

Algoritmos evolutivos no projeto de irrigação de lavouras de arroz

Ana Paula Lüdtke Ferreira¹, Alex Silva da Rocha¹, José Pedro Pereira Trindade²

¹ Universidade Federal do Pampa, Bagé, Rio Grande do Sul, Brasil,
anaferreira@unipampa.edu.br, rocha.a.s@hotmail.com

² EMBRAPA Pecuária Sul, Bagé, Rio Grande do Sul, Brasil
jose.pereira-trindade@embrapa.br

RESUMO

A cultura do arroz é peça chave no agronegócio brasileiro, sendo o Rio Grande do Sul, que emprega o sistema de cultivo irrigado, o maior produtor nacional. O método de irrigação por inundação demanda água e energia, recursos que devem ser minimizados para maior efetividade tanto em termos ambientais como econômicos. Este trabalho propõe um modelo de otimização para apoio ao projeto de sistemas de irrigação por inundação em lavouras de arroz, buscando encontrar os valores, dentre o conjunto das variáveis envolvidas no problema, que maximizem a eficiência do sistema. O modelo faz uso de algoritmos genéticos para encontrar soluções que diminuam os custos de implantação e de irrigação da lavoura.

PALAVRAS-CHAVE: Inteligência Artificial, Algoritmos Genéticos, Irrigação.

ABSTRACT

Rice crop is considered a critical factor of success to Brazilian agribusiness, and Rio Grande do Sul, which employs the irrigated cultivation system, is the largest domestic producer. Irrigation demands large quantities of both water and energy, which are valuable resources in environmental as well as in economic aspects. This paper presents an optimization model to support irrigation system design for rice crop fields, aiming to find values for the variables related the problem in order to maximize system efficiency. The model makes use of genetic algorithms to find solutions that minimize both deployment and crop irrigation costs.

KEYWORDS: Artificial Intelligence, Genetic Algorithms, Irrigation.

INTRODUÇÃO

A orizicultura (cultura do arroz) tem destaque tanto pelo volume de produção como pelo tamanho da área de cultivo. Cerca de 150 milhões de hectares de arroz são cultivados anualmente no mundo gerando 590 milhões de toneladas, sendo que 75% é produto do cultivo

irrigado (EMBRAPA, 2005). Em 2006 a produção do cereal atendia cerca de 2,4 bilhões de pessoas, e estima-se que este número dobre até 2050. Dados do IBGE (2015) informam que hoje o Rio Grande do Sul (RS) responde por 68,5% da produção nacional de arroz, com 8.396.348 toneladas produzidas, numa área colhida de 1.122.046 hectares. O RS faz uso majoritário de cultivo irrigado e, por essa razão, a diminuição dos custos associados à produção de arroz é um problema local relevante.

A irrigação por inundação opera na criação de uma lâmina de água em compartimentos do campo, denominados tabuleiros ou quadros, limitados por taipas ou diques. Os quadros possuem formas e tamanhos variados, em acordo com as características topográficas locais (STONE; SILVEIRA; MOREIRA, 2015). A inundação do solo pode ser contínua ou intermitente, via precipitação, inundação por gravidade ou por meio de levantes hidráulicos, no caso do reservatório hídrico estar abaixo no nível da lavoura. Nesse último caso, existe gasto de energia para levar a água até seu destino e em todos os casos há necessidade de controlar o nível da água na área de plantio. O correto dimensionamento da estrutura da lavoura produz economia nos custos de implantação e de produção (CORRÊA, 2007; SORIANO et al., 2007) bem como diminuição dos impactos ambientais.

O projeto de uma lavoura de arroz envolve a tomada de decisões com relação a diversos aspectos, entre os quais se incluem: a topografia do terreno, a localização dos reservatórios de água, o posicionamento e diâmetro dos canais de irrigação e das taipas ao longo da lavoura, a quantidade e localização de bombas de recalque necessárias, os índices pluviométricos e de insolação da região, o tipo de solo e sua capacidade de reter a lâmina d'água, entre outros. As decisões tomadas produzem diferentes resultados de volume e custo de produção. A otimização do projeto permite aumentar o primeiro e diminuir o segundo. O número de soluções possíveis, contudo, é exponencial na quantidade de variáveis, o que inviabiliza o uso de um algoritmo que explore todo o conjunto de soluções (BLUM; ROLI, 2003). Formalmente, um problema de otimização pode ser definido como: dado um conjunto S de variáveis discretas (chamadas soluções) e uma função objetivo $f:S \rightarrow R$ que associa, a cada solução $s \in S$, um valor real $f(s)$, encontrar a solução $o \in S$ de forma que $f(o)$ é mínimo (ou máximo, dependendo do objetivo). Nesse caso, a solução o é chamada de *solução ótima* do problema. Grande parte dos problemas de otimização são caracterizados como *NP-difíceis*, para os quais não se conhece solução ou verificação algorítmica em tempo polinomial (TOSCANI; VELOSO, 2012), exigindo abordagens heurísticas para sua solução. Uma heurística não assegura a melhor solução possível, mas percorre o espaço das soluções

buscando avançar na qualidade da solução encontrada a um custo computacional significativamente menor (RUSSELL; NORVIG, 2004).

Algoritmos genéticos são inspirados na teoria da Seleção Natural de Darwin para a busca da solução de problemas de otimização (MITCHELL, 1996). As soluções possíveis do problema são modeladas por meio de *cromossomos*, compostos de *genes*, que carregam parte da solução. Uma *população* é um conjunto de cromossomos, e evolui por meio de operadores de *mutação* e *recombinação* de pares (*crossover*). Uma *função de aptidão* (*fitness*) é definida, de forma que cada indivíduo da população pode ter sua qualidade avaliada por meio dessa função: quanto maior o valor, maior a aptidão do indivíduo e, correspondentemente, melhor a qualidade da solução que ele representa e maior a chance desse cromossomo ser usado para recombinação ou passar diretamente à próxima geração. O algoritmo funciona por um ciclo *avaliação de indivíduos – crossover – mutação – nova avaliação*, até que uma solução considerada aceitável seja obtida ou que um limite de tempo transcorra. A solução do problema será dada pelo indivíduo da população com maior valor de *fitness*.

Técnicas de Inteligência Artificial têm sido usadas para resolver problemas de otimização em diversas áreas do conhecimento. Entre os trabalhos relacionados à Agricultura cita-se (MARCUIZZO, 2008; MARCUIZZO; WENDLAND, 2011) que visa otimizar a distribuição da carga hidráulica efetiva da unidade operacional de uma rede de irrigação, tendo como parâmetro o diâmetro de cada trecho da rede; (INESA et al., 2006) propõe um modelo de gerenciamento de recursos hídricos para irrigação considerando restrições de disponibilidade e heterogeneidade do sistema; (MANSOR et al, 2012) desenvolve um modelo geoespacial para alocação de recursos no uso da terra, otimizado aspectos de adaptabilidade ao ambiente e preservação ambiental; trabalho com o mesmo foco é apresentado em (WYATT; HOSSAIN, 2006); (NIXON; DANDY; SIMPSON, 2001) usam algoritmos genéticos para organizar o escalonamento da distribuição de água em um sistema de irrigação.

A inovação deste trabalho consiste na otimização do *projeto* de lavouras que, aparentemente, não foi especificamente trabalhado na literatura. Neste contexto, propõe-se uma estratégia focada no projeto do sistema de irrigação de forma a maximizar a eficiência da implantação e produção em lavouras de arroz por meio de algoritmos genéticos, visando: (i) a redução dos custos relacionados à implantação, como construção de diques e instalação de sistemas de recalque, (ii) a redução dos custos de operação com consumo de energia e manutenção do sistema e (iii) o apoio ao manejo da irrigação. A estratégia utilizada visa o aperfeiçoamento da topologia do canal de irrigação, buscando encontrar a configuração dos

componentes do sistema que melhor se aplicam aos diferenciais topográficos da área em que o sistema de irrigação será implantado.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho realizado é uma pesquisa exploratória aplicada, visando utilizar conceitos e técnicas da computação – nomeadamente, Algoritmos Genéticos – à área de produção agrícola, investigando a aplicabilidade dos resultados obtidos. A estratégia usada consiste nas seguintes fases: (i) delimitação do problema, (ii) especificação das variáveis relevantes, (iii) modelagem da solução do problema na técnica escolhida, (iv) testes e análise dos resultados.

A delimitação do problema baseou-se no levantamento das questões relacionadas ao projeto e implantação de lavouras de arroz e na criação de um modelo para este projeto, com escolha das variáveis do sistema. Simplificações foram necessárias para que o modelo não ficasse excessivamente complexo, mas ainda permitindo que conclusões sobre a viabilidade da técnica fossem obtidas. São elementos relevantes, neste trabalho: (i) a topografia do terreno, (ii) a localização da entrada de água assumida como sendo a cota mais alta de elevação do terreno e (iii) parâmetros agronômicos específicos da produção, como os períodos de formação e manutenção da lâmina d'água, profundidade a ser mantida durante o período de manutenção, período de funcionamento diário das moto-bombas, taxa de infiltração (percolação mais fluxo lateral), taxa de evapotranspiração, coeficiente de escoamento em canais e coeficiente de rendimento dos levantes, todos fornecidos ao modelo. A saída do algoritmo deve apresentar (i) o mapa da solução, com a localização dos canais de irrigação e divisão dos quadros da lavoura, (ii) um relatório de análise da solução e (iii) um relatório sobre a evolução das soluções, visando uma avaliação qualitativa da solução encontrada.

O mapa de solução constitui-se de células de diferentes cores, dependendo da cota de altitude, e os segmentos de canal representados por meio de linhas horizontais ou verticais. A existência de um levante em um seguimento de canal é representada por uma linha transversal ao mesmo. A Fig. 1 apresenta exemplos. Os relatórios descrevem as soluções em termos de conexões entre ponto de entrada de água, canais, quadros e levantes, dimensionamento da área de secção transversal dos canais e potência dissipada pelas bombas, estimativas de vazões e consumo energético.

A modelagem hídrica do processo de escoamento de água na lavoura fez uso do software PCRaster, que permite simulação e modelagem dinâmica de processos físicos, descrevendo a distribuição, fluxo e transporte de material no solo (CÂMARA; MONTEIRO, 2003; BARRETO-NETO; FILHO, 2003). A topografia do campo foi descrita por um modelo

matricial de elevação, em que cada ponto da matriz representa a altitude do terreno. A partir da matriz são definidas as cotas de altitude, determinadas pela aglutinação das células que pertencem ao mesmo intervalo de variação altimétrica. O terreno é modelado como um grafo, onde os vértices são pontos do campo e as arestas os locais onde os canais secundários podem estar localizados. A propagação da água entre os elementos do sistema considera a movimentação do canal secundário para um quadro de irrigação e de um quadro para outro, respeitando adjacências, cotas de altitude e distância percorrida. Assim garante-se que soluções onde canais se cruzam sem controle são eliminadas do espaço de soluções.

O cromossomo, que contém a estrutura da solução proposta, é constituído pela matriz de adjacência sistematizada do terreno, com os pontos que constituem limites do canal. Durante o processo de avaliação das soluções, o software insere os levantamentos quando necessário. A população inicial dos cromossomos é gerada de forma aleatória. O tamanho da população é parâmetro do algoritmo, sendo mantido constante no decorrer da execução. A técnica de *crossover* escolhida é a de um ponto, de forma que uma seção da matriz venha de um dos cromossomos selecionados e o restante do segundo. O operador de mutação promove a diversidade da população modificando de forma aleatória até dois genes do cromossomo, ampliando o espaço de busca e dificultando a convergência prematura do algoritmo genético. A única restrição imposta à alteração de um gene é a de que os vértices envolvidos sejam adjacentes. O método de *seleção* é o *torneio*, no qual o mais apto entre três indivíduos selecionados aleatoriamente é escolhido para compor a população intermediária. O processo é repetido até a população intermediária atingir 50% do tamanho da população total; então indivíduos aos pares são selecionados aleatoriamente para passarem por *crossover* e mutação, gerando novos cromossomos. A técnica de *substituição* selecionada é a *steady state*, onde os novos indivíduos substituem os menos aptos na população. Esta seleção também é feita por torneio, apenas contando com o diferencial da escolha do menos apto para ser substituído. O processo é repetido até que o número de gerações definido pelo usuário seja alcançado.

A *função de aptidão* reflete a importância relativa dos elementos do projeto de uma lavoura de arroz, quais sejam: o percentual de área irrigada no terreno, a quantidade de energia gasta, o custo dos levantamentos necessários e o comprimento dos canais. A ponderação de cada elemento é parâmetro da função. A avaliação dos indivíduos observa possíveis situações de incoerência presentes nos cromossomos (cruzamentos de segmentos e formação de ciclos ou não estar conectado à fonte de água, por exemplo), calcula a demanda hídrica à qual o canal secundário representado pelo cromossomo será submetido e, posteriormente, dimensiona o sistema de irrigação para que o mesmo possa atender à solicitação. O cálculo

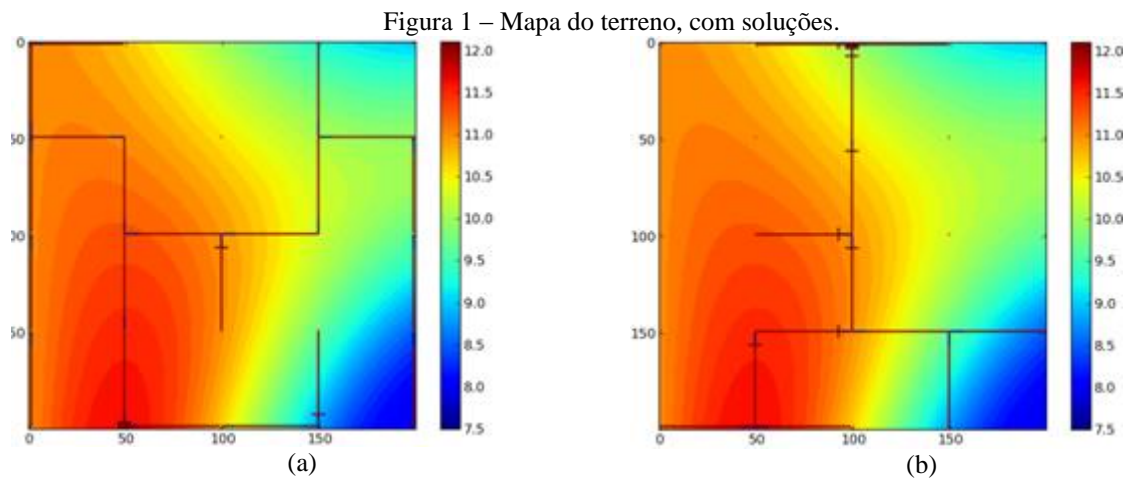
das notas das variáveis de saída é realizado por meio dos seguintes passos: (i) definição, pela análise do cromossomo, do conjunto de vértices que compõem o canal secundário, (ii) cálculo da demanda hídrica de cada vértice componente do canal, computada também a vazão acumulada de cada vértice em função das ligações existentes em cotas mais altas (iii) dimensionamento de cada segmento do canal de irrigação em função da demanda hídrica, analisando a necessidade de levantes hidráulicos, com as respectivas potências necessárias. O percentual de área irrigada é computado como a razão entre a área irrigada pelo canal definido no cromossomo e a área total; o consumo de energia é o produto entre a potência dissipada e o período total de funcionamento dos equipamentos; os custos fixos presentes na instalação e manutenção dos levantes, dependendo de seu número e potência; e os custos de construção dos canais, que são proporcionais ao comprimento total dos mesmos. Os resultados obtidos são normalizados para que unidades de medida com grandezas muito diversas não comprometam os resultados. As equações utilizadas são omitidas neste trabalho por razões de espaço, mas são definidas em acordo com a literatura (CORRÊA, 2007; TUCCI, 2007; ÇENGEL; Cimbala, 2007) e apresentadas na íntegra em (ROCHA, 2014).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os trabalhos diretamente relacionados ao tema desse artigo encontrados na literatura (MARCUIZZO, 2008; INESA et al., 2006; NIXON; DANDY; SIMPSON, 2001) visam otimizar a distribuição de água em uma lavoura já existente. A distinção de objetivos entre eles e a proposta deste trabalho impede a validação dos resultados por meio da estratégia de comparação com outros modelos já existentes. Outra estratégia de validação seria comparar os resultados apresentados pelo algoritmo com resultados atingidos por meio de experimentos reais, o que não é viável para uma pesquisa exploratória como esta. Sendo assim, os resultados serão apresentados em termos das diferentes topologias de canal geradas pelo algoritmo, indicando que as decisões tomadas durante o desenvolvimento constituem uma base consistente para que a continuidade deste trabalho possa trazer resultados significativos no auxílio ao projeto de sistemas de irrigação para lavouras de arroz. Na próxima seção discutiremos trabalhos futuros que podem levar a melhores estratégias de validação.

Os parâmetros derivados da topologia de canal que é saída do algoritmo – presentes na função de aptidão – são utilizados para análise dos resultados obtidos, ou seja, o percentual da área irrigada, o somatório das potências dos levantes, o total de levantes e o volume de fluido comportado pelo canal. Os parâmetros agrônômicos usados (ROCHA, 2014) e o mapa apresentado na Figura 1 formam as condições de contorno definidas para a realização dos

experimentos. Note que o mapa apresenta a matriz sistematizada, com as cotas altimétricas, mas omite os vértices não usados no canal de irrigação.



Fonte: (ROCHA, 2014)

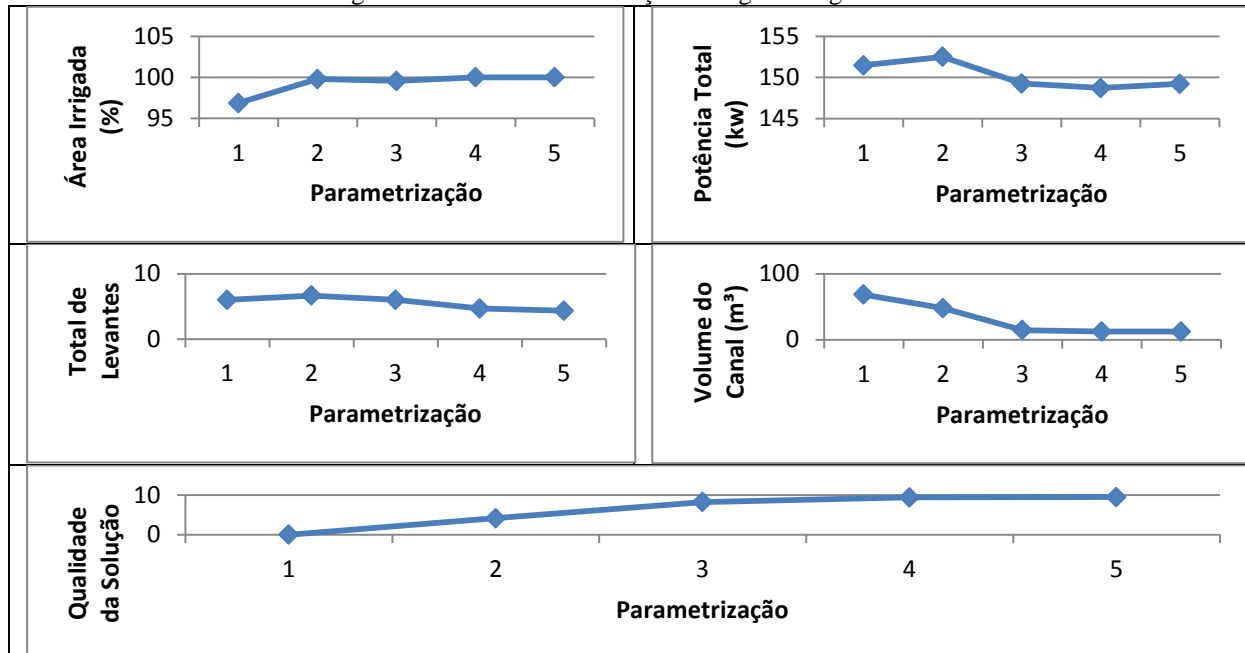
A parametrização do algoritmo genético consiste no tamanho da população, taxa de *crossover*, taxa de mutação, distância máxima de propagação da água a partir dos vértices do canal, ponto de entrada da água na lavoura, total de vértices estabelecidos para o canal e a distribuição de prioridades das variáveis de aptidão. O termo *parametrização* se refere ao conjunto de valores (ou configuração) estabelecido para as variáveis de entrada. Simulações diversas foram realizadas com diferentes parametrizações e uma análise de sensibilidade foi conduzida, possibilitando a criação de uma coleção de resultados que servem de base para a avaliação dos resultados. O número de iterações foi determinado de forma empírica, para refletir o número de gerações necessário para a convergência da solução. A descrição das simulações individuais com a análise de sensibilidade é discutida de forma completa em (ROCHA, 2014). Para fins de exemplificação, somente um resultado de acompanhamento de simulação será apresentado.

A Figura 2 apresenta o relatório de evolução dos resultados obtidos, considerando-se sempre o melhor indivíduo da população. Note-se que a cada nova geração a qualidade da solução melhora. No exemplo dado, o percentual da área irrigada aumenta enquanto os demais parâmetros, que representam custos, diminuem. O resultado, em termos da topologia do canal resultante, é apresentado na Figura 1, na qual o resultado em (a) corresponde a uma solução de melhor qualidade e o resultado em (b) a uma solução com uma qualidade um pouco menor.

A análise dos resultados obtidos mostrou que a técnica é viável para ser utilizada em projetos de sistemas de irrigação em lavouras em implantação. Em terrenos acidentados,

especialmente, o planejamento de canais de irrigação que diminuam o gasto com água e energia pode, a longo prazo, resultar em economia significativa nos custos de produção.

Figura 2 – Relatório de evolução do algoritmo genético.



Fonte: (ROCHA, 2014)

CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um algoritmo de otimização para projeto de sistemas de irrigação por inundação de lavouras de arroz baseado em algoritmos genéticos. O objetivo é encontrar a topologia da rede de canais internos da lavoura, responsável pela distribuição entre os quadros, que maximize o percentual de área irrigada e minimize os custos de implantação e de produção. A possibilidade de simular diferentes configurações de implantação dá flexibilidade ao sistema, permitindo a quantificação de recursos e a avaliação do impacto das decisões tomadas. Na avaliação das soluções, perdas por área não irrigada e custos relacionados à operação e implantação dos componentes do sistema são considerados. Nos sistemas de levante hidráulico, tanto gastos dependentes da potência (variáveis) quanto fixos (que independem do tamanho da moto-bomba) são ponderados pelo algoritmo. Os custos associados ao canal também estão presentes na equação de aptidão, o que é feito por meio de variáveis que refletem as dimensões deste componente. A descrição da solução encontrada é devolvida por meio de relatórios e mapas. O conteúdo destas saídas, além de possibilitar a visualização da implantação do sistema, permite a avaliação do manejo da irrigação, uma vez que o fluxo de água entre os componentes do sistema é detalhado.

A análise dos experimentos apontou que os resultados obtidos foram coincidentes com os esperados de um sistema de irrigação por inundação real. A comparação entre a demanda hídrica teórica e a calculada pelo algoritmo mostrou que os parâmetros usados estão superestimados e necessitam de ajuste. A inserção de recalques hidráulicos deve ser revista, transformando-se em mais uma variável de otimização do algoritmo genético e não em um procedimento da avaliação do algoritmo. A visualização dos quadros atingidos pelo sistema de irrigação também é uma melhoria prevista para o sistema. Essa informação consta dos relatórios em planilha, mas ainda carece de um modo interativo de análise, permitindo uma validação melhor dos resultados obtidos, com apoio dos usuários que possuem experiência na implantação de lavouras de arroz com sistema de irrigação por inundação.

REFERÊNCIAS

- BARRETO-NETO, A. A.; FILHO, C. R. S. Modelagem dinâmica de escoamento superficial.
- BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*. v. 35, n.3, p. 268–308, 2003.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (org.). Introdução à Modelagem Dinâmica Espacial. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2003, Belo Horizonte., São José dos Campos, INPE 2003.
- ÇENGEL, Y.A.; Cimbala, J.M. Mecânica dos Fluidos - Fundamentos e Aplicações. McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda, 2007. 819 p.
- CHAVES, M. Modelos Digitais e Elevação Hidrologicamente Consistentes para a Bacia Amazônica. 2002. 115f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2002.
- CORRÊA, H. C. Adequação da demanda hídrica e da potência instalada em sistemas de recalque para o arroz na depressão central do Rio Grande do Sul. 2007. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2007.
- EMBRAPA. Cultivo do arroz irrigado no Brasil. Sistemas de Produção, v.3. Versão Eletrônica. Novembro, 2005.
- IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola - pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. *Levant. Sistem. Prod. Agríc.* v.29 n.4 p.1-81. Rio de Janeiro, 2015.
- INESA, A. V. M.; HONDAB, K.; GUPTAC, A. D.; DROOGERSD, P.; CLEMENTE, R. S. Combining remote sensing-simulation modeling and genetic algorithm optimization to explore water management options in irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*. vol. 83, no. 3, p. 221–232, 2006.

LOUZADA, J. A. S. Simulação da irrigação por inundação e da drenagem nos solos de várzea do Rio Grande do Sul. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

MANSOR, S. B.; PORMANAFI, S.; MAHMUD A. R. B.; PIRASTEH S. Optimization of land use suitability for agriculture using integrated geospatial model and genetic algorithms. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. vol. I-2, 2012.

MARCUZZO, F. Sistema de otimização hidráulica e econômica de rede de irrigação localizada usando algoritmos genéticos. 2008. 361f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

MARCUZZO, F. F. N.; WENDLAND, E. Distribuição de pressão em rede de irrigação localizada otimizada por algoritmos genéticos. Engenharia Agrícola. vol.31, no.3, 2011.

MITCHELL, M. an introduction to genetic algorithms. MIT Press, 1996.

NIXON, J. B.; DANDY, G. C.; SIMPSON, A. R. A genetic algorithm for optimizing off-farm irrigation scheduling. Journal of Hydroinformatics. vol. 3, no. 1, p. 11-22, 2001.

ROCHA, A. S. Proposta de um modelo de otimização para o apoio ao projeto de sistemas de irrigação em lavouras de arroz. 2014. 121f. Monografia (Graduação em Engenharia de Computação) – Universidade Federal do Pampa. Bagé, 2014.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. Inteligência Artificial. Trad. da 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004. 1021p.

SORIANO, M. M.; BAUMHARDT, U. B. ;GUIMARÃES, J. C.; PATTA, J. C. A agricultura de informação e as estações de bombeamento para o cultivo do arroz irrigado por inundação. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2007, São Paulo. Anais eletrônicos... Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos . Disponível em <<http://www.abrh.org.br/sgcv3/index.php?PUB=3&ID=19>>. Acesso em 12 dez. 2013.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A. Métodos de irrigação. Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2015.

TOSCANI, L. V.; VELOSO, P. A. S. Complexidade de algoritmos. 3ª Ed. Bookman, 2012.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Editora da ABRH - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE RECURSOS HIDRICOS, 2007.

VIEIRA, A. S. Um modelo de simulação, via programação linear sequencial, para sistema de recursos hídricos. 2007. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2007.

WYATT, R.; HOSSAIN, H. Evolutionary computing for optimizing a region's distribution of agricultural production. Applied GIS. vol. 2, no. 3, p. 21.1-21.22, 2006.