

CAPÍTULO IX

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA O PLANEJAMENTO, OTIMIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

Augusto Hauber Gameiro¹
José Vicente Caixeta Filho²
Carina Simionato de Barros²

¹Professor Doutor, Departamento de Nutrição e Produção Animal, Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo, Campus Pirassununga. E-mail: gameiro@usp.br.

²Professor Titular, Departamento de Economia, Administração e Sociologia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Campus Piracicaba. E-mail: jvcaixet@esalq.usp.br.

³Médica Veterinária, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Produção Animal, Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo, Campus Pirassununga. E-mail: carinaveter@gmail.com.

RESUMO

O objetivo deste capítulo é analisar o surgimento e os avanços da modelagem matemática, com destaque para a área do conhecimento denominada de “Pesquisa Operacional”, aplicada ao planejamento e avaliação da produção agropecuária. É apresentado um modelo matemático multiobjetivo para otimização e avaliação de uma propriedade rural caracterizada pela integração entre lavoura (culturas vegetais) e pecuária (culturas animais). Procurou-se ressaltar que o aumento da complexidade envolvida nos sistemas produtivos, em função da necessidade de se considerar aspectos sociais e ambientais, além dos técnicos, implicará esforços para o desenvolvimento de novos métodos e ferramentas auxiliares no processo de tomada de decisão quanto às três questões centrais dos sistemas sociais: o que produzir, como produzir e para quem produzir. Como resultado, tem-se que o modelo pode ser utilizado como ferramenta para simular os impactos na realocação dos recursos diante de mudanças nas prioridades (pesos) atribuídas a cada um dos três grupos de variáveis consideradas: econômicas, ambientais e sociais. Todavia, para a elaboração do modelo é necessário que se tenha disponível um detalhamento bastante minucioso dos dados, o que implicará tanto esforços gerenciais de campo, quanto da pesquisa científica.

1. INTRODUÇÃO

Fazer uso racional dos recursos disponíveis é um desafio que se confunde com a própria história da humanidade. Independentemente da

localização geográfica das civilizações e da sua época, eleger o que será produzido, como será produzido e de que forma a produção será consumida configuram-se como as três questões centrais das sociedades, sejam elas tradicionais ou ditas modernas.

O desafio, portanto, é historicamente, o mesmo. Todavia, quando se pensa em uso racional abre-se espaço para diversas reflexões. A evolução dos seres humanos e a sua capacidade de interferir no meio em que vivem alteram as relações homem-homem e homem-natureza, modificando a racionalidade das mesmas. Se a simples coleta de frutos e sementes, assim como a caça, eram métodos racionais de subsistência há milhares de anos, não o são hoje para a maioria das civilizações.

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 o meio rural, definir os cultivos e/ou as criações que, conjuntamente ou não, permitem o maior retorno do empreendimento com uma interferência negativa que seja mínima ou, pelo menos, suportável sobre o meio, destaca-se como estratégia iminente de grande parte das civilizações contemporâneas.

Importante ressaltar que a consideração conjunta desses cultivos implica maior necessidade do conhecimento: i) de suas características biológicas intrínsecas (botânicas e zoológicas); ii) do solo, que é base de sustentação; 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 (disponibilidades, 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.).

Fica evidente, por conseguinte, que há uma complexidade significativa envolvida na configuração desses sistemas produtivos. Há muitos fatores relacionados, com inúmeras relações de causa e efeito envolvidas.

Planejar a produção agropecuária, tendo como foco a propriedade como um todo (uma determinada área territorial) e sua inserção social, visando o uso mais racional possível (otimização) dos seus recursos, vem sendo tema de pesquisa científica nas últimas quatro décadas, especialmente no campo das ciências exatas (engenharias, com o conhecimento de modelagem matemática) e agrárias (com o conhecimento das culturas agrícolas e pecuárias). Mais recentemente, outras áreas do conhecimento, em especial aquelas relacionadas às ciências biológicas e ambientais (como a ecologia, por exemplo) e as humanas (economia, administração e sociologia), também passaram a se

dedicar mais diretamente ao problema do planejamento e da otimização da produção agropecuária.

O objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão de literatura destacando o surgimento e os avanços da modelagem matemática, com destaque para a área do conhecimento denominada de “Pesquisa Operacional”, aplicada ao planejamento e avaliação da produção agropecuária. Procurar-se-á destacar os avanços no sentido de se incluir, em tais modelos, aspectos ambientais e sociais. É apresentado um modelo matemático multiobjetivo para otimização e avaliação de uma propriedade rural caracterizada pela integração entre lavoura (culturas vegetais) e pecuária (culturas animais).

2. A DISPONIBILIDADE DOS RECURSOS, OS SISTEMAS INTEGRADOS E A OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

O desenvolvimento de modelos de otimização de sistemas de produção agropecuários vem despertando a curiosidade dos cientistas desde meados do século XX, quando a complexidade das relações técnicas de produção aumentou significativamente com o advento e utilização de insumos e tecnologias responsáveis pelo incremento da produtividade de cultivos vegetais e animais.

Eleger as culturas mais adequadas, suas respectivas áreas cultivadas, o padrão tecnológico, o número e as categorias de animais, diante de recursos escassos (terra, equipamentos, mão de obra, insumos etc.) caracteriza-se como o problema central desses modelos.

Mais recentemente, como mencionado na introdução, adiciona-se ao contexto a preocupação com o ecossistema, ou seja, a interferência do sistema sobre o ambiente à sua volta, especialmente no que se refere: i) à conservação de recursos naturais (maciços vegetais, mananciais hídricos etc.); ii) ao uso intensivo de recursos não-renováveis (especialmente os derivados de petróleo); e iii) à geração de resíduos (excrementos animais, agroquímicos, gases do efeito estufa etc.).

Além da dimensão técnica-econômica e ambiental, algumas sociedades passaram a se preocupar com a influência dos sistemas agropecuários na matriz de relações sociais, por perceberem a relevância que o meio rural apresenta na manutenção cultural, da história e na geração de renda e ocupação das pessoas. Tais preocupações são perceptíveis com mais nitidez na União Européia, que apresenta certa tradição na formulação de políticas agrícolas que visavam, originalmente, a segurança alimentar. No entanto, atualmente, ganham dimensões maiores exatamente por contemplarem o serviço ambiental e social que o meio rural pode proporcionar à sociedade como um todo.

O uso de recursos não-renováveis na agricultura foi recentemente discutido por Lana (2009). O autor apresenta alguns exemplos de possibilidade

iminente de exaustão de alguns recursos. As reservas de fosfato no mundo, que podem ser exploradas a baixo custo, são suficientes para 40 a 100 anos e as reservas mundiais de potássio são suficientes para 50 a 200 anos. Para os micronutrientes a situação é ainda mais delicada: as reservas de cobre e zinco são suficientes para 60 anos, de manganês para 35 anos e de selênio para 55 anos.

Além da escassez dos recursos naturais, Lana (2009) alertou para a questão da contaminação do ambiente pelo uso de insumos na agropecuária. Para o pesquisador, o uso excessivo de fertilizantes pode contribuir para a contaminação do solo e dos cursos d'água com nitrato, acidificação do solo e emissões de dióxido de carbono, óxido nitroso (N_2O) e amônia para a atmosfera. A poluição com nitrato tem sido uma atual preocupação na Europa e América do Norte. A fertilização com fósforo e nitrogênio causa decréscimo na oxigenação da água pelo excessivo aumento na população de algas tóxicas nos oceanos (Lana, 2009).

No que se refere à emissão de gases, Lana (2009) afirma que aproximadamente 70% de todas as emissões antropogênicas de N_2O são atribuídas à agricultura. Há uma correlação direta entre emissão de N_2O e aplicação de fertilizantes. O N_2O retém 13 vezes mais calor que o metano e 270 vezes mais que o CO_2 (Lana, 2009). Estudos no sentido de se estimar a emissão de gases pelos animais também vêm sendo desenvolvidos. Um exemplo é a pesquisa recente de Burgos et al. (2010), que procuraram avaliar a emissão de amônia por vacas leiteiras.

Além de despertar para a seriedade da questão ambiental, o principal aspecto trabalhado por Lana (2009) refere-se ao fato que as necessidades nutricionais dos sistemas de recomendação consideram um determinado nível de produção, e a conseqüente exigência nutricional para atingi-la, sem, na maioria das situações, considerarem-se os aspectos econômicos da relação custo-benefício dos diferentes nutrientes e dos ganhos de produção auferidos.

Um aspecto chave quando se considera a necessidade de otimização de sistemas de produção agropecuária é a integração entre os cultivos vegetais e os animais, conhecida genericamente por “integração lavoura-pecuária” (ILP). Duas referências recentes sobre o assunto no país são Balbinot Junior et al. (2009) e Macedo (2009).

Para Balbinot Junior et al. (2009), a ILP pressupõe o uso contínuo das áreas agrícolas e a melhoria e manutenção da qualidade do solo ao longo do tempo. Segundo esses autores, a ILP “pode ser definida como um sistema de produção que alterna, na mesma área, o cultivo de pastagens anuais ou perenes, destinadas à produção animal, e culturas destinadas à produção vegetal, sobretudo grãos” (p.1926). Para os estados do Sul do Brasil, aqueles autores afirmam que os sistemas de ILP acontecem sob três estratégias básicas:

i) pastagens anuais de inverno e culturas para produção vegetal no verão; ii) pastagens anuais de verão e culturas para produção vegetal no inverno; e iii) pastagens perenes por alguns anos, intercalando um ou mais anos com culturas anuais.

Balbinot Junior et al. (2009), afirmam que os sistemas de ILP podem propiciar vantagens biológicas e econômicas em relação aos sistemas não-integrados. As vantagens biológicas, segundo os autores seriam: i) aumento na velocidade de ciclagem de nutrientes: os animais representam agentes aceleradores da ciclagem de nutrientes, principalmente pela aceleração na mineralização dos nutrientes contidos na massa vegetal. Segundo Russelle (1997), os animais devolvem ao solo, via fezes e urina, cerca de 70% a 95% dos nutrientes que ingerem; e ii) Melhoria da qualidade do solo: os sistemas de ILP podem aumentar as concentrações de carbono orgânico no solo ao longo do tempo, devido ao crescimento contínuo de plantas na área, seja pastagens ou culturas para exploração vegetal, rotação de culturas, incremento da massa produzida por tempo em decorrência do pastejo e maior ciclagem de nutrientes.

Já em relação às vantagens econômicas sugeridas por Balbinot Junior et al. (2009), tem-se: i) Diversificação de renda: resultante da produção vegetal e animal na mesma área; ii) Redução de riscos de insucesso econômico: também pela diversificação de atividades econômicas; e iii) Aumento da renda por área: devido ao aumento da produtividade por área e à redução dos custos de produção devido às vantagens biológicas.

Já para Macedo (2009), dois aspectos chamam a atenção quando se analisa sustentabilidade dos sistemas agropecuários: o uso do solo com preparo excessivo e monocultivos, e a degradação das pastagens. Segundo o autor, o monocultivo e práticas culturais inadequadas na agricultura, como o preparo tradicional do solo, têm causado queda na produtividade, degradação do solo e dos recursos naturais. Sistemas contínuos de monocultivos, por sua vez, aumentam a ocorrência de pragas e doenças, tais como o percevejo castanho da soja, o cancro da haste, o nematóide das galhas, e o nematóide do cisto com inúmeros prejuízos à sojicultura, e mais recentemente a ferrugem da soja. Completa Macedo (2009) que, na ILP, a introdução de lavouras não é eventual mas parte constante de um sistema de produção de grãos e de produção animal que interagem e se completam em aspectos do manejo, da fertilidade, da física e da biologia do solo, aumentando a renda dos produtores e trazendo progresso social ao campo. Para o autor, mais recentemente tem crescido a ILP como alternativa muito eficiente, porém mais complexa, de manutenção da produtividade e de recuperação/renovação indireta de pastagem.

As vantagens da ILP também foram discutidas por Macedo (2009). Para o autor, do ponto de vista das propriedades físicas e químicas do solo, há uma melhoria na fertilidade, pela ciclagem dos nutrientes e eficiência no uso

de fertilizantes, em função das diferentes necessidades das culturas em rotação. As alterações nas propriedades físicas têm sido o aumento da estabilidade dos agregados, a diminuição da densidade aparente, a compactação e o aumento da taxa de infiltração de água.

Outra vantagem citada por Macedo (2009) refere-se à possibilidade de redução de pragas, doenças e plantas invasoras. De forma geral, o autor sugere como principal hipótese favorável à ILP o efeito positivo das lavouras em elevar a fertilidade, amortizando os custos pela venda dos grãos, subprodutos e a melhoria das propriedades físicas pela ação das raízes das forrageiras, que melhorariam a estrutura, elevariam os estoques de carbono, e a capacidade de infiltração e retenção de água no solo. Completa ainda que, com a melhoria dessas qualidades haveria, também, um incremento na densidade e na riqueza da fauna do solo e outros atributos microbiológicos.

Outros autores discutem amplamente as vantagens da integração entre lavoura e pecuária. São eles: Fontaneli et al. (2000), Ambrosi et al. (2001), Costa & Macedo (2001), Cobucci et al. (2007), Muniz (2007), Martha Jr. et al. (2008).

A adoção da ILP, portanto, implica lidar com a complexidade dos sistemas produtivos, em especial pela inter-relação entre solo, planta, animal, homem e ambiente. Nesse sentido, os modelos matemáticos podem ser úteis na tentativa de se representar, de forma mais sucinta e objetiva, as principais relações de causa e efeito dos sistemas produtivos e, com isso, gerar um nível menor de incerteza nas tomadas de decisão dos agentes envolvidos (Gameiro, 2009).

Especificamente em relação ao uso dos modelos de tomada de decisão por parte dos agricultores e pecuaristas, Rennó (2005) abordou suas principais vantagens e refere-se a tais modelos como “sistemas de suporte à decisão” (SSD). Para o autor, referenciando-se em Newman et al. (1999), a utilização de SSD na produção animal permite aos produtores obterem vantagens como: 1) integrar as informações pertinentes aos seus sistemas de produção numa forma mais utilizável; 2) melhorar as técnicas de manejo utilizadas e, desta forma, implementar e aperfeiçoar a tomada de decisão; 3) aumentar a capacidade de analisar o custo/benefício e o risco das modificações introduzidas nos sistemas de produção e; 4) permitir que sejam realizadas comparações efetivas de custos de produção sob várias alternativas de produção.

Ainda para Rennó (2005) a técnica de análise de sistemas de produção através da simulação, aplicada no contexto da produção pecuária, permite perceber como o sistema reagirá diante de mudanças genéticas, de manejo ou ambientais, assim como testar novas hipóteses. A contribuição dos modelos de simulação computacionais à análise de sistemas pecuários, já existentes ou projetados, tem se tornado mais importante devido ao avanço das

técnicas computacionais e à necessidade de maior integração dos resultados experimentais das diversas disciplinas.

Do ponto de vista de definição e avaliação de políticas públicas com uso de modelos matemáticos, os trabalhos mais recentes que consideram sua adoção têm sido desenvolvidos na Europa, em especial na Universidade de Wageningen, na Holanda. O artigo de Janssen & Ittersum (2007) apresenta uma ampla revisão sobre os modelos denominados “bioeconômicos” aplicados na agropecuária. Esses são modelos que procuram considerar os aspectos econômicos, sociais e ambientais, tanto em nível local (em termos de gleba de terra), quanto em nível macro (nacional, continental, mundial). Tais esforços vêm sendo conduzidos, em grande parte, no contexto de um amplo projeto denominado *System for Environmental and Agricultural Modelling* (SEAMLESS). Trata-se de um projeto da União Européia, composto por 29 instituições de pesquisa, com especialistas nas áreas de agricultura, ecologia, economia, gestão de fazendas, tecnologia da informação, análise institucional, pesquisa participativa, sociologia, análise de sistemas e simulação, e engenharia de sistemas (SEAMLESS, 2010).

Nesse sentido, vale o registro de uma das principais áreas de conhecimento relacionadas à modelagem matemática com vistas à otimização: a Pesquisa Operacional. A Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SOBRAPO) a define como:

“[...] uma ciência aplicada voltada para a resolução de problemas reais. Tendo como foco a tomada de decisões, aplica conceitos e métodos de várias áreas científicas na concepção, planejamento ou operação de sistemas. A Pesquisa Operacional é usada para avaliar linhas de ação alternativas e encontrar as soluções que melhor servem aos objetivos dos indivíduos ou organizações. Através de desenvolvimentos de base quantitativa, a Pesquisa Operacional visa também introduzir elementos de objetividade e racionalidade nos processos de tomada de decisão, sem descuidar, no entanto, dos elementos subjetivos e de enquadramento organizacional que caracterizam os problemas” (SOBRAPO, 2010).

As aplicações de modelagem visando à otimização da produção agropecuária começaram a surgir com mais evidência na década de 70. Alguns trabalhos referenciais internacionalmente são: Beneke & Winterboer (1973), Casey (1977), Balm (1980), Sargent (1980), Butterworth (1985) e Zuo et al. (1991).

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 Linear⁴ a 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 na época.

Azevedo Filho & Neves (1988) afirmam que a Pesquisa Operacional, e em especial a Programação Linear – uma de suas principais técnicas –, 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 identificam 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, no estado, 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 que otimizasse o modelo. As exigências nutricionais

⁴A “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.

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 culturas 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 cultura foram calculadas as áreas ótimas para cada atividade. 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, grãos de inverno e verão no 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 incluindo o risco, 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. Este trabalho, antes de ser publicado, recebeu no ano de 2001 o “*Franz Edelman Award - Honorable Mention*”, do *Institute for Operations Research and the Management Sciences* (INFORMS), principal entidade norte-americana promotora da Pesquisa Operacional.

A experiência na aplicação da Pesquisa Operacional pela 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 na tomada de decisão 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 - especialmente o sequenciamento de colheita -, de

cafés finos em uma fazenda localizada no estado de São Paulo.

A aplicação de técnicas de otimização, em especial a Programação Linear, tem sido particularmente mais recorrente para o planejamento e corte de áreas de produção florestal. São exemplos de referências nesse sentido: Garcia (1990), Bueno et al. (1993), 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 dessas técnicas, a grande parte considera apenas variáveis e restrições de ordem técnica e econômica, sendo raros os que incluem variáveis ambientais e, ainda mais escassos aqueles que incluem variáveis sociais.

Quingzhen et al. (1991) descreveram a aplicação de um modelo de programação linear em um projeto de desenvolvimento 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 (maximização do lucro), quanto ambientais. Trata-se de uma referência bastante interessante para a inspiração de modelos com múltiplos objetivos por meio da Programação Linear.

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

Dogliotti (2003) tem sido uma importante referência para trabalhos de planejamento da produção 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 base sustentável de hortaliças. Segundo a autora, a produção de hortaliças é particularmente complexa por envolver um grande número de culturas com limitações específicas no que se refere a aspectos técnicos, como época de plantio e colheita; e a aspectos ecológicos, como adubação verde, pousio, dentre outros.

Aplicações de modelagem matemática especificamente na área da Zootecnia também vêm sendo desenvolvidas mais recentemente. Karmakar et al. (2007) elaboraram uma completa 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. Os autores desenvolveram 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), que certamente também passará a compor a biblioteca dos estudiosos de Pesquisa Operacional aplicada à produção.

3. PROPOSIÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO MULTI OBJETIVO DE PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE UMA PROPRIEDADE RURAL

O modelo para planejamento e otimização de propriedade rural caracterizada pela integração entre lavoura e pecuária a ser apresentado nesta seção pode ser classificado como “multiobjetivo”. O que caracteriza um modelo de Programação Linear como “multiobjetivo” – tal como sugere o nome – é o fato de sua função objetivo ser composta por mais de um conjunto de atributos a serem otimizados.

Tradicionalmente, a função objetivo é composta por um único atributo, como o lucro, por exemplo, a ser maximizado. Contudo, diante da necessidade iminente de se contemplar, nos estudos de planejamento agropecuário, também variáveis ambientais e sociais, é necessário que se trabalhe com uma função multiobjetivo, como será descrito na sequência.

Será apresentada a estrutura matemática básica de um modelo dessa natureza, com o intuito de se discutir: i) a importância de tal ferramenta; ii) a necessidade de se dispor de dados relevantes para o seu processamento; iii) sua potencialidade em termos de respostas e análises que podem ser obtidas e desenvolvidas, respectivamente; e iv) suas principais limitações.

3.1. Função multiobjetivo:

$\text{Max } MOBJ = (\alpha_1 \times LE) - (\alpha_2 \times IA) + (\alpha_3 \times IS)$	(1)
---	-----

Onde:

α_j = peso atribuído ao objetivo j .

LE = lucro econômico;

IA = impacto ambiental; e

IS = inserção social.

A função multiobjetivo é assim composta:

$\text{Max } \alpha_1 \times LE$	(2)
$\text{Min } \alpha_2 \times IA$	(3)
$\text{Max } \alpha_3 \times IS$	(4)

As expressões (2), (3) e (4) representam, respectivamente, os objetivos relacionados à maximização do lucro, à minimização do impacto ambiental e à maximização da inserção social.

3.2. Variáveis endógenas:

3.2.1. Quantidade das culturas

$$X_{i,t}$$

$X_{i,t}$ representa a quantidade (em hectares, se forem culturas vegetais e em cabeças se forem criações animais) da cultura i no período t .

3.2.2. Quantidades movimentadas

$$Z_{i^A, i^V, f, t}$$

$Z_{i^A, i^V, f, t}$ representa a quantidade (em unidade de peso) movimentada de material fertilizante f da cultura animal (i^A) para a cultura vegetal (i^V) no período t .

$$Y_{i^V, i^A, n, t}$$

$Y_{i^V, i^A, n, t}$ representa a quantidade (em unidade de peso) movimentada de nutriente n da cultura vegetal (i^V) para a cultura animal (i^A) no período t .

3.3. Restrições econômicas

3.3.1. Lucro econômico (LE): representado pela receita (R) diminuída pelos custos variáveis (CV) e fixos (CF) de produção, pelos custos logísticos de suprimento de insumos (CS) e de distribuição de produtos (CD).

$$LE = R - CV - CS - CD - CF \quad (5)$$

Desmembrando-se a equação (5) tem-se que:

3.3.2. Receita (R): preço do produto, multiplicado pela sua produtividade e pela quantidade (área para vegetais e cabeças para animais):

$$R = \sum_{i^V} precoprod_{i^V} \times produtividade_{i^V} \times X_{i^V, t} \quad (6)$$

onde:

$precoprod_{i,t}$ = preço do produto i (R\$/t para produtos vegetais ou R\$/UA⁵ para produtos animais), no período t ;

$produtividade_{i,t}$ = produtividade da cultura i no período t (t/hectare ou UA/cabeça); e

$X_{i,t}$ = quantidade da cultura i no período t (hectares para vegetais e cabeças para animais).

3.3.3. Custo Variável (CV): somatória dos custos variáveis de produção multiplicados pela quantidade:

$$CV = \sum_{i,t} custov_{i,t} \times X_{i,t} \quad (7)$$

onde:

$custov_{i,t}$ = custos variáveis (fertilizantes, defensivos, sementes, inseminação, combustível, medicamentos, rações, suplementos etc.), em R\$/hectare ou R\$/animal. Mais especificamente para culturas vegetais:

$$custov_{i,t} = custosem_{i,t} + custofer_{i,t} + custodef_{i,t} + custocom_{i,t} + custoser_{i,t} \quad (8)$$

Para culturas animais:

$$custov_{i,t} = custoins_{i,t} + customt_{i,t} + customed_{i,t} + custocom_{i,t} + custoser_{i,t} \quad (9)$$

Em (8) e (9), tem-se os seguintes custos variáveis:

3.3.3.1. Sementes

$custosem_{i,t}$ = custo com semente na cultura i no período t (R\$/hectare):

$$custosem_{i,t} = psem_{i,t} \times qsem_{i,t} \quad (10)$$

$psem_{i,t}$ representa o preço unitário da semente i no período t (R\$/kg) e $qsem_{i,t}$ a quantidade da semente i a ser utilizada em t (kg/hectare).

Consequentemente, a quantidade total utilizada da semente i em t será:

$$Qsem_{i,t} = qsem_{i,t} \times X_{i,t} \quad (11)$$

⁵Para simplificar a representação do modelo, será utilizada a sigla “UA” para representar “unidade animal”, podendo esta dizer respeito ao número de cabeças, à quantidade de litros de leite, número de ovos, quilogramas de peso vivo etc., dependendo da situação. Quando for considerado necessário, esta equivalência será devidamente detalhada.

3.3.3.2. Fertilizantes

$custofer_{i,t}$: custo com todos os fertilizantes f na cultura i no período t (R\$/hectare):

$$custofer_{i,t} = \sum_f pfer_{ft} \times qfer_{i,ft} \quad (12)$$

$pfer_{i,t}$ representa o preço unitário do fertilizante f a ser aplicado na cultura i no período t (R\$/kg) e $qfer_{i,t}$ a quantidade do fertilizante f a ser utilizada em t (kg/hectare). Assim, tem-se que:

$$Qfer_{i,t} = \sum_f qfer_{i,t} \times X_{i,t} \quad (13)$$

TROCAS DE FERTILIZANTES

As culturas animais são potenciais ofertantes de fertilizantes para as culturas vegetais (potenciais demandantes). Essa troca implica custos logísticos de movimentação dos resíduos animais (esterco, basicamente). Considera-se, portanto, outro conjunto de variáveis endógenas ($Z_{i^A,i^V,f,t}$), representadas pelas quantidades movimentadas de cada cultura animal (i^A) para cada cultura vegetal (i^V), tal como já apresentado anteriormente.

A quantidade do fertilizante f ofertado pela cultura animal i^A no período t deve totalizar as quantidades movimentadas para as potenciais culturas vegetais i^V , que representam os destinos demandantes. Portanto, para todo fertilizante f , toda i^A em todo t , tem-se que:

$$Qfer_{i,t} = \sum_f qfer_{i,t} \times X_{i,t} \quad (13)$$

Além dessa oferta das culturas animais, deve-se considerar a possibilidade de aquisição dos fertilizantes no mercado:

$$ofer_{i^V,f,t} \times X_{i^V,t} = \sum_{i^A} Z_{i^A,i^V,f,t} + RS_{i^V,f,t} \quad (14)$$

onde $ofer_{i^V,f,t}$ é a quantidade do fertilizante f adquirido no mercado no período t , que deve totalizar a soma dos fluxos logísticos $Z_{i^A,i^V,f,t}$ desse fertilizante com destino às culturas vegetais i^V no período t .

A demanda por fertilizante pelas diferentes culturas vegetais i^V também deve ser considerada visando o equilíbrio, tal que:

$$Dfer_{i^V,f,t} = \sum_{i^A} Z_{i^A,i^V,f,t} + \sum_{i^M} Z_{i^M,i^V,f,t} \quad (16)$$

3.3.3.3. Defensivos

$custodef_{i,t}$: custo com defensivo na cultura i no período t (R\$/hectare):

$$custodef_{i,t} = \sum_d pdef_{d,t} \times qdef_{i,d,t} \quad (17)$$

$pdef_{d,t}$ representa o preço unitário do defensivo d a ser aplicado na cultura i no período t (R\$/kg ou R\$/l) e $qdef_{i,d,t}$ a quantidade do fertilizante f a ser utilizada em t (kg/hectare ou l/hectare). Consequentemente, a quantidade total utilizada de defensivos na cultura i em t será:

$$Qdef_{i,t} = \sum_d qdef_{i,d,t} \times X_{i,t} \quad (18)$$

3.3.3.4. Combustível

$custocom_{i,t}$ = custo com combustível na cultura i no período t (R\$/hectare);

$$custocom_{i,t} = pcom_{i,t} \times qcom_{i,t} \quad (19)$$

sendo $pcom_{i,t}$ o preço unitário do combustível no período t (R\$/l) e $qcom_{i,t}$ a quantidade de combustível a ser utilizada na cultura i em t (kg/hectare). Consequentemente, a quantidade total utilizada de combustível em t será:

$$Qcom_{i,t} = qcom_{i,t} \times X_{i,t} \quad (20)$$

3.3.3.5. Serviços

$custoser_{i,t}$ = custo com serviços na cultura i no período t (R\$/hectare);

$$custoser_{i,t} = pser_{i,t} \times qser_{i,t} \quad (21)$$

sendo $pser_{i,t}$ o preço unitário do serviço no período t (R\$/hora) e $qser_{i,t}$ a quantidade de horas a serem utilizadas na cultura i em t (hora/hectare). Consequentemente, a quantidade total utilizada de serviços em t será:

$$Qser_{i,t} = qser_{i,t} \times X_{i,t} \quad (22)$$

3.3.3.6. Inseminação

$custoins_{i,t}$ = custo com inseminação para a pecuária i no período t (R\$/animal);

$$custoins_{i,t} = pins_{i,t} \times Qins_{i,t} \quad (23)$$

sendo $pins_{i,t}$ o preço unitário da inseminação no período t (R\$/dose) e $qins_{i,t}$ a quantidade de doses a serem utilizadas na cultura i em t (dose/animal). Consequentemente, a quantidade total utilizada de inseminação em t será:

$$Qins_{i,t} = qins_{i,t} \times X_{i,t} \quad (23)$$

3.3.3.7. Nutrição animal

$custom_{i,t}$ = custo com nutrição para a pecuária i no período t (R\$/animal);

$$custom_{i,t} = \sum_g ping_{g,t} \times qing_{i,g,t} \quad (24)$$

sendo $ping_{g,t}$ o preço unitário do ingrediente g (farelo de soja, pelet de polpa cítrica, caroço de algodão etc.) a ser fornecido à pecuária i no período t (R\$/kg) e $qing_{i,g,t}$ a quantidade do ingrediente g a ser utilizada em t (kg/animal).

Portanto:

$$Qingt_{i,t} = \sum_g qing_{i,g,t} \times X_{i,t} \quad (25)$$

TROCAS DE NUTRIENTES

As culturas vegetais são potenciais ofertantes de nutrientes para as culturas animais (potenciais demandantes). Essa troca implica custos logísticos de movimentação dos nutrientes. Considera-se, portanto, outro conjunto de variáveis endógenas ($Y_{i^V, i^A, n, t}$), representadas pelas quantidades movimentadas de cada cultura vegetal (i^V) para cada cultura animal (i^A), tal como já apresentado anteriormente.

A quantidade do nutriente n ofertado pela cultura vegetal i^V no período t deve totalizar as quantidades movimentadas para as potenciais culturas animais i^A que representam os destinos demandantes. Portanto, para todo nutriente n , toda i^V em todo t , tem-se que:

$$omut_{i^V, n, t} \times X_{i^V, t} = \sum_{i^A} Y_{i^V, i^A, n, t} \quad (26)$$

Além dessa oferta das culturas vegetais, deve-se considerar a possibilidade de aquisição dos nutrientes no mercado, ou seja:

$$Qnut_{i^M, i^A, n, t} = \sum_{i^A} Y_{i^M, i^A, n, t} \quad (27)$$

onde $Qnut_{i^M, i^A, n, t}$ é a quantidade do nutriente n adquirido no mercado no período t , que deve totalizar a soma dos fluxos logísticos desse nutriente a partir da

fonte de suprimento do mercado i^M com destino às culturas animais i^A no período t .

Os nutrientes n (proteínas, carboidratos, lipídeos e sais minerais) estão contidos em ingredientes g (farelo de soja, pellet de polpa cítrica, grão de milho etc.), de modo que se deve considerar a sua relação:

$$Qnut_{i^M, i^A, n, t} = \sum_g c_{n, g} \times Qing_{g, t} \quad (28)$$

A quantidade no nutriente n , a partir do mercado i^M a ser fornecida à pecuária i^A será a soma das quantidades dos diferentes ingredientes g multiplicadas pelas concentrações c do nutriente nos respectivos ingredientes.

A demanda por nutriente pelas diferentes culturas animais $Dnut_{i^A, n, t}$ também deve ser considerada visando o equilíbrio, tal que:

$$Dnut_{i^A, n, t} = \sum_{i^V} Y_{i^V, i^A, n, t} + \sum_{i^M} Y_{i^M, i^A, n, t} \quad (29)$$

A dinâmica das relações de troca entre culturas vegetais e animais, para fertilizantes e nutrientes, pode ser representada pela Figura 1.

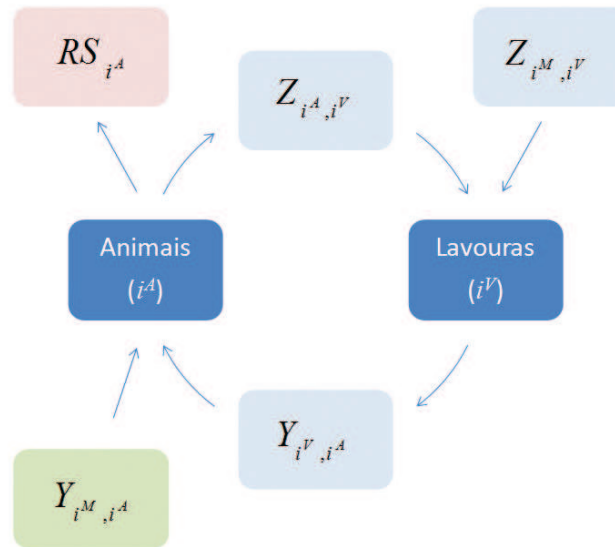


Figura 1. Dinâmica de trocas de fertilizantes e nutrientes entre culturas animais e vegetais.

Uma determinada cultura animal i^A pode fornecer a quantidade $Z_{i^A, i^V, f, t}$ de material fertilizante (basicamente representado pelos dejetos orgânicos) para a cultura vegetal (i^V). Caso alguma quantidade desse material

não venha a ser aproveitada pelas culturas vegetais, é caracterizado como resíduo RS_i^A , sendo disposto, de alguma forma, no ambiente. Além do material fertilizante ofertado pelas culturas animais, pode ser necessária a obtenção de certa quantidade do fertilizante no mercado (compra). Este fluxo é representado pela variável Z_i^M, V . De forma análoga, as culturas vegetais (i^V) podem fornecer os nutrientes para as culturas animais Y_i^V, A , via a produção e o fornecimento de grãos, forragens, silagens e resíduos vegetais. Quando não suficiente, a propriedade terá de adquirir tais nutrientes no mercado: Y_i^M, V .

3.3.3.8. Medicamentos

$customed_{i,t}$: custo com medicamentos para a pecuária i no período t (R\$/animal);

$$customed_{i,t} = \sum_m pmed_{m,t} \times qmed_{i,m,t} \quad (30)$$

sendo $pmed_{m,t}$ o preço unitário do medicamento m a ser fornecido à pecuária i no período t (R\$/dose) e $qmed_{i,t}$ a quantidade do ingrediente g a ser utilizada em t (dose/animal). Consequentemente, a quantidade total utilizada de medicamentos na cultura i em t será:

$$Qmed_{i,t} = \sum_m qmed_{i,m,t} \times X_{i,t} \quad (31)$$

3.3.4. Custo de Suprimento (CS): custo de suprimento de todos os insumos utilizados em todas as culturas i e períodos t considerados:

$$Qmed_{i,t} = \sum_m qmed_{i,m,t} \times X_{i,t} \quad (31)$$

de tal forma que:

$$CSsem_{i,t} = ctsem_{i,t} \times Qsem_{i,t} \quad (33)$$

$$CSfert_{i,t} = \sum_f \sum_{i^A} \sum_{i^V} ctfert_{i,f,t} \times Z_{i^A, i^V, f, t} + ctfert_{i,f,t} \times Qfer_{i^A, f, t} \quad (34)$$

$$CSdef_{i,t} = ctdef_{i,t} \times Qdef_{i,t} \quad (35)$$

$$CScom_{i,t} = ctcom_{i,t} \times Qcom_{i,t} \quad (36)$$

$$CSins_{i,t} = ctins_{i,t} \times Qins_{i,t} \quad (37)$$

$$CSnut_{i,t} = \sum_n \sum_{i^A} \sum_{i^V} ctnut_{i,n,t} \times Z_{i^A, i^V, n, t} + ctnut_{i,n,t} \times Qnut_{i^A, n, t} \quad (38)$$

$$CSmed_{i,t} = ctmed_{i,t} \times Qmed_{i,t} \quad (39)$$

Essas expressões calculam o custo de suprimento da cultura i no

período t , sendo função do custo unitário de transporte ($ct_{-i,t}$) e da quantidade a ser suprida de cada insumo ($Q_{-i,t}$).

3.3.5. Custo de Distribuição (CD): custo de distribuição de produtos.

$CD_{i,t} = \sum_{i,t} CD_{prod_{i,t}}$	(40)
$CD_{prod_{i,t}} = ct_{prod_{i,t}} \times produtividade_{i,t} \times X_{i,t}$	(41)

3.3.6. Custo Fixo (CF): custo fixo da propriedade.

$CF = \overline{CF}$	(42)
----------------------	------

3.4. Restrições ambientais

3.4.1. Impacto ambiental (IA): representado pelos gases de efeitos estufa emitidos (GE) descontados os gases de efeito estufa sequestrados pela cultura (GS), adicionando os resíduos animais gerados não-aproveitados (RG) e os resíduos químicos disponibilizados no ambiente (RQ)⁶.

$IA = GE - GS + RG + RQ$	(43)
--------------------------	------

Desmembrando-se a equação (43), tem-se que:

3.4.2. Gases de efeito estufa emitidos (GE): emissão estimada de gases por cultura multiplicada pela quantidade (área para vegetais e cabeças para animais):

$GE = \sum_{i,t} gasemitido_{i,t} \times X_{i,t}$	(44)
---	------

A emissão dos gases ocorre naturalmente pela cultura e pela combustão do combustível utilizado em suas operações mecânicas:

$gasemitido_{i,t} = f(emisnatural_{i,t}; emiscombust_{i,t})$	(45)
--	------

3.4.3. Gases de efeito estufa sequestrados (GS): volume de gases sequestrados por cultura, multiplicado pela quantidade (área para vegetais e cabeças para animais):

⁶A definição de uma unidade comum para esses parâmetros, em princípio, seria necessária, sendo esse um desafio para futuras pesquisas nas respectivas áreas.

$$GS = \sum_{it} gasequestra_{it} \times X_{it} \quad (46)$$

O sequestro dos gases ocorre naturalmente pela cultura:

$$gasequestra_{it} = f(seqnatural_{it}) \quad (47)$$

3.4.4. Resíduos gerados (RG): volume de resíduos de origem animal gerado por cultura (não aproveitado sequencialmente por alguma cultura vegetal), multiplicado pela quantidade (cabeças):

$$RS = \sum_{i^a, j, t} RS_{i^a, j, t} \quad (48)$$

3.4.5. Resíduos químicos (RQ): volume de resíduos químicos (defensivos agrícolas) aplicados por cultura, multiplicado pela área da cultura:

$$RQ = \sum_{it} Qdef_{it} \quad (49)$$

3.5. Restrições sociais

3.5.1. Inserção social (IS): representado pela soma da mão de obra da família envolvida nas atividades (MF), da mão de obra permanente contratada (MC), da mão de obra terceirizada (MT) e do número de dependentes diretos dessa mão de obra (DM).

$$IS = MF + MC + MT + DM \quad (50)$$

Desmembrando-se a equação (50), tem-se que:

3.5.2. Mão de obra familiar (MF): número de horas de trabalho de pessoas da família do proprietário que atuam na atividade:

$$MF = \sum_{it} hfamilia_{it} \times X_{it} \quad (51)$$

O número de empregos gerados é assim calculado:

$$NMF = \frac{MF}{turno} \quad (52)$$

3.5.3. Mão de obra contratada (MC): número de horas de trabalho de pessoas contratadas que atuam na atividade:

$$MC = \sum_{it} h_{emprego_{it}} \times X_{it} \quad (53)$$

O cálculo do número de empregos gerados dá-se da mesma forma que no item anterior.

3.5.4. Mão de obra terceirizada (MT): número de horas de trabalhos pessoas terceirizadas que atuam na atividade:

$$MT = \sum_{it} h_{terceiro_{it}} \times X_{it} \quad (54)$$

O cálculo do número de empregos gerados dá-se da mesma forma que no item anterior.

3.5.5. Dependentes da mão de obra (DM): número de pessoas que dependem diretamente da mão de obra familiar, contratada ou terceirizada que atuam na fazenda.

3.6. Restrições técnicas⁷

3.6.1. Restrições de disponibilidade de terra

$$\sum_{i^v} X_{i^v,t} + l_{i^a,t} \times X_{i^a,t} \leq area_m \quad (55)$$

Limitam a disponibilidade de terra para as diferentes culturas alternativas em determinado período t , sendo X_{i^v} a área das culturas vegetais, l_{i^a} a lotação (cabeças de animais por hectare) e X_{i^a} a quantidade de animais.

3.6.2. Restrições de disponibilidade de máquinas e implementos

Limitam a disponibilidade de máquinas e equipamentos na propriedade. Tais restrições podem implicar a necessidade de contratação de serviços terceirizados de mecanização.

3.6.3. Restrições de disponibilidade de mão de obra

Limitam a disponibilidade de mão de obra própria e contratada para as diferentes culturas alternativas em determinada estação de determinado ano. Tais restrições podem implicar a necessidade de contratação de mão de obra terceirizada em determinadas estações.

3.6.4. Restrições de disponibilidade de crédito

Limitam a disponibilidade de recursos próprios disponíveis, indicando a necessidade de se alavancar financeiramente no mercado.

⁷A título de ilustração, apenas a restrição de disponibilidade de terra será apresentada algebricamente.

3.6.5. Restrições nutricionais

Limitam a disponibilidade de nutrientes por meio das culturas cultivadas, indicando a eventual necessidade de aquisição de nutrientes no mercado, sejam eles volumosos ou concentrados. Os nutrientes serão desagregados nas suas principais frações (proteínas, carboidratos, lipídeos, sais minerais).

Também são consideradas restrições para o atendimento das exigências nutricionais das espécies e categorias animais criadas na propriedade.

3.6.6. Restrições de fertilidade do solo

Limitam a disponibilidade de nutrientes no solo, indicando a necessidade de adubação. As criações animais podem fornecer nutrientes a serem aplicados ao solo. Os nutrientes serão desagregados nas suas principais frações (nitrogênio, fósforo, potássio etc.).

3.7. Obtenção dos dados e processamento do modelo

Uma vez definida a estrutura matemática, é necessário o levantamento de todos os parâmetros envolvidos nas equações e inequações formuladas. Tais informações podem vir tanto de observação a campo e no mercado, quanto de experimentos científicos. Por meio de *software*⁸ específico, o modelo pode ser então processado.

Seus resultados indicarão o planejamento da propriedade, ou seja, as áreas, o número de animais (por espécie/categoria), em cada período (que pode ser um mês, semestre, safra etc.) que resultarão na maximização de *MOBJ* (a função multiobjetivo), ponderada para os três atributos considerados: econômicos, ambientais e sociais, respeitando-se todas as restrições previamente definidas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo procurou apresentar o estado da arte da modelagem matemática aplicada ao planejamento da produção agropecuária. Procurou-se destacar que o aumento da complexidade envolvida nos sistemas produtivos – em função de uma “nova” racionalidade do homem – implicará a necessidade de desenvolvimento de novos métodos e ferramentas auxiliares no processo de tomada de decisão quanto às três questões centrais dos sistemas sociais: o que produzir, como produzir e para quem produzir.

⁸O algoritmo conhecido como “Simplex” é o mais tradicionalmente utilizado para a solução de problemas de Programação Linear. Diversos *software* disponíveis no mercado possuem *solver* que normalmente incorpora tal algoritmo, possibilitando assim a obtenção da solução para o modelo.

Apresentou-se um modelo matemático teórico que pode ser aplicado no planejamento visando a otimização de uma propriedade rural, especialmente caracterizada pela integração entre lavoura e pecuária.

O modelo apresentado suscita algumas considerações que são listadas a seguir e que procuram resumir a potencialidade e os desafios de tais ferramentas.

O modelo apresenta uma solução que contempla, conjunta e concomitantemente, uma série de fatores (parâmetros e variáveis) que se relacionam entre si das mais diversas formas. Esta é uma característica intrínseca aos modelos de programação linear que se configura como uma das suas principais vantagens: levar em consideração um grande número de informações e apontar a melhor solução dentre as inúmeras possíveis, algo que a mente humana, por mais privilegiada que seja, não consegue fazer ante à complexidade dos sistemas.

O modelo pode ser utilizado como ferramenta para simular os impactos na realocação dos recursos diante de mudanças nas prioridades (pesos) atribuídas a cada um dos três grupos de variáveis consideradas: econômicas, ambientais e sociais. Em outras palavras, como mudaria o planejamento das culturas na propriedade se fosse aumentado o peso atribuído às variáveis ambientais? O que aconteceria se, ao invés de se preocupar mais com o retorno econômico (lucro), houvesse a preocupação de que a propriedade fosse capaz de absorver mais mão de obra? São apenas alguns exemplos para reflexão.

O modelo pode ser útil para avaliar o impacto de alterações em parâmetros econômicos, agrônômicos e zootécnicos. Consequentemente, ele pode ser útil para avaliar impacto de pesquisas científicas que propõem mudanças tecnológicas que alteram tais parâmetros. Como alteraria o retorno da propriedade se aumentasse a produtividade de leite por vacas (litros/vaca/dia), devido a um melhoramento genético? Qual seria o retorno se fosse produzida uma silagem com maior percentagem de energia líquida? Qual o retorno se houvesse um aumento significativo no preço do litro do diesel? O que aconteceria se, eventualmente, fosse cobrada uma taxa sobre cada tonelada de CO₂ equivalente emitido pelos animais? E assim sucessivamente.

Para a elaboração do modelo, como pode ser claramente observado, é necessário que se tenha disponível um detalhamento bastante minucioso dos dados de todas as culturas. Isso exigirá, no campo, um controle rigoroso dos coeficientes técnicos e do uso dos fatores de produção (horas-máquina, litro de defensivos, produtividade por animal etc.). Na pesquisa científica, provavelmente também surgirão desafios: quantos kg de CO₂ equivalente emite um animal sob determinadas condições? Quanto de cada um dos principais nutrientes uma determinada cultura em determinadas condições extrai do solo, quanto ela devolve a ele? Etc.

Visto haver a necessidade de certo conhecimento matemático de modelagem, para se processar e fazer uso do modelo no campo é necessário treinamento e reciclagem periódicos por parte dos usuários, como engenheiros agrônomos, técnicos agrícolas, médicos veterinários, zootécnicos, administradores, entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBROSI, I.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; ZOLDAN, S.M. Lucratividade e risco de sistemas de produção de grãos combinados com pastagens de inverno. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, n. 10, p.1213-1219, out. 2001

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

ARAÚJO, L. A. e 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.

BALBINOT JUNIOR, A.A.; MORAES, A.; VEIGA, M.; PELISSARI, A.; DIECKOW, J. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. *Ciência Rural*, v.39, n.2, p.1925-1933, set. 2009.

BALM, I.R. Linear Programming applications in Scottish agriculture. *Journal of the Operational Research Society*, v.31, p.387-392, 1980

BENEKE, R.R.; WINTERBOER, R. Linear Programming applications to agriculture. The Iowa State University Press, 1973. 244p.

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.

BURGOS, S.A.; EMBERTSON, N.M.; ZHAO, Y.; MITLOEHNER, F.M.; DEPETERS, E.J.; FADEL, J.G. Prediction of ammonia emission from dairy cattle manure based on milk urea nitrogen: Relation of milk urea nitrogen to ammonia emissions. *Journal of Dairy Science*, v.93, n.6, p.2377-2386, Jun. 2010

BUTTERWORTH, K. Practical application of Linear/Integer Programming in Agriculture. *Journal of Operational Research Society*, v. 36, n.2, p.99-107, 1985.

- 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.
- CASEY, H. The relevance of Operational Research in agricultural management. *Operational Research Quarterly*, v.28, n.4, p.901-908, 1977.
- COBUCCI, T.; WRUCH, F.J.; KLUTHCOUSKI, J. Opções de integração lavoura-pecuária e alguns de seus aspectos econômicos. *Informe Agropecuário*, v.28, n.240, p.25-42, 2007.
- COSTA, F.P.; MACEDO, M.C.M. Economic evaluation of agropastoral systems: some alternatives for Central Brazil. In: Workshop on Agropastoral System in South America, 2001, Japan. Proceedings...Japan: JIRCAS, 2001, p.57-62 (Working Report, 19).
- 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.
- FONTANELI, R.S.; AMBROSI, I.; SANTOS, H.P.; IGNACZAK, J.C.; ZOLDAN, S.M. Análise econômica de sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno, em sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.35, n.11, p.2129-2137, nov. 2000
- 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.
- 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.
- LANA, R.P. Uso racional de recursos naturais não-renováveis: aspectos biológicos, econômicos e ambientais. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.38, p.330-340 (supl.especial).
- MACEDO, M.C.M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.38, p.133-146 (supl.especial).
- MARTHA JR, G.B.; VILELA, L.; SOUSA, D.M.G. Economia de fertilizantes na integração lavoura-pecuária no Cerrado. *Revista de Política Agrícola*, Ano XVII, n.4, p.14-19, 2008.
- 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.
- MUNIZ, L.C. Avaliação bio-econômica em sistema de integração lavoura-pecuária. 91p. Dissertação (Mestrado). Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.
- NEWMAN, S.; LYNCH, T.; PLUMMER, A.A. Success and failure of decision support system: learning as we go. In: American Society of Animal Science, 1999. Anais...ASAS, 1999, p.01.
- 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.194-205Mar./Apr, 1991
- RENNÓ, F.P.; Avaliação bioeconômica de estratégias de alimentação em sistemas de produção de leite. Tese (Doutorado em Zootecnia). Universidade Federal de Viçosa, 2005. 131p.
- RUSSELLE, M.P. Nutrient cycling in pasture. In: Simpósio Internacional sobre Produção Animal em Pastejo, 1997, Viçosa, MG. Anais... Viçosa: UFV, 1997. 471p. p.235-266.
- 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.
- SARGENT, E.D. The impact of Operational Research on agriculture. *Journal of the Operational Research Society*, v.31, p.477-483, 1980.
- SEAMLESS. System for Environmental and Agricultural Modelling. Consortium. Disponível em: <http://www.seamless-ip.org>. Acessado em 17 de março de 2010.
- 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.
- SILVA NETO, B.; OLIVEIRA, A. Modelagem e planejamento de sistemas de produção agropecuária: manual de aplicação da programação matemática. Ijuí: Ed. Unijuí, 2009. 288p.
- SOBRAPO. Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional. Pesquisa Operacional. Disponível em: http://www.sobrapo.org.br/o_que_e_po.php. Acessado em 11 de outubro de 2010.
- 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.

ZUO, M.; KUO, W.; McROBERTS, K.L. Application of mathematical programming to a large-scale agricultural production and distribution system. Journal of the Operational Research Society, v.42, n.8, p.639-648, 1991.