

**ANÁLISE MULTIOBJETIVO
APLICADA A UM SISTEMA DE
PRODUÇÃO AGRÍCOLA**

Arisvaldo V. Mélo Jr.
Benedito P.F.Braga Jr.

ARISVALDO V. MÉLLO JR.

Rua Alcino Oliveira Neto, 75, Bairro Luzia
CEP 49045-450 - Aracaju - SE

BENEDITO P.F. BRAGA JR.

Escola Politécnica da USP, Dep. Engenharia Civil

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo desenvolver uma estrutura de cálculo para otimizar um sistema de rotação de culturas irrigado, para maximizar a receita líquida e minimizar a degradação do solo do processo de produção agrícola. A área estudada foi a de um pivô central, localizada em Gualra, SP. As culturas empregadas foram: milho, soja, feijão, sorgo e tomate. O sistema de preparo do solo adotado, foi o convencional e o plantio direto. O instrumento analítico usado foi a programação linear inteira. As restrições foram de disponibilidade de água, de especificação da rotação de culturas e sua distribuição nos talhões do pivô. O modelo foi formulado para dois métodos de análise multiobjetivo. A solução obtida pelo método SWT, apresentou um conjunto de pontos não inferiores, que estabeleceu trocas entre os objetivos. O método PM forneceu uma única solução, como resultado da melhor negociação entre os desvios das metas. A modelação matemática desenvolvida, mostrou-se confiável e adequada, pois para os mesmos valores dos objetivos obteve-se o mesmo esquema de rotação, preparo do solo e manejo da irrigação. Palavras-chave: Otimização de recursos, produção agrícola, irrigação, rotação de culturas.

INTRODUÇÃO

Na atividade agrícola, a busca do aumento da produtividade é fator primordial para sua manutenção. O uso da irrigação e a ocupação contínua do solo contribuem para se aumentar a produção por unidade de

área. Entretanto, em geral, o alcance deste propósito requer uma progressiva intensificação dos trabalhos de preparo de solo, provocando, ao longo dos anos, efeitos nocivos de degradação e empobrecimento do solo.

O uso excessivo de máquinas agrícolas para o preparo do solo, a queima de restos culturais, a não utilização de rotação de culturas e a irrigação mal feita alteram a estrutura física e química do solo, provocam o desequilíbrio nutricional, a queda da atividade biológica, dos níveis de matéria orgânica e reduzem a capacidade de armazenamento de água do solo (Sidiras et al., 1983; Vieira e Muzilli, 1984; Pavan et al., 1985; Castro et al., 1987; Bertoni e Lombardi Neto, 1990; Hill, 1990; Tognon, 1991; Vieira, 1994; Muzilli, 1994 e Henklain e Casão Jr., 1994). Essas desvantagens convergem para o aumento de custos de produção e para a queda do potencial produtivo das culturas.

É importante promover aumentos progressivos da produtividade agrícola e, ao mesmo tempo, garantir a sustentabilidade dos recursos de produção, prevenindo sua degradação. Para contornar os problemas que causam o depauperamento do solo e são entraves à produtividade das culturas, é recomendado o uso de um sistema adequado de preparo do solo, de estratégias de manejo da irrigação e de rotação de culturas, incluindo espécies de cobertura verde que protejam e recuperem o solo (Maalouf, s.d.; Verma, 1986; Sorrenson e Montoya, 1989; Smith, 1992; Veiga Filho et al., 1992; Dullely e Miyasaka, 1994 e Barcelos e Novaes, 1995).

No campo, o planejamento integrado dessas práticas agrícolas é complexo, fazendo-se necessário um método para a avaliação das estratégias de manejo nesse tipo de sistema de produção. Muitos trabalhos foram

desenvolvidos para otimizar sistemas de produção agrícola, considerando cultivo único ou múltiplos, submetidos ou não a programas de irrigação específicos (Windsor e Chow, 1971; Trava et al., 1977; Matanga e Mariño, 1979; Kumar e Khepar, 1980; Neves et al., 1984; Anderson et al., 1985; Bosch et al., 1987; Tsai et al., 1987; Bernardo et al., 1988; Martin et al., 1989; English, 1990; Mannocchi e Mecarelli, 1994 e Dantas Neto, 1994). Poucos estudos têm sido encontrados abordando o sistema de rotação de culturas, o manejo da irrigação e do solo, no planejamento otimizado da produção agrícola, principalmente quando se considera a preservação do meio ambiente.

Deve-se, portanto, pensar na atividade agrícola de uma forma mais ampla e racional, prevendo não só o aumento da receita, mas também, a preservação dos recursos naturais. A análise multiobjetivo oferece uma abordagem mais realista do problema, uma vez que leva em conta situações de conflito no uso dos recursos. A aplicação desta técnica de programação matemática tem por finalidade verificar a melhor solução de compromisso, ou seja, a solução eficiente que maximiza a função de preferência do decisor (Miller e Byers, 1973; Haimes e Hall, 1974; Cohon e Marks, 1973 e 1975; Das e Haimes, 1979; Ignizio, 1981; Goicoechea et al., 1982; Horiuchi et al., 1982; Braga, 1987; Hillier e Lieberman, 1988 e Hobbs et al., 1992).

Através da análise multiobjetivo, este trabalho pretende otimizar a seqüência de cultivos, a ser usada em áreas irrigadas, que estabeleça o melhor sistema de rotação de culturas, preparo do solo e manejo de irrigação, maximizando a receita líquida e minimizando a degradação do solo.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área estudada está localizada na Fazenda Barcelona, no Município de Gualra, ao norte do Estado de São Paulo. O solo é classificado como Latossolo roxo distrófico e a declividade média do terreno é de 2,4%, sendo o solo intensivamente usado com agricultura irrigada. A região possui clima tropical de altitude com chuvas de verão, inverno seco e pouca variação da temperatura durante o ano. As temperaturas máximas e mínimas anuais são de 31,5°C e 12,4°C. A precipitação média anual é de 1330 mm: o período chuvoso se estende de outubro a março, com média mensal de 187,6 mm, e o seco de abril a setembro, com média mensal de 38,9 mm. O teor médio de umidade relativa do ar varia de 62 a 77%. A evaporação potencial anual, obtida de evaporímetro tipo classe "A", é de 1652 mm.

O sistema otimizado de cultivo envolve uma combinação de práticas englobando 5 culturas em rotação, 2 métodos de preparo de solo, 4 lâminas de irrigação e 3 adubos verdes. As culturas empregadas na rotação foram: milho, soja, feijão, sorgo e tomate. O sistema de preparo do solo adotado, foi o convencional, PC (grade pesada, escarificador e grade niveladora após gramínea; escarificador ou arado de aiveca e grade niveladora após leguminosa; e somente grade pesada após adubo verde) e o plantio direto, PD (semeadura feita sobre a palhada que cobre a superfície do solo).

A adubação verde seria usada na entressafra das culturas para proteger o solo. Seu esquema de uso seria: plantar crotalária após o milho e a aveia preta antes da soja. Quando o sistema de preparo do solo da cultura seguinte ao adubo verde for o PD, a mucuna preta substituirá a crotalária devido à sua maior produção de massa, fator importante na proteção do solo. Foi adotado um sistema de

rotação de 4 anos, indicando que a área delimitada pelo pivô central será dividida em 4 partes iguais, sendo cada parte cultivada com uma cultura, em um sistema de preparo de solo, irrigada com uma lâmina de irrigação. A implementação do sistema nos anos seguintes é feita sucessivamente nos diferentes talhões. A combinação desses fatores dará as opções de rotação desejadas.

O ano agrícola foi dividido em duas épocas de cultivo, respeitando as exigências climáticas e de mercado. Na época de primavera-verão (P/V) é estabelecido o cultivo de agosto a janeiro, e na de outono-inverno (O/I) o cultivo é de fevereiro a julho. As épocas exatas de plantio das culturas devem ser convenientemente ajustadas pelo produtor, de acordo com as variações climáticas incidentes.

Em Gualra, o milho, a soja, a crotalaria e a mucuna preta são cultivadas na época de P/V. As demais culturas e a aveia preta são cultivadas no O/I. As culturas deverão ocupar o solo o ano todo, de modo a não ocorrer ociosidade do terreno e evitar o aumento da degradação do solo. Para efeito de controle e prevenção de pragas e doenças é recomendado que haja alternância de cultivo entre gramíneas e leguminosas na mesma área. Portanto, não será permitido o plantio de culturas da mesma família em épocas subsequentes, na mesma área.

Modelagem matemática

O instrumento analítico usado para equacionar os objetivos e as restrições do problema, foi a programação linear inteira, por se tratar de um procedimento utilizado na solução de problemas que envolvam decisões "sim" ou "não".

Serão apresentados dois modelos, que são o resultado da formulação do problema por dois métodos de análise multiobjetivo. O método da troca de valor substituto - SWT (Cohon e Marks, 1975 e Goicoechea et al., 1982) gera um conjunto de soluções não inferiores, estabelecendo trocas entre os objetivos pretendidos. O método da programação de metas - PM (Ignizio, 1981; Goicoechea et al., 1982 e Hillier e Lieberman, 1988) apresenta uma única solução para que se possa atingir metas preestabelecidas.

No método SWT o objetivo de minimização da degradação do solo entrará como restrição do objetivo de maximização da receita líquida. O equacionamento do problema consistiu em:

$$\text{Max } Z = \left[\sum_{i,j,t=1}^{n,m,q} \sum_{s=0}^u X_{ijts} Y_{ijts} \right] P_{ijt} - \sum_{i,j,t=1}^{n,m,q} \sum_{h=1}^r \sum_{s=0}^u A_{ijth} X_{ijts} C_{ijth} \quad (1)$$

Tendo como restrições

$$\sum_{i,j,t=1}^{n,m,q} \sum_{s=0}^u X_{ijts} W_{ijts} \leq W_t \quad (i=1,\dots,n; j=1,\dots,m; t=1,\dots,q; s=0,\dots,u) \quad (2)$$

$$\sum_{i,j,t=1}^{n,m,q} \sum_{h=1}^r \sum_{s=0}^u A_{ijth} X_{ijts} \leq V_h \quad (i=1,\dots,n; j=1,\dots,m; t=1,\dots,q; s=0,\dots,u; h=1,\dots,r) \quad (3)$$

$$X_{i^*jts} \leq -X_{ijts} + 1 \quad (4)$$

$$X_{ijts} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

$$\sum_{i,j,t=1}^{n,m,q} \sum_{s=0}^u X_{ijts} = 1 \quad (6)$$

$$X_{ijts} \text{ inteiros } (i=1,\dots,n; j=1,\dots,m; t=1,\dots,q; s=0,\dots,u) \quad (7)$$

$$\sum_{i,j,t=1}^{n,m,q} \sum_{s=0}^u E_{ijts} X_{ijts} \leq B \quad (8)$$

onde:

- i é um número representando a cultura ($i = 1, 2, \dots, n$).
- j é um número representando o sistema de preparo do solo ($j = 1, \dots, m$).
- t é um número representando o talhão do pivô onde as culturas serão cultivadas ($t = 1, \dots, q$).
- s é o ponto que identifica a produção e o correspondente uso de água na função de produção relativa à água ($s = 0, \dots, u$).
- h é um número representando outros insumos ($h = 1, \dots, r$).
- P_{ijt} é o preço unitário da cultura i , no sistema de preparo do solo j , no talhão t .
- X_{ijts} é a cultura i , no sistema de preparo do solo j , a ser plantada no talhão t , no ponto S da função de produção relativa à água (variável inteira 0 ou 1).
- Y_{ijts} é a produtividade obtida da cultura i , no sistema de preparo do solo j , no talhão t , quando aplicada uma lâmina de irrigação qualquer localizada no ponto S da função de produção, $f(W_{ijts})$.
- A_{ijth} é a quantidade demandada do insumo h pela cultura i , no sistema de preparo do solo j , no talhão t .
- C_{ijth} é o custo unitário do insumo h usado pela cultura i , no sistema de preparo do solo j , no talhão t .
- W_{ijts} é a quantidade de água para irrigar a cultura i , no sistema de preparo do solo j , no talhão t .
- W_t é a quantidade total de água disponível para as culturas i , nos sistemas de preparo do solo j , em todos os talhões t , na mesma época de cultivo.
- V_h é a disponibilidade máxima do insumo h .
- E_{ijts} é a contribuição da cultura i , no sistema de preparo j , no talhão t , no segmento s da função de produção, para a degradação do solo.

B é o requerimento permissível para a degradação do solo.

A equação (1) é a função objetivo linear, a (2) é a restrição de disponibilidade de água e a (3) é uma restrição quanto à disponibilidade de recursos diversos. As equações de número (4) a (7) são restrições para tornar as variáveis inteiras (0 ou 1) e a (8) representa a tolerância permitida de degradação do solo. O lado esquerdo da restrição (2) representa as quantidades totais de água requerida, nas épocas de P/V e O/I, em mm, para cada hectare cultivado. A restrição indica que a quantidade de água necessária para irrigação das culturas tem que ser menor ou igual à disponibilidade de água existente na fazenda (35300 e 18690 m³ nas épocas de P/V e O/I, respectivamente).

A equação (4) é uma restrição contingente que depende de uma decisão anterior. A decisão X_{i^*jts} (decisão de cultivar uma cultura na época de O/I) é contingente da decisão X_{ijts} (decisão de cultivar uma cultura na época de P/V). A primeira decisão poderá ser "sim" somente se a última for "não". Portanto, $X_{ijts} = 0$ dá escolha livre a X_{i^*jts} , enquanto que $X_{ijts} = 1$ força $X_{i^*jts} = 0$. Esta restrição se refere ao esquema de rotação das culturas. Ela serve para indicar a possibilidade, ou não, de uma cultura ser cultivada uma após a outra, assim como, o número de talhões cultivados com uma mesma cultura, no mesmo ano agrícola. Por exemplo, na rotação não foi permitido que o sorgo e o feijão fossem cultivados após o milho e a soja, e que o milho e o tomate fossem cultivados em mais de três talhões por ano.

A restrição (6) se refere a distribuição das culturas nos talhões do pivô. É uma alternativa mutuamente exclusiva, de modo que somente uma decisão no grupo possa ser sim. Ela assegura que apenas uma cultura, nas épocas de plantio de

P/V e O/I, em cada sistema de preparo do solo e irrigada com uma determinada lâmina, seja plantada nos talhões do pivô.

A equação (8) é uma restrição que diz que a combinação de sistemas de cultivo, nas áreas do pivô, ao longo do horizonte de planejamento, não pode ultrapassar um limite mínimo. A variação paramétrica dos valores da restrição da degradação do solo, a partir de um valor mínimo inicial, em incrementos pré-especificados, permite a geração de um conjunto não inferior e a avaliação das trocas entre os objetivos.

As produções das culturas foram condicionadas à lâmina de irrigação aplicada às culturas. Esta relação foi incluída no modelo através das funções de produção relativas à água, calculadas segundo Doorenbos e Kassam (1986). As respostas de produtividade das culturas às lâminas de irrigação, ditadas pelo decréscimo da evapotranspiração relativa (ETa/ETm), foram discretizadas de acordo com o decréscimo da evapotranspiração atual (ETa). A região de alocação de recursos para cada cultura, foi definida entre a lâmina de irrigação na qual a produção é máxima e a lâmina correspondente a uma redução na evapotranspiração máxima (ETm) de 20%.

A degradação do solo foi quantificada em termos de unidades de impacto ambiental (UIA). Determinou-se a diferença do impacto, nos parâmetros de solo, com e sem o plantio das culturas, nos sistemas de PD e de PC. Em seguida foi feita a computação das UIA. Os parâmetros representativos da qualidade ambiental do solo foram: a macro e a microporosidade, a densidade do solo, a água disponível, a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração, conforme Tognon (1991). Todos os parâmetros foram quantificados para várias camadas do perfil do solo com exceção da taxa de infiltração.

A formulação do problema para o método PM, consistiu em se estabelecer as metas de atingir uma receita líquida de pelo menos um valor RL (US\$/ha) qualquer obtido com as produções das culturas em rotação, e de manter os níveis de degradação do solo menor que um valor D (UIA) qualquer. Foi estabelecido que as metas tem a mesma ordem de importância, não sendo necessária a definição de fatores de prioridade para as mesmas.

As metas foram definidas como

$$\begin{array}{l} n, m, q \quad u \\ \text{Max } Z = \sum_{i,j,t=1}^n \sum_{s=0}^q C_{ijts} X_{ijts} \geq \text{RL (meta de lucro)} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} n, m, q \quad u \\ \text{Min } Z = \sum_{i,j,t=1}^n \sum_{s=0}^q E_{ijts} X_{ijts} \leq D \text{ (meta ambiental)} \end{array}$$

onde C_{ijts} é o coeficiente demonstrando o benefício da variável de decisão X_{ijts} , e E_{ijts} é a contribuição da cultura, em cada sistema de cultivo, para a degradação do solo. Os índices das variáveis tem o mesmo significado mostrado na formulação do problema no primeiro método.

Novas variáveis auxiliares foram introduzidas,

$$\begin{array}{l} n, m, q \quad u \\ d_1 = \sum_{i,j,t=1}^n \sum_{s=0}^q C_{ijts} X_{ijts} - \text{RL} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} n, m, q \quad u \\ d_2 = \sum_{i,j,t=1}^n \sum_{s=0}^q E_{ijts} X_{ijts} - D \end{array}$$

como também seus componentes positivo e negativo,

$$d_1 = d_1^+ - d_1^-, \text{ onde } d_1^+ \geq 0, d_1^- \geq 0$$

$$d_2 = d_2^+ - d_2^-, \text{ onde } d_2^+ \geq 0, d_2^- \geq 0$$

Como não existe problema em exceder a meta de lucro (RL) ou de ficar abaixo da meta ambiental (D), d_1^+ e d_2^- não aparecem na função objetivo. Entretanto, d_1^+ e d_2^- aparecem junto com d_1^- e d_2^+ nas restrições de igualdade, que definem a relação entre estas variáveis auxiliares e as variáveis de decisão originais (X_{ijts}), pois é possível que se tenha $d_1^+ \geq 0$ e $d_2^- \geq 0$.

A formulação do problema de programação linear inteira para a PM é a seguinte:

$$\text{Min } Z = d_1^- + d_2^+ \quad (9)$$

sujeito a

$$\sum_{i,j,t=1}^{n,m,q} C_{ijts} X_{ijts} - (d_1^+ - d_1^-) = \text{RL} \quad (10)$$

$$\sum_{i,j,t=1}^{n,m,q} E_{ijts} X_{ijts} - (d_2^+ - d_2^-) = D \quad (11)$$

$$\text{equações (2) a (7)} \quad (12)$$

$$d_1^+, d_1^-, d_2^+, d_2^- \geq 0 \quad (13)$$

Os custos de produção e de irrigação das culturas, assim como os preços dos produtos, usados nos modelos, foram obtidos de IPT (1990 e 1991). Eles foram considerados constantes no horizonte de planejamento. Os coeficientes referentes a custos, preços dos produtos, requerimento de irrigação das culturas e ao sistema de avaliação ambiental, bem como maiores detalhes sobre o procedimento de cálculo para a obtenção dos coeficientes, podem ser encontrados em Mélló Jr. (1996).

As soluções dos modelos formulados nos dois métodos, foram obtidas com o uso

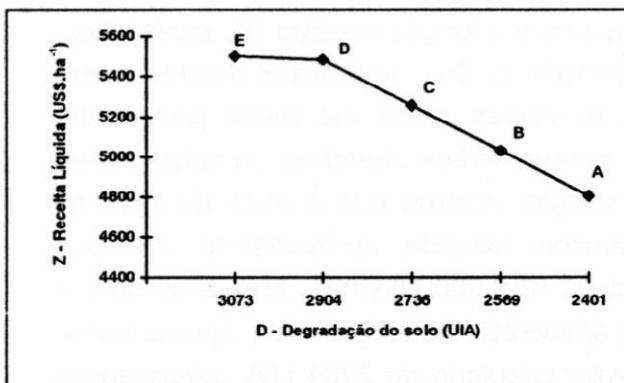
do software "Microsoft Excel 5.0 para Windows". A resolução do problema, em suas formulações originais, se mostrou muito lenta devido ao número elevado de variáveis e restrições. Para torná-la mais rápida, o problema foi decomposto em duas fases.

Numa primeira fase a otimização foi feita com as variáveis que levavam em conta a lâmina mais baixa de irrigação, determinando-se a cultura e o sistema de preparo de solo a ser utilizado nos talhões do pivô, na pior situação de irrigação. Este resultado foi levado para uma segunda fase onde foi escolhida a lâmina ótima de irrigação, sujeita às restrições de disponibilidade de água, de exclusividade de ocupação dos talhões e às restrições para tornar as variáveis inteiras. Portanto, a solução da otimização da primeira fase tende a melhorar, uma vez que lâminas de irrigação maiores proporcionam maior possibilidade de retorno econômico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo formulado pelo método SWT foi resolvido várias vezes para cada valor restrito de degradação do solo. Um conjunto de pontos não inferiores foi gerado, definindo-se uma fronteira da região viável. Cada ponto estabelece um plano alternativo para valores específicos de receita líquida (RL) e de degradação do solo (D), como pode ser visto na Tabela 1. Para cada nível restrito de D, o modelo calculou a máxima receita líquida (Z) e o valor de D associado. Por exemplo, o nível restrito de D em 2450 UIA originou o valor máximo de Z de 4803,4 US\$.ha⁻¹ e o D associado de 2401,4 UIA.

Os pontos não inferiores, apresentados na última coluna da Tabela 1, foram plotados no gráfico da Figura 1. A curva resultante é chamada de curva de transformação (CT), porque representa uma troca entre os valores dos objetivos conforme se movimenta de um ponto para outro. Observa-se que D diminui a partir da origem do eixo X, mostrando que menores valores são preferidos. À medida que a restrição de D se torna mais rigorosa, seu valor calculado diminui, provocando uma redução de Z, até que se chegue a um limite mínimo viável. Neste trabalho, o limite mínimo considerado de D foi de 2401 UIA. Pontos abaixo de A, na CT, são inferiores, apesar de serem viáveis. Quando a restrição de degradação do solo é menos rigorosa, Z aumenta, até um valor máximo (ponto E da CT).



CURVA DE TRANSFORMAÇÃO DOS OBJETIVOS DE RECEITA LÍQUIDA E DE DEGRADAÇÃO DO SOLO

Figura 1

Considerando os valores extremos de D do conjunto de pontos não inferiores (Tabela 1), verifica-se que houve uma redução da qualidade ambiental de 22%. Isto permitiu um aumento da receita líquida de 13%, uma vez que Z aumentou de 4803,40 para 5498,69 US\$.ha⁻¹. Quando se relaciona desenvolvimento econômico e

qualidade ambiental, normalmente se estabelece uma situação de conflito. Esta situação foi verificada neste trabalho. Miller e Byers (1973) e Das e Haines (1979) também verificaram o mesmo comportamento, constatando que o benefício econômico diminuía com o aumento da qualidade ambiental.

O preço dual, mostrado na Tabela 1, é o valor associado à restrição de D. Ele indica a taxa na qual a função objetivo melhorará quando o lado direito da restrição é aumentado uma pequena quantidade. Neste caso, os preços duais foram zero, mostrando que um pequeno aumento no lado direito da restrição não causará efeito no valor da solução, nos pontos considerados. Isso mostra que, a princípio, todos os pontos poderiam ser escolhidos como ótimos. No entanto, a escolha da melhor solução é feita pela definição de uma função de valor substituto que representa a preferência do responsável pela decisão. Esta função representa o desejo das trocas entre os objetivos e seu cálculo é feito em função dos preços duais. Atribui-se uma escala de pontuação com valores positivos e negativos, sendo a solução ótima verificada no ponto em que as relações de troca façam com que as funções de valor substituto sejam iguais a zero ou qualquer outro valor que designe troca invariável (Haines e Hall, 1974).

Os preços duais indicam que, na vizinhança de cada ponto, não há variação marginal de Z com relação a uma pequena alteração de D. Mas no deslocamento de um ponto para outro a variação marginal existe. Para cada par de pontos não inferiores ocorre uma variação marginal associada ao deslocamento. Neste caso, uma comparação

pode ser feita entre a magnitude da variação marginal com a taxa marginal de substituição do decisor (Goicoechea et al., 1982).

A análise da troca entre objetivos (Figura 1) nos mostra que pontos selecionados sobre o segmento ED causam pouca mudança na receita líquida e uma diminuição na degradação do solo, quando realizado o deslocamento de E para D. Movendo-se de D para A, a degradação do solo é grandemente melhorada, mas a receita líquida é muito sacrificada. Como comentado anteriormente, a alternativa ótima deve ser selecionada de acordo com a preferência do decisor, então, uma decisão voltada para o lado do benefício econômico selecionaria um plano na vizinhança do ponto D. E uma decisão voltada para a preservação ambiental, selecionaria um plano localizado entre D e A.

Supondo que a solução preferida seja a do ponto D da CT (Figura 1), deduz-se, portanto, que o sistema de rotação de culturas, o sistema de preparo de solo e o manejo da irrigação utilizado, é aquele apresentado na Tabela 2. Por exemplo, no talhão 1 (ano de 1995) seria cultivado milho em plantio direto na época de P/V, seguido da crotalária, e tomate em preparo convencional do solo na época de O/I. As lâminas de irrigação usadas seriam as do segmento S0 (283,8 mm) para o milho e S0 (283 mm) para o tomate. A receita líquida obtida seria de 5483,06 US\$.ha⁻¹ e a degradação do solo de 2904 UIA.

No talhão 2 (ano de 1995) a soja seria cultivada, em plantio direto, com a lâmina S0 (0 mm), na época de P/V, depois da aveia preta. E o sorgo seria cultivado, em plantio direto, com a lâmina S0 (255,1 mm), na época de O/I. Nos demais talhões é seguido o

mesmo procedimento. Nos anos posteriores o sistema seria implantado de forma sucessiva, de modo que as culturas cultivadas no talhão 1 passariam a ser cultivadas no talhão 2, e assim por diante até o fechamento do período.

O método da PM forneceu uma solução que foi o resultado da minimização da soma dos desvios das funções objetivo das metas de lucro e ambiental. Três níveis das metas foram considerados para a resolução do problema. Os valores das metas, os desvios, a função objetivo e os valores reais das metas que o modelo calculou, estão apresentados na Tabela 3.

A pretensão de se atingir uma receita de pelo menos 5000 US\$.ha⁻¹ e de manter os níveis de D em menos de 2700 UIA, resultou em um desvio acima da meta restrita de degradação do solo ($d_2^+ = 204$). Os desvios da restrição de lucro foram zero e a função objetivo (Z), minimizada, atingiu valor de 204. Se todos os desvios fossem zero, os valores iniciais das metas pretendidas pelo decisor, seriam atendidos completamente. Esta solução mostrou que a meta de lucro foi plenamente atingida, apresentando um valor calculado de 5000 US\$.ha⁻¹. Enquanto que, a meta ambiental não foi atendida, apresentando um valor calculado de 2904 UIA. Interpretação idêntica a comentada anteriormente pode ser repetida para as outras soluções da Tabela 3.

O decisor pode participar interativamente no alcance da melhor solução preferida, resolvendo o problema com diferentes níveis das metas. Goicoechea et al. (1982) e Ignizio (1981) disseram que este procedimento contribuiria para tornar o método mais eficaz, permitindo uma avaliação instantânea do efeito das mudanças nos parâmetros do modelo, podendo ser reformulado a cada interação e suas soluções comparadas.

Este processo foi aplicado no problema para se alcançar uma alternativa de solução próxima à admitida como ótima no método SWT. A Tabela 4 resume os resultados a que se chegou, apresentando as variáveis de decisão, os valores iniciais das metas e os calculados pelo modelo, a cada interação. Nota-se que, mudanças nos níveis das metas alteraram as variáveis de decisão em cada solução, alterando os valores calculados pelo

modelo. A última interação (solução número 3) mostrou que, para valores iniciais de 5500 US\$.ha⁻¹ e 2800 UIA, o modelo calculou valores de 5483 US\$.ha⁻¹ e 2904 UIA, respectivamente. O esquema de rotação a ser utilizado para esta solução é o apresentado na Tabela 5. Os sistemas de rotação e de preparo de solo, o uso dos adubos verdes e as lâminas de irrigação, são os mesmos encontrados no método SWT.

PONTOS NÃO INFERIORES E VARIÁVEIS DE DECISÃO DO PROBLEMA

Tabela 1

Nº Passo:	Variáveis de decisão ¹ :								D ≤ B (UIA):	Z (US\$.ha ⁻¹):	Preço Dual:	Ponto na CT:
1	X ₂₂₁	X ₁₂₂	X ₁₂₃	X ₁₂₄	X ₄₂₁	X ₅₂₂	X ₅₂₃	X ₅₂₄	2450 (2401) ²	4803,40	0	A
2	X ₂₂₁	X ₁₂₂	X ₁₂₃	X ₁₂₄	X ₄₂₁	X ₅₁₂	X ₅₂₃	X ₅₂₄	2600 (2569)	5029,78	0	B
3	X ₁₂₁	X ₂₂₂	X ₁₂₃	X ₁₂₄	X ₅₁₁	X ₄₂₂	X ₅₁₃	X ₅₂₄	2750 (2736)	5256,42	0	C
4	X ₁₂₁	X ₂₂₂	X ₁₂₃	X ₁₂₄	X ₅₁₁	X ₄₂₂	X ₅₁₃	X ₅₁₄	3050 (2904)	5483,06	0	D
5	X ₁₂₁	X ₂₁₂	X ₁₂₃	X ₁₂₄	X ₅₁₁	X ₄₂₂	X ₅₁₃	X ₅₁₄	3200 (3073)	5498,69	0	E

1- Os índices das variáveis indicam: 1º) cultura; 2º) sistema de preparo do solo; 3º) talhão do pivô e 4º) lâmina de irrigação.

2 - Valores entre parênteses indicam os valores de D calculados para níveis restritos de B, que combinados com os Z, dar os pontos na curva de transformação (CT).

SISTEMA DE ROTAÇÃO DE CULTURAS (QUATRO ANOS), CONSIDERANDO DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO, VARIEDADES DE ADUBOS VERDES E LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO, NO MÉTODO SWT

Tabela 2

Talhão Nº:	Ano:							
	1995		1996		1997		1998	
	P/V	O/I	P/V	O/I	P/V	O/I	P/V	O/I
1	MLPDO+Cr	TMPCO	MLPDO+Cr	TMPCO	MLPDO+Cr	TMPCO	Av+SJPDO	SGPDO
2	Av+SJPDO	SGPDO	MLPDO+Cr	TMPCO	MLPDO+Cr	TMPCO	MLPDO+Cr	TMPCO
3	MLPDO+Cr	TMPCO	Av+SJPDO	SGPDO	MLPDO+Cr	TMPCO	MLPDO+Cr	TMPCO
4	MLPDO+Cr	TMPCO	MLPDO+Cr	TMPCO	Av+SJPDO	SGPDO	MLPDO+Cr	TMPCO

P/V - época de cultivo de primavera-verão; O/I - época de cultivo de outono-inverno

PD = sistema de preparo do solo em plantio direto; PC = preparo convencional do solo

Av = aveia preta; Cr = crotalária; Mp = mucuna preta; ML = milho; SJ = soja; SG = sorgo; TM = tomate
lâmina de irrigação no segmento 0 = ML (283,8 mm), SJ (0 mm), TM (283 mm) e SG (255,1 mm)

EFEITO DA MUDANÇA DOS NÍVEIS DAS METAS NA SOLUÇÃO DO PROBLEMA NO MÉTODO DA PM

Tabela 3

Nº da Solução:	Níveis das metas:		Desvios:				F. O. Z	Valores calculados das metas:	
	RL (US\$.ha ⁻¹)	D (UIA)	d ₁ ⁺	d ₁ ⁻	d ₂ ⁺	d ₂ ⁻		RL (US\$.ha ⁻¹)	D (UIA)
1	5000	2700	0	0,0	204,0	0	204,0	5000	2904
2	5400	2900	0	0,0	3,9	0	3,9	5400	2904
3	5500	2800	0	16,9	104,0	0	121	5483	2904

NÍVEIS INICIAIS DAS METAS, OS CALCULADOS PELO MODELO E AS VARIÁVEIS DE DECISÃO DO PROBLEMA

Tabela 4

Nº da Solução:	níveis das metas:		variáveis de decisão:								valores calculados da metas:	
	RL (US\$/ha)	D (UIA)	X ₂₂₁₀	X ₁₂₂₃	X ₁₂₃₃	X ₁₂₄₀	X ₄₂₁₀	X ₅₁₂₀	X ₅₁₃₁	X ₅₁₄₁	RL (US\$/ha)	D (UIA)
1	5000	2700	X ₂₂₁₀	X ₁₂₂₃	X ₁₂₃₃	X ₁₂₄₀	X ₄₂₁₀	X ₅₁₂₀	X ₅₁₃₁	X ₅₁₄₁	5000	2904
2	5400	2900	X ₂₂₁₁	X ₁₂₂₂	X ₁₂₃₀	X ₁₂₄₀	X ₄₂₁₀	X ₅₁₂₀	X ₅₁₃₀	X ₅₁₄₀	5400	2904
3	5500	2800	X ₂₂₁₀	X ₁₂₂₀	X ₁₂₃₀	X ₁₂₄₀	X ₄₂₁₀	X ₅₁₂₀	X ₅₁₃₀	X ₅₁₄₀	5483,06	2904

SISTEMA DE ROTAÇÃO DE CULTURAS (QUATRO ANOS), CONSIDERANDO DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO, VARIEDADES DE ADUBOS VERDES E LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO, NO MÉTODO PM

Tabela 5

Talhão Nº:	Ano:							
	1995		1996		1997		1998	
	P/V	O/I	P/V	O/I	P/V	O/I	P/V	O/I
1	Av+SJPD0	SGPD0	MLPD0+Cr	TMPC0	MLPD0+Cr	TMPC0	MLPD0+Cr	TMPC0
2	MLPD0+Cr	TMPC0	Av+SJPD0	SGPD0	MLPD0+Cr	TMPC0	MLPD0+Cr	TMPC0
3	MLPD0+Cr	TMPC0	MLPD0+Cr	TMPC0	Av+SJPD0	SGPD0	MLPD0+Cr	TMPC0
4	MLPD0+Cr	TMPC0	MLPD0+Cr	TMPC0	MLPD0+Cr	TMPC0	Av+SJPD0	SGPD0

P/V - época de cultivo de primavera-verão; O/I - época de cultivo de outono-inverno
 PD = sistema de preparo do solo em plantio direto; PC = preparo convencional do solo
 Av = aveia preta; Cr = crotalária; Mp = mucuna preta; ML = milho; SJ = soja; SG = sorgo; TM = tomate
 lâmina de irrigação no segmento 0 = ML (283,8 mm), SJ (0 mm), TM (283 mm) e SG (255,1 mm).

Como foi visto, as variáveis selecionadas pelo processo analítico dos modelos, influenciam o esquema de ocupação e movimentação do solo, determina a lâmina de irrigação a ser aplicada às culturas e, ainda, definem os níveis ótimos dos objetivos, determinados pelo decisor. Vários pesquisadores têm colocado a rotação de culturas como uma das práticas que mais contribuem para o desenvolvimento e a estabilidade da agricultura, devido aos benefícios que ela propicia. Seu uso promove aumento da produtividade e do retorno econômico a longo prazo, trazendo resultados compensadores aos produtores e ao meio ambiente (Sorenson e Montoya, 1989; Bertoni e Lombardi Neto, 1990; Veiga Filho et al., 1992; BARCELOS e NOVAIS, 1995).

O sistema de avaliação ambiental usado reuniu, em um único valor, as informações referentes à degradação do solo de que se dispunha para as condições locais de estudo. Este procedimento simplificou o processo de resolução dos modelos uma vez que apenas uma restrição foi suficiente para quantificar a degradação do solo. Método parecido foi utilizado por Miller e Byers (1973) que resumiram a mudança na qualidade ambiental em uma função de troca composta, que agrega várias características ambientais examinadas na seleção de planos de desenvolvimento de uma bacia.

O ambiente seria completamente representado no modelo matemático se todos os componentes ambientais fossem considerados no processo de degradação. Alguns efeitos ambientais, conseqüentes das atividades de rotação de culturas e da lâmina de irrigação, não foram incluídos devido a falta de informações, impedindo a representação quantitativa da influência dessas atividades na análise do problema. Entretanto, acreditou-se que o sistema de avaliação ambiental, empregado neste trabalho, foi suficiente para representar de forma clara, simples e realista as conseqüências ambientais causadas pelo uso do solo.

Do ponto de vista ambiental o PD sempre seria a opção de preparo de solo a ser escolhida, pois é a que causa menos impacto em todas as culturas envolvidas. Isto ocorre porque este sistema favorece a preservação das condições estruturais do perfil do solo e a manutenção de sua umidade por maior tempo, segundo comentado por Sidiras et al. (1983), Vieira e Muzilli (1984), Castro et al. (1987), Hill (1990), Tognon (1991), Muzilli (1994) e Henklain e Casão Jr. (1994).

Contudo, apesar deste sistema contribuir para o aumento de produtividade, nas culturas da soja, do feijão e do tomate, o custo do PD é elevado devido ao uso intenso de herbicida. Outro aspecto é que nas culturas do milho e do sorgo a exigência de nitrogênio e a dificuldade no controle de invasoras são maiores no PD que no PC, fazendo com que suas produtividades fossem menores (Henklain e Casão Jr., 1994). Estes fatores não permitiram que o PD fosse sempre escolhido como opção na definição das variáveis, para se atingir os melhores níveis de receita líquida e de degradação do solo. Os adubos verdes, indicados para ser plantados nos períodos de entressafra, contribuem para minimizar os efeitos causadores da degradação do solo, além de aumentar o teor de matéria orgânica no solo. Sua influência na seleção das variáveis de decisão é inócua, serve apenas como medida complementar de proteção do solo.

A restrição de disponibilidade de água, em cada época de cultivo, exige que a quantidade de água necessária para irrigação seja menor ou igual à disponibilidade máxima. Na Tabela 6 observa-se as lâminas de irrigação usadas em um ano de cultivo, para cada solução obtida pelos modelos (SWT e PM). Na época de P/V, para uma disponibilidade de água de 3530 mm.ha, o consumo máximo de água de água foi de 851,5 mm.ha. Na época de O/I, para uma disponibilidade de 1869

mm.ha, o máximo consumido foi de 1104,2 mm.ha. A disponibilidade de água, nas duas épocas de cultivo, não foi limitante para a obtenção dos objetivos.

As variáveis de decisão foram calculadas para atender aos níveis estabelecidos dos objetivos, respeitando as restrições impostas ao problema. Se comparamos a solução referente aos objetivos de $RL = 5000 \text{ US}\$.ha^{-1}$ e $D = 2904 \text{ UIA}$ com a dos objetivos de se obter a $RL = 5483,06 \text{ US}\$.ha^{-1}$ e $D = 2904 \text{ UIA}$, verifica-se que o consumo de água na primeira solução foi menor (728,6 e 1084,8 mm.ha nas épocas de P/V e O/I, respectivamente), porque não foi necessário aumentar a quantidade de água para elevar a produtividade e, conseqüentemente, a receita líquida. Isso mostra que, para os modelos, a lâmina que melhor atende aos objetivos não necessariamente é a maior. A lâmina ótima é aquela que melhor relaciona o valor marginal do produto com o preço da água, conforme comentado por Kumar e Khepar (1980), Neves et al. (1984), Bosch et al. (1987), Bernardo et al. (1988), Martin et al. (1989), English (1990), Mannocchi e Mecarelli (1994) e Dantas Neto (1994).

Os resultados discutidos anteriormente mostram que os modelos, formulados para os dois métodos analíticos, obtiveram o mesmo esquema de rotação de culturas, preparo de solo e manejo da irrigação, para uma determinada solução preferida do decisor. Isto demonstra uma coerência dos resultados, podendo-se dizer que o processo de modelação matemática usado foi confiável para a solução do problema multiobjetivo em questão.

A programação linear inteira, utilizada como instrumento de análise matemática, se mostrou apropriada para resolver o problema, porque selecionou opções em que as variáveis de decisão existiram ou não. Esta técnica têm sido muito empregada na solução de vários problemas de otimização de objetivo único (Trava et al., 1977 e Anderson et al., 1985),

como também de problemas multiobjetivo (Miller e Byers, 1973), se constituindo numa ferramenta de grande utilidade na modelação matemática de problemas reais, se aplicada de forma adequada.

Na PL inteira, o número elevado de variáveis de um problema que tenha uma estrutura complexa, torna sua resolução difícil e até mesmo impossível para a maioria dos softwares existentes. Tsai et al. (1987) desistiram de usar esta técnica na otimização de um sistema de cultivo múltiplo irrigado devido a este inconveniente. A formulação desenvolvida neste trabalho, apresentou, em sua forma original, um número muito grande de variáveis (160 e 164 para os métodos SWT e PM) e de restrições (871 e 876 para os métodos SWT e PM), o que tornou a resolução dos modelos muito lenta. A decomposição em duas fases permitiu que se reduzisse sensivelmente o esforço computacional, proporcionando a obtenção da solução em um tempo de processamento bem mais rápido nos dois modelos analisados. A decomposição contribuiu para que se melhorasse o desempenho dos modelos formulados.

O problema só pôde ser decomposto devido à existência de relações independentes entre a degradação do solo e as lâminas de irrigação, e a ligação entre as funções objetivo nas duas fases. As lâminas de irrigação foram escolhidas, em uma 2ª fase, depois que as variáveis referentes à rotação de culturas, preparo de solo e talhão do pivô foram selecionadas com a restrição de degradação do solo. O resultado da otimização feita na 1ª fase serviu de base para a solução da segunda. A solução do problema resolvido pela forma original é idêntica à encontrada pela forma decomposta, com a vantagem de se reduzir enormemente o esforço computacional.

Nota-se que muitos engenheiros não costumam usar técnicas de programação matemática na solução de problemas práticos. Isto talvez se deva a inabilidade para a modelação ou

CONSUMO DE ÁGUA, ESTIMADO PELOS MODELOS, PARA O CULTIVO DE UM HECTARE, CONSIDERANDO A DISPONIBILIDADE DE ÁGUA DE 3530 E 1869 MM.HA NAS ÉPOCAS DE P/V E O/I, RESPECTIVAMENTE **Tabela 6**

Variáveis de decisão:	Lâminas (mm.ha): P/V O/I	RL (US\$.ha ⁻¹):	D (UIA):
———— método SWT ————			
$X_{2210} X_{1220} X_{1230} X_{1240} X_{4210} X_{5220} X_{5230} X_{5240}$	851,5 1104,2	4803,14	2401
$X_{2210} X_{1220} X_{1230} X_{1240} X_{4210} X_{5120} X_{5230} X_{5240}$	851,5 1104,2	5029,78	2569
$X_{1210} X_{2220} X_{1230} X_{1240} X_{5110} X_{4220} X_{5130} X_{5240}$	851,5 1104,2	5256,42	2736
$X_{1210} X_{2220} X_{1230} X_{1240} X_{5110} X_{4220} X_{5130} X_{5140}$	851,5 1104,2	5483,06	2904
$X_{1210} X_{2120} X_{1230} X_{1240} X_{5110} X_{4220} X_{5130} X_{5140}$	851,5 1104,2	5498,69	3073
———— método PM ————			
$X_{2210} X_{1223} X_{1233} X_{1240} X_{4210} X_{5120} X_{5131} X_{5141}$	728,6 1084,8	5000,00	2904
$X_{2211} X_{1222} X_{1230} X_{1240} X_{4210} X_{5120} X_{5130} X_{5140}$	820,8 1104,2	5400,00	2904
$X_{2210} X_{1220} X_{1230} X_{1240} X_{4210} X_{5120} X_{5130} X_{5140}$	851,5 1104,2	5483,06	2904

ao desconhecimento de tais técnicas. Mas com certeza, um dos fatores limitantes da difusão do uso das técnicas de pesquisa operacional no dia-a-dia, é a indisponibilidade de softwares específicos que permita a solução dos problemas. Neste trabalho, usou-se o software "Excel 5.0 para Windows" para se obter as soluções discutidas. A aplicação deste software contribui para facilitar o processo de otimização pois alia a versatilidade de cálculo automático, característica das planilhas eletrônicas, com a possibilidade de uso da ferramenta de otimização do software, o solver. Na planilha, os cálculos para obtenção dos coeficientes das variáveis, na função objetivo e nas restrições, podem ser feitos com rapidez e facilidade.

Numa avaliação comparativa dos métodos, pôde-se notar que o uso do método SWT forneceu um número de informações suficientes para mostrar ao decisor as melhores alternativas possíveis, assim como, o impacto que cada uma delas provoca na realização dos objetivos. Isto assume grande

importância na tomada de decisão quando o decisor não conhece, qualitativa e quantitativamente, os fatores que comandam as relações de troca entre os objetivos. No entanto, a obtenção dos pontos não inferiores requer um grande número de resoluções do problema, o que resulta em um tempo de processamento elevado. Neste trabalho, o problema foi resolvido 10 vezes para se obter os pontos não inferiores, considerando o problema decomposto em duas fases.

O método PM forneceu uma única solução para cada nível das metas preestabelecidas, que foi o resultado da melhor negociação entre os desvios das metas. Devido ao fato de terem sido necessárias 2 resoluções do problema decomposto, para se obter uma solução final, este método apresentou uma eficiência computacional maior (menor tempo de processamento). Cohon e Marks (1975) e Goicoechea et al. (1982) constataram as mesmas diferenças entre os dois métodos, quando eles foram avaliados como técnicas

empregadas para tomada de decisão em problemas multiobjetivo.

Ao se optar por uma participação interativa do decisor, a vantagem da eficiência computacional do método PM se reduz ou se anula, pois o problema terá de ser resolvido para diferentes níveis das metas, conforme a preferência do decisor, o que aumenta o tempo de processamento computacional. A eficácia do método PM depende do entendimento de como as alterações nas metas afetam a obtenção das alternativas viáveis. Se o decisor desconhecer a intensidade das relações de troca entre os objetivos, a solução obtida pode ser inferior ou um grande número de interações será necessário até se obter alternativas viáveis.

Neste estudo, aplicou-se mais de um método para verificar qual deles era mais apropriado conforme HOBBS et al. (1992). Na região viável do espaço de decisão, definida para o método PM (Tabela 4), 2 pontos são menores que o ponto D, calculado pelo método SWT (Tabela 1). Este resultado não afetou significativamente as variáveis de decisão do problema, ocorrendo apenas pequenas alterações na lâmina de irrigação das culturas. Valores idênticos dos objetivos, calculados pelos dois métodos, resultaram nas mesmas variáveis de decisão. Concluiu-se que os métodos utilizados são adequados para resolver o problema multiobjetivo apresentado, devendo-se ter o cuidado de observar as peculiaridades inerentes a cada método.

A estrutura de cálculo desenvolvida permitiu otimizar o processo de produção agrícola, maximizando sua RL e minimizando o impacto adverso sobre o ambiente, pelo uso de práticas de manejo do solo e da água. Esse conjunto de ações, reunidas e analisadas em um modelo matemático, contribui para promover o desenvolvimento agrícola sustentado, que se fundamenta na diversificação e interação de suas atividades. O uso eficiente e apropriado de

tecnologias na produção agrícola, são condições essenciais para assegurar a produtividade e conduzir à estabilidade ecológica, garantindo a satisfação continuada das necessidades humanas (Maalouf, s.d.; Verma, 1986; Smith, 1992; e Dulley e Miyasaka, 1994).

Neste trabalho, o problema de otimização da produção agrícola foi tratado de forma mais ampla, procurando alternativas que atendam ao conceito de sustentabilidade da produção. Os modelos propostos prevêem o uso de práticas de rotação de culturas e de preparo de solo, sob cultivo irrigado, importantes para a preservação dos recursos naturais. Não se tem encontrado trabalhos que tratem do mesmo tema no planejamento otimizado da produção agrícola, apesar da crescente importância da preservação ambiental em todas as áreas de desenvolvimento.

CONCLUSÕES

Os modelos de análise multiobjetivo, desenvolvidos para maximizar a receita líquida (RL) e minimizar a degradação do solo (D), de um sistema de rotação de culturas irrigado, permitiram a obtenção de soluções para o problema. Com base nos resultados apresentados e discutidos, chegou-se a algumas conclusões:

- (i) A solução obtida pelo método SWT, apresentou um conjunto de pontos não inferiores, que formam uma curva de transformação, onde podem se estabelecer trocas entre os objetivos. Nesta curva, a RL obtida diminuiu à medida que se restringiu D a valores cada vez menores, até um valor mínimo possível (2401 UIA). Este valor permitiu um ganho líquido de 4803,40 US\$.ha⁻¹, enquanto que um

valor maior de D (3073 UIA) permitiu obter uma RL = 5498,69 US\$.ha⁻¹. A solução ótima dependerá da preferência do responsável pela decisão.

- (ii) O método PM forneceu uma única solução, que foi o resultado da melhor negociação entre todos os desvios das metas pretendidas. Para a meta de atingir uma RL de pelo menos 5500,00 US\$.ha⁻¹ e de manter o nível de D em menos de 2800 UIA, o modelo encontrou uma solução final de 5483,00 US\$.ha⁻¹ e 2904 UIA. Esta solução resultou em um esquema idêntico de rotação de culturas, preparo de solo e manejo da irrigação que o obtido no método SWT. Isto demonstra que o processo de modelação matemática, desenvolvido para os dois métodos, foi confiável e adequado para a obtenção da solução do problema.
- (iii) A resolução do problema pelo software "Excel 5.0 para Windows" contribuiu para facilitar o processo de otimização, tornando acessível a aplicação de técnicas de pesquisa operacional na análise de problemas reais.
- (iv) A decomposição do problema em duas fases diminuiu sensivelmente o esforço computacional nos dois métodos, melhorando o desempenho dos modelos. O tempo de processamento, em cada resolução, foi relativamente curto, mostrando uma eficiência computacional satisfatória.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, C.; ROCHESTER, W.; HARDY JR., W.E. Position selection of center pivot irrigation systems using linear programming. *Transactions of ASEA*, v.28, n.5, p.1551-6, 1985.
- BARCELOS, C.; NOVAES, L. Agricultura diversificada para aumentar lucro, *Folha de São Paulo*, São Paulo, Caderno Agrofólia, 18 abril 1995. p.4.
- BERNARDO, D.J. et al. Irrigation optimization under limited water supply. *Transactions of ASEA*, v. 31, n. 3, p. 712-9, 1988.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. São Paulo. São Paulo, Ed. Ícone, 1990. 355p.
- BOSCH, D.J.; EIDMAN, V.R.; OOSTHUIZEN, L.K. A review of methods for evaluating the economic efficiency of irrigation. *Agriculture Water Management*, v. 12, p. 231-45, 1987.
- BRAGA, B.P.F. Técnicas de otimização e simulação aplicada em sistemas de recursos hídricos. In: *MODELOS para gerenciamento de recursos hídricos*. São Paulo, Nobel-ABRH, 1987. Cap. 5.
- CASTRO, O.M. et al. *Caracterização química e física de dois Latossolos em plantio direto e convencional*. Campinas, IAC, 1987. 23p. (Boletim Científico. Instituto Agrônomo, 11)
- COHON, J.L.; MARKS, D.H. Multiobjective screening models and water resource investment. *Water Resources Research*, v. 9, n. 4, p. 826-36, 1973.
- COHON, J.L.; MARKS, D.H. A review and evaluation of multiobjective programming techniques. *Water Resources Research*, v. 11, n. 2, p. 208-20, 1975.
- DANTAS NETO, J. *Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo, em áreas irrigadas, baseadas nas funções de resposta das culturas à água*. Botucatu - UNESP, 1994. 125p. Tese (Doutorado), Faculdade de Ciências Agrônomicas do Campus de Botucatu, UNESP, 1994.
- DAS, P.; HAIMES, Y.Y. Multiobjective optimization in water quality and land management. *Water Resources Research*, v. 15, n. 6, p. 1313-22, 1979.

- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. *Yield response to water*. Roma, FAO, 1986. 194p. (Irrigation and drainage paper, 33).
- DULLEY, R.D.; MIYASAKAI, S. Agricultura sustentável e prioridades aos insumos agrícolas internos. *Informações Econômicas*, São Paulo, v.24, n.11, p. 28-33, 1994.
- ENGLISH, M.J. Deficit irrigation: analitical framework. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v. 116, p. 399-412, 1990.
- GOICOECHEA, A.; HANSEN, D.R.; DUCKSTEIN, L. *Multiobjective decision analysis with engineering and business applications*. New York, John Wiley & Sons, 1982.
- HAIMES, Y.Y.; HALL, W.A. Multiobjective in water resource systems analysis: the surrogate worth trade off method. *Water Resources Research*, v. 10, n. 4, p. 615-24, 1974.
- HENKLAIN, J.C.; CASÃO JÚNIOR, R. Preparo do solo. In: *MANUAL técnico do subprograma de manejo e conservação do solo*. 2.ed. Curitiba, IAPAR, 1994. p.130-57.
- HILL, R.L. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. *Soil Science Society American Journal*, v. 54, p. 161-6, 1990.
- HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. *Introdução à pesquisa operacional*. São Paulo, EDUSP, 1988. 805p.
- HOBBS, B.F.; CHANKONG, V.; HAMADEH, W. Does choice of multicriteria method matter? An experiment in water resources planning. *Water Resources Research*, v. 28, n. 7, p. 1767-79, 1992.
- HORIUCHI, K; SUGAI, Y.; SCOLARI, D.D.G. Programação de múltiplos objetivos (PMO) e sua aplicação à administração rural. *Revista de Economia Rural*, v. 20, n. 2, p. 213-26, 1982.
- IGNIZIO, J.P. The determination of a subset of efficient solutions via goal programming. *Computers and Operations Research*, v. 8, p. 9-16, 1981.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Acompanhamento econômico das lavouras sob regime de monitoramento e aconselhamento de irrigação no município de Guaíra, SP*. São Paulo, 1990. v. 1. (Relatório IPT/SCTDE - nº 28 419/90).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Racionalização do uso da água de irrigação nos municípios de Guaíra e Casa Branca, SP*. São Paulo, 1991. v. 1. (Relatório IPT/DAEE - nº 30 254/91).
- KUMAR, R.; KHEPAR, S.D. Decision models for optimal cropping patterns in irrigations based on crop water production functions. *Agriculture Water Management*, Amsterdam, v. 3, p. 65-76, 1980.
- MAALOUF, W. *Recursos humanos e desenvolvimento agrícola sustentado*. s.l., Fundação Salim Farah Maluf, s.d. 47p.
- MANNOCCHI, F.; MECARELLI, P. Optimization analysis of deficit irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 120, n. 3, p. 484-503, 1994.
- MARTIN, D.L.; GILLEY, J.R.; SUPALLA, R.J. Evaluation of irrigation planning decisions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 115, n. 1, p. 58-77, 1989.
- MATANGA, G.B.; MARIÑO, M.A. Irrigation planning 1. Cropping pattern. *Water Resources Research*, v. 15, n. 3, p. 672-8, 1979.
- MÉLLO JR., A.V. *Otimização multiobjetivo de um sistema de rotação de culturas sob irrigação*. São Paulo, 1996. 153p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo
- MILLER, W.L.; BYERS, D.M. Development and display of multiple-objective project impacts. *Water Resources Research*, v. 9, n. 1, p. 11-20, 1973.
- MUZILLI, O. Plantio direto no Brasil. In: Fancelli, A.L., coord. *Atualização em plantio direto*. Campinas, Fundação Cargill, 1985. p. 3-16.
- MUZILLI, O. Plantio direto como alternativa no manejo e conservação do solo. In: *MANUAL técnico do subprograma de manejo e conservação do solo*. 2. ed. Curitiba, IAPAR, 1994. p.158-77.
- NEVES, E.M.; GRAÇA, R.L.; McCARL, B. Programação matemática aplicada a dados experimentais no Brasil: problemas atuais, limitações e sugestões. In: CONTINI, E. et al. *Planejamento da propriedade agrícola*, modelos de decisão. Brasília, EMBRAPA, 1984. p. 101-109.
- PAVAN, M.A.; BINGHAN, F.T.; PRATT, P.F. Chemical and mineralogical characteristics of select acid

soils of the State of Paraná, Brazil. *Turrialba*, v.35, n.2, p.131-9, 1985.

- SIDIRAS, N.; DERPCH, R.; MONDONARDO, A. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo na variação da umidade e rendimento da soja, em latossolo roxo distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, Campinas, v. 7, p. 103-06, 1983.
- SMITH, N.J.H. Strategies for sustainable agriculture in the tropics. *Ecological Economics*, Amsterdam, v.2,p.311-23, 1990.
- SORRENSON, W.J.; MONTOYA, L.J. Implicações econômicas da evasão do solo e do uso de algumas práticas conservacionistas no Paraná. Londrina, IAPAR, 1989. (Boletim técnico, 21).
- TOGNON, A.A. *Propriedades físico-hídricas do latossolo roxo da Região de Gualra - S.P. sob diferentes sistemas de cultivo*. Piracicaba, 1991. 67p. Dissertação (mestrado), ESALQ, USP.
- TRAVA, J.; HEERMAN, D.F.; LABADIE, J.W. Optimal on-farm allocation of irrigation water. *Transactions of ASEA*, v. 20, n. 1, p. 85-8, 1977.
- TSAI, Y.J.; JONES, J.W.; MISHOE, J.W. Optimizing multiple cropping systems: a systems approach. *Transactions of ASEA*, v. 30, n. 6, p. 1554-61, 1987.
- VEIGA FILHO, A.A. et al. Análise de investimento em adoção de tecnologias e conservação do solo no Estado de São Paulo. *Agricultura em São Paulo*, v.39, n.1, p.133-54, 1992.
- VERMA, R.D. Environmental impacts of irrigation projects. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.112, n.4, p.322-30, 1986.
- VIERA, M.J. Embasamento técnico do sub-programa de manejo e conservação do solo. Paraná Rural. In: *MANUAL técnico do subprograma de manejo e conservação do solo*. 2. ed. Curitiba, IAPAR, 1994. p.12-40.
- VIEIRA, M.J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 19, n. 7, p. 873-82, 1984.
- WINDSOR, J.S.; CHOW, V.T. Model for farm irrigation in humid areas. *Journal of Irrigation and Drainage Division*. v. 97(IR3), p. 369-85, 1971.

ABSTRACT

Multiobjective analysis applied to an agricultural production system.

The objective of this study is to develop a calculation structure to optimize an irrigated crop rotation system, to maximize the net income and minimize the soil degradation in the agricultural production process. The analysed area was that of a center pivot, in Gualra, SP. Corn, bean, soybean, sorghum and tomato were the used cultures. The adopted soil mechanization practices was the conventional tillage and the direct seeding. The analytic instrument used was the interger linear programming. The constraints were water availability, crop rotation specification and its distribution in the pivot areas. The model was formulated to two multiobjective analysis methods. The obtained solution through the SWT method presented a group of non-inferior points where trade offs between the objectives could be settled. The PM method provided one only solution, as a result of a better negotiation between the intended goal deflection. The developed mathematical pattern was trustable and adequate, once that for the same objective values, the same crop rotation scheme, soil mechanization practice and irrigation management were obtained

Key words: Multiobjective optimization, agricultural production, irrigation, crop rotation.