

- Series Trend in The United States Average Farm Real Estate Value. tesis doctoral. Michigan State University, mimeo.
- REYDON, B.P. (1992) Mercados de Terras Agrícolas e determinantes de seus preços no Brasil: um estudo de casos. Tese de Doutorado. Instituto de Economia da UNICAMP. Campinas.
- REYNOLDS, J.E. e TIMMONS, J.F. (1969). Factores Affecting Farmland Values. United States. Research Bulletin 566. Agriculture And Home Economics Experiment Station Iowa State University. AMES, Iowa, feb. 1969.
- REZENDE, G. (1982) Crédito Rural Subsidiado e o Preço da Terra no Brasil. In: **Estudos Econômicos**. SP, IPE 12 (2) pp 117-138. agosto 1982.
- SAYAD, J. (1982) Especulação em terras rurais, efeitos sobre a produção agrícola e o novo ITR. In: **Pesquisa e Planejamento Econômico**. RJ. IPEA, 12 (1): 87-108, abril 1982.

T P 3 ECONOMIA DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA E AGROINDUSTRIAL

ELABORAÇÃO DE CRONOGRAMA DE COLHEITA DE LARANJA: UMA APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

José Vicente Caixeta Filho¹
Nicolau D. Fares Gualda²

A competitividade do setor cítrico brasileiro é função do controle de qualidade exercido sobre o processo de transformação do fruto em suco, a começar pela programação de colheita. Nesse sentido, é formulado modelo matemático, apoiado na teoria de programação linear, que relaciona as restrições químicas, biológicas e logísticas, pertinentes à questão da qualidade do fruto a ser colhido. Tal estrutura de modelagem foi verificada e validada com dados reais de safra, tendo sido observado que a grande dimensão das matrizes geradas não chega a ser uma limitação à eficiência de aplicativos atualmente disponíveis para plataformas computacionais de pequeno porte.

The competitiveness of the Brazilian citrus sector is function of the quality control over the transformation process of the fruit into juice, starting with the harvesting scheduling. In view of that, it is formulated a mathematical model, based on the theory of linear programming, which relates the pertinent chemical, biologic and logistic restrictions to the question of the quality of the fruit to be harvested. Such modeling structure was verified and validated with real data of a season, despite the large dimension of the matrix, which was not a limitation to the efficiency of the available software for microcomputers.

1 A CITRICULTURA E A QUESTÃO DA QUALIDADE

A importância da citricultura para o mundo, segundo a FAO (1991), fica evidente quando se observa que ao final da década de 80, entre as frutas, os citros ocuparam o primeiro lugar em termos de volume físico (68 milhões de toneladas), à frente das uvas de mesa e de vinho, com 61 milhões; bananas com 46 milhões e maçãs com 40 milhões de toneladas.

Em termos de valores monetários, segundo NEVES et al. (1992), as cifras alcançadas em 1990 pelo mercado mundial de citros giraram em torno de US\$ 6,5 bilhões, com o suco cítrico representando 45% deste total e 70% do valor do comércio mundial de sucos de frutas e hortaliças.

Com relação à participação do Brasil nesse mercado, o país vem ocupando posição de destaque, sendo o maior produtor e exportador de sucos cítricos do mundo desde 1982, com o setor cítrico sendo responsável por mais de US\$ 1 bilhão anuais da balança comercial brasileira, colocando-se sempre entre os cinco produtos mais importantes na pauta de exportações brasileiras provenientes do setor primário.

A base do setor cítrico brasileiro se concentra principalmente no Estado de São Paulo, o que pode ser confirmado quando se observa a participação marcante da

¹ Departamento de Economia e Sociologia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

² Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

citricultura paulista no cenário nacional. Ainda, levando-se em conta a liderança brasileira em termos de participação no mercado internacional de suco de laranja, NEVES et al. (1992) admitem que o Estado de São Paulo seja, em termos individuais, o maior produtor de laranja do mundo.

1.1 A programação da colheita de laranja

No caso da programação de colheita de laranja, a importância da atividade justifica plenamente a utilização de mecanismos de controle de qualidade. Segundo STEGER (1990), o citricultor é um dos principais responsáveis pela qualidade do fruto, através, por exemplo, da escolha correta das variedades, da adubação e dos tratamentos culturais e fitossanitários que contribuem para que os frutos apresentem características industriais desejáveis.

Entretanto, a colheita é também, se não principalmente, responsabilidade da indústria. O sistema de colheita pelas próprias indústrias, de acordo com MATA (1989), permite que os frutos sejam colhidos no ponto correto de maturação para a produção de suco de boa qualidade, o que seria muito difícil de se conseguir se cada um dos mais de 20.000 produtores do Estado de São Paulo colhessem a sua própria produção.

Por mais óbvio que seja este raciocínio, as indústrias mantêm um grande sigilo quanto ao *modus operandi* de seus mecanismos de programação de colheita. Mesmo a literatura, tanto nacional quanto internacional, é extremamente restrita quanto à documentação de estratégias ou ferramentas utilizadas pelas indústrias citrícolas em termos de programação de colheita.

Uma das justificativas para tal, tanto ao nível de mercado interno quanto externo, diz respeito à concorrência propriamente dita. A partir do momento em que citricultores brasileiros e americanos dispuserem de, no mínimo, condições climáticas ideais para despejarem no mercado toda a sua produção, a questão da qualidade do produto será fundamental para a conquista do mercado. Outra justificativa, mais específica ao caso brasileiro, dá conta do modelo vigente de remuneração ao citricultor.

1.2 Modelos de remuneração

Tomando-se as informações compiladas por BOCAIUVA et al. (1991), tem-se que o produtor vem sendo remunerado pela quantidade produzida, de acordo com a seguinte fórmula:

$$PC = (BNY - RPC) / TR \quad (1.1)$$

onde

PC = preço final da caixa de laranja;

BNY = média anual das cotações de suco de laranja na Bolsa de Nova York;

RPC = remuneração de produção industrial e comercialização, obtida a partir de planilha de custos fornecida pelas indústrias;

TR = taxa de rendimento, representando o número de caixas de laranja, de 40,8 kg, necessárias para a produção de uma tonelada de suco concentrado a 65° Brix³, fixada no início de cada safra, a partir de negociações entre produtores e indústria.

Portanto, o citricultor tem uma remuneração fixa, por caixa, independente de seu maior ou menor nível de eficiência. As desvantagens desse tipo de remuneração são várias. Entre elas:

a) o custo de colheita de uma caixa num pomar com produtividade igual a uma caixa por árvore é praticamente o dobro daquela colhida num pomar de três caixas por árvore (DI GIORGI, 1991). O contrato penaliza, portanto, o eficiente, o mais produtivo, uma vez que quanto maior o rendimento, menor a quantidade de caixas necessárias para a fabricação de uma tonelada de suco concentrado (MATA, 1989). Não há prêmios aqueles que têm pomares com rendimentos mais elevados, graças ao melhor uso de técnicas de produção (porta-enxertos, copas selecionadas, etc.).

b) o frete entre o pomar e a fábrica, assumido pela indústria, varia segundo a distância, chegando a ser 2,5 vezes maior quando se compara o custo unitário do frete de um pomar a 50 km da fábrica com outro a 200 km (DI GIORGI, 1991). O contrato atual e omisso em relação à distância e, da mesma forma, penaliza alguns, beneficiando outros.

c) de acordo com BOCAIUVA et al. (1991), o advento de contratos de 2 e 3 anos faz com que as indústrias cítricas congelem até 1994 os atuais valores de custos industriais e de comercialização, que se encontram em seus níveis mais altos. Portanto, mesmo que as indústrias continuem a perseguir a minimização de seus custos, o produtor que tenha assinado tais tipos de contrato não será beneficiado.

Entretanto, é sabido que a maioria das indústrias se utilizam de compradores (ou supervisores) que identificam (por amostragem e análise em laboratório ou inspeção visual) quais os pomares mais maduros (ou mais adequados) a serem colhidos em uma determinada época, em função de uma melhor qualidade de suco. Essa informação, assim como a sua manipulação, independente de seus graus de confiabilidade, não são de domínio público e muito menos são repassadas aos produtores.

1.3 Ponto de colheita

Para definir-se o ponto de colheita de um determinado pomar, as características de maturação do fruto devem ser analisadas. Segundo LOTT (1945), a maturação constitui o processo de desenvolvimento no qual os frutos atingem a maturidade, através do aumento da concentração de açúcares e diminuição da quantidade dos ácidos presentes no fruto⁴.

De acordo com MARCHI (1993), o aumento dos açúcares ocorre durante toda a fase de crescimento e maturação dos frutos, estando diretamente relacionado à intensidade do processo fotossintético e, por sua vez, à temperatura e à intensidade da luz.

³ Em cada kg de suco, 650 g de sólidos solúveis e 350 g de água.

⁴ Os açúcares representam mais de 70% dos sólidos solúveis existentes na laranja, sendo os ácidos orgânicos, principalmente o ácido cítrico, responsáveis por outros 10%.

Quanto aos ácidos, estes são formados durante o ciclo de Krebs, na mitocôndria das células do suco, sendo o ácido cítrico o primeiro a ser elaborado.

Dado que o ponto de colheita está diretamente ligado à maturidade do fruto, e por consequência à qualidade do fruto, uma série de índices explicatórios desse estado podem ser determinados. VIEGAS (1991) cita o índice *Ratio*, relação entre o teor percentual de sólidos solúveis no fruto (*Brix*) e o percentual de acidez titulável no suco da laranja; assim como o próprio *Brix*. MARCHI (1993) menciona também o *índice tecnológico* (kg de sólidos solúveis no suco a ser extraído de uma caixa de 40,8 kg de laranja), parâmetro utilizado pela indústria para expressar o rendimento da matéria prima.

HALPERN et al. (1988) confirmam também a constatação de que a maioria das variedades de citros têm uma época mais adequada de colheita, na qual o *Brix* é ótimo. Como consequência, os frutos colhidos no ponto ótimo de *Brix* oferecem maiores produtividades de suco concentrado. O principal resultado desse trabalho dá conta de que o acréscimo de *Brix* obtido, caso o fruto seja colhido no ponto ótimo de maturação (em comparação com o fruto colhido num estágio de maturação médio) gira em torno de 7 a 14%. Trata-se, portanto, de mais um indicativo de que a colheita de laranja para fins industriais deve ser programada em função dos pontos de maturação ótimos das diversas variedades de citros, o que beneficiaria às indústrias diretamente, e indiretamente os próprios produtores, que plantariam as variedades mais adequadas ao processamento.

Caso um modelo de remuneração baseado no *Brix* e/ou *Ratio* (e não mais em número de caixas necessárias para a produção de uma tonelada de suco) seja estabelecido para o Estado de São Paulo, o passo inicial deverá dizer respeito à padronização de procedimentos para a implantação e operacionalização de laboratórios, devidamente equipados para proceder a análise dos frutos retirados pelas próprias indústrias dos caminhões de transporte (CAMPANELLI et al., 1989).

Tal modelo de remuneração poderia trazer como consequências, por exemplo, uma diminuição da defasagem entre os desempenhos dos colhedores brasileiros e americanos, uma vez que esses últimos, de acordo com DI GIORGI (1991), vêm observando uma produtividade duas vezes maior, além de receber oito vezes mais que os brasileiros.

Facilitaria, ainda, a adoção de novas tecnologias de colheita. Em países mais desenvolvidos, tais como os Estados Unidos e Japão, em função da indústria vir se defrontando com a crescente aceleração dos custos de mão-de-obra, alternativas para uma maior eficiência na colheita dão conta da utilização de colhedoras mecânicas ou de soluções em termos de aplicação de robótica.

2 MODELAGEM DA PROGRAMAÇÃO DE COLHEITA

As aplicações de programação linear à colheita, documentadas nos últimos anos sobre casos brasileiros, que mais se aproximam à programação de colheita de laranja, são aquelas que dizem respeito ao gerenciamento de lavouras de cana-de-açúcar (GUALDA et al., 1991; BARATA, 1992) ou de florestas de *Eucalyptus* (TAUBE NETO, 1989).

Coincidentemente, tratam-se de segmentos agroindustriais que vêm observando contínuo avanço em termos de geração de divisas, tal como a laranja.

Podem ser verificadas uma série de similaridades entre tais aplicações, assim como entre as mesmas e uma eventual aplicação para programação de colheita de laranja. Tanto *Eucalyptus*, quanto cana-de-açúcar, quanto laranja, têm o seu ponto de colheita associado a um determinado estágio de crescimento e/ou maturação. No caso de florestas, os rendimentos florestais a serem alimentados à estrutura de modelagem pertinente serão função das curvas de crescimento representativas, tendo em vista a minimização dos custos envolvidos. No caso da cana-de-açúcar, BARATA (1992) se apóia na maximização da margem total de contribuição ao lucro, tendo em vista a produtividade em toneladas de cana por hectare plantado; já GUALDA et al. (1991) maximizam a produção de cana levando em consideração o teor de sacarose, estimado por curvas de maturação. Com relação à laranja, a situação vigente, e ainda não documentada na literatura, é a de maximização de produção de caixas de laranja, sem a princípio qualquer tratamento à questão da qualidade, a qual poderia ser modelada através da incorporação das características de *Brix* e de *Ratio*. Em termos de diferenças entre os produtos, além das evidentes, note-se que o ponto de colheita para a laranja não estará somente relacionado a critérios de qualidade, mas assim também à quantidade de frutos disponíveis na árvore. Não necessariamente será uma boa política atrasar-se a colheita de um determinado pomar, tendo-se em vista um ganho em termos de sólidos solúveis, se a queda de frutos a ser observada já inviabilizar aquele eventual benefício. Além disso, as restrições econômicas, operacionais, químicas, biológicas e logísticas são totalmente distintas para a laranja, uma vez que se trata de uma cultura muito mais vulnerável e sensível a intempéries, exigindo uma série de cuidados adicionais ao nível de tratamentos culturais e gerenciamento administrativo, se comparado com a cana-de-açúcar e com *Eucalyptus*.

Ao nível de estrutura matemática dos modelos citados, entretanto, alguns comentários merecem destaque. Primeiro, é a questão da definição da variável endógena de decisão, normalmente associada à área a ser colhida. Como as propriedades vêm sendo gerenciadas a partir da adoção de algum tipo de zoneamento das áreas agrícolas (talhões, ou lotes, ou qualquer outra terminologia análoga), o valor da solução para tal variável de decisão deverá levar em consideração a colheita ou não daquela unidade dentro de um determinado período de tempo ou, de uma forma genérica, tal variável de decisão deverá assumir características binárias, tipo 0-1. Tal unidade de manejo terá que efetivamente ser colhida, não fazendo sentido a opção de colheita de unicamente alguma de suas frações. Na pior das hipóteses, poderia se vislumbrar a colheita de frações da unidade, ao longo do ano, mas caracterizando a exploração da área total, o que a princípio não parece ser uma prática viável em termos logísticos (deslocamento constante de mão-de-obra e equipamentos, por exemplo), e por consequência, não recomendável economicamente. Assim sendo, tornar-se-ia interessante a utilização de programação inteira para a estrutura de modelagem a ser proposta, o que não foi realizado, e evitado, devido a limitações em termos de desempenho computacional, nas aplicações comentadas para *Eucalyptus* e cana-de-açúcar. Ainda, como as unidades classificadas dentro de um determinado padrão de zoneamento também levam em consideração aspectos de homogeneidade da cultura (por exemplo, a predominância de

uma determinada variedade), a programação de colheita poderá eventualmente oferecer não somente o cronograma de colheita por propriedade, mas também por variedade.

Outro aspecto é a questão de utilização de plataformas computacionais. As aplicações citadas se concentraram basicamente na utilização de computadores de grande porte, talvez pela sua disponibilidade na época de implementação dos respectivos modelos, e pelo fato daquelas máquinas serem mais eficientes no que se dissesse respeito ao tempo de processamento a ser dispendido. Hoje, com certeza, essa já não é necessariamente uma premissa verdadeira: os custos de processamento em máquinas de grande porte são altíssimos, o que já afasta o usuário não tão qualificado; além do mais, a indústria da informática já oferece não somente alternativas mais viáveis em termos de equipamentos, mas também ao nível de software com características de eficiência e convergência em processamento de problemas estruturados para programação linear, inteira ou não, assim como com características de flexibilidade à adaptação para computadores de portes e fabricantes distintos.

Nesse sentido, é proposta a formulação matemática necessária para a representação do problema em questão, passível de resolução por algoritmos de programação linear, e flexível de tal forma que se possa resolver o problema por programação linear contínua ou inteira, ou seja, podendo-se optar por colher um talhão totalmente em um único mês ou colhê-lo por partes, se isto for operacional e economicamente viável.

2.1 O modelo proposto

Até meados da década de 80, as alternativas disponíveis para resolver problemas de grande dimensão por programação linear diziam respeito a pacotes instalados em computadores de médio a grande porte, que observavam custos de processamento excessivamente elevados, o que em muitos casos não estimulava a utilização de tais ferramentas.

Com a compactação dos processadores de computadores, assim como com a diminuição dos custos operacionais envolvidos, alternativas de pacotes de programação linear começam a se tornar disponíveis para microcomputadores. Entretanto, a questão da explosão combinatória ainda era um impedimento para a popularização na utilização de pacotes de programação linear inteira, que em grande parte dos casos eram ferramentas distintas das de programação linear.

Próximo ao fim da década de 80, soluções para o aumento de memória em microcomputadores parecem contornar a questão da explosão combinatória, assim como linguagens de modelagem começam a ser desenvolvidas com o intuito de propiciar códigos que fossem comuns à utilização de ferramentas distintas de programação linear (inteira ou não), programação não-linear, etc.. SHARDA (1992) apresenta um estudo sobre as possibilidades existentes nesse sentido.

Em vista disso, foi selecionada uma dessas linguagens, no caso a GAMS (BROOKE et al., 1992), e sobre ela codificada a estrutura do modelo. GAMS - *General Algebraic Modeling System* - é uma tecnologia de modelagem que teve seu desenvolvimento

iniciado no fim da década de 80, através de equipe de economistas do Banco Mundial, com o objetivo de possibilitar a estruturação de modelos através de linguagem extremamente próxima à linguagem matemática, além de ser flexível à incorporação de algoritmos para programação matemática disponíveis no mercado. Portanto, não se trata de um esforço para o desenvolvimento de algoritmos mais convergentes, mas sim para incorporá-los a um pacote que se preze pela facilidade de manipulação tanto para programadores especializados quanto para o usuário final. Entre outras vantagens, possibilita a formulação do modelo na mesma forma em que a representação matemática foi concebida; a utilização de somatórias propicia a geração automática de matrizes; as variáveis exógenas podem ser alimentadas ao problema sem terem que observar um padrão rígido de formato, variando desde o padrão ASCII e passando, por exemplo, pelo formato das mais diversas planilhas eletrônicas existentes no mercado.

Assim sendo, o modelo a ser proposto segue a estrutura básica de modelos de otimização, a partir da maximização de uma determinada função objetivo, sujeita a uma série de restrições.

A função objetivo será definida como sendo a *margem total de contribuição ao lucro* (M) a ser recebida pela indústria, ou seja:

$$M = \text{RSS} - \text{CTOTTR} - \text{CTOTCOLH} \quad (2.1)$$

onde

RSS = receita a ser auferida pela comercialização do suco, em função do total de sólidos solúveis, em US\$, sendo que:

$$\text{RSS} = \text{PSS} * \sum_i \sum_j \text{PRO}_{ij} * \text{ISS}_{ij} * T_{ij} \quad (2.2)$$

onde

PSS = preço do kg de sólido solúvel, em US\$;

PRO_{ij} = valor da função de produção do talhão i, no mês j, em cx;

ISS_{ij} = teor de sólidos solúveis, medido a partir da curva de maturação, no talhão i no mês j, em kg/cx;

T_{ij} = variável representativa da proporção do talhão i a ser colhida no mês j.

CTOTTR = custo total de transporte, em US\$, sendo que:

$$\text{CTOTTR} = \text{CUT} * \sum_i \text{DIST}_i * \sum_j \text{PRO}_{ij} * T_{ij} \quad (2.3)$$

onde

CUT = valor da função custo de transporte, em US\$/cx/km;

DIST_i = distância do talhão i à indústria, em km.

CTOTCOLH = custo total de colheita, em US\$, sendo que:

$$\text{CTOTCOLH} = \sum_i \sum_j \text{CUC}_{ij} * \text{PRO}_{ij} * T_{ij} \quad (2.4)$$

onde

CUC_{ij} = valor da função custo de colheita, do talhão i , no mês j , em US\$/cx.

As alternativas para a otimização da função objetivo, ou seja, as variáveis endógenas propriamente ditas, dirão respeito às combinações possíveis de programação de colheita em época de safra. Por exemplo, se a variável T_{ij} valer 1,0, o talhão i deverá ser colhido totalmente no mês j ; caso T_{ij} valha 0,0, o talhão i não deverá ser colhido no mês j .

Quanto às restrições, elas podem ser divididas em três grandes grupos, ou seja:

a) Capacidade de processamento da indústria, representada da seguinte forma:

$$PROCME_j \leq CAP_j \quad (2.5)$$

sendo que:

$PROCME_j$ = processamento a ser efetuado pela indústria num determinado mês j , em cx, onde

$$PROCME_j = \sum_i PRO_{ij} * T_{ij} \quad (2.6)$$

em cx;

CAP_j = capacidade de processamento da indústria, num determinado mês j ,

b) Intervalo de variação para o Ratio, representado da seguinte forma:

sendo que:

$$RATIOMIN_{ij} \leq RATIO_{ij} \leq RATIOMAX_{ij} \quad (2.7)$$

$$RATIO_{ij} = (R_{ij} * T_{ij}) \quad (2.8)$$

$$RATIOMIN_{ij} = (RMIN_{ij} * T_{ij}) \quad (2.9)$$

$$RATIOMAX_{ij} = (RMAX_{ij} * T_{ij}) \quad (2.10)$$

onde:

R_{ij} = valor da função *Ratio*, no talhão i , no mês j ;

$RMIN_{ij}$ = *Ratio* mínimo a ser fixado pela indústria, para o processamento de determinado tipo de suco, a partir da produção do talhão i no mês j ;

$RMAX_{ij}$ = *Ratio* máximo a ser fixado pela indústria, para o processamento de determinado tipo de suco, a partir da produção do talhão i no mês j .

c) Cronograma de colheita por talhão, representada da seguinte forma:

sendo que

$$CRONOTAL_i \leq 1,0 \quad (2.11)$$

$CRONOTAL_i$ = cronograma de colheita para o talhão i , em termos de proporção total do talhão i colhida durante a safra, onde

$$CRONOTAL_i = \sum_j T_{ij} \quad (2.12)$$

Um talhão poderá ser colhido então mais que uma vez durante a safra, sem superar, entretanto, o nível de produção esperado para aquele talhão.

Assim, em função do cronograma ótimo a ser obtido a partir da estrutura de modelagem proposta, poderão também ser obtidas, através de equações auxiliares ao modelo, informações sobre receita, custos e quantidades de caixas ou sólidos solúveis, agrupadas da maneira mais conveniente aos tomadores de decisão (por exemplo, por talhão, mês a mês, de acordo com a variedade da laranja, etc.).

3 APLICAÇÕES DA MODELAGEM PROPOSTA

A estrutura de modelagem proposta foi testada em dois níveis distintos: através de um exemplo protótipo, com o intuito de verificação da lógica da estrutura; e através de um exemplo real, em que a estrutura passou por uma análise de sensibilidade a maiores dimensões de modelo, assim como ao desempenho de plataformas computacionais distintas.

3.1 Exemplo protótipo

Para ilustrar e eventualmente implementar o modelo proposto, empresas citricolas foram contatadas no sentido de fornecer os dados considerados como necessários para o processamento do modelo. Assim sendo, os dados utilizados, de caráter meramente ilustrativo tanto quanto ao porte da empresa quanto ao conteúdo da informação propriamente dita, foram fornecidos gentilmente pela FRUTESP⁵.

O principal resultado a ser obtido a partir do modelo é o cronograma propriamente dito da colheita, a ser representado por todos os $T_{ij} > 0,0$, ou seja, em quais meses (j) quais proporções dos talhões (i) devem ser colhidas.

O modelo, codificado na linguagem GAMS, foi processado numa plataforma IBM/AT 386-SX compatível, com co-processador matemático e 4 Mb de memória RAM. A estratégia a ser inicialmente recomendada para a programação de colheita é a de fixar que cada talhão deverá ser colhido totalmente em um único mês (Cenário A). Em função dessa premissa, as variáveis T_{ij} podem ser definidas como inteiras, tipo 0-1.

Em vista disso, o modelo foi resolvido por um solucionador de programação linear inteira tipo 0-1, incorporado à linguagem GAMS, denominado ZOOM (SINGHAL et al, 1992), algoritmo que basicamente tem codificada a técnica *branch-and-bound*. O modelo inicialmente processado gerou uma matriz de 369 linhas e 212 colunas, com 1881 elementos não-nulos. Foram realizadas 663 iterações, num tempo de processamento de 5,8 minutos, e com a utilização de 0,45 Mb de memória RAM.

No caso em que não haja necessidade de rigidez quanto à necessidade de se colher cada talhão em um único mês (Cenário B), o modelo poderá ser tratado como sendo de programação linear contínua, através do solucionador para programação linear BDMLP (BROOKE et al, 1988), incorporado à linguagem GAMS. Os valores a serem observados

⁵ Cooper Citrus Industrial - FRUTESP S.A., Rodovia Armando Salles Oliveira, Km 396, Caixa Postal 81, 14.700-000 - Bebedouro - SP

para as variáveis T_{ij} , portanto, dirão respeito à proporção de cada talhão que deverá ser colhida em um determinado mês. Os resultados foram obtidos após 195 iterações, em 36 segundos, com a utilização de 0,28 Mb de memória RAM.

3.2 Exemplo real

Com o intuito de implementar a estrutura de modelagem proposta através de processamento de conjunto de dados representativos de uma safra completa, empresas citricolas novamente foram contatadas, sendo que uma delas gentilmente se prestou a fornecer os dados solicitados, desde que sua identidade não fosse revelada. Assim sendo, foram levantados os dados da safra de 1992, correspondentes à produção de 320 fazendas, cujas variedades características foram a Hamlin, a Pera (em três floradas distintas), além da Natal e Valência (em duas floradas). A produção processada girou em torno de 7.200.000 cx, sendo que a produtividade média da Hamlin ficou em torno de 3,5 cx/pé, Pera com 2,2 cx/pé, e Natal e Valência com 2,8 cx/pé. Cada variedade, dependendo da florada, observou curvas de maturação e de *Ratio* distintas, sendo considerado aceitável para o *Ratio* o intervalo entre 13,0 e 16,0. Note-se que os dados de produção de laranja utilizados deixaram implícita uma queda de frutos de 2% ao mês, após o momento em que a fazenda atingisse o *Ratio* 14. O custo de colheita variou de acordo com a produtividade da fazenda e o custo de transporte de acordo com a produção e distância (no caso, US\$ 0,004/cx/km), estando as fazendas distribuídas em um raio máximo de distância da fábrica de 100 km. A fábrica, por sua vez, tem uma capacidade de processamento estimada em 1.000.000 cx/mês.

Os dados obtidos são referentes a 320 fazendas, tendo sido estruturados em uma matriz de 5.522 linhas, 2.677 colunas e 46.199 elementos não-nulos. Os principais resultados, em termos de características de processamento, estão apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2.

TABELA 3.1 - CENÁRIO A: RESULTADOS COMPARATIVOS

Solucionador utilizado	Plataforma computacional	Memória requerida	No. de iterações	Tempo de proces.	Valor da f. objetivo
GAMS/ZOOM	PC-AT 486 DX 66 MHz	8,6 Mb	7002	20,2 min	2,97E+07
GAMS/OSL	PC-AT 486 DX 66 MHz	10,6 Mb	6976	14,9 min	2,98E+07
GAMS/CPLEX ⁶	Est. Trab. SUN Sparc 1	fl. aplic.	8180	22,5 min	2,96E+07
GAMS/LAMPS ⁷	Est. Trab. IBM Risc 6000	fl. aplic.	22994	22,1 min	3,01E+07
GAMS/OSL ⁸	Est. Trab. IBM Risc 6000	10,6 Mb	6141	3,4 min	2,95E+07

⁶ CPLEX é marca registrada, tendo sido desenvolvida por Cplex Optimization, Inc., 7710-T Cherry Park, Suite 124, Houston, TX 77095, USA.

⁷ LAMPS é marca registrada, tendo sido desenvolvida por Advanced Mathematical Software, Yukon Court, 4 Yukon Road, London SW12 9PU, England.

⁸ OSL é marca registrada, tendo sido desenvolvida por IBM, 41U/276 Neighborhood Road, Kingston, NY 12401, USA.

TABELA 3.2 - CENÁRIO B: RESULTADOS COMPARATIVOS

Solucionador utilizado	Plataforma computacional	Memória requerida	No. de iterações	Tempo de proces.	Valor da f. objetivo
GAMS/MINOS ⁹	PC-AT 386 SX 25 MHz	4,2 Mb	3285	4,25 h	3,01E+07
GAMS/MINOS	PC-AT 486 DX 33 MHz	4,2 Mb	3285	1,87 h	3,01E+07
GAMS/MINOS	PC-AT 486 DX 66 MHz	4,2 Mb	3285	12,2 min	3,01E+07
GAMS/BDMLP	PC-AT 486 DX 66 MHz	10,8 Mb	2804	6,9 min	3,01E+07
GAMS/ZOOM	PC-AT 486 DX 66 MHz	5,6 Mb	5109	11,2 min	3,01E+07
GAMS/OSL	PC-AT 486 DX 66 MHz	5,6 Mb	927	38,1 s	3,01E+07

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos para o "exemplo protótipo" atestam, inicialmente, que a partir da estratégia de colheita a ser adotada, diferentes soluções para cronogramas poderão ser obtidas. Como consequência, distintas características, tanto operacionais quanto econômicas, deveriam ser observadas. Entretanto, a ordem de grandeza das diferenças obtidas entre os resultados do Cenário A e Cenário B, podem ser consideradas como marginais. Por exemplo, enquanto pelo Cenário A foram processados 51.563 kg de sólidos solúveis, o valor observado pelo Cenário B dá conta de 51.568 kg (desvio de 0,01%). Em termos de unidades de caixas processadas, essa constatação fica mais evidente, dado que para ambos os cenários foram processadas 20.000 caixas. Por outro lado, a diferença entre os valores de margem de contribuição ao lucro observados também ficou em torno de 0,01%.

Em termos de eficiência de algoritmo de programação matemática utilizado, percebe-se que o tempo de processamento dispendido pelo solucionador de programação inteira é superior ao de programação linear contínua, sem entretanto comprometer a viabilidade da estrutura de modelagem proposta.

É importante notar ainda que, colher um talhão em um único mês ou colhê-lo em vários meses, desde que sejam meses consecutivos, diz respeito, na prática, a estratégias extremamente similares. Para o planejamento da colheita é fundamental que a continuidade de uma determinada frente de trabalho em um mesmo talhão seja garantida, evitando-se assim gastos logísticos desnecessários.

Com relação ao "exemplo real", percebe-se, inicialmente, que a diferença percentual entre as soluções obtidas por solucionadores de programação inteira (valor médio da função objetivo = $2,97 \times 10^7$) e aquelas obtidas por solucionadores de programação linear (valor da função objetivo = $3,01 \times 10^7$) girou em torno de 1,35%, confirmando a tendência observada no "exemplo protótipo".

Com relação à sensibilidade de desempenho à plataforma computacional utilizada, note-se que a mesma estrutura, definida para programação linear, e processado pelo solucionador MINOS incorporado à linguagem GAMS, observou um tempo de processamento de 4,3 h para um microcomputador 386 SX 25 MHz, 1,9 h para um microcomputador 486 DX 33 MHz e 12,2 min para um microcomputador 486 DX 66 MHz.

⁹ MINOS é marca registrada, tendo sido desenvolvida por MURTAGH et al. (1987)

Portanto, uma redução de tempo de processamento em torno de 95%, sem entretanto migrar para plataformas de maior porte. Quando se analisa a sensibilidade da estrutura de modelagem ao solucionador utilizado, verifica-se que o GAMS/OSL resolve, em um microcomputador 486 DX 66 MHz, a estrutura de programação linear em 38,1 s, um tempo ainda 95% inferior ao tempo obtido pelo GAMS/MINOS naquele mesmo equipamento. Com relação à utilização de programação inteira, a estrutura de modelagem correspondente foi também processada em microcomputadores 486 DX 66 MHz, observando um tempo médio de processamento de 17,5 min, o que pode ser considerado como bastante razoável em se tratando de utilização de programação inteira para um problema daquela dimensão.

Os microcomputadores 486 DX 66 MHz, equipamentos dotados de processadores que se utilizam de uma técnica de duplicação da frequência do "clock" em sua operação interna, apesar de toda a vanguarda incorporada, continuam sendo microcomputadores e, portanto, de fácil acesso à comunidade eventualmente envolvida no processamento do modelo, com um custo operacional praticamente nulo. O investimento adicional que contingencialmente poderá ser requerido por esse tipo de equipamento será a expansão de memória RAM, o que não deixa de ser um custo claramente marginal.

Quanto ao solucionador OSL (*Optimization Subroutine Library*), desenvolvido pela IBM, este contém uma série de algoritmos tanto para programação linear quanto programação inteira, incluindo métodos de pontos interiores, baseados no trabalho desenvolvido por KARMARKAR (1984). Em pesquisa de desempenho em estações de trabalho, conduzida por SHARDA et al. (1991), foi o solucionador classificado em primeiro lugar, tendo em vista os critérios de capacidade de resolução de maior número de problemas, com o menor tempo de processamento possível, e com o menor número possível de erros.

Finalmente, vale ressaltar a versatilidade da linguagem GAMS, o que caracteriza uma solução para programação matemática no geral (linear, inteira ou não-linear), sem se atrelar a um determinado fabricante de equipamentos, uma vez que se encontram disponíveis no mercado versões para as mais diversas marcas de microcomputadores, estações de trabalho, computadores de grande porte e até para supercomputadores.

5 CONCLUSÕES

A programação de colheita de laranja é uma fase fundamental dentro do processo de industrialização do suco, principalmente tendo-se em vista a questão da qualidade do produto final. Nesse sentido, uma série de investigações foram conduzidas para se levantar e avaliar as características dessa busca pela qualidade, o que não parece uma preocupação constante para os participantes da agroindústria citrícola. Tal evidência fica clara quando se constata que o modelo de remuneração vigente ao produtor ainda se baseia no pagamento por caixas de laranja, não incorporando qualquer critério relativo à qualidade do fruto colhido.

Foi assim proposta estrutura de modelagem específica para a programação da colheita de laranja, que levou em consideração as virtudes e limitações das estruturas

análogas concebidas para outros produtos. Particularmente, buscou-se uma ferramenta de apoio à estrutura de modelagem que fosse compatível a plataformas de pequeno porte e com características de processamento convergente, inclusive para modelos de grande dimensão, e que fosse aberta à incorporação de técnicas de programação matemática até então evitadas por modeladores (tais como a programação inteira), principalmente devido ao alegado baixo desempenho.

Em vista disso, optou-se pela linguagem de modelagem GAMS, que tem a característica de incorporar uma série de algoritmos alternativos para a solução de problemas de programação linear, inteira e não-linear. Resultados bastante animadores foram verificados, como por exemplo, o processamento de matriz de 5.522 linhas, 2.677 colunas e 46.199 elementos não-nulos, em um microcomputador 486 DX 66 MHz, em um tempo inferior a 40 s. Certamente, trata-se de uma alternativa para processamento acessível, em função de seu baixo custo de investimento, e praticamente nulo custo operacional.

Portanto, é viável a utilização dessa ferramenta para a programação de colheita de laranja, o que implicará aumento na qualidade do suco a ser produzido. Dado que a competitividade da empresa citrícola é função direta do nível de controle de qualidade exercido sobre o processo como um todo, isto é, desde a escolha da variedade de citros a ser plantada até a forma com que o suco chega até o seu consumidor final, será de fundamental importância a prática de planejamento contínuo, em seus mais diversos níveis, passando principalmente pela programação da colheita. Ressalte-se que essa preocupação com a qualidade do fruto a ser colhido, com certeza, aumentará a partir do momento em que o modelo de remuneração ao produtor começar a levar em consideração os diferentes níveis de produtividade observados nos pomares.

Algumas limitações, entretanto, devem ser destacadas, para que novos estudos possam ser elaborados com o intuito de minimizá-las. Uma delas é a questão da confiabilidade das informações sobre as características químicas e biológicas dos frutos, assim como as funções de custo de transporte e de colheita. Essa precisão deverá ser sempre perseguida através de cuidadoso planejamento de amostragem de dados de pomares, para que as equações correspondentes possam ser efetivamente estimadas e validadas.

A validação é também um cuidado contínuo que deve ser dado à estrutura do modelo, o que será facilitado a partir do momento em que as empresas, ou os próprios produtores, se disponham a discutir as características do processo modelado neste trabalho e que, porventura, na prática ainda não tenham sido incorporadas. Isto, provavelmente, facilitará a opção pela implementação ou não do modelo em si.

Finalmente, vale lembrar que a necessidade de ajustes na estrutura de programação da colheita em si se justifica plenamente, dado que o ganho em eficiência, em termos de competitividade no mercado internacional, não será mais marginal, o que certamente resultará em aumento de divisas para o setor, assim como para o País como um todo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARATA, M. Q. F. Otimização econômica do corte e reforma de canaviais. Piracicaba, ESALQ, 1993, 153p. Dissertação (Mestrado em Agronomia).
- BOCAIUVA, J. R.; RODRIGUES, I. F.; NINA, L. D. Comercialização e Custos x Estratégia do Citricultor para a Negociação com as Indústrias. **Laranja**, Cordeirópolis, 12(1), p.29-48, 1991.
- BROOKE, A.; KENDRICK, D.; MEERAUS, A. **GAMS: A User's Guide, Release 2.25**. The Scientific Press, 1992. 289p.
- CAMPANELLI, R.; BOCAIUVA, J. R. Comercialização da Laranja entre Produção e Indústria. **Laranja**, Cordeirópolis, 10(1), p.217-32, 1989.
- DI GIORGI, F. Exaustão do Modelo de Remuneração na Citricultura. **Laranja**, Cordeirópolis, 12(1), p.95-115, 1991.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO) **The Longer Term Outlook for Citrus Fruit Productions**. Havana, Intergovernmental Group on Citrus Fruit, 9th edn., 1991. 17p.
- GUALDA, N. D. F.; TONDO, C. M. A large l.p. model for sugarcane crop planning. Paper presented in TIMS XXX - SOBRAPO XXIII Joint International Meeting, Rio de Janeiro, July 15-17, 1991, 7p.
- HALPERN, D.; ZUR, A. Total Soluble Solids in Citrus Varieties Harvested at Various Stages of Ripening. In: SIXTH INTERNATIONAL CITRUS CONGRESS, Tel Aviv, March 6-11, 1988. **Proceedings**. Balaban Publishers, p.1777-83, 1988.
- KARMARKAR, N. A new polynomial-time algorithm for linear programming. **Combinatorica**, 4(4), p. 372-95, 1984.
- LOTT, R. V. The terminology of fruit maturation and ripening. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, 46, p. 166-73, 1945.
- MARCHI, R. J. Determinação das curvas de maturação da laranja "pera" na região de Bebedouro, SP. Jaboticabal, FCAV, 1993, 129p. Dissertação (Mestrado em Agronomia).
- MATA, J. P. Aspectos Positivos e Negativos da Citricultura Paulista. **Laranja**, Cordeirópolis, 10(1), p.147-55, 1989.
- MURTAGH, B.; SAUNDERS, M. A. **MINOS 5.1 User's Guide**. Report SOL 83-20R, December 1983, revised January 1987, Stanford University.
- NEVES, E. M.; ANDIA, L. H.; NEVES, M. F.; BARROS, S. S. Economia da Produção Citrícola: Competitividade sob o Enfoque de Custos e Investimentos. In: XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, Rio de Janeiro, 03-06/08/92. **Anais**, vol. II, SOBER, p.525-37, 1992.
- SHARDA, R. Linear Programming Software for Personal Computers: 1992 Survey. **OR/MS Today**, p. 44-60, June 1992.
- SHARDA, R.; FAN, M-Y. Performance comparison of LP software for workstations: 1991 update. Paper presented in TIMS XXX - SOBRAPO XXIII Joint International Meeting, Rio de Janeiro, July 15-17, 1991, 24p.
- SINGHAL, J.; MARSTEN, R. E.; MORIN, T. **Fixed Order Branch-and-Bound Methods for Mixed-Integer Programming: the ZOOM System**. Working Paper, Management Information Science Department, The University of Arizona, Tucson, December 1987.
- STEGER, E. 30 Anos de Desenvolvimento em Processamento de Citros. **Laranja**, Cordeirópolis, 11(2), p.463-502, 1990.
- TAUBE NETO, M. **Planejamento Florestal Otimizado - PLANFLOR - Manual do Usuário**. SOMA, 1989, 52p.
- VIEGAS, F. A Industrialização dos Produtos Cítricos. In: RODRIGUEZ, O., VIEGAS, F., POMPEU JR., J.; AMARO, A. A. **Citricultura Brasileira**, 2a. ed., Campinas, Fundação Cargill, 1991, p.898-921.