Modelo matemático para otimização e avaliação de unidade produtora de leite caracterizada pela integração lavoura-pecuária: consideração de parâmetros econômicos, logísticos e ambientais

Mathematical model to optimization and assessment of a dairy farm characterized by crop-livestock integration: consideration of economic, logistic and environmental parameters

Augusto Hauber Gameiro
Cleber Damião Rocco
José Vicente Caixeta-Filho

Grupo de Pesquisa 2: Economia e Gestão no Agronegócio

Resumo

Definir os cultivos vegetais e as criações animais que, conjuntamente ou isoladamente, permitirão o maior retorno do empreendimento agropecuário com mínima interferência negativa sobre o meio-ambiente destaca-se como estratégia iminente de grande parte das civilizações contemporâneas. O modelo aqui proposto tem o objetivo maximizar a soma do lucro mensal de uma unidade produtora de leite em um período de 60 meses, em função da quantidade ótima de animais em cada categoria (vacas em lactação, secas, bezerras, novilhas) e da quantidade de hectares a serem cultivadas de cada lavoura (milho para silagem, milho para grão, soja, sorgo, tifton, alfafa e cana de açúcar) em cada safra. A técnica de Programação Linear (PL) foi utilizada para a modelagem do problema e o modelo foi implementado na linguagem GAMS e resolvido pelo CPLEX. O modelo foi aplicado em uma propriedade de alta tecnologia localizada no município de Carmo do Paranaíba - MG. Além dos tradicionais parâmetros considerados em modelagens dessa natureza, esta pesquisa procurou inovar ao considerar os custos logísticos (transporte de insumos, produtos finais, alimentação dos animais e distribuição de dejetos), custos de um eventual mercado de carbono e de uma eventual política de cobrança pelo uso da água, e a economia na aquisição de adubos pelo uso dos dejetos animais como fertilizantes para as culturas vegetais. A estrutura matemática proposta permite a adaptação do modelo a outros tipos de propriedades agropecuárias caracterizadas pela integração entre culturas vegetais e produção pecuária. Dessa forma, poderia dar origem a ferramentas para a avaliação de impactos de políticas públicas ou privadas relacionadas à produção agropecuária. Especificamente sobre a aplicação na propriedade considerada, o modelo apresentou diversos resultados relevantes para os tomadores de decisão.

Palavras-chave: otimização, planejamento agrícola, integração lavoura-pecuária, programação linear.

Abstract

Selecting agricultural crops and livestock production that, jointly or separated allow to reach higher return to a rural enterprise with a minimum negative interference over the natural resource in the environment arises as an imminent question of most part of contemporary civilization. The proposed model aims to the maximization of the sum of monthly profit of a dairy farm along a period of 60 months, in function of the optimal number of animals in different categories (lactating cows, dry cows, heifer) and the amount of hectares to be grown of each crop (corn for grain and silage, soybean, sorghum, tifton, alfalfa and sugar cane) in each season. The Linear Programming (LP) technique was adopted to model the problem that was implemented in GAMS syntax and solved by CPLEX optimizer. The model was performed to a high technology dairy farm in Carmo do Paranaíba city, Minas Gerais state, Brazil. Besides the traditional parameters took into account in this realm of planning models, this research innovates by including logistic costs (transportation of inputs and farm products, animal feeding and animal waste management), the costs of an eventual carbon market and of an eventual policy of charging for the water use, and the savings related to fertilizers acquisition due to the use of animal manure locally. The mathematical mainframe allows the model adaptation to several rural production unit characterized by crop-livestock integration. Therefore, the proposed model may be used as a decision support tool by public and private sectors to evaluate the impacts of formulating policies over agriculture activities. Regarding the model application in real farms, the proposed model offered relevant outcomes to the decision makers.

Key Words: optimization, agricultural planning, crop-livestock integration, linear programming.

1. INTRODUÇÃO

As pressões sobre os sistemas produtivos, especialmente aqueles que exploram diretamente os recursos da natureza, aumentam com o desenvolvimento das sociedades. Tais forças podem ser assim sistematizadas como: i) pressões econômicas: pela necessidade de uso racional dos fatores de produção ante ao aumento populacional; ii) pressões ambientais: pelo reconhecimento de que as relações produtivas e de troca entre os seres humanos geram externalidades ao ambiente, que não podem ser desconsideradas dadas as suas consequências sobre o sistema como um todo; e iii) pressões sociais: a evolução moral da sociedade gera demandas sociais representadas por diversos movimentos cada vez mais influentes na sociedade, implicando maior preocupação com outros indivíduos da mesma espécie e, eventualmente, com aqueles de outras espécies (Gameiro, 2009).

Ao mesmo tempo em que as pressões aumentam, também se observa o avanço tecnológico visando responder ao novo contexto de exigências em que as sociedades estão submetidas. O resultado desse processo evolutivo é o aumento da complexidade dos sistemas de produção, e, por conseguinte, ferramentas auxiliares às tomadas de decisão se fazem necessária em todos os setores da sociedade, sejam da esfera pública ou privada (Gameiro, 2010).

Explorar a natureza de forma a satisfazer as necessidades humanas atuais sem comprometer sua capacidade futura de ser igualmente explorada começa a se configurar como a racionalidade que, possivelmente, deverá direcionar os processos de transformação dos recursos. Especificamente considerando-se o meio rural, definir os cultivos e as criações de animais que, conjuntamente ou isoladamente, permitem o maior retorno do empreendimento agropecuário, com mínima interferência negativa, ou pelo menos, suportável sobre o meio ambiente, destaca-se como estratégia iminente de grande parte das civilizações contemporâneas.

Importante ressaltar que a consideração conjunta desses aspectos implica em uma maior necessidade de conhecimento interdisciplinar em diversas áreas: i) de características biológicas intrínsecas (botânicas e zoológicas); ii) do solo, que é base de sustentação da produção agropecuária; iii) do clima, pela sua interferência direta sobre os cultivos; iv) das tecnologias disponíveis para o manejo (mecânica, química, genética etc.); v) dos mercados de produtos finais e insumos (oferta, preços, sazonalidades etc.); e vi) das relações sociais pertinentes (relações de poder, direito de propriedade, absorção de mão de obra, qualidade de vida no trabalho, políticas regulatórias etc.).

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo matemático para otimização para a avaliação de uma unidade produtora de leite caracterizada pela integração lavoura-pecuária. A técnica utilizada para modelar o problema foi a Programação Linear, que se insere na área do conhecimento denominada Pesquisa Operacional. O modelo matemático de otimização foi processado com o uso do solver CPLEX, através do software *General Algebraic Modlling System* (GAMS) (McCarl, 2010). A propriedade escolhida para aplicação do modelo é especializada na produção de leite localizada no município de Carmo do Paranaíba, Estado de Minas Gerais. A pesquisa de campo para levantamento dos dados na propriedade foi realizada durante os anos de 2009 e 2010.

2. PESQUISA OPERACIONAL APLICADA À AGROPECUÁRIA

Azevedo Filho & Neves (1988) apresentaram uma revisão de literatura sobre o uso da Pesquisa Operacional na agricultura brasileira. Para os autores, a utilidade de Pesquisa Operacional na agricultura decorre de sua natureza multidisciplinar, que envolve métodos e técnicas quantitativas que visam determinar decisões ótimas sob vários aspectos, assim como estabelecer padrões e critérios para alocação de recursos. Os autores ressaltam que a Pesquisa Operacional envolve, basicamente, a aplicação de métodos científicos e matemáticos para a solução de sistemas complexos. Reforçam que não é apenas um ramo da matemática aplicada, mas o inter-relacionamento dos conhecimentos de diversas disciplinas. Segundo os autores, o interesse pela Pesquisa Operacional no Brasil surgiu em 1955, com o Professor Rui A. S. Leme, da Faculdade de Economia da Universidade de São Paulo, que promoveu um seminário para discussão de aplicações da Programação Linear[1] a

[1] A "Programação Linear" é uma das principais técnicas da Pesquisa Operacional. É amplamente utilizada devido à relativa simplicidade de modelagem matemática a ser solucionada, à disponibilidade de diversos algoritmos no mercado e à possibilidade de encontrar solução ótima e única (quando existente) para sistemas complexos. O modelo matemático a ser resolvido por técnicas de Programação Linear é normalmente composto, como sugere o nome, por equações e/ou inequações lineares. Há uma função objetivo linear que deve ser otimizada (maximizada ou minimizada), respeitando um conjunto de equações e/ou inequações também lineares denominadas restrições.

problemas de Economia. Especificamente com aplicação na agricultura, Azevedo Filho & Neves (1988) mencionam que foi o próprio professor Leme que, em 1960, desenvolveu um trabalho de formulação de rações a custo mínimo para duas empresas do setor.

Azevedo Filho & Neves (1988) afirmam que a Pesquisa Operacional e, em especial a Programação Linear, pode ser aplicada à solução de diversos problemas na agricultura, tais como: otimização de rações e dietas, planejamento de fazendas e empresas agroindustriais, otimização de transporte e localização espacial, análise e planejamento de experimentos, planejamento regional, inter-regional e política agrícolas, e planejamento florestal. Em relação à aplicação em planejamento de fazendas e empresas agroindustriais, os autores identificaram 81 trabalhos elaborados por autores brasileiros, sendo cinco na década de 1960, 47 trabalhos na década de 1970 e 29 na década de 1980.

Azevedo Filho & Neves (1982) utilizaram um modelo de Programação Linear para definir a melhor estratégia entre diferentes sistemas de confinamento de bovinos de corte no estado de São Paulo, e possibilidades de aplicação do capital em outras alternativas de mercado. O estudo foi motivado pela percepção – já no início da década de 80 – de que áreas com culturas de exportação e energéticas estavam tornando praticamente inviável a pecuária extensiva. O modelo de Azevedo Filho & Neves (1982) considerou quatro níveis de ganho de peso e, para cada nível de ganho de peso, existia uma exigência nutricional que deveria ser atendida por uma combinação de alimentos. As exigências nutricionais consideradas foram: proteína bruta, proteína digestível, energia metabolizável, cálcio, fósforo, vitamina A entre outras. Quanto à época de compra e venda dos animais, foram considerados três períodos para cada uma. Interessante ressaltar que os autores consideraram o custo de oportunidade do capital e também a receita adicional advinda da comercialização do esterco dos animais confinados.

Na década de 1990, Toniello & Caixeta Filho (1992) desenvolveram um modelo de Programação Linear para o planejamento de uma propriedade agrícola na região Centro-Oeste do Brasil. Os autores consideraram como atividades candidatas, a soja, o algodão, o milho, a avicultura de corte e a pecuária de corte. A partir dos custos de produção por hectare, das receitas esperadas e do limite de crédito rural disponível para cada atividade foram calculadas as áreas ótimas alocadas em cada produção. Caixeta Filho (1993) dedicou-se à modelagem para otimização e planejamento da colheita de laranjas para fins industriais. Dossa (1994) desenvolveu um modelo de Programação Linear para servir como ferramenta auxiliar no planejamento de uma propriedade rural produtora de leite, de grãos de inverno e verão no estado do Paraná. O que motivou o autor a desenvolver o trabalho foi a constatação de que os produtores precisavam melhorar sua eficiência técnico-econômica na gestão das propriedades rurais do estado. Araújo & Caixeta Filho (1998) estimaram uma fronteira de eficiência econômica utilizando Programação Linear e a inclusão de alguns riscos de atividades, em 33 empresas agrícolas na região Sul do estado de Santa Catarina. No final da década de 1990, Caixeta Filho et al. (2002) desenvolveram um modelo de otimização para o planejamento da produção de lírios. Esse trabalho recebeu no ano de 2001 a indicação do prêmio "*Franz Edelman Award - Honorable Mention*", do *Insitute for Operations Research and the Management Sciences* (*INFORMS*), principal entidade norte-americana promotora da Pesquisa Operacional.

A experiência na aplicação da Pesquisa Operacional na ESALQ/USP permitiu o lançamento, no ano de 2001, do livro "Pesquisa Operacional: Técnicas de Otimização Aplicadas a Sistemas Agroindustriais" (Caixeta Filho, 2001), que atualmente é um dos

principais livros-texto para estudo e ensino desta ciência quando aplicada à produção agropecuária e agroindustrial.

Mais recentemente, Biagio et al. (2007) desenvolveram um modelo matemático para o planejamento da produção de grãos em uma propriedade rural no estado de Minas Gerais. O trabalho, além dos atributos técnicos e econômicos, preocupou-se em incluir variáveis financeiras visando auxiliar às decisões de como o agricultor deveria obter recursos para financiamento da produção diante de linhas alternativas de crédito rural. Milan (2008) propôs um modelo de Programação Linear multiobjetivo para o planejamento da produção e seqüenciamento de colheitas de cafés finos em uma fazenda no estado de São Paulo.

A aplicação de técnicas de otimização tem sido particularmente recorrente no planejamento de corte de madeira em áreas florestais (Garcia, 1990; Bueno et al., 1992; Fidelis & Reis, 2001; Ohman & Lamas, 2003; Ducheyne et al., 2004; e Kangas & Kangas, 2005).

Apesar de diversos trabalhos de otimização aplicados à agropecuária mencionarem ou reconhecerem o caráter multidisciplinar dessa área de pesquisa, é comum os pesquisadores considerarem somente variáveis e restrições de ordem técnica e econômica, não levando em consideração as variáveis ambientais ou sociais, que possuem influências diretas em todos os sistemas agropecuários.

Quingzhen et al. (1991) descreveram a aplicação de um modelo de programação linear em um projeto de planejamento da produção agropecuária na China. O modelo visava o aumento da renda líquida sem gerar efeitos adversos sobre o meio ambiente. Annetts & Audley (2002) propuseram um modelo de otimização multiobjetivo para o planejamento da produção agropecuária considerando tanto aspectos econômicos quanto ambientais. Trata-se de uma referência bastante interessante para a inspiração de modelos com múltiplos objetivos com o uso da Programação Linear.

Em relação à questão ambiental, um tema de grande relevância refere-se à rotação de culturas nas áreas de produção, pois essa prática apresenta uma série de benefícios em termos biológicos e agronômicos.

Dogliotti (2003) tem sido uma importante referência para trabalhos de planejamento agrícola considerando esquemas ótimos de rotação de culturas. Detlefsen & Jensen (2006) desenvolveram um modelo de otimização cujo principal objetivo era definir a melhor sequência de culturas vegetais em uma mesma área agrícola. No Brasil, a tese de Santos (2009) abordou a programação de rotação de culturas focando na produção de hortaliças em bases sustentáveis. Segundo a autora, a produção de hortaliças é particularmente complexa por envolver grande número de culturas com limitações específicas no que se refere a aspectos técnicos, como época de plantio e colheita, aspectos ecológicos como adubação verde, o período de pousio etc.

Aplicações de modelagem matemática especificamente na área da Zootecnia também vêm sendo desenvolvidas. Karmakar et al. (2007) elaboraram uma revisão de literatura sobre as ferramentas disponíveis para a tomada de decisão integrada quanto ao uso/destino de dejetos animais. O trabalho de Silva Neto & Retzlaff (2004) é um dos poucos encontrados na literatura brasileira específica de Zootecnia nos últimos anos. Nesse trabalho, os autores desenvolveram uma modelagem de otimização sob condição de incerteza para a avaliação econômica de sistemas de integração lavoura-pecuária de leite.

A experiência de Silva Neto culminou com o lançamento recente do livro "Modelagem e planejamento de sistemas de produção agropecuária" (Silva Neto & Oliveira, 2009).

3. MODELO PROPOSTO

O modelo aqui proposto tem como objetivo maximizar a soma do lucro mensal (variável *Z*) em um período de 60 meses, em função da quantidade ótima de animais em cada categoria (vacas em lactação, secas, bezerras, novilhas) e da quantidade de hectares a serem cultivadas de cada lavoura (milho para silagem, milho para grão, soja, sorgo, tifton, alfafa e cana de açúcar) em cada safra. A receita da fazenda é composta pela venda de leite, de animais (vacas de descarte, bezerros machos etc.) e de soja em grão. Os custos são compostos pela sua parcela variável (concentrados, medicamentos, sêmen, fertilizantes, sementes, defensivos, óleo diesel etc.) e fixa (depreciação de máquinas, implementos e benfeitorias, salários dos trabalhadores, serviços especializados, taxas diversas etc.). O único custo não considerado foi o de remuneração da terra (própria). Apesar disso, optou-se por usar a denominação de "lucro" para a diferença entre a receita total e os custos descritos. Para evitar viés financeiro, desconsiderou-se o valor do dinheiro no tempo (considerou-se a taxa de desconto nula).

A propriedade na qual foi aplicado o modelo dispõe de 142 vacas holandesas em produção, com produtividade média de 27 litros de leite por vaca/dia. A área disponível para culturas irrigadas é de 22,1 hectares; para culturas de sequeiro de 32 hectares; e de pastagem (Tifton) de 8,4 hectares. A capacidade máxima de animais em produção é de 154 cabeças.

Apresenta-se a seguir a função objetivo do modelo proposto e, posteriormente, explicam-se a notação utilizada.

$$
\begin{aligned}
Z = & \sum_{t=1}^{T}\sum_{p=1}^{P}\left(pprice_{pt} - lprod_{p}\right).SALEPROD_{pt} - \sum_{t=1}^{T}\sum_{g=1}^{G}\left(gcstm_{gt} + lmercfeed_{g}\right).FEEDMERC_{gt} - \\
& \sum_{t=1}^{T}\sum_{c=1}^{C} cropcst_{ct}.CROP_{ct} - \sum_{t=1}^{T}\sum_{f=1}^{F} lfeed_{da}.equipcapacity_{d}.FEEDGROUP_{dat} - \\
& \sum_{t=1}^{T}\sum_{f=1}^{F}\left(fprice_{ft} + lmercfert_{f}\right).FERTMERC_{ft} - \sum_{t=1}^{T}\sum_{a=1}^{A}\left(animalcst_{a}/12\right).XA_{at} - \\
& \sum_{t=1}^{T}\sum_{c=1}^{c} lmanure_{c,"fresh"}.manurecrop_{c,"fresh"}.FERTFRESH_{ct}/truckcapacity - \\
& \sum_{t=1}^{T}\sum_{\substack{c=1 \\ c\in C_i}}^{Ci} lmanure_{c,"slurry"}.manurecrop_{c,"slurry"}.FERTSLURRY_{ct}/slurrycapacity - \sum_{t=1}^{T} waterprice.WATERCON_{t} - \\
& (laborfixedcst + depreciation + higienematerial + energycst + officecst + generaltaxes).card(t) - \\
& cstinvfeed - CO2BALANCECOST
\end{aligned}
$$

Sendo os parâmetros: $pprice_{pt}$: o preço do produto *p* comercializado pela propriedade no período *t*; $lprod_{p}$: custo logístico da comercialização do produto *p*; $gcst_{gt}$: custo de aquisição no mercado do ingrediente *g* para alimentação animal no período *t*; $lmercfeed_{g}$: custo logístico do fornecimento do ingrediente *g* para a propriedade; $cropcst_{ct}$: custo variável para a cultura *c* no período *t*; $lfeed_{da}$: custo logístico para

alimentação de cada categoria animal *a* com o grupo de dieta *d*; $equipcapacity_d$: capacidade no transporte de cada grupo de dieta *d* na alimentação dos animais; $fprice_{ft}$: preço do fertilizante *f* no período *t*; $lmercfert_f$: custo logístico de aquisição do fertilizante *f*; $animalcst_a$: custo variável anual de produção de cada categoria animal *a*; $lmanure_{cm}$: custo logístico da aplicação do dejeto *m* na cultura *c*; $manurecrop_{cm}$: indica qual cultura vegetal *c* pode receber o dejeto animal *m*; $truckcapacity$: capacidade da carreta utilizada na propriedade; $slurrycapacity$: capacidade da chorumeira utilizada na propriedade; $waterprice$: custo unitário da água; $laborfixedcst$: custo fixo mensal de mão de obra; $depreciation$: custo fixo mensal de depreciação do capital imobilizado; $higienematerial$: custo fixo mensal com material de higiene para ordenha e tratamento sanitário dos animais; $energycst$: custo fixo mensal de energia elétrica; $officecst$: custo fixo mensal com despesas de escritório; $generaltaxes$: custo fixo mensal com taxas diversas; $cstinvfeed$: custo para formação de estoque inicial de alimentos volumosos.

As variáveis do modelo são: *Z* o resultado financeiro total do sistema em todo horizonte de planejamento. Parcela referente à soma do lucro mensal: $SALEPROD_{pt}$: volume de produto *p* produzido na propriedade e vendido para o mercado no período *t*; $FEEDMERC_{gt}$: volume de ingrediente *g* adquirido no mercado no período *t*; $CROP_{ct}$: área da cultura vegetal *c* plantada no período *t*; $FEEDPROD_{gt}$: volume de ingrediente *g* produzido pela propriedade proveniente de colheitas da cultura *c* no período *t*; $FERTMERC_{ft}$: volume de fertilizante mineral *f* adquirido no mercado no período *t*; XA_{at}: número de animais de cada categoria *a* em cada período *t*; $FERTFRESH_{ct}$: volume de esterco *in natura* a ser aplicado na cultura *c* no período *t*; $FERTSLURRY_{ct}$: volume aplicado de chorume (proveniente do biodigestor) na cultura *c* no período *t*; $WATECON_t$: consumo total de água para ordenha das vacas no período *t*; e $CO2BALANCECOST$: custo total do resultado do balanço entre a emissão e o seqüestro de gás carbônico na propriedade em todo o horizonte de planejamento.

O modelo completo apresenta aproximadamente 100 conjuntos de equações entre restrições e funções contábeis. Citam-se as principais delas, sendo que seus equacionamentos serão apresentados em trabalhos posteriores em decorrência da limitação de espaço neste artigo: i) garantir o número médio constante de animais na propriedade durante o ano; ii) relação entre o número de vacas em lactação e de vacas secas; iii) relação entre o número de novilhas para lactação e de vacas (em lactação e secas); iv) relação entre o número de bezerras para lactação e de novilhas para lactação; v) cálculo do número de bezerras em relação à quantidade dos outros animais produtivos; vi) cálculo da quantidade de bezerras para comercialização; vii) cálculo de novilhas para comercialização; viii) cálculo do número de bezerros em relação ao número dos outros animais; ix) cálculo da produção de bezerros para criar tourinhos; x) cálculo da produção de tourinhos; xi) cálculo de vacas para descarte; xii) equação que garanta o fornecimento de energia e proteína na alimentação dos animais; xiii) equação da proporção de concentrado na ração de cada categoria animal; xiv) equação da proporção de volumoso na ração de cada categoria animal; xv) equação do fornecimento de minerais na alimentação de cada categoria animal;

xvi) cálculo da elaboração da dieta completa; xvii) cálculo para elaboração dos alimentos a base de pasto; xviii) elaboração dos alimentos a base de forragem picada; xix) produção de alimentos a partir das culturas *c* plantadas na propriedade; xx) balanceamento dos estoques dos alimentos *g*; xxi) cálculo dos produtos comercializados pela propriedade em cada período *t*; xxii) área ocupada com culturas de sequeiro, irrigadas e pasto; xxiii) restrição de ocupação das culturas e manutenção do tamanho de área; xxiv) equação de irrigação das culturas; xxv) restrição de mão-de-obra na propriedade; xxvi) equação para produção do esterco *in natura* (*"fresh"*); xxvii) equação para balanço da produção e estoque de esterco *in natura*; xxviii) equação para produção do chorume (*"slurry"*); xxix) equação para balanço da produção e estoque de chorume (*"slurry"*); xxx) equação para adubação das culturas plantadas com fertilizantes comerciais e adubos orgânicos (esterco *in natura* ou chorume); xxxi) equação para emissão de CO_2 entérico dos animais; xxxii) equação para emissão de CO_2 proveniente do esterco *in natura*; xxxiii) equação para emissão de CO_2 proveniente do chorume; xxxiv) equação para contabilização da emissão total de CO_2 pelo esterco animal; xxxv) equação para contabilização da emissão total de CO_2 resultante das operações de venda dos produtos da fazenda no mercado (logística de distribuição); xxxvi) equação para contabilização da emissão total de CO_2 resultante das aquisições de fertilizante mineral no mercado (logística de suprimento); xxxvii) equação para contabilização da emissão total de CO_2 resultante das aquisições de alimento no mercado para elaboração da ração (logística de suprimento); xxxviii) equação para contabilização da emissão total de CO_2 resultante das movimentações logísticas internas para alimentação dos animais; xxxix) equação para contabilização da emissão total de CO_2 resultante da logística de aplicação de esterco *in natura* (*"fresh"*) em todas as culturas *c*, que podem recebê-lo; xl) equação para contabilização da emissão total de CO_2 resultante da logística de aplicação de chorume (*"slurry"*) em todas as culturas *c*, que podem recebê-lo; xli) equação para contabilização da emissão total de CO_2 resultante da logística de aplicação de esterco total, ou seja, da aplicação de *"fresh"* e *"slurry"* juntamente; xlii) equação para contabilização da emissão total de CO_2 para cada cultura vegetal *c*; xliii) equação para contabilização da emissão total de CO_2 resultante da produção de todas as culturas vegetais *c*, em todo o horizonte de planejamento; xliv) equação para contabilização do sequestro total de CO_2 para cada cultura vegetal *c*; xlv) equação para contabilização do sequestro total de CO_2 resultante da produção de todas as culturas vegetais *c*, em todo horizonte de planejamento; xlvi) equação para contabilização do balanço entre emissão e sequestro de CO_2 de todas as atividades que envolvem logística na propriedade; xlvii) equação para contabilização monetária do balanço entre emissão e sequestro de carbono na propriedade; xlviii) equação para contabilização monetária mensal do balanço entre emissão e sequestro de carbono na propriedade em todo o horizonte de planejamento, entre outras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas diversas simulações sob diferentes condições com o intuito de se avaliar o impacto de variações nos parâmetros nos resultados do modelo, especialmente com particular interesse no efeito da realocação dos recursos da propriedade sobre as externalidades geradas pela mesma. Na Tabela 1 são apresentados sucintamente os 18 cenários desenvolvidos na presente análise.

Tabela 1. Cenários desenvolvidos a partir da aplicação do modelo matemático.

Cenários	Alteração característica em relação ao cenário base
1	Parâmetros representativos da propriedade (cenário base)
2	Considera 50% de redução na área disponível para irrigação
3	Considera 50% de aumento na área disponível para irrigação
4	Desconsidera os custos logísticos totais
5	Desconsidera os custos logísticos externos (de produtos e insumos)
6	Desconsidera os custos logísticos internos (de alimentos e dejetos)
7	Considera mercado de carbono para emissão e sequestro
8	Considera mercado de carbono apenas para emissão
9	Considera mercado de carbono apenas para emissão entérica
10 a 18	Incluem acréscimo gradual no custo da água

O cenário 1 procura representar as características atuais da propriedade e por esse motivo foi considerado o cenário base. Todos os demais cenários possuem como referência para comparação e análise o cenário 1. Dessa forma, quando se analisa o cenário 7, por exemplo, tem-se que este parte das características do cenário 1 com a única diferença de que considera o mercado de carbono para emissão e sequestro de gases de efeito estufa. Os cenários de 10 a 18 são analisados conjuntamente para permitir melhor compreensão dos seus resultados.As principais características da propriedade, que refletem os parâmetros considerados no cenário 1, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Principais parâmetros do cenário 1 (cenário base).

Parâmetro	Valor
Produtividade média de leite	27 litros/vaca/dia
Disponibilidade de trabalho	1.267,20 horas/mês (6 trabalhadores)
Área disponível não irrigada	32,0 hectares
Área disponível irrigada	22,1 hectares
Área disponível para pastagem	8,4 hectares
Custo da emissão de equivalente CO_2	R$ 0,00/t
Custo do uso da água	R$ 0,00/ m^3
Lotação máxima de vacas em produção	154

A produtividade média diária[2] de leite, por vaca em lactação, é de 27 litros, obtida por meio de registros reais da propriedade. Em toda a modelagem considerou-se que um mês apresenta 30,4 dias, sendo este número obtido pelo resultado da divisão de 365 dias por 12 meses. Considerou-se a disponibilidade de seis trabalhadores operacionais, e que cada um possui jornada de trabalho de oito horas, durante 26,4 dias por mês. As áreas disponíveis para lavouras de sequeiro, irrigadas e pastagem também refletem a realidade da propriedade. No cenário 1 desconsideram-se os custos sobre a emissão de gases de efeito estufa e sobre o consumo de água, tal como se verifica na realidade. A lotação máxima de

[2] Deve-se considerar que há uma significativa variabilidade na produtividade individual dos animais. A título de ilustração, na medição da produtividade no dia 29 de agosto de 2010, obteve-se o registro de 10 litros e de 55 litros para a menor e maior produtividade, respectivamente.

vacas em produção também reflete uma restrição efetiva da propriedade, uma vez que os estábulos e o sistema de ordenha estão projetados para atender, no máximo, a esse número de animais. A Tabela 3 apresenta os principais resultados obtidos no cenário 1 em comparação com aqueles efetivos da propriedade.

Tabela 3. Características da propriedade e resultado do modelo no cenário 1.

Variáveis	Perfil da propriedade	Resultado no cenário 1	Variação (%)
Animais (cabeças)			
Vacas em lactação	142	117	-17,6
Vacas secas	29	31	6,9
Novilhas	55	46	-16,4
Bezerras	51	51	0,0
Lavouras (média em hectares)			
Milho de verão	32,0	19,0	-40,6
Soja	0,0	7,1	-
Milho de inverno	10,0	0,0	-100
Sorgo	0,0	0,0	0
Pastagem de Tifton	8,4	3,7	-55,9
Alfafa para silagem	5,6	1,0	-82,1
Tifton para silagem	4,5	17,9	297,8
Cana de açúcar para corte	2,0	3,2	60,0
Cana de açúcar para silagem	5,0	5,6	12,0
Geração de receita			
Leite (litros/dia)	3.648	3.182	-12,8

O resultado do modelo indica que o número ótimo de vacas em lactação seria de 117 animais, valor inferior (17,6%) ao existente na propriedade (142 animais). Trata-se de um resultado que corrobora um dos principais desafios da propriedade no que diz respeito à produção de alimentos volumosos para os animais. Ocasionalmente, a propriedade obriga-se a adquirir tais alimentos no mercado, incorrendo em elevadas despesas. O menor número de animais garantiria alguma independência em relação a essas aquisições e, consequentemente, possíveis melhores retornos financeiros.

Uma menor quantidade de vacas em lactação implicaria em uma menor quantidade de novilhas que serão criadas para reposição, resultado esse observado na comparação com o cenário 1. Os números de vacas secas e de bezerras apresentaram-se bastante aderentes, com diferença de apenas dois animais na primeira categoria e nenhum animal na segunda.

As maiores diferenças apareceram em relação à alocação de área para o cultivo das culturas vegetais. O modelo sugere uma realocação da área de sequeiro do milho (de verão) e também para a soja, uma vez que essa pode ser trocada por farelo de soja com empresas que vendem o produto para a propriedade. Destaca-se que, em anos anteriores, a propriedade cultivou soja, estabelecendo uma relação de troca[3] com a esmagadora da região, que recebia o grão e fornecia o farelo. Os resultados do modelo mostraram que esse tipo de estratégia é bastante eficiente do ponto de vista econômico e sugere-se a sua readoção.

[3] Foi considerada, no modelo, uma relação de troca de 70% entre farelo de soja e soja em grão.

Outra alteração significativa sugerida pelo modelo é a substituição de área irrigada de milho (de inverno) por pastagem de tifton para a produção de silagem. Em relação à área de pastagem, que atualmente representam 8,4 hectares na propriedade, o modelo sugere sua redução para uso como área cultivada. O modelo também indica uma redução expressiva na área de alfafa provavelmente decorrente de seus custos mais elevados, particularmente de secagem e ensilagem, em comparação com as outras culturas. As áreas sugeridas para o cultivo de cana de açúcar, seja para corte ou silagem, poderiam ser ligeiramente superiores, uma vez que os resultados do modelo são aderentes ao observado na realidade.

Finalmente, com um número menor de animais em produção, possivelmente seria observado uma redução na receita da propriedade (12,8%), em função da menor produção de leite. Em contrapartida, reforça-se que esse resultado maximiza a soma dos lucros mensais da propriedade durante os 60 meses de planejamento.

Na sequência, discutem-se os resultados da comparação entre os cenários 1 e 2. Esse segundo cenário simula uma redução de 50% na área disponível para irrigação. O investimento no sistema de irrigação para a propriedade foi amplamente debatido quando da ocasião de sua implantação. De fato, espera-se que um sistema de irrigação tenha influência direta e significativa sobre diversos aspectos, tanto no aumento da produtividade da terra, quanto na redução do custo de distribuição de fertilizantes orgânicos (dejetos animais) nas lavouras, dentre outros. Por ser uma tecnologia chave na questão da integração lavoura-pecuária, considerou-se o cenário 2 com uma redução de 50% na área disponível para irrigação. O cenário 3, por sua vez, permite um incremento de 50% na área irrigável, que passaria de 22,1 hectares para 33,2 hectares.

Na análise comparativa do cenário 2 (redução de 50% na área irrigada disponível), o modelo indicou uma redução de 52,7% no lucro mensal médio, o que é altamente significativo. Interessante notar que tal redução não seria gerada por uma diminuição na receita, pois o número de animais e da produção leiteira seria mantido, no entanto, seria decorrente do aumento nos custos unitários de produção vegetal, uma vez que a realocação das áreas cultivadas obrigaria a migração para culturas de sequeiro, que são menos produtivas, e também à aquisição de mais alimentos para composição de dietas para suprir adequadamente os animais. A Tabela 4 apresenta tais informações.

Tabela 4. Comparação entre os resultados do cenário 1 e do cenário 2.

Variáveis	Resultado no cenário 1	Resultado no cenário 2	Variação (%)
Lucro médio (R$/mês)	13.851,28	6.553,88	-52,7
Animais (cabeças)			
Vacas em lactação	117	117	0,0
Vacas secas	31	31	0,0
Novilhas	46	46	0,0
Bezerras	51	51	0,0
Lavouras (média em hectares)			
Milho de verão	19,0	19,0	0,0
Soja	7,1	16,2	128,1
Milho de inverno	0,0	0,0	0,0
Sorgo	0,0	0,0	0,0
Pastagem de Tifton	3,7	4,7	27,0
Alfafa para silagem	1,0	0,0	-100,0
Tifton para silagem	17,9	7,9	-55,86
Cana de açúcar para corte	3,2	3,1	-3,1
Cana de açúcar para silagem	5,6	7,8	39,3
Geração de receita			
Leite (l/dia)	3.182	3.160	-0,7
Bezerras comercializadas (cabeça/ano)	8	8	0,0
Bezerros comercializados (cabeça/ano)	35	35	0,0
Vacas de descarte comercializadas (cabeça/ano)	44	44	0,0
Novilhas comercializadas	0	0	0,0
Tourinhos comercializados	0	0	0,0
Soja em grão	0	0	0,0
Milho em grão	0	0	0,0
Aquisição de fertilizantes			
Uréia (t/60 meses)	46,8	31,2	-33,3
Superfosfato simples (t/60 meses)	69,2	71,0	3,6
Cloreto de potássio (t/60 meses)	17,1	14,7	-14,0
Aquisição de alimentos			
Farelo de soja (média em t/mês)	0,0	0,0	0,0
Caroço de algodão (média em t/mês)	15,3	18,7	22,22
Pellet de polpa cítrica (média em t/mês)	6,6	18,9	186,4
Suplemento mineral (média em kg/mês)	823	817	-0,7
Consumo de água (média m^3/mês)	2.291	1.293	-43,6
Balanço de dejetos animais			
Produção total de esterco (t/60 meses)	3.275	3.253	-0,7
Aplicação de esterco nas lavouras (t/60 meses)	54,6	54,2	-0,7
Estoque de esterco não utilizado (t/60 meses)	3.220	3.198	-0,7
Produção total de chorume (m^3/60 meses)	33.078	32.855	-0,7
Aplicação de chorume nas lavouras (m^3/60 meses)	30.558	21.706	-29,0
Estoque de chorume não utilizado (t/60 meses)	2.520	11.149	342,4
Balaço de gases			
Emissão CO_2 entérico (t/60 meses)	1.969	1.956	-0,7

Emissão CO_2 dejetos (t/60 meses)	853	847	-0,7
Emissão CO_2 pela logística (t/60 meses)	318	382	20,1
Emissão CO_2 pela mecanização (t/60 meses)	97	77	-20,6
Emissão CO_2 total (t/60 meses) (A)	3.237	3.262	-0,8
Sequestro CO_2 pelas lavouras (t/60 meses) (B)	3.901	3.985	2,2
Balanço CO_2 (t/60 meses) (A – B)	-664	-723	8,9

Observa-se que parcelas significativas de lavouras irrigadas (alfafa e tifton para silagem) precisariam dar espaço a culturas de sequeiro, como a soja, a pastagem e a cana para produção de silagem. Volumes superiores de caroço de algodão e de *pellet* de polpa cítrica precisariam ser adquiridos no mercado, caso não houvesse alterações na realocação das áreas de culturas. Economias aconteceriam na aquisição de fertilizantes e no consumo total de água pela propriedade, porém essas seriam anuladas por despesas superiores em logística. A produção de dejetos seria praticamente mantida, já que a quantidade de animais não seria alterada. Todavia, a redução na possibilidade de distribuição de dejetos (no caso, do chorume) pelo sistema de irrigação, faria com que o estoque final desse produto aumentasse muito, sendo esse um fator negativo para o meio ambiente. Para o balanço da emissão de gases de efeito estufa, o cenário 2 apresentou um incremento de 8,9% no período de 60 meses; o volume líquido sequestrado (diferença entre o sequestrado e o emitido) foi de 723 toneladas, quantidade superior ao balanço do cenário 1. – , ou seja, um ligeiro aumento no sequestro de CO_2 pelas culturas vegetais. A maior emissão desse gás pela logística (especialmente a logística mecânica de esterco, incentivada pela menor possibilidade de distribuição pelo sistema de fertirrigação) seria compensada pela menor emissão nos processos mecânicos no plantio e tratos das lavouras.

Se a redução da área irrigada piora os resultados financeiros, a sua expansão causa melhorias evidentes. Essas informações foram obtidas na comparação entre os cenários 1 e 3. O aumento de 50% na área disponível para irrigação, ou seja, passando-se para 32,2 hectares; o modelo indica a possibilidade de se aumentar em 22,1% o lucro médio mensal, reforçando a importância que a prática tem para melhorar os indicadores da integração entre lavouras e pecuária leiteira, especialmente no que se refere à produção de alimentos para os animais. A maior oferta de alimentos permitiria incrementar o efetivo do rebanho em torno de 6% a 6,5%. O número de vacas em lactação poderia passar de 117 para 124, e a produção diária de leite seria incrementada em 159 litros (diferença entre 3.341 litros e 3.182 litros). Haveria o aumento na aquisição de alimentos no mercado para suprir o maior número de animais do rebanho na nova situação.

O consumo de água pela propriedade seria elevado devido à maior área irrigada. A produção de dejetos seria incrementada à mesma proporção da expansão do rebanho. Contrariamente ao cenário 2, porém, haveria a realocação no manejo de esterco fresco (que exige operações mecânicas de maior custo) e na aplicação de chorume (esterco diluído em água, resultado do processo de biodigestão). Todavia, como o volume de chorume produzido aumentaria mais do que proporcionalmente à demanda das lavouras. Haveria o aumento na formação dos seus estoques, sendo esse um resultado negativo para o ambiente. Em relação à emissão de gases no cenário 3; haveria um aumento praticamente proporcional ao do rebanho, não apenas para as emissões entéricas, mas também pelos dejetos e logísticas. Por outro lado, aconteceria um menor sequestro de CO_2 pelas lavouras, e isso seria suficiente para piorar o balanço total de equivalente gás-carbônico, mas ainda

manteria a propriedade capturando mais gases do que emitindo: 136 toneladas em 60 meses.

Os cenários 4, 5 e 6 procuram avaliar o efeito dos custos logísticos. As atividades logísticas sejam externas (para distribuição de produtos e para suprimento de insumos) ou internas (distribuição de alimentos aos animais e distribuição dos dejetos nas lavouras), normalmente, não são consideradas nos esforços de planejamento agrícola. Mas percebe-se que sua influência é significativa, pois são fontes de custos operacionais. Dessa forma, é de particular interesse nesta pesquisa a sua consideração.

Na comparação com o cenário base, o cenário 4 levaria ao aumento no lucro em aproximadamente 40%. A eliminação dos custos logísticos permitiria a criação de um número superior de animais e também causaria uma realocação nas culturas plantadas. Aconteceria a realocação na aquisição de produtos no mercado, com o incremento nos volumes comprados de alimentos para os animais. Em relação à aquisição de fertilizantes, também se observou algum efeito sobre a intensificação do uso. Sobre a distribuição de dejetos nas lavouras, houve variações atreladas à oferta de mão de obra, agora mais ocupada com o maior número de animais. Os custos logísticos eliminados causaram o incremento na aplicação dos dejetos nas lavouras e nas economias de fertilizantes comerciais. No balanço da emissão de gás-carbônico, houve o aumento proporcional à expansão do rebanho e o incremento das emissões decorrentes das atividades logísticas. No cômputo final, a propriedade continuaria emitindo menos gases que sequestrando.

O cenário 5 desconsidera os custos com a logística externa, ou seja, aquela relacionada à distribuição dos produtos da propriedade e ao suprimento de insumos (fertilizantes e alimentos para os animais adquiridos no mercado). De forma semelhante, o cenário 6 desconsidera apenas os custos da logística interna, aquela relacionada à movimentação dos alimentos para os animais e dos dejetos para fertilização das lavouras. As elevações nos lucros dos dois cenários foram de aproximadamente 26% para o cenário 5 e de 14% para o cenário 6. Esses valores indicam que a logística externa pode apresentar efeitos significativos sobre a alocação de recursos e a sua inclusão nos trabalhos de planejamento agropecuário torna-se fundamental. Destacam-se no cenário 6, que os custos logísticos são impedimentos para o uso de esterco como fertilizante nas lavouras, pois a eliminação desses custos poderia aumentar sua aplicação de dejetos nas lavouras, mitigando em certa medida, o problema ambiental do acúmulo de esterco e resolvendo, em partes, a dependência de fertilizantes comerciais.

As próximas análises procuram considerar o efeito do estabelecimento de eventuais mecanismos de desenvolvimento limpo, especialmente de um mercado para o balanço entre emissões e seqüestro de gases de efeito estufa, representados majoritariamente pelo gás carbônico (CO_2). No modelo foram considerados quatro fontes de emissão de gases: i) o processo de digestão ruminal dos animais (emissão entérica); ii) os dejetos (esterco *in natura* (fresco) disponibilizado livremente no ambiente ou o chorume, caracterizado pelo produto originado do processo de biodigestão); iii) atividades logísticas (externos e internos), que emitem CO_2 pela combustão do diesel; e iv) a mecanização das lavouras, caracterizada pela emissão de CO_2 por máquinas agrícolas necessárias para o preparo do solo, tratos culturais, colheita e transporte de insumos para as lavouras etc. Dessa forma, a soma dos volumes de equivalente CO_2 dessas quatro fontes configura a emissão total. Contrariamente, as culturas vegetais podem sequestrar gás-carbônico da atmosfera pelos

seus processos fisiológicos naturais. A diferença entre o total emitido e sequestrado representa o balanço líquido de gases de efeito estufa da propriedade.

No cenário 7 considerou-se a existência de um mercado de carbono, tanto para emissão quanto para sequestro. Assim, se a propriedade emitir mais do que sequestrar (balanço positivo), ela incorrerá em custos por tonelada emitida. Por outro lado, se ela sequestrar mais do que emitir (balanço negativo) ela recebe créditos pelas toneladas seqüestradas. O preço considerado para a tonelada de CO_2 foi de R$ 28,71, referente o preço praticado no mercado europeu em meados de agosto de 2010, valor convertido a partir da cotação original em euro. A comparação entre os cenários 7 e o base é comentada na sequência.

O estabelecimento de um mercado de carbono, segundo simulação no cenário 7, teria pequeno impacto sobre a alocação de recursos da propriedade. O número de animais seria o mesmo e as variações nas áreas cultivadas seriam pequenas, de no máximo 10% - valor em módulo. Portanto, a consequência seria um pequeno impacto de 2,3% sobre o lucro mensal. No balanço de gases, haveria uma ligeira redução nas emissões, que seriam compensadas pelo aumento no sequestro pelas culturas. O balanço líquido seria favorável com o aumento em 4,5% no volume líquido passível de ser recebido em créditos de carbono. Em síntese, ao preço da tonelada de CO_2 considerado, e supondo-se que a propriedade também tenha o direito de ter o crédito sobre o volume de CO_2 sequestrado pelas culturas, haveria relativamente pouca mudança na alocação dos recursos, principalmente na escolha das culturas.

Contudo, como ainda não existem protocolos bem definidos e amplamente aceitos para o cálculo do sequestro de CO_2 pelas culturas vegetais, situação diferentemente encontrada para o cálculo das emissões entéricas e dos dejetos dos animais, optou-se pela elaboração do cenário 8, que considera apenas os custos sobre as emissões, mas desconsidera o crédito sobre o CO_2 eventualmente sequestrado pelas culturas.

No cenário 8, houve a redução no lucro, pois surgem custos antes inexistentes sem a compensação de créditos de carbono. Essa redução sobre o lucro mensal foi de aproximadamente 11%. Interessante observar que o número de animais foi praticamente mantido, tendo o modelo sugerido apenas redução de uma unidade em cada categoria. Em relação às culturas, o modelo indicou alguma realocação, mas que foi de, no máximo, de 16,1% - valor em módulo. Haveria uma redução na quantidade de insumos adquiridos no mercado, especialmente de fertilizantes e de alimentos para os animais. A principal razão deve estar associada à necessidade de maior economia devido à incidência de novos custos. Outra razão também pode ser a possibilidade de redução das emissões pelo esforço de se reduzir custos logísticos externos. O menor aporte de fertilizantes externos poderia ser compensado pela maior aplicação de esterco. Os estoques de dejetos animais seriam reduzidos, sendo esse um dos poucos benefícios observados pelo surgimento de um mercado de carbono que considerasse apenas as emissões. Finalmente, considerando-se o balanço de carbono, o impacto foi modesto, com as emissões totais reduzidas em apenas 2,1% durante os cinco anos considerados na simulação.

Ainda devido a questões de protocolos de mensuração, pode-se pensar que a produção agropecuária seja desafiada apenas no que se refere às emissões entéricas pelos ruminantes, pois como os próprios resultados evidenciaram, esta é a fonte mais significativa de emissões, dentre as quatro consideradas. Desse modo, elaborou-se o cenário 9, que considera apenas os custos sobre tal fonte. Observa-se uma piora no

resultado financeiro, com a redução de 6,8% no lucro, devido à incidência de custos sobre as emissões entéricas. Essa redução é inferior à apresentada pelo cenário 8, que foi de 11,1%. Todos os demais comentários apresentados para o cenário 8 continuam válidos no cenário 9, ainda que as variações apareçam em magnitudes mais modestas. Destaca-se, também, que a eventual incidência desses custos alteraria pouco a alocação de recursos e, consequentemente, reduziria pouco a emissão de gases.

Finalmente, os últimos cenários construídos (cenários de 10 a 18), consideram a hipótese de existência de um custo sobre a água utilizada na propriedade, especificamente para o fornecimento aos animais, para a higienização da sala de ordenha e estábulos, e para a irrigação das culturas. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Comparação entre os cenários 10 a 18 em relação ao preço da água.

Cenário	Preço da água	Lucro médio	Variação no lucro	Vacas em produção	Consumo de água	Economia de água
	(R$/ m^3)	(R$/mês)	(%)	(animais)	(média m^3/mês)	(média m^3/mês)
1 (base)	0,00	13.851,29		117	2.291	-
10	0,01	13.828,38	-0,2%	117	2.291	-
11	0,10	13.622,19	-1,7%	117	2.291	-
12	0,15	13.507,64	-2,5%	117	2.291	-
13	0,30	13.164,01	-5,0%	117	2.291	-
14	1,00	11.561,30	-16,5%	117	2.289	2
15	3,00	6.994,14	-49,5%	116	2.281	10
16	4,00	4.758,32	-65,6%	116	2.211	80
17	5,00	2.552,93	-81,6%	115	2.198	93
18	6,00	364,69	-97,4%	114	2.079	212

Os resultados das simulações mostraram que, até o valor de R$ 0,30/m^3, o consumo de água permanece inalterado, muito embora haja impacto negativo no lucro médio da propriedade. Nesse nível de custo, a redução no lucro médio mensal seria de 5,0%. Interessante observar que a elevação do custo da água até o nível máximo considerado (R$ 6,00/m^3) faz com que o lucro médio mensal aproxime-se do valor zero, mas ainda assim, o número de animais do rebanho e, consequentemente, o volume de água consumido apresenta apenas ligeira redução, resultado que merece investigações mais aprofundadas.

5. CONCLUSÕES

O modelo desenvolvido mostrou-se útil na análise dos efeitos de variações nos parâmetros econômicos, logísticos e ambientais sobre a alocação de recursos em uma propriedade produtora de leite. A estrutura matemática desenvolvida permite a adaptação do modelo a outros tipos de propriedades agropecuárias caracterizadas pela integração entre culturas vegetais e produção de animais e seus produtos. Dessa forma, o modelo proposto pode dar origem à elaboração de ferramentas para a avaliação de impactos de políticas públicas ou privadas relacionadas à produção agropecuária.

Apesar da riqueza de resultados obtidos pelas simulações e da preocupação em se utilizar parâmetros que reflitam a realidade, deve-se deixar claro que muitos coeficientes técnicos ainda carecem de pesquisa científica para sua estimativa mais precisa, de modo que alguns resultados devem ser considerados com ressalvas. Especificamente sobre a aplicação do modelo na propriedade do estudo de caso, algumas considerações são destacadas.

A decisão pelo sistema de irrigação – instalado na propriedade há alguns anos – mostrou-se claramente vantajosa, pois permite o aumento da produção de alimentos para os animais e o uso mais racional e mais econômico dos dejetos animais. As simulações ainda indicaram que o aumento na área irrigada poderia elevar ainda mais o retorno econômico da propriedade.

A importância da logística de produtos, insumos, alimentos e dejetos foi comprovada nas simulações realizadas. Essas atividades apresentarem custos diretos, como pagamento de serviços ou consumo de combustível, além de demandam quantidades consideráveis de horas de trabalho, além se serem fontes de externalidades negativas representadas na pesquisa pela emissão de gás-carbônico. Para o manejo de dejetos dos animais, os custos logísticos são relevantes e, inclusive, proibitivos, principalmente para a distribuição de esterco na forma natural (esterco fresco). O desenvolvimento de novas tecnologias de captação, transporte e distribuição de dejetos apresentaria grande relevância nesse contexto. Esforços na transformação do esterco fresco em chorume também são importantes, pois sua logística é facilitada em comparação à do material sólido ou semi-sólido.

Os resultados dos modelos, para todos os cenários considerados, não indicaram que a propriedade deveria dedicar-se à criação de animais para a comercialização, no caso, a produção de novilhas e tourinhos. Em outras palavras, a alocação dos recursos para a produção e manutenção de um rebanho exclusivo para a produção leiteira emergiu como a melhor opção. Deve-se ponderar, contudo, que os preços considerados para a venda de animais foram médias dos valores praticados no mercado, independentemente da raça e da qualidade genética. É possível que estejam aquém do que poderia ser obtido, uma vez que o rebanho da propriedade é considerado de elevada qualidade genética. Assim, em ocasiões futuras, podem-se realizar simulações com preços eventualmente mais apropriados.

Em relação à geração e captação de gás-carbônico, os resultados foram promissores, não obstante, devem-se ser relembradas as ressalvas em relação à precisão dos parâmetros. As lavouras cultivadas apresentaram um potencial significativo de sequestro de CO_2 que, no balanço geral, poderiam, eventualmente, ser suficientes para compensar o total emitido. Todavia, quando a possibilidade de sequestro não é considerada, a fazenda passa a ter um balanço de emissões positivo e, na eventualidade de custos por tais emissões, haveria penalizações nos resultados financeiros. Apesar do impacto econômico negativo, pouco efeito teria na realocação dos recursos da propriedade, que continuaria praticamente com a mesma quantidade de animais.

Tendência semelhante seria observada para eventuais cobranças no uso da água. A principal conclusão, nesse sentido, é que dada a tecnologia atualmente utilizada, o impacto financeiro seria bastante expressivo, se não, proibitivo e, no pior dos casos, não implicaria economias do recurso. Os produtores apenas realocariam suas culturas vegetais para aquelas de sequeiro, que não seriam impactadas pela cobrança da água, de modo a gerarem economias compensatórias para manter quase que inalterado o tamanho do rebanho.

Medidas de outras naturezas devem ser idealizadas para estimular o uso mais racional dos recursos naturais nas atividades agropecuárias.

REFERÊNCIAS

ANNETTS, J.E.; AUDSLEY, E. Multiple objective linear programming for environmental farm planning. **Journal of Operational Research Society**, v.53, p.933-943, 2002.

ARAÚJO, L.A.; CAIXETA FILHO, J.V. Fronteira de eficiência econômica sob condições de risco para empresas agrícolas do sul de Santa Catarina. **Análise Econômica**, v. 16, n.29, p. 91-110, set. 1998.

AZEVEDO FILHO, A.J.B.V.; NEVES, E.M. O uso de programação matemática na análise de investimento na pecuária de corte: técnicas intensivas vs. mercado de capitais. **Anais.** I Congresso Latino-Americano de Pesquisa Operacional e Engenharia de Sistemas. Rio de Janeiro, Nov. 1982.

AZEVEDO FILHO, A.J.B.V.; NEVES, E.M. Pesquisa Operacional na Agricultura Brasileira. **Mini-curso**. 11ª. Reunião da Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada à Computação. Botucatu, 09 a 10 de junho de 1988.

BIAGIO, M.A.; ABE, E.N.; TURNES, O. Modelo para planejamento de Produção de grãos em fazenda familiar – cenários sócio-econômicos e financeiros. **Pesquisa Operacional**, v.27, n.3, p.377-405, set./dez., 2007

BUENO, A.R.S.; KINPARA, D.I.; CAIXETA FILHO, J.V. Development of mathematical models for Forest management: a survey. In: XX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. **Anais**. P.82-87, Campinas, Nov. 1992.

CAIXETA FILHO, J.V. Estrutura de Modelagem para Programação de Colheita de Laranja. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

CAIXETA FILHO, J.V. **Pesquisa Operacional:** Técnicas de Otimização Aplicadas a Sistemas Agroindustriais. São Paulo: Atlas, 2001.

CAIXETA FILHO, J.V.; van SWAAY NETO, J. M.; WAGEMAKER, A. P. Optimization of the Production Planning and Trade of Lily Flowers. **Interfaces**, vol. 32(1), January-February 2002, p. 35-46.

DETLEFSEN, N.K.; JENSEN, A.L. Modeling optimal crop sequences using network flows. **Agricultural Systems**, v.94, p.566-572, 2007.

DOGLIOTTI, S.; ROSSING, W.A.H. van ITTERSUM, M.K. ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. **European Journal of Agronomy**, v.19. p.239-250, 2003.

DOSSA, D. Programação Linear na gestão da propriedade rural um enfoque alternativo. **Teoria e Evidência Econômica**, v.2, n.4, p.33-60, 1994.

DUCHEYENE, E.I.; WULF, R.; BAETS, B. Single versus multiple objective genetic algorithms for solving the even-flow forest management problem. **Forest Ecology and Management**, v.201, n.2-3, p.259-273, 2004.

FIDELIS, A.C.; REIS, R.P. Decisão no planejamento bianual da colheita florestal: o uso da programação inteira mista. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v.39, n.2, p.9-26, 2001.

GAMEIRO, A.H. Avaliação Econômica Aplicada à Zootecnia: Avanços e Desafios. In. SANTOS, M.V.; PRADA E SILVA, L.F.; RENNÓ, F.P.; ALBUQUERQUE, R. (Ed.) **Novos Desafios da Pesquisa em Nutrição e Produção Animal**. Pirassununga: Editora 5D, 2009, 215p.

GAMEIRO, A.H.; CAIXETA FILHO, J.V.; BARROS, C.S. Modelagem matemática para o planejamento, otimização e avaliação da produção agropecuária. In: **Novos Desafios para a Pesquisa em Nutrição e Produção Animal.** Pirassununga: Editora 5D, 2010, 259p.

GARCIA, O. Linear Programming and Related Approaches in Forest Planning. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v.20, n.3, p.307-331, 1990.

JANSEN, S.; ITTERSUM, M.K. Assessing farm innovations and responses to policies: a review of bio-economic farm models. **Agricultural Systems**, v.94, p.622-636, 2007.

KANGAS, J.; KANGAS, A. Multiple criteria decision support in forest management: the approach, methods, applied and experiences gained. **Forest Ecology and Management**, v.207, p.133-143, 2005

KARMAKAR, S.; LAGUË, C.; AGNEW, J.; LANDRY, H. Integrated decision support system (DSS) for manure management: a review and perspective. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.57, p.190-201, 2007.

KIEHL, E.J. **Novo Fertilizantes Orgânicos**. Piracicaba: 1a edição do autor, 2010. 248p.

KILLEN, L.; KEANE, M. A Linear Programming model of seasonality in Milk production. **Journal of Operational Research Society**, v.29, n.7, p.625-631, 1978.

MACCARL, B.A. GAMS User Guide: version 23.3, 777p. 2010. Disponível em: <http://www.gams.com/dd/docs/bigdocs/gams2002/mccarlgamsuserguide.pdf>

MILAN, P. Modelagem matemática para a otimização da produção de cafés finos: um estudo de caso. Piracicaba, 2008. Dissertação (M.S.) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

OHMAN, K.; LAMAS, T. Clustering of harvest activities in multi-objective long-term forest planning. **Forest Ecology and Management**, v.176, n.1-3, p.161-171, 2003.

QINGZHEN, Z.; CHANGYU, W.; ZHIMIN, Z. The application of Operations Research in the optimization of agricultural production. **Operations Research**, v.39, n.2, p.194-205, Mar./Apr, 1991.

SANTOS, L.M.R. Programação de rotação de culturas: modelos e métodos de solução. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, 2009. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

SILVA NETO, B.; OLIVEIRA, A. **Modelagem e planejamento de sistemas de produção agropecuária**: manual de aplicação da programação matemática. Ijuí: Ed. Unijuí, 2009. 288p.

SILVA NETO, B.; RETZLAFF, E. Otimização sob incerteza de sistemas de produção: Interação lavoura-pecuária, com ênfase em bovinocultura de leite. **Ciência Rural**, v.34, n.4, p.1207-1212, jul-ago. 2004.

TONIELLO, B.L.; CAIXETA FILHO, J.V. Utilização de Programação Linear para planejamento agrícola em propriedade da região Centro-Oeste. **Informe GEP/DESR**, v.5, n.3, p.1-7, mar. 1992.

VAN HORN, H.H., WILKIE, A C., POWERS, W.J., NORDSTEDT, R.A. Components of dairy manure management systems. **Journal Dairy Science**, v.77, n.7, p.2008-30, 1994.