) Soil water measurement by time domain reflectometry. **Encyclopedia of water science**, 894-898
- FAOSTAT (2013). Food and Agriculture Organization of the United Nations, **Statistical Database**, Rome, Italy
- Fatnassi H, Poncet C, Bazzano MM, Brun R, Bertin N (2015) A numerical simulation of the photovoltaic greenhouse microclimate. **Solar Energy**, 120, 575-584
- Fellner-Feldegg H (1969) Measurement of dielectrics in the time domain. **The Journal of Physical Chemistry**, 73(3), 616-623
- Filgueira FAR (1982) Manual de olericultura: cultura e comercialização de hortaliças. 2.ed. São Paulo: **Agronômica Ceres**, 1982. v.2, 587p
- Filgueira FAR (2003) Solanáceas: agrotecnologia moderna na produção de tomate, batata, pimentão, pimenta, beringela e jiló. **UFLA**. 333p
- Folch JG, Fàbrega JG (1999) El volumen húmedo del suelo en el riego localizado. Importancia y evaluación. **Departamento de Arboricultura Mediterránea. Centro de Mas Bové-Constantí (Tarragona). Instituto de reserva y tecnología Agroalimentaria (IRTA)**
- Fontes PCR, Dias EN, Graça RN (2005) Acúmulo de nutrientes e método para estimar doses de nitrogênio e de potássio na fertirrigação do pimentão. **Horticultura Brasileira**, 23(2), 275-280
- Friedlander D, Atsmon D, Galun E, Iwahori S, Kitagawa H, Yakuwa T (2002) Influência do boro no desenvolvimento e na composição mineral do pimentão. **Hortic. bras**, 20(1)
- Fullér R (2013) Introduction to neuro-fuzzy systems. **Springer Science & Business Media**
- García-Ruiz RA, López-Martínez J, Blanco-Claraco JL, Pérez-Alonso J, Callejón-Ferre AJ (2018) On air temperature distribution and ISO 7726-defined heterogeneity inside a typical greenhouse in Almería. **Computers and Electronics in Agriculture**, 151, 264-275
- Gardner W, Kirkham D (1952) Determination of soil moisture by neutron scattering. **Soil Science**, 73(5), 391-402
- Gilmour SG (2006) Response surface designs for experiments in bioprocessing. **Biometrics**, 62(2), 323-331
- Goldberg DE, Holland JH (1988) Genetic algorithms and machine learning. **Machine learning**, 3(2), 95-99.
- Goto R, Rossi F (1997). Cultivo de pimentão em estufa - Manual. **Viçosa: CPT**
- Goto R, Tivelli SW (1998) Produção de hortaliças em ambiente protegido: condições subtropicais. São Paulo: **UNESP**, v. 600

- Gunawardena N, Pardyjak ER, Stoll R, Khadka A (2018) Development and evaluation of an open-source, low-cost distributed sensor network for environmental monitoring applications. **Measurement Science and Technology**, 29(2), 024008
- Guo J, He B, Sha Q (2018) Shallow-sea application of an intelligent fusion module for low-cost sensors in AUV **Ocean Engineering**, 148, 386-400
- Hahn F (2011) Fuzzy controller decreases tomato cracking in greenhouses. **Computers and electronics in agriculture**, 77(1), 21-27
- Hargreaves GH, Samani ZA (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. **Appl. Eng. Agric.** 1 (2), 96–99
- Hart WE (1961) Overhead irrigation pattern parameters. **Agricultural Engineering**, 42(7), 354-355
- Hasim MA (2009). Water, Agriculture and Environment in Arid Lands–Water and Agriculture Vision for Qatar by 2020. **Friends of Environment Centre (FEC)**, Doha, Qatar
- Hasted JB (1973) Aqueous dielectrics. **Chapman and Hall, London**
- Hecht-Nielsen R (1992) Theory of the backpropagation neural network. In **Neural networks for perception** (pp. 65-93)
- Henz GP, Costa CSR, Carvalho S, Banci CA (2007) Como cultivar pimentão: alta produtividade. **Cultivar hortaliças e frutas**, Pelotas-RS, v. 7, n. 1, p. 1-6
- Hoekstra P, Delaney A (1974) Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. **Journal of geophysical research**, 79(11), 1699-1708
- Holmblad LP, Østergaard JJ (1993) Control of a cement kiln by fuzzy logic. In **Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems** (pp. 337-347)
- Hornik K, Stinchcombe M, White H (1989) Multilayer feedforward networks are universal approximators. **Neural networks**, 2(5), 359-366
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2009) Censo agropecuário – 2006 **IBGE** Rio de Janeiro
- Irmak S, Irmak A, Allen RG, Jones JW (2003) Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. **Journal of irrigation and drainage engineering**, 129(5), 336-347
- Jacobsen OH, Schjønning P (1993) A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. **Journal of Hydrology**, 151(2-4), 147-157
- Jang JSR (1993) ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. **IEEE transactions on systems, man, and cybernetics**, 23(3), 665-685
- Jang JSR, Sun CT, Mizutani E (1997) Neuro-fuzzy and soft computing; a computational approach to learning and machine intelligence. **Prentice Hall, Upper Saddle River, n. NJ**
- Jensen DT, Hargreaves GH, Temesgen B, Allen RG (1997) Computation of ETo under nonideal conditions. **J. Irrig. Drain. Eng.** 123 (5), 394–400
- Jensen ME, Burman RD, Allen RG (1990) Evapotranspiration and irrigation water requirements. **The Committee on Irrigation Water Requirement of the Irrigation and Drainage Division of the American Society of Civil Engineers, New York**
- Jensen ME, Haise HR (1963) Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division**, 89, 15-41
- Jia X, Dukes MD, Jacobs JM (2009) Bahiagrass crop coefficients from eddy correlation measurements in central Florida **Irrigation Science**, 28(1), 5-15.

- John R, Coupland S (2007) Type-2 fuzzy logic: A historical view. **IEEE computational intelligence magazine**, 2(1), 57-62
- Jones JW, Ritchie JT (1990) Crop growth models. Management of farm irrigation systems. In: **Hoffman, G.J., Howel, T.A., Solomon, K.H. (Eds.)**, ASAE Monograph No. 9. ASAE, St. Joseph, Mich., pp. 63–89
- Jones M (1995) Impedance matching. In *A Practical Introduction to Electronic Circuits* (pp. 76-122). **Cambridge: Cambridge University Press**. doi:10.1017/CBO9781139172837.008
- Johnson NE, Bonczak B, Kontokosta CE (2018) Using a gradient boosting model to improve the performance of low-cost aerosol monitors in a dense, heterogeneous urban environment **Atmospheric Environment**, 184, 9-16.
- Katsoulas N, Kittas C, Dimokas G, Lykas C (2006) Effect of irrigation frequency on rose flower production and quality. **Biosystems engineering**, 93(2), 237-244
- Kennedy J (2006). Swarm intelligence. In **Handbook of nature-inspired and innovative computing** (pp. 187-219). Springer, Boston, MA.
- King RE (1992) Expert supervision and control of a large-scale plant. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 5(2), 167-176
- Kişî Ö (2006) Generalized regression neural networks for evapotranspiration modelling. **Hydrological Sciences Journal**, 51(6), 1092-1105
- Klir G, Yuan B (1995) Fuzzy sets and fuzzy logic (**Vol. 4**). **New Jersey: Prentice hall**
- Kosko B (1994) Fuzzy systems as universal approximators. **IEEE transactions on computers**, 43(11), 1329-1333
- Koubaa A, Cunha A, Alves M (2007) A time division beacon scheduling mechanism for IEEE 802.15. 4/ZigBee cluster-tree wireless sensor networks. In **Real-Time Systems**, 2007. ECRTS'07. 19th Euromicro Conference on (pp. 125-135). IEEE
- Kumar M, Raghuwanshi NS, Singh R, Wallender WW, Pruitt WO (2002) Estimating evapotranspiration using artificial neural network. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 128(4), 224-233
- Kumar R, Jat MK, Shankar V (2012) Methods to estimate irrigated reference crop evapotranspiration—a review. **Water Science and Technology**, 66(3), 525-535
- Landeras G, Ortiz-Barredo A, López JJ (2008) Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). **Agricultural water management**, 95(5), 553-565
- Leal-Junior AG, Vargas-Valencia L, dos Santos WM, Schneider FB, Siqueira AA, Pontes MJ, Frizzera A (2018) POF-IMU sensor system: A fusion between inertial measurement units and POF sensors for low-cost and highly reliable systems. **Optical Fiber Technology**, 43, 82-89
- Lee MJ, Zheng J, Ko YB, Shrestha DM (2006) Emerging standards for wireless mesh technology. *IEEE Wireless Communications*, 13(2), 56-63
- Li A, Huang L, Zhang T (2017) Field test and analysis of microclimate in naturally ventilated single-sloped greenhouses. **Energy and Buildings**, 138, 479-489
- Locascio SJ, Fiskell JGA, Graetz DA, Hauck RD (1985) Nitrogen accumulation by pepper as influenced by mulch and time of fertilizer application. **Journal of the American Society for Horticultural Science**
- Lovarelli D, Bacenetti J, Fiala M (2016) Water Footprint of crop productions: A review. **Science of the Total Environment**, 548, 236-251

- Lumbreras JF, Coelho M, Almeida JD, Cunha T, Oliveira JD (2013) Sistema brasileiro de classificação de solos. rev. e ampl. Brasília, DF: **Embrapa**
- Maia CE, Levien SLA (2010) Estimativa de dimensões de bulbo molhado em irrigação por gotejamento superficial aplicando modelo de superfície de resposta. **Ciência Rural**, 40(6), 1302-1308
- Maia CE, Levien SLA, de Medeiros JF, Neto JD (2010) Dimensões de bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial. **Revista Ciência Agronômica**, 41(1), 149-158
- Makkink GF (1957) Testing the Penman formula by means of lysimeters. **Journal of the Institution of Water Engineers**, 11, 277-288
- Malicki MA, Plagge R, Roth CH (1996) Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. **European Journal of Soil Science**, 47(3), 357-366
- Mamdani EH (1974) Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. In **Proceedings of the institution of electrical engineers** (Vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588). IET
- Mamdani EH (1977) Applications of fuzzy set theory to control systems: a survey. **Fuzzy automata and decision processes**, 77-88
- Marouelli WA, Silva WLC (2012). Irrigação na cultura do pimentão. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Circular Técnica** 101:20
- McGuinness JL, Bordne EF (1972) A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values (No. 1452). **US Dept. of Agriculture**
- Mello SC, Pereira HS, Vitti GC (2000) Efeito de fertilizantes orgânicos na nutrição e produção do pimentão. **Horticultura Brasileira**, 18(3), 200-203
- Michalewicz Z (1999) Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. **Springer-Verlag**, 3rd edition, Berlin, Germany
- Miller CH, McCollum RE, Claimon S (1979) Relationships between growth of bell peppers (*Capsicum annuum* L.) and nutrient accumulation during ontogeny in field environments. **Journal American Society for Horticultural Science**
- Minns AW, Hall MJ (1996) Artificial neural networks as rainfall–runoff models. **Hydrol. Sci. J.**, 41(3), 399–416
- Minsky ML, Papert SA (1969) Perceptrons: an introduction to computational geometry **MA: MIT Press**, Cambridge
- Monaghan JM, Daccache A, Vickers LH, Hess TM, Weatherhead EK, Grove IG, Knox JW (2013) More ‘crop per drop’: constraints and opportunities for precision irrigation in European agriculture. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 93(5), 977-980
- Monteith JL (1964) Evaporation and environment. **Symposia of the society for experimental biology** Vol. 19, pp. 205-234
- Monteith JL (1977) Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Phil. Trans. R. Soc. Lond. B**, 281(980), 277-294
- More JJ (1978) The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory. In **Numerical analysis** (pp. 105-116). Springer, Berlin, Heidelberg
- Muñoz-Carpena R, Shukla S, Morgan K (2004) Field devices for monitoring soil water content (**Vol. 343, pp. 1-24**). **University of Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, EDIS**
- Naderloo L, Alimardani R, Omid M, Sarmadian F, Javadikia P, Torabi MY, Alimardani F (2012) Application of ANFIS to predict crop yield based on different energy inputs. **Measurement**, 45(6), 1406-1413.

- Noborio K (2001) Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and electronics in agriculture**, 31(3), 213-237
- Noborio K, McInnes KJ, Heilman JL (1994). Field measurements of soil electrical conductivity and water content by time-domain reflectometry. **Comput. Electron. Agri.** 11, 131–142
- Oshima H, Yasunobu S, Sekino SI (1988) Automatic train operation system based on predictive fuzzy control. In **Artificial Intelligence for Industrial Applications, 1988. IEEE AI'88.**, Proceedings of the International Workshop on (pp. 485-489). IEEE
- Pagamas P, Nawata E (2008) Sensitive stages of fruit and seed development of chili pepper (*Capsicum annuum* L. var. Shishito) exposed to high-temperature stress. **Scientia horticulturae**, 117(1), 21-25
- Park C, Rappaport TS (2007) Short-range wireless communications for next-generation networks: UWB, 60 GHz millimeter-wave WPAN, and ZigBee. **IEEE Wireless Communications**, 14(4)
- Pedrycz W, Gomide F (2007) Fuzzy systems engineering: toward human-centric computing. John Wiley & Sons, 2007
- Pereira HS, Mello SC (2002) Aplicações de fertilizantes foliares na nutrição e na produção do pimentão e do tomateiro. **Horticultura Brasileira**, 20(4), 597-600
- Peres JG, Pereira AR, Frizzzone JA, Villa Nova NA (1996) Determinação da resistência do dossel da grama para as condições de evapotranspiração potencial **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, 4(1), 55-60
- Pfister S, Bayer P (2014) Monthly water stress: spatially and temporally explicit consumptive water footprint of global crop production. **Journal of Cleaner Production**, 73, 52-62
- Priestley CHB, Taylor RJ (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly weather review**, 100(2), 81-92
- Reginato RJ, Van Bavel CHM (1964) Soil Water Measurement with Gamma Attenuation 1. **Soil Science Society of America Journal**, 28(6), 721-724
- Rincón L, Saez J, Balsalobre E, Pellicer MC (1993) Nutrición del pimiento grueso de invernadero. **Hortofruticultura**, 5, 37-41
- Robinson DA, Jones SB, Wraith JM., Or D, Friedman SP (2003) A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. **Vadose Zone Journal**, 2(4), 444-475
- Rosenblatt F (1958) The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. **Psychological Review**, 65(6), 386-408. <http://dx.doi.org/10.1037/h0042519>
- Rosenblatt F (1961). Principles of neurodynamics. perceptrons and the theory of brain mechanisms (No. VG-1196-G-8). **CORNELL AERONAUTICAL LAB INC BUFFALO NY**
- Ross TJ (2009) Fuzzy logic with engineering applications. **John Wiley & Sons**
- Roth K, Schulin R, Flühler H, Attinger W (1990) Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. **Water Resources Research**, 26(10), 2267-2273
- Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ (1986) Learning representations by back-propagating errors **Nature**, 323(6088), 533.
- Rumelhart DE, McClelland JL (1986) Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition. volume 1. Foundations **Computational Models of Cognition and Perception, Cambridge: MIT Press**, 1987

- Sabri N, Aljunid SA, Ahmad RB, Malek MF, Yahya A, Kamaruddin R, Salim MS (2012) Smart prolong fuzzy wireless sensor-actor network for agricultural application. *Journal of Information Science and Engineering*, 28(2), 295-316
- Sato LM, Peres JG, Souza CF (2012) Avaliação de modelos matemáticos para dimensionamento do bulbo molhado na irrigação por gotejamento. **IRRIGA**, 18(1), 99
- Schmugge TJ, Jackson TJ, McKim HL (1980) Survey of methods for soil moisture determination. **Water Resources Research**, 16(6), 961-979
- Schwartzman M, Zur B (1986) Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 112(3), 242-253
- Sediyama MAN, Vidigal SM, Santos MR, Salgado LT (2009) Rendimento de pimentão em função da adubação orgânica e mineral. **Horticultura Brasileira**, 27(3), 294-299
- Sharma K, Dhir N (2014) A study of wireless networks: WLANs, WPANs, WMANs, and WWANs with comparison. **International Journal of Computer Science and Information Technologies**, 5(6), 7810-7813
- Siarry P, Guey F (1998) A genetic algorithm for optimizing Takagi-Sugeno fuzzy rule bases. **Fuzzy sets and systems**, 99(1), 37-47
- Siler W, Buckley JJ (2005) Fuzzy expert systems and fuzzy reasoning. John Wiley & Sons
- Silva EM, Lima JEFW, de Azevedo JA, Rodrigues LN (2004) Proposição de um modelo matemático para a avaliação do desempenho de sistemas de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 39(8), 741-748
- Silva ID, Spatti DH, Flauzino RA (2010) Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas. **São Paulo: Artliber**, 23(5), 33-111
- Simunek J, Sejna M, Van Genuchten MT (1996) HYDRUS-2D: Simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. **International Groundwater Modeling Center**, Colorado School of Mines, Golden, Colorado
- Solomon KH (1984) Yield related interpretations of irrigation uniformity and efficiency measures. **Irrigation Science**, 5(3), 161-172
- Somani NA, Patel Y (2012) Zigbee: A low power wireless technology for industrial applications. **International Journal of Control Theory and Computer Modelling (IJCTCM)** Vol, 2, 27-33
- Soto-Zarazua GM, Romero-Archuleta BA, Mercado-Luna A, Toledano-Ayala M, Rico-Garcia E, Peniche-Vera RR, Herrera-Ruiz G (2011) Trends in automated systems development for greenhouse horticulture. **International Journal of Agricultural Research**, 6(1), 1-9.
- Souza AP, Pereira JBA, Silva LDBD, Guerra JGM, Carvalho DFD (2011) Evapotranspiração, coeficientes de cultivo e eficiência do uso da água da cultura do pimentão em diferentes sistemas de cultivo. **Acta Scientiarum Agronomy**, 33(1)
- Su SL, Singh DN, Baghinic MS (2014). A critical review of soil moisture measurement. **Measurement**, 54, 92-105.
- Tabari H, Kisi O, Ezani A, Talaei PH (2012) SVM, ANFIS, regression and climate based models for reference evapotranspiration modeling using limited climatic data in a semi-arid highland environment. **Journal of Hydrology**, 444, 78-89
- Takagi T, Sugeno M (1985) Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. **Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on**, (1), 116-132
- Topp GC, Davis JL, Annan AP (1980) Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water resources research**, 16(3), 574-582

- Touati F, Al-Hitmi M., Benhmed K., Tabish R (2013) A fuzzy logic based irrigation system enhanced with wireless data logging applied to the state of Qatar. **Computers and electronics in agriculture**, 98, 233-241
- Trajkovic S (2005) Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration. **Journal of irrigation and drainage engineering**, 131(4), 316-323.
- Trani PE (2014) Calagem e adubação para hortaliças sob cultivo protegido. Campinas: **IAC–Instituto Agrônômico de Campinas, Centro Horticultura**
- Trani PE, Tiveli SW, Carrijo AO (2011) Fertirrigação em hortaliças. ver. Atual. Campinas: **Instituto Agrônômico, 2011. 51 p. Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC, 196**
- Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, 38(1), 55-94
- Turc L (1961) Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. **Ann. Agron.**, 12, 13-49
- Vapnik V (1995) The Nature of Statistical Learning Theory. **Springer Verlag**, New York, USA
- Waharte S, Boutaba R, Iraqi Y, Ishibashi B (2006) Routing protocols in wireless mesh networks: challenges and design considerations. **Multimedia tools and Applications**, 29(3), 285-303
- Whalley WR (1993) Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. **Journal of Soil Science**, 44(1), 1-9
- Wien HC (1997) Peppers. In **Wien, H.C. (ed.). The physiology of vegetable crops. CAB International**, Ithaca, NY, pp 259–293
- Wilcox JC, Swailes GE (1947) Analysis of surface irrigation application efficiency. **Sci Agric**, 27, 565-583
- Yang Y, Wu J, Zheng W (2012) Adaptive fuzzy sliding mode control for robotic airship with model uncertainty and external disturbance. **Journal of Systems Engineering and Electronics**, 23(2), 250-255
- Zadeh LA (1992) Fuzzy logic, neural networks, and soft computing. In **Proceedings of the 2nd International Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks**, Iizuka, Japan, pp. 13-14
- Zanetti SS, Sousa EF, Oliveira VP, Almeida FT, Bernardo S (2007) Estimating evapotranspiration using artificial neural network and minimum climatological data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 133(2), 83-89