

PLANEJAMENTO DE IRRIGAÇÃO EM PIVÔ CENTRAL POR MEIO DE MODELOS MATEMÁTICOS

MOREIRA, J.M.M.A.P.¹; RODRIGUES, L.N.²; ZANATA, J.A.³; TORRES, M. de O.⁴

Resumo – Em algumas regiões do país a oferta hídrica de uma bacia hidrográfica é insuficiente para atender as necessidades de irrigação, levando o produtor a tomar decisões mais frequentes sobre qual pivô irrigar, quanto irrigar e quando. A multiplicidade de variáveis envolvidas resulta em grande número de possibilidades de soluções, o que leva, muitas vezes, o produtor a tomar uma decisão menos adequada. Este trabalho objetivou desenvolver e aplicar modelos de manejo (MI) e de programação linear (PL) para o planejamento de irrigação em pivôs centrais. No PL a variável de decisão representa a área de cada cultura alocada em cada pivô na propriedade, o regime de irrigação utilizado e as semanas de plantio e colheita das culturas. O objetivo é a maximização do lucro e são consideradas as restrições inerentes ao processo produtivo na propriedade agrícola, como, por exemplo, a oferta hídrica. O MI foi utilizado para estimar a demanda de água durante o ciclo da cultura, que é utilizado na simulação do PL. O modelo acoplado foi aplicado para planejar a irrigação por pivô central na bacia do rio Buriti Vermelho. Os resultados indicaram várias possibilidades de solução, indicando a importância de modelos desse tipo no planejamento da irrigação.

Palavras-Chave – Tomada de decisão, Acoplamento de modelos, Programação linear.

OPTIMAL CENTER PIVOT IRRIGATION PLANNING THROUGH MATHEMATICAL MODELING

Abstract – In some regions of the country watershed water yield is insufficient to meet irrigation needs, leading farmers to have to make more frequent decisions about which center pivot to irrigate, how much water and when to apply it. The diversity of variables involved results in a large number of possible solutions, which often leads farms to make decisions inadequate. This study aimed to develop and apply both management (MI) and linear programming (LP) models for planning center pivots irrigation. In the PL the decision variable represents the area allocated to each crop in each pivot in the farm, irrigation water used and the weeks of planting and harvesting crops. The goal is to maximize profit. Restrictions to the production process in the farm, such as the water supply, are considered. The MI was used to estimate the water demand during the crop cycle, which is used in the simulation of the PL. The coupled model was applied to plan the center pivot irrigation in the Buriti Vermelho basin. The results showed a great amount of possible decisions, highlighting the importance of using models like the one presented here irrigation planning.

Keywords – Decision making, Model linkage, Linear programming.

INTRODUÇÃO

¹ Pesquisador Embrapa Florestas, jose-mauro.moreira@embrapa.br

² Pesquisador Embrapa Cerrados, lineu.rodrigues@embrapa.br

³ Dra. Embrapa Florestas, josileia.zanatta@embrapa.br

⁴ Professor Universidade de Brasília, mtorres@ucb.br

No Brasil, a área plantada sob irrigação corresponde a aproximadamente 5,9% da área total plantada no país, ocupando cerca de 5,4 milhões de hectares. O sistema de irrigação por aspersão é utilizado em 40% da área total irrigada no país, e em cerca de 70% das áreas irrigadas na região Centro-Oeste.

No Bioma Cerrado, é comum o compartilhamento de uma mesma estrutura física de captação e condução de água por vários pivôs centrais. Esse é o caso, por exemplo, verificado na bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho. Os pivôs centrais inseridos na área de drenagem dessa bacia captam água de um único local, que possui um volume de armazenamento definido, o qual não é suficiente para atender simultaneamente a demanda de todos os pivôs durante os períodos de elevada demanda hídrica. Tal fato leva o produtor a ter que tomar decisões frequentes sobre quando finalizar a irrigação em um pivô e iniciar a irrigação do próximo.

A multiplicidade de variáveis envolvidas no processo de decisão resulta em grande número de possibilidades de soluções, o que leva, muitas vezes, o produtor a tomar a decisão menos adequada. Tal decisão acaba por contribuir para reduzir a produtividade de uso da água da bacia e a eficiência da irrigação. Para contornar este problema, faz-se necessário elaborar e analisar diferentes estratégias de alocação de água entre os pivôs centrais, de forma a selecionar aquele que maximize o retorno econômico da lavoura dado um volume fixo de água disponível para irrigação e uma demanda de irrigação das culturas que deve ser atendida.

A dificuldade na tomada de decisão sobre a melhor estratégia a ser adotada decorre da complexa interação existente entre os fatores envolvidos (condições de clima, solo e planta), e o próprio sistema de irrigação. As variações temporais das condições climáticas e de solo dificultam a avaliação experimental dos efeitos individuais de cada um dos fatores envolvidos sobre o desempenho do sistema de irrigação. Assim, um dado sistema de irrigação pode atender com folga às necessidades hídricas da cultura em um ano e, no ano seguinte, não conseguir atender à demanda da mesma cultura. Outro aspecto importante é que nem sempre o sistema que propicia produtividade máxima da cultura coincide com o de melhor retorno econômico.

Tais situações oportunizam a aplicação de modelos multidisciplinares para a gestão da irrigação, envolvendo, principalmente economia, administração rural, agronomia e irrigação. A aplicação de modelos computacionais na definição da melhor estratégia de alocação de água constitui-se em uma valiosa ferramenta, ainda pouco utilizada, a qual possibilita ao tomador de decisão analisar o resultado de diversas estratégias e escolher a melhor opção para a sua condição. Ferramentas que auxiliem o produtor na tomada de decisão sobre a melhor forma de alocar a água entre os pivôs centrais, e até mesmo sobre a decisão de uso destes pivôs, são de fundamental importância para o manejo dos recursos hídricos em bacias hidrográficas. Estas ferramentas podem contribuir para aumentar a produtividade da água, que em um conceito amplo, significa obter um maior valor ou benefício de cada unidade de volume de água utilizado por unidade de área.

O uso de modelos matemáticos de otimização já foi realizado por vários autores com diversos propósitos, sendo o mais comum maximizar o retorno, seja econômico ou de produção, de uma quantidade limitada de recursos hídricos. *Frizzone et al (1994)* utilizaram a programação linear para maximizar o lucro do produtor sob uma oferta de água insuficiente para atender a demanda hídrica. Já *Frizzone et al (1997)* desenvolveram um modelo de programação linear para maximizar a receita líquida da propriedade, considerando um conjunto de fatores técnicos que influenciam a rentabilidade do projeto de irrigação. *Tavares et al (2011)* utilizaram um modelo matemático de programação linear para avaliar padrões ótimos de cultivo em uma propriedade rural, em condições de risco.

Sadeghi et al (1995) trataram o problema da alocação de diferentes usos do solo na microbacia de Brimvand, no Irã, por meio da programação linear multiobjetivo, visando minimizar a erosão do solo e maximizar o benefício líquido dos diferentes usos do solo na microbacia hidrográfica.

Todos os autores anteriormente mencionados enfatizaram a importância da programação matemática como método de auxílio no processo de tomada de decisão, tanto na escala da propriedade como na escala da Bacia. Com base no exposto, fica evidente a necessidade de desenvolver ferramentas que possibilitem a simulação e a análise de cenários, que representem o efeito das variações climáticas sobre a disponibilidade dos recursos hídricos para a produção agrícola, bem como auxiliem o produtor na escolha da estratégia de produção que procure maximizar o retorno dos sistemas de produção e dos insumos utilizados, principalmente a água de irrigação.

Nesse trabalho desenvolveu-se um modelo de programação linear e um modelo de manejo de irrigação, para subsidiar a tomada de decisão dos produtores sobre a irrigação em pivôs centrais. No modelo desenvolvido, as variáveis de decisão representam a área de cada cultura alocada em cada pivô central, manejadas em diferentes sistemas de produção, na propriedade e o objetivo será maximização do lucro, com restrições inerentes ao processo produtivo. Inicialmente consideraram-se as restrições de limitação de solo, rotação de culturas ao longo do período de planejamento e disponibilidade de água para irrigação nos pivôs da propriedade.

MATERIAIS E MÉTODOS

Local de estudo

O estudo foi realizado tomando uma propriedade de médio porte na Zona Rural do Buriti Vermelho, no Distrito Federal, a qual possui quatro pivôs centrais com 90 hectares cada, e que dividem uma mesma fonte de captação de água (Figura 1). A propriedade planta as seguintes culturas, utilizando o sistema de rotação de culturas como recomendação agrônômica: milho safra, milho safrinha, soja média, soja precoce, feijão pérola, feijão precoce e trigo. O não uso do solo (pousio) também foi considerado com uma forma de uso do solo no modelo de programação linear.

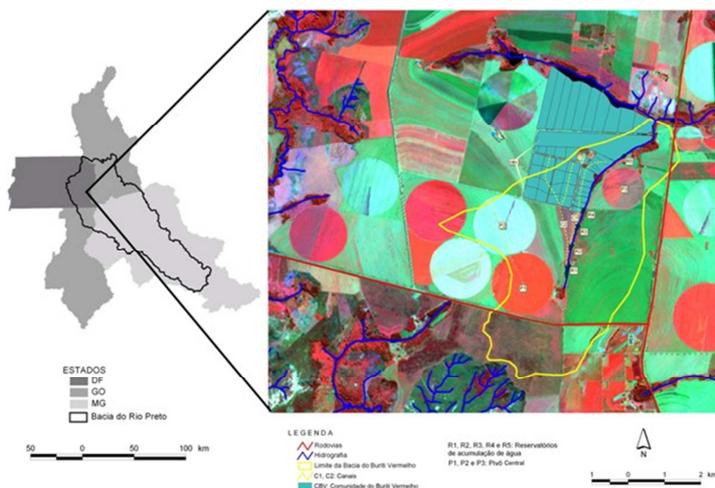


FIGURA 1 – Esquema representativo das Bacias do Rio Preto à esquerda e do Rio Buriti Vermelho à direita.

Os custos de produção, a produção esperada nas culturas irrigadas e os preços pagos ao produtor foram obtidas em entrevista com o produtor rural e são apresentadas na Tabela 1. A oferta

de água ao longo dos períodos pode ser observada na Figura 2. A demanda de água por cada estratégia de uso do solo, tanto em irrigação como em sequeiro, e a produtividade esperada em sequeiro foram estimadas por meio do modelo hidrológico. O custo de irrigação informado pelo produtor foi de R\$ 0,80 por milímetro de água aplicado nas culturas.

Tabela 1 – Custo de produção, produtividade esperada sob irrigação e preço das culturas

Cultura	Custo de Produção (R\$/ha)	Produtividade (sc 60kg/ha)	Preço (R\$/sc 60kg)
Feijão pérola	R\$ 2.500,00	55,00	R\$ 120,00
Feijão precoce	R\$ 2.500,00	45,00	R\$ 120,00
Milho safra	R\$ 2.500,00	230,00	R\$ 25,00
Milho safrinha	R\$ 1.800,00	170,00	R\$ 25,00
Soja média	R\$ 1.500,00	75,00	R\$ 60,00
Soja precoce	R\$ 1.500,00	70,00	R\$ 60,00
Trigo	R\$ 1.895,33	100,00	R\$ 42,00

Modelo relacionando água e produtividade

Um modelo relacionando a quantidade de água aplicada na planta diariamente foi desenvolvido para avaliar o seu potencial produtivo nos regimes de irrigação com 100% da demanda de água da planta atendida, e o regime de sequeiro.

Modelo de programação linear:

O modelo desenvolvido assemelha-se ao modelo padrão para o planejamento agrícola (Caixeta-filho, 2004) ou de fazendas (Prado, 2003), onde a variável de decisão representa a área de cada cultura alocada em cada pivô central na propriedade em um determinado período de tempo. O objetivo foi a maximização do lucro foram consideradas as restrições inerentes ao processo produtivo na propriedade agrícola, como disponibilidade de área, água, rotações de culturas permitidas e uso inicial do solo no momento do planejamento. Ao alocar o uso da água ao longo do tempo e entre pivôs, o modelo também incorporara características dos modelos multi-período e multi-planta (Prado, 2003).

Os meses foram separados em quatro períodos de tempo cada, sendo chamados de quartis de mês, totalizando 48 quartis de mês em um ano. O modelo de programação linear desenvolvido é apresentado abaixo:

Função objetivo – Maximizar o lucro da propriedade

$$\begin{aligned} \text{Maximizar } Lc = & \sum_c \sum_p \sum_q \sum_r \sum_{t_p} \sum_{a_p} \sum_{t_c} \sum_{a_c} \sum_t \sum_a \left(\text{Preço}_{ctca_c} * \text{Produção}_{crt_p a_p t_c a_c} - \text{Custo}_{crt_p a_p t_c a_c} - \right. \\ & \left. \text{CustoIrr} * QAAI_{cp rt_p a_p t_c a_c t a} \right) \frac{\text{Area}_p}{N\text{Quotas}_p} X_{cp q rt_p a_p t_c a_c} + \\ & \sum_c \sum_p \sum_q \sum_r \sum_{t_p} \sum_{a_p} \sum_{t_c} \sum_{a_c} \sum_t \sum_a \left(\text{Preço}_{ctca_c} * \text{Produção}_{crt_p a_p t_c a_c} - \text{Custo}_{crt_p a_p t_c a_c} - \right. \\ & \left. \text{CustoIrr} * QAAI_{cp rt_p a_p t_c a_c t a} \right) \frac{\text{Area}_p}{N\text{Quotas}_p} X_{Ini_{cp q rt_p a_p t_c a_c}} \end{aligned} \quad (1)$$

Alocação das áreas em uso no início do horizonte de planejamento

$$\frac{\text{Area}_p}{N\text{Quotas}_p} X_{Ini_{cp q rt_p a_p t_c a_c}} = \text{Usolnicial}_{cp q rt_p a_p t_c a_c} \forall \{cp q rt_p a_p t_c a_c\} \quad (2)$$

Cálculo da área disponível para plantio no primeiro período do horizonte de planejamento

$$\text{DispPriPeriodo}_{pq} = \frac{\text{Area}_p}{N\text{Quotas}_p} - \sum_c \sum_r \sum_{t_p} \sum_{a_p} \sum_{t_c} \sum_{a_c} \text{Usolnicial}_{cp q rt_p a_p t_c a_c} \forall \{pq\} \quad (3)$$

Destinação das áreas disponíveis no primeiro período do horizonte de planejamento

$$\sum_c \sum_r \frac{Area_p}{NQuotas_p} RXIni_{cpqrt_p a_p} = DispPriPeriodo_{pq} \forall \{pqt_p a_p | t_p a_p = 1^o \text{ período}\} \quad (4)$$

Destinação das áreas colhidas ao longo do período de planejamento

$$\sum_{t_p} \sum_{a_p} X_{cpqrt_p a_p t_c a_c} + \sum_{t_p} \sum_{a_p} XIni_{cpqrt_p a_p t_c a_c} = \sum_{c_p} \sum_{r_p} \sum_{t_p} \sum_{a_p} RX_{pqcrt_c a_c p r t_p a_p} \forall \{cpqrt_c a_c\} \quad (5)$$

Destinação das áreas a serem plantadas no primeiro período do horizonte de planejamento

$$RXIni_{cpqrt_p a_p} = \sum_{t_c} \sum_{a_c} X_{cpqrt_p a_p t_c a_c} \forall \{cpqrt_p a_p | t_p a_p = 1^o \text{ período}\} \quad (6)$$

Destinação das áreas a serem plantadas a partir do segundo período do horizonte de planejamento

$$\sum_{c_c} \sum_{r_c} \sum_{t_c} \sum_{a_c} RX_{pqcrt_c a_c p r t_p a_p} = \sum_{t_c} \sum_{a_c} X_{cpqrt_p a_p t_c a_c} \forall \{cqrpta | ta > 1^o \text{ período}\} \quad (7)$$

Controle da área utilizada em cada período de tempo

$$\sum_{t_p} \sum_{a_p} \sum_{t_c} \sum_{a_c} Uso_{cpqrt_p a_p t_c a_c} XIni_{cpqrt_p a_p t_c a_c} + \sum_{t_p} \sum_{a_p} \sum_{t_c} \sum_{a_c} Uso_{cpqrt_p a_p t_c a_c} X_{cpqrt_p a_p t_c a_c} = 1 \forall \{pqt_a\} \quad (8)$$

Limitação da quantidade de água utilizada para irrigação

$$\sum_c \sum_r \sum_p \sum_q \sum_{t_p} \sum_{a_p} \sum_{t_c} \sum_{a_c} QAAI_{cprtp a_p t_c a_c} XIni_{cpqrt_p a_p t_c a_c} + \sum_c \sum_r \sum_p \sum_q \sum_{t_p} \sum_{a_p} \sum_{t_c} \sum_{a_c} QAAI_{cprtp a_p t_c a_c} X_{cpqrt_p a_p t_c a_c} \leq LimAgua_{ta} \forall \{ta\} \quad (9)$$

Onde:

Conjuntos: c – culturas utilizadas pelo produtor; r – regimes de irrigação; p – pivôs centrais da propriedade; q – quota em que cada pivô foi dividido; t_p – quartil de mês de plantio da cultura; a_p – ano de plantio da cultura; t_c – quartil de mês de colheita da cultura; a_c – ano de colheita da cultura; t – quartil de mês considerado; a – ano considerado.

Parâmetros: Preço_{ctca_c} – preço pago pela cultura c no quartil de colheita t_c e no ano de colheita a_c; Produção_{crt_pa_pt_ca_c} – produção esperada da cultura c com o regime de irrigação r plantada no quartil de mês t_p e no ano a_p e colhida no quartil de mês t_c e no ano a_c; Custo_{crt_pa_pt_ca_c} – custo de produção da cultura c com o regime de irrigação r plantada no quartil de mês t_p e no ano a_p e colhida no quartil de mês t_c e no ano a_c; CustoIrr – custo de irrigação em reais por milímetro de água aplicado na cultura; QAAI_{cprtp a_pt_ca_c} – quantidade de água demandada pela cultura c com o regime de irrigação r no quartil de mês t no ano a alocada no pivô p, tendo sido plantada no quartil de mês t_p e no ano a_p e com previsão de colheita no quartil de mês t_c e no ano a_c; Area_p – area do pivô central p em hectares; NQuotas_p – número de quotas em que a area do pivô central p foi igualmente dividida; UsoInicial_{cpqrt_pa_pt_ca_c} – área do solo do quartil q do pivô p já utilizada com a cultura c com o regime de irrigação r cujo plantio ocorreu antes do início do período de planejamento no quartil de mês t_p e no ano a_p com previsão de colheita no período de planejamento no quartil de mês t_c e no ano a_c; DispPriPeriodo_{pq} – disponibilidade de terra para plantio na quota q do pivô central p no primeiro período do horizonte de planejamento; Uso_{cpqrt_pa_pt_ca_c} – parâmetro que assume valor 1 se a cultura c alocada na quota q do pivô p com o regime de irrigação r plantada no quartil de mês t_p e no ano a_p com previsão de colheita no quartil de mês t_c e no ano a_c ocupar o solo no quartil de mês t no ano a, 0 caso contrário; LimAgua_{ta} – limitação da quantidade de água para irrigação no quartil de mês t do ano a.

Variáveis: L_c – lucro total da propriedade, $X_{cpqrt_p a_p t_c a_c}$ – variável binária que associa o uso do solo do quartil q do pivô central p à cultura c com o regime de irrigação r plantada no quartil de mês t_p e no ano a_p e colhida no quartil de mês t_c e no ano a_c sendo que o seu plantio ocorreu no período de planejamento, $X_{Ini_{cpqrt_p a_p t_c a_c}}$ – variável binária que associa o uso do solo do quartil q do pivô central p à cultura c com o regime de irrigação r plantada no quartil de mês t_p e no ano a_p e colhida no quartil de mês t_c e no ano a_c sendo que o plantio da mesma ocorreu antes do início do período de planejamento, $RX_{Ini_{cpqrt_p a_p}}$ – variável que associa o solo disponível para plantio no início do período de planejamento da quota q do pivô p no quartil de mês t_p e no ano a_p à cultura c com o regime de irrigação r , $RX_{pqcrt_c a_c c_p r_p t_p a_p}$ – variável que associa o solo que ficou disponível na quota q do pivô p após a colheita da cultura c com o regime de irrigação r no quartil de mês t_c no ano a_c para ser plantado com a cultura c_p com o regime de irrigação r_p no quartil de mês t_p no ano a_p sendo que o quartil de mês de plantio é imediatamente após o quartil de mês de colheita.

Recursos utilizados

O modelo de manejo de irrigação foi desenvolvido em linguagem Delphi, os dados foram organizados em planilhas eletrônicas MS Excel 2010 e o modelo de programação linear inteira mista foi implementado no *General Algebraic Modelling System* (GAMS) versão 23.7.3, e resolvido no solver CPLEX versão 12.3.0.0.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram avaliadas duas estratégias de planejamento do uso do solo sob os pivôs centrais, uma impondo um mesmo uso do solo em cada pivô, e outra permitindo a divisão do pivô em no máximo duas estratégias de uso do solo, podendo variar a cultura plantada e o regime de irrigação adotado. O número de equações, total de variáveis de decisão, variáveis binárias, tempo de resolução, valor da função objetivo e diferença entre o melhor valor possível da função objetivo pelo algoritmo *branch and bound* são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo das informações dos modelos considerados

Informação	Pivôs com 1 quota	Pivôs com 2 quotas
Nº de equações	2.784	5.524
Nº de variáveis de decisão	6.353	12.705
Nº de variáveis binárias	2.384	4.768
Tempo de resolução (s)	11	7200
Valor da Função Objetivo (R\$)	2.519.850,44	2.649.114,54*
Gap do Valor da F.O. (R\$)	0,00	51.640,04

* Melhor valor encontrado para uma solução inteira, o solver foi interrompido após uma hora de execução, apresentando um gap relativo de 1,949%. Ressalta-se que este valor foi encontrado antes do primeiro minuto de execução, e depois não houve melhora do valor ao longo de duas horas de execução do algoritmo *branch and bound*.

A Tabela 3 apresenta o resultado do uso do solo proposto pelo modelo matemático nos dois cenários analisados. É possível perceber que a partição dos pivôs em duas áreas permite uma melhor alocação do uso do solo e da água disponível para irrigação, possibilitando um aumento de 5,13% no lucro da propriedade, conforme pode ser observado na Tabela 2.

Comparando a Tabela 3 com a Figura 2, percebe-se que a principal diferença entre as duas estratégias é a produção de milho safrinha irrigado em metade de um pivô (pivô 3), e o adiamento do plantio de metade de um pivô com feijão pérola em três quartis de mês (pivô 4). Tal estratégia permite um irrigar parte da cultura de milho safrinha, utilizando melhor a água nos meses de maio a

julho, justamente no período onde ela apresenta menor disponibilidade e maior demanda por parte das culturas.

Tabela 3 – Resultado de uso do solo proposto pelo modelo nas duas estratégias

Ano / Mês / Quartil de Mês			2011																																															
Estratégia	Pivô	Quota	1				2				3				4				5				6				7				8				9				10				11				12			
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
Uma Quota	p1	1	NU_seq				Feijão Pérola_irr				NU_seq				M Safra_irr																																			
	p2	1	NU_seq				Feijão Pérola_irr				NU_seq				M Safra_irr																																			
	p3	1	Milho Safrinha_seq				NU_seq				Feijão Precoce_irr				NU_seq				M Safra_irr																															
	p4	1	Milho Safrinha_seq				Feijão Pérola_irr				NU_seq				M Safra_irr																																			
Duas Quotas	P1	1	NU_seq				Feijão Pérola_irr				NU_seq				M Safra_irr																																			
		2	Milho Safrinha_seq				Feijão Pérola_irr				NU_seq				M Safra_irr																																			
	p2	1	NU_seq				Feijão Pérola_irr				NU_seq				M Safra_irr																																			
		2	NU_seq				Feijão Pérola_irr				NU_seq				M Safra_irr																																			
	p3	1	Milho Safrinha_irr				Feijão Pérola_irr				NU_seq				M Safra_irr																																			
		2	NU_seq				Feijão Pérola_irr				NU_seq				M Safra_irr																																			
	p4	1	Milho Safrinha_seq				NU_seq				Feijão Pérola_irr				NU_seq				M Safra_irr																															
		2	Milho Safrinha_seq				NU_seq				Feijão Precoce_irr				NU_seq				M Safra_irr																															

NU – Não uso do solo, M Safra – Milho Safra, irr – irrigado, seq – sequeiro

Embora a estratégia de particionar o uso do solo sob o pivô central torne a gestão e o manuseio das culturas mais complexo, e aumente de maneira significativa o esforço computacional para a obtenção da solução ótima do modelo, ele permite uma melhor alocação do solo e da água de irrigação disponível, aumentando o valor marginal da água para o produtor e a sociedade.

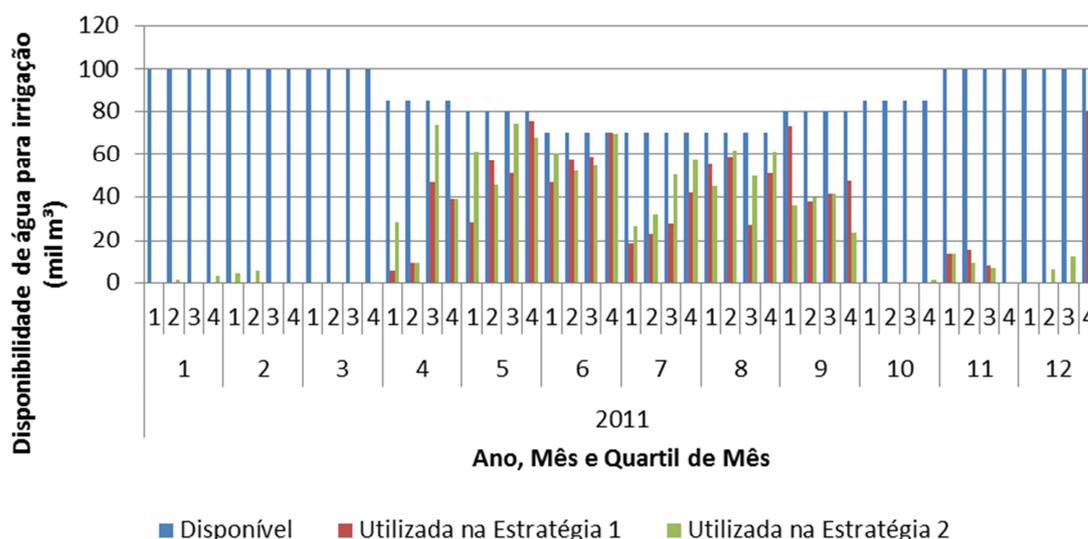


Figura 2 – Quantidade de água disponível e utilizada nas duas estratégias de irrigação

Uma forma de melhorar ainda mais o uso do solo seria aumentar o número de regimes de irrigação, reduzindo a irrigação em momentos de maior demanda hídrica e estimando o impacto na produtividade das culturas, aumentando as possibilidades de alocação do uso da água nos diferentes pivôs centrais da propriedade.

CONCLUSÕES

O modelo matemático proposto permitiu a otimização do uso do solo e da água para a realidade considerada, maximizando o lucro da propriedade para as culturas, os regimes de irrigação e as possibilidades de rotação de culturas consideradas.

A possibilidade de subdividir o pivô em diferentes estratégias de produção permite uma melhor utilização dos recursos de terra e água, embora aumente a complexidade de gestão da propriedade e o esforço computacional para a resolução do modelo.

O desenvolvimento de regimes de irrigação adicionais poderia aumentar a eficiência do uso dos recursos na propriedade, principalmente em regimes que minimizem o uso de água de irrigação nos períodos de maior demanda.

REFERÊNCIAS

- CAIXETA-FILHO, J.V. (2004). *Pesquisa Operacional: técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais*. 2 ed. São Paulo: Atlas, 169p.
- CHANG, N.B.; WEN, C.G.; WU, S.L. (1995). Optimal management of environmental and land resources in a reservoir watershed by multiobjective programming. *Journal of environmental management* 44(2), pp. 145-161.
- FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A.; ARCE, R.A.B.; PÉRES, F.C. (1994). Alocação de água e combinação de atividades pela programação linear em um projeto hidroagrícola no município de Guaíra(SP). *Scientia Agricola*, 51(3), pp.524-532.
- FRIZZONE, J.A.; COELHO, R.D.; DOURADO-NETO, D.; SOLIANI, R. (1997). Linear programming model to optimize the water resource use in irrigation projects: an application to the Senator Nilo Coelho Project. *Scientia Agricola*, 54(Número Especial), pp.136-148.
- PRADO, D. dos S. (2003). *Programação linear*. Belo Horizonte, MG: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 220p. (Série Pesquisa Operacional, Vol. 1)
- TAVARES, B.S.; BORGES JÚNIOR, J.C.F.; CORREA, M.M.; LIMA, J.R.S.; DANTAS NETO, J. Análise de risco e otimização de recursos hídricos e retorno financeiro em nível de fazenda. (2011). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 15(4), pp. 338-346.