

Desenvolvimento de modelos preditores de acúmulo de forragem e sustentabilidade de sistemas de produção em pastejo

Felipe Tonato¹, Luis Gustavo Barioni², Bruno Carneiro e Pedreira³

¹Pesquisador Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus-AM, email: felipe.tonato@cpaa.embrapa.br; ²Pesquisador Embrapa Informática Agropecuária, Campinas-SP, email: barioni@cnptia.embrapa.br; ³Pesquisador Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop-MT email: bruno.pedreira@embrapa.br

Introdução:

Qualquer modelo, seja uma maquete, um mapa, um simulador de computador ou uma equação que visa estimar o desenvolvimento de uma planta, é uma simplificação intencional da realidade, cujo objetivo é possibilitar que se tenha uma apreciação prévia de como será a realidade no futuro.

A idéia por trás dos modelos é a de representar, da melhor maneira possível, a realidade, permitindo identificar de forma antecipada, dificuldades e limitações ou vantagens e virtudes da estratégia que se pretende adotar, antes dela efetivamente ser implementada e que os esforços e recursos sejam aplicados.

A simulação de acordo com Dourado-Neto et al. (1998) é uma analogia com a realidade, sendo de uso comum nas mais diversas áreas. Atletas em treinamento simulam as condições de uma competição real, alunos realizam exercícios e provas que simulam o trabalho no futuro, pilotos simulam em solo varias condições de vôo antes de realmente pilotarem um avião.

Na agropecuária, o intuito não é diferente, o que se busca com os modelos de simulação é avaliar uma determinada técnica, tecnologia ou estratégia de ação quanto ao seu efeito sobre o desempenho do sistema de produção e qual o risco envolvido em sua adoção, antes de serem efetivamente adotadas. Modelos são ferramenta de planejamento, avaliação de cenários e apreciação de riscos, que tem o objetivo de apoiar a tomada de decisão.

A adoção de modelos de simulação na agropecuária ainda é um assunto de certa forma controverso, já que conceitos e valores de referencia estão em constante mudança com a geração de novos resultados de pesquisa e o desenvolvimento de novas

tecnologias computacionais, fazendo com que os modelos disponíveis nem sempre gerem resultados consistentes.

Existe também muita falta de conhecimento e familiaridade do meio produtivo com as peculiaridades dos modelos disponíveis e com o processo de modelagem propriamente dito, gerando quase sempre expectativas superiores às que podem ser atendidas pelos modelos. Qualquer indivíduo minimamente afeito à modelagem sabe que o resultado gerado por um modelo, não é uma previsão, algo holístico, que mostra de forma indubitável o futuro, como um grande número de pessoas envolvidas na agropecuária, novas na área da modelagem, pensam. Um modelo gera uma estimativa com determinado objetivo, definido em sua concepção. Assim, para o objetivo em questão, uma série de premissas, assunções sobre o sistema a ser simulado a partir das quais se concebeu o modelo, que se não forem respeitadas farão com que a estimativa do modelo seja diferente do resultado realmente observado, levando o usuário à frustração.

Apesar dos percalços, a adoção de modelos no setor agropecuário tende a ser cada vez maior, com conceitos e ferramentas de simulação se mostrando gradativamente mais sólidos e confiáveis, fazendo com que a aplicação de diferentes tipos de modelos para suporte à tomada de decisões na pesquisa ou em propriedades rurais esteja em ascensão. Como a grande maioria dos sistemas de produção pecuários no Brasil são pastoris, nada mais natural que a modelagem passe a ser assunto de interesse também nessa área.

Modelos como ferramentas de suporte à tomada de decisão

Administrar qualquer atividade é decidir como, quando e por quanto tempo alocar os recursos disponíveis, buscando atingir um resultado esperado no futuro (Kay, 1986).

Tal processo de tomada de decisão envolve a percepção e a avaliação de um problema de escolha entre cursos alternativos de ação (Stuth et al., 1991), complicados pelo fato de a disponibilidade das informações sobre as alternativas existentes nunca serem completas (Blackie & Dent, 1979). Sendo que, se não existirem alternativas, existe um problema, mas não há um problema de decisão (Kirkwood, 1997).

Apoiar à decisão significa auxiliar nessa escolha, identificando essas alternativas, e estimando sua evolução e seu resultado.

O setor agropecuário é considerado ideal para a aplicação de ferramentas de suporte á tomada de decisão (Van Soest, 1994 e Woodward, 1998) já que se caracteriza por ser um ambiente repleto de riscos e incertezas que ameaçam o sucesso da atividade e dificultam seu gerenciamento, e sempre com diferentes alternativas de curso de ação. A combinação entre os riscos econômicos e financeiros, inerentes a qualquer atividade empresarial, tais como fatores conjunturais, políticos, econômicos e de mercado, e os riscos biológicos como clima, problemas sanitários ou outros, e todas as suas interações, trazem grande complexidade ao processo de tomada de decisão em uma propriedade rural e devem ser consideradas no gerenciamento da atividade.

Uma das formas mais práticas de se minimizar os riscos no processo de tomada de decisão é a realização de um planejamento prévio, com o emprego de projeções e simulações, que possibilitam testar o desempenho de um determinado processo ou sistema quando uma estratégia decisória hipotética é tomada, aferindo seus possíveis resultados.

De forma geral, mas muito particularmente no meio agropecuário, a capacidade de tomada de decisão sempre foi considerada um dom, um talento individual de algumas pessoas, sendo aperfeiçoado com o tempo por meio do processo de aprendizado via tentativa e erro. Segundo essa lógica, tal habilidade é muito mais baseado na criatividade, capacidade de julgamento, intuição e experiência do administrador do que em qualquer método ou critério objetivo (Turban, 1993).

Essa forma de pensar, apesar de estar arraigada na “cultura” de alguns setores produtivos, é muito mais um fruto da dificuldade que existia até algum tempo atrás para armazenar, gerenciar e por conseqüência acessar o conhecimento existente, dificultando o seu aproveitamento na resolução de problemas futuros, do que o reflexo da realidade a cerca da pouca importância de métodos objetivos de tomada de decisão.

Já que qualquer processo decisório é intrinsecamente arriscado, pelo simples fato de ser impossível se obter informações completas sobre o futuro, (Turban, 1988), é indiscutível que o maior acesso a informação permite que se aumente a eficiência na tomada de decisão (Anderson et al., 1977).

Dentro desse contexto, os sistemas de apoio à tomada de decisão podem ajudar no diagnóstico do problema, na visualização dos resultados de diferentes decisões e na escolha do melhor curso de ação (Turban, 1993). E a modelagem matemática é uma das principais metodologias para o desenvolvimento de tais sistemas (Bywater, 1990), já que os modelos de simulação são úteis para melhorar a capacidade de estimar os resultados

de diferentes decisões e estudar a sensibilidade do sistema a diferentes manejos e quantidades de fatores de produção (Barioni, 2002).

Apesar da ajuda que os modelos podem dar no processo decisório, é sempre importante considerar que a tomada de decisão é uma parte e não toda a resolução de um problema. A resolução de problemas depende não somente de tomar a melhor decisão, mas também da eficiência com que se implementa tal decisão, e com que competência se realiza o monitoramento, controle e correção do curso de ação adotado para atendimento das metas propostas (Gray & Parker, 1994).

Conceitos básicos sobre o desenvolvimento de modelos:

Sendo um modelo uma representação simplificada intencional da realidade, a primeira grande questão em modelagem é exatamente que nível de simplificação adotar.

Idealmente os modelos devem ser o mais simples possíveis, mas tão complexos quanto o necessário (Barioni, 2002), de forma a tentar equilibrar as duas fontes básicas de erros, os de estrutura, associados à escolha de quais e de que forma os processos serão considerados no modelo, e os erros relacionados à parametrização, que dizem respeito à confiabilidade e acurácia dos valores dos parâmetros obtidos experimentalmente (Passioura, 1996).

O dilema da modelagem é que ao se aumentar a complexidade do modelo, considerando mais componentes e processos, se reduz o erro associado à estrutura já que essa é mais realista, mas se amplia o erro ligado à parametrização, pois o modelo passa a depender de um maior número de parâmetros de entrada que trazem erros associados (Barioni, 2002).

Normalmente, o grau de simplificação do modelo varia de acordo com o conhecimento existente sobre o sistema em questão, a interpretação das informações necessárias pelos usuários sobre esse sistema, a disponibilidade das informações para sua parametrização, dos dados de entrada que podem ser requeridos do usuário e da demanda computacional associada ao funcionamento do modelo (Dias, 1996; Barioni, 2002), sendo o modelo a formalização do conhecimento que se tem a respeito do sistema (Romanelli, 2002).

Conceitualmente os modelos de simulação podem ser descritivos, baseados diretamente em dados observados, constituídos por equações cujos parâmetros são determinados através de regressão, sendo denominados de modelos empíricos (Blackie

& Dent, 1979). Tais modelos, no caso de sistemas agrícolas, não consideram os processos fisiológicos da cultura, estabelecendo uma ligação direta entre parâmetros observados e valores estimados. Ou podem ser desenvolvidos com base em relações teóricas entre os componentes de um determinado sistema, tentando incorporar em sua estrutura todos os processos envolvidos (Thornley, 2001), sendo denominados de mecanísticos (Thornley & Johnson, 1990). Modelos mecanísticos em agricultura se baseiam em relações biológicas para descrever o comportamento do sistema, considerando aspectos como temperatura, radiação solar, índice de área foliar, taxas de fotossíntese e respiração na geração das estimativas (Villegas et al., 2004).

Modelos completamente mecanísticos não existem (Gill et al., 1989) sendo que todo modelo mecanístico se inicia de um modelo empírico.

A classificação dos modelos, é apenas um referencial teórico em relação à forma como os modelos são idealizados, sendo menos importante do que normalmente é considerado nas discussões sobre o assunto. Essa classificação não define se um modelo é melhor ou pior, mais ou menos completo, já que não existe na realidade um modelo universal, de aplicação generalizada, nem mesmo modelos certos ou errados, existindo sim, modelos com diferentes graus de aplicabilidade em diferentes situações, com capacidades distintas de estimação.

De forma geral, os modelos empíricos são mais simples de serem desenvolvidos, e utilizados, o que os tornam mais populares. Mas tem aplicação mais limitada em função de sua elaboração direta com os dados experimentais, não sendo recomendadas extrapolações fora das condições em que foram gerados (Dourado-Neto et al., 1998).

Já os modelos mecanísticos tem uma potencial mais amplo de utilização, permitindo extrapolações nas estimativas fora dos limites em que foram gerados (Chanter, 1981), mas são de desenvolvimento mais difícil e demorado, pois seu nível de complexidade é maior.

Seja qual for o modelo, seu desenvolvimento passa por várias fases que devem seguir uma seqüência organizada e lógica (Ragsdale, 1997), podendo ser resumido em cinco passos:

- Parte da identificação do problema;
- Segue para a formulação clara dos objetivos, isto é, quais respostas se quer que o modelo forneça;
- Depois para a determinação dos limites, variáveis e processos que farão parte do modelo, sua hierarquização e níveis de agregação;

- Parametrização do modelo, seja por experimentação ou por análise bibliográfica;
- Validação do modelo, um “teste”, checando se o modelo reproduz de maneira coerente as situações que ele tenta representar, sendo que idealmente isso deve ser feito através de análises estatísticas (Nelson, 1995).

No contexto de modelagem, a estratégia mais consagrada é que se estabeleça primeiramente o potencial de produtividade biológica do genótipo (Detomini, 2004), que pode ser definido no caso das plantas como a massa produzida por uma cultura padrão, cobrindo totalmente o terreno, tendo a radiação solar, o fotoperíodo e a temperatura como fatores limitantes. Ou seja, a maior produtividade esperada para determinado cultivar em uma determinada região, desde que não ocorra nenhuma restrição hídrica ou de fertilidade (Nabinger, 1996), havendo apenas restrições nos fatores climáticos em que o homem não pode exercer praticamente nenhum controle.

Após se ter determinado a produtividade potencial novos experimentos com restrições controladas de cada fator, climático ou de fertilidade, por exemplo, geram os fatores de correção para o modelo inicial, penalizando a produtividade. Assim, assume-se que cada fator modula a capacidade de produção da cultura, funcionando como um fator de eficiência.

É em decorrência da complexidade e demanda de tempo e dinheiro para gerar modelos de uso amplo, que atualmente, o número de modelos de aplicação genérica é pequeno, sendo muito maior a disponibilidade de modelos de uso mais específico e restrito.

O uso da modelagem em agricultura possui duas vertentes bem definidas e que nem sempre são aplicadas de forma conjunta. A primeira está voltada para a aplicação científica. Nesse caso, a modelagem diminui a distância existente entre a pesquisa e a prática, possibilitando que hipóteses teóricas sejam artificialmente testadas antes de serem efetivamente aplicadas no campo, auxiliando na identificação de lacunas do conhecimento, embasando decisões práticas e direcionando novas pesquisas.

O processo de modelagem pode ser utilizado para verificar as áreas da ciência onde o conhecimento é escasso ou inexistente, já que a simulação é um método de pesquisa mais flexível oposto ao método analítico, que é meramente teórico (Lovatto & Souvant, 2002).

Em função de seu caráter integrador e multidisciplinar, os modelos de simulação tem se tornado ferramenta eficiente sendo sua aplicabilidade ampliada gradativamente na pesquisa experimental (Boote et al., 1996; Pereira, 1987).

A segunda vertente está voltada para a aplicação prática dos modelos pelos usuários com o objetivo de auxiliar um determinado usuário na interpretação dos resultados e na tomada de decisão. Apoiar a decisão significa auxiliar na escolha do caminho a ser tomado, onde os modelos geram essas alternativas e estimam sua evolução e seu possível resultado final (Tonato, 2009). O propósito das ferramentas de apoio à tomada de decisão é exatamente fornecer o maior número possível de informações, aumentando a capacidade de avaliação dos resultados, diminuindo o risco e aumentando a eficiência e confiabilidade na decisão (Anderson et al., 1977; Turban, 1988).

Apesar de os modelos de crescimento de pastagens não gerarem as respostas para todos os problemas da pecuária, quando razoavelmente construídos, podem ser instrumentos importantes no ensino, pesquisa, gestão profissional e desenvolvimento de políticas públicas. Podendo ser usados para explorar hipóteses e desenvolver conhecimento, permitindo assim que o usuário, seja ele aluno, pesquisador, produtor ou gestor avaliem de forma mais consistente os fatores ou condições que realmente devem ser considerados. A inteligência, o raciocínio, bem como a observação, e a experiência não podem ser substituídos por modelos, mas podem ser bem apoiado por eles.

Infelizmente, o inegável potencial das técnicas de modelagem matemática contrasta com seu nível de contribuição atual em sistemas de produção de bovinos nos trópicos (Barioni, 2002).

Contexto da modelagem na agropecuária:

Apesar de a grande complexidade característica dos sistemas agropecuários, em que múltiplos fatores interagem, tornarem esses sistemas ideais para a aplicação de técnicas de modelagem e simulação (Woodward, 1998), o uso dessas ferramentas pode ser considerado relativamente recente nas ciências agrárias.

Fatores como restrições na capacidade de resolução de problemas, somente solucionadas com o uso mais generalizado da informática e aumento na capacidade de processamento dos computadores (Cacho, 1993; Monteith, 1996) e a carência de informações confiáveis para o desenvolvimento de modelos, decorrente do

distanciamento da pesquisa experimental tradicional da área de modelagem (Veloso et al., 2003) são os motivos mais comumente apontados para esse fato.

No Brasil houve ainda o agravante da situação econômica e conjuntural do país antes do Plano Real, atrasando ainda mais o desenvolvimento dos modelos aqui, pois em um período de economia instável e muita inflação era praticamente impossível se utilizar qualquer ferramenta de planejamento futuro, pois a variação nos preços era diária, dificultando qualquer planejamento e os ganhos especulativos eram mais importantes do que com a eficiência produtiva. Dessa forma criou-se uma grande defasagem entre o desenvolvimento dos modelos aqui e no exterior.

Fora do Brasil, como o quadro era diferente, as múltiplas aplicações da modelagem que permitem desde o simples entendimento dos fatores envolvidos na produção de uma cultura ou animal em um certo local, como o desenvolvimento de sistemas complexos de apoio à tomada de decisão no âmbito regional ou nacional (Costa & Barros, 2001) foram mais cedo desenvolvidas.

Dentre os diferentes ramos da agropecuária, a agricultura é que tem feito uso mais amplo e a mais tempo da modelagem, com os modelos aplicados ao desenvolvimento de culturas se iniciado a aproximadamente sete décadas (Joyce & Kickert, 1987). Nos anos 60 e 70, os modelos iniciais para cultivos agrícolas se baseavam na transpiração, fotossíntese, clima e água no solo (Monteith, 1996). Tais modelos eram predominantemente experimentais, mas com o tempo evoluíram para uma gama de novos modelos, de diferentes tipos, com diferentes aplicações, para as mais variadas culturas.

Exemplos dos modelos agrícolas são os desenvolvidos para testar e avaliar a resposta do milho em diferentes condições ambientais (Curry & Chen, 1971; Splinter, 1974; Liu et al., 1989; Lima, 1995), ou da soja (Meyer et al., 1979; Meyer et al., 1981; Jones et al., 1988; Acock & Trent, 1991).

O objetivo de vários desses modelos é simular o desenvolvimento da planta, o acúmulo de massa nos seus diferentes componentes e o índice de área foliar em função de parâmetros climáticos e fenológicos (Van Keulen et al., 1982; Spitters et al., 1986a,b). Entretanto, como foram desenvolvidos em condições climáticas específicas sua aplicação é limitada quando se pretende fazer estimativas em condições distintas daquelas em que tais modelos foram desenvolvidos (Detomini, 2004).

Como alternativa a esse modelos, nos anos 80 foram lançados sistemas de aplicação mais genérica, em que um conjunto de modelos integrados simulam os principais processos fisiológicos da planta, como a fotossíntese, a respiração, o acúmulo

e partição de fotoassimilados e de massa, o crescimento dos diferentes componentes (folhas, colmos e raízes) nas diversas fases fenológicas, e os processos físicos no solo (extração, disponibilidade e evapotranspiração de água), o que permitiu que esses modelos fossem utilizados em condições mais amplas, nos mais diferentes locais (Dallacort et al., 2006).

Dentro deste contexto, o Grassland Soil and Water Research Laboratory desenvolveu uma série de modelos de simulação dos processos fisiológicos de culturas, chamado CERES (Crop Environmental Resource Systems) (Jones & Kiniry, 1986), o Instituto de Pesquisas Científicas na Agricultura e Indústria da Bélgica lançou o modelo WAVE (Water and Agrochemical Vardose Environment) (Figueiredo Júnior, 2004) e o International Consortium for Agricultural Systems Applications (ICASA) lançou o DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) (Boote et al., 1998), todos pacotes complexos de simulação, que como ponto desfavorável apresentam uma grande quantidade de parâmetros de entrada, limitando sua utilização prática pela dificuldade na obtenção dos dados requeridos para as simulações (Detomini, 2004).

No Brasil, os esforços para desenvolvimento de modelos para cultivos agrícolas é mais recente, e talvez em função disso o número de modelos efetivamente gerados no país seja relativamente pequeno. A existência de um grande número de modelos estrangeiros já bem desenvolvidos, tem feito com que a adaptação ou “tropicalização” dos mesmos venha sendo a alternativa preferida em nosso meio científico, existindo poucos esforços no desenvolvimento de modelos completamente novos.

Outro setor da agropecuária em que o desenvolvimento e aplicação de modelos já é antigo é a nutrição animal. No transcorrer de aproximadamente 30 anos de desenvolvimento da modelagem nessa área, diversos modelos matemáticos para simulação do crescimento, ingestão e digestão de alimentos já foram desenvolvidos, em diversos países, vários deles culminando com o desenvolvimento de sistemas amplos para determinação das exigências nutricionais dos animais, demanda alimentar e formulação de dietas.

Os sistemas mais conhecidos são o NRC americano (National Reserach Concil, 2000), AFRC inglês (Agricultural and Food Research Council, 1993), INRA francês (Institut National de la Recherche Agronomique, 1989), o CSIRO australiano (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1990) e o CNCPS americano (Cornell Net Carbohydrate and Protein System) inicialmente publicado em uma série de quatro trabalhos entre 1992 e 93 (Fox et al., 1992; O'Connor et al., 1993; Russell et al., 1992; Sniffen et al., 1992).

Esses modelos para determinação dos requerimentos nutricionais e otimização de dietas são atualmente os melhores exemplos de aplicação de ferramentas de suporte à tomada de decisão na agropecuária (Barioni et al.2012), sendo amplamente utilizados tanto no exterior como no Brasil.

Até meados da década de 90, praticamente todas as ferramentas computacionais para apoio à tomada de decisão em nutrição animal eram de desenvolvimento estrangeiro, e sua adoção praticamente insignificante no Brasil (Barioni et al., 2012). Mais uma vez, somente após a estabilização da economia é que os programas computacionais de balanceamento de rações e predição da performance animal passaram a ser adotados e desenvolvidos em nosso país.

Nessa área, assim como na modelagem de cultivos agrícolas, por questões de tempo, recursos e conveniência, a adaptação de modelos desenvolvidos no exterior às condições tropicais tem sido a estratégia adotada em detrimento do desenvolvimento de modelos totalmente nacionais.

Em função disso, modelos estrangeiros como NRC ou CNCPS são usados como base (“tropicalizados”) para o desenvolvimento de pacotes nacionais tais como RLM (Rações de Lucro Máximo - Lanna et al., 2011) e Super crac (TDSsoftware, 2012).

Apesar de tais ferramentas ainda estarem em desenvolvimento, sua efetividade em auxiliar a tomada de decisão em sistemas confinados de produção de bovinos é tão grande que é inconcebível conduzir um confinamento hoje sem a adoção de algum desses softwares.

Modelos preditores de acúmulo de forragem

A importância das pastagens para a produção de bovinos no Brasil não encontra paralelo em nem outro país do mundo. Ocupamos aproximadamente 20% de nossa área total (IBGE, 2008) e 31% de nossa área agricultável (Manzatto et al., 2002) com pastagens, que representam mais de 99% da dieta de nossos animais (Bürgui & Pagoto, 2002).

Gramíneas de clima tropical como as dos gêneros *Brachiaria*, *Panicum*, *Cynodon* e *Penisetum* e a predominância de animais de origem zebuina tornam nossos sistemas pecuários únicos, sendo responsáveis por grandes vantagens competitivas para a nossa pecuária (Silva & Sbrissia, 2000; Ferraz & Felício, 2010). Em função disso, para nenhum outro país o desenvolvimento de uma sistema de apoio à tomada de decisões em pastagens é algo relevante.

Entretanto, as mesmas vantagens competitivas nos deixam sozinhos na geração de tecnologia para sistemas de produção pastoris nos trópicos e dificultam a adoção de sistemas de apoio à tomada de decisão em nosso país, pois inviabilizam que sistemas desenvolvidos em outros países sejam adotados. Como resultado, a adoção de tais sistemas em nossa pecuária é praticamente inexistente (Barioni et al., 2012).

Para os sistemas de produção animal predominantes no Brasil, um ponto assume fundamental importância, a adequação do suprimento à demanda de alimentos (Silva & Pedreira, 1997), através da chamada orçamentação forrageira (Barioni et al., 2005).

Sem a sincronização entre a quantidade de alimento necessário e a quantidade produzida, existe o risco de que haja déficit de alimentos, prejudicando o desempenho produtivo dos animais, ou sobra de alimentos com conseqüente desperdício, havendo em ambas as situações prejuízo econômico ao sistema.

A demanda de alimentos em uma propriedade atualmente pode ser determinada de maneira relativamente fácil, com base em características como raça, sexo, peso vivo, e estado fisiológico conseguem determinar a capacidade de ingestão de matéria seca (IMS) para cada categoria de um rebanho, seja através de equações matemáticas, ou pelo uso de tabelas advindas dos modelos de nutrição animal já citados. Bastando para isso se conhecer a composição do rebanho em relação ao número de animais em cada categoria para se calcular a necessidade de alimento.

Em condições de pastejo, a determinação da demanda real por alimentos pode ser um pouco mais problemática, pois além do material realmente ingerido pelos animais o consumo de forragem também considera o material perdido ou pelo ato do pastejo em si (material derrubado, pisoteado ou amassado pelos animais), ou o material que foi incorporado ao resíduo (Barioni et al., 2003). Mesmo assim os modelos existentes com poucas correções permitem que seja determinada (Barioni et al., 2005).

Já a determinação da capacidade de produção das plantas forrageiras, a oferta de forragem, tem se configurado em um dos maiores desafios ao desenvolvimento de sistemas integrados de planejamento e apoio à tomada de decisão em sistemas pastoris em ambiente de clima tropical.

A combinação do elevado número de espécies de plantas forrageiras e seus diferentes cultivares em uso em nosso país, com a grande extensão territorial brasileira e a conseqüente variedade de climas e solos advinda dela, com a diversidade de manejo tanto de colheita da planta como de fertilidade do solo, geram uma ampla variação de condições de produção. Essa amplitude de condições de produção associada a uma falta de direcionamento das pesquisas nacionais com plantas forrageiras, que ao contrário das

pesquisas em nutrição e crescimento animal, não tem depreendido esforços na agregação dos resultados de pesquisas, levam à existência dessa lacuna para nossos sistemas de produção.

No mundo, existem, hoje, a disposição algumas alternativas simples de modelos preditores de acúmulo de forragem como os propostos por Overman et al. (1988) para Coastal (*Cynodon dactylon*), Burton et al. (1988) para Tifton 85 (*Cynodon spp.*), Duru et al. (2002) para Capim dos pomares (*Dactylis glomerata*) Kiniry et al. (2007) para Coastal e Pensacola (*Paspalum notatum*) ou mesmo, pacotes mais completos como o TAMU (Smith, 1979), GROWIT (Smith & Loewer, 1981), GRAZE (Loewer et al., 1998) CROPGRO (Rymph et al., 2004) nos EUA, STOCKPOL (Marshall et al., 1991) na Nova Zelândia e GRAZPLAN (Moore et al., 1997) e GRAZFEED (Freer et al., 1997) na Austrália. Todas essas ferramentas apesar de funcionarem bem em suas respectivas realidades, apresentam limitações para a sua aplicação nas condições brasileiras, pois ou são modelos para uma única espécie e condição ambiental específica, como no caso dos primeiros, ou apesar de serem mais genéricos em relação às espécies contempladas foram desenvolvidos e parametrizados em condições ambientais e de produção muito diferentes das nossas, como no caso dos demais.

Existem também algumas iniciativas nacionais que de alguma forma tentaram minimizar essa lacuna. Ainda na década de 80, Soto (1981) ajustou modelos de soma térmica para Colonião (*Panicum maximum*) e Pangola (*Paspalum atratum*), mas após isso, por aproximadamente duas décadas nada foi feito nessa área. Apenas no final dos anos 90 que novos esforços foram dedicados, tentando gerar um conjunto confiável de informação para as principais espécies forrageiras cultivadas no Brasil. Entre as principais contribuições estão o modelo de Villa Nova et al. (1999) para estimar o crescimento de capim elefante, o de Moreno et al. (2000) para grama estrela, o de Medeiros et al. (2001) ou Tonato (2003) para plantas do gênero *Cynodon*, Moreno (2004) com plantas do gênero *Panicum*, Detomini (2004) com Marandu e Xaraés (*Brachiaria brizantha*), Rodrigues (2004), Lara (2007, 2011) e Cruz (2011) com plantas do gênero *Brachiaria*. Mas todos esses esforços, apesar de representarem algum avanço, também são pontuais, contemplando plantas de um único gênero e por um intervalo de tempo restrito o que limita suas aplicações em ferramentas de uso amplo.

Mais recentemente, duas novas linhas de trabalho visando o desenvolvimento de modelos para apoio à tomada de decisão em sistemas pastoris começaram a ser desenvolvidas no Brasil.

Uma delas iniciada com o trabalho de Tonato et al. (2010) que compilou os dados de boa parte dos experimentos acima citados e desenvolveu um banco de dados de crescimento das principais espécies forrageiras tropicais usadas no Brasil, parametrizando a partir desse banco de dados modelos para estimar a produtividade potencial dessas espécies em nossas condições.

Os resultados obtidos até o momento são animadores, com os modelos gerando estimativas confiáveis dos padrões sazonais das taxas de acumulação de pastagem para o Brasil Central. Mas como os modelos não conseguem contemplar fatores como fertilidade do solo e manejo da pastagem, a magnitude da produção tem que ser ajustada para sistemas de produção individuais (Barioni et al., 2011).

Outro problema ainda existente, é que apesar de o banco de dados usado na parametrização dos modelos ser o maior disponível no país sobre crescimento de gramíneas forrageiras tropicais, ele ainda é muito restrito em seus mais diversos aspectos, como espécies e cultivares contemplados, condições de uso e localização geográfica em que os dados foram gerados, tornando seu uso ainda um tanto quanto restrito.

Apesar dessas limitações, em função da forma como o banco de dados foi sistematizado, permitindo a agregação de novos dados a qualquer momento com a consequente melhoria na robustez dos modelos, em um processo de contínua evolução, os modelos foram implementados em um sistema de suporte à tomada de decisão chamado Embrapa Invernada, que está sendo desenvolvido pela Embrapa Informática Agropecuária e está disponível ao público desde 2011.

Outra iniciativa é a realizada por Pedreira et al. (2011) e Lara et al. (2012) que vem trabalhando na adaptação de um modelo desenvolvido nos EUA para estimar o crescimento das principais espécies forrageiras usadas no Brasil.

O modelo em questão chamado CROPGRO foi inicialmente desenvolvido para estimar o crescimento de culturas agrícolas como soja, feijão e sorgo, mas mesmo nos EUA a alguns anos vem sendo adaptado para estimar o crescimento de gramíneas forrageiras (Rymph et al., 2004).

Apesar de ser um modelo já bem desenvolvido e que vem apresentando bons resultados com culturas agrícolas (Meireles et al, 2002), a sua adaptação às gramíneas forrageiras ainda é um processo em curso. Os resultados até o momento obtidos são animadores, principalmente para *Brachiaria brizantha* e *Panicum maximum*, mas melhores ajustes e um maior banco de dados ainda se fazem necessários para que seu uso possa ser generalizado.

Embrapa Invernada

No desenvolvimento do modelo que estima a produtividade de forragem com base em variáveis climáticas no Invernada optou-se por adotar uma abordagem empiricista, já que para as gramíneas usadas na alimentação animal no Brasil ainda não existem dados disponíveis e organizados sobre os diversos processos fisiológicos envolvidos em seu crescimento e desenvolvimento que permitam uma abordagem mecanicista.

Também em função de restrições na disponibilidade de dados corretamente gerados e organizados para o desenvolvimento de modelos sensíveis a restrições nutricionais, climáticas, pragas, doenças e outros fatores restritivos à produção, se optou pelo desenvolvimento de modelos de produção potencial, ou seja, modelos que estimam a produção das plantas na ausência de fatores restritivos, já que os conjuntos de dados empregados foram originalmente gerados com esse objetivo.

Para a geração dos modelos foram usados cinco conjuntos de dados de experimentos com os principais cultivares das espécies de gramíneas forrageiras mais difundidas no país. Os experimentos de Tonato (2003), avaliando a produção de plantas do gênero *Cynodon* (Estrela, Florico, Florona, Coastcross e Tifton 85) em Piracicaba - SP por um período de dois anos, entre 2001 e 2003. De Rodrigues (2004), avaliando a produção do gênero *Brachiaria*, cultivares Marandu, Xaraés, Arapoty e Capiporã, em Planaltina - DF, pelo período de um ano. De Moreno (2004), avaliando gramíneas do gênero *Panicum*, Atlas, Massai, Mombaça, Tanzânia e Tobiatã, em Piracicaba - SP, pelo período de um ano. Um segundo conjunto de dados do gênero *Brachiaria*, de Lara (2007) com os cultivares Basilisk, Marandu, Xaraés, Arapoty e Capiporã, em Piracicaba-SP, por um ano. Todos irrigados e com reposição de nutrientes. E um conjunto de dados gerado por Pedreira (2006) com capim Xaraés não irrigado, manejado por pastejo em Piracicaba - SP, por dois períodos de cinco meses em dois anos diferentes.

Avaliou-se modelos gerados com base na combinação dos dados de taxa de acúmulo de massa em cada crescimento das diferentes espécie, com variáveis meteorológicas, como temperaturas média ($T_{\text{méd}}$), máxima ($T_{\text{máx}}$) e mínima ($T_{\text{mín}}$), radiação global incidente (Rad), além de variáveis não meteorológicas, como dias do ano (DA), para cada período de crescimento. Chegando à conclusão de que a $T_{\text{mín}}$ apresentou a melhor capacidade estimadora, e de forma mais robusta. Em razão da maior representatividade da $T_{\text{mín}}$ nos modelos e da alta correlação existente entre as diversas variáveis meteorológicas, optou-se por desenvolver modelos simples, cuja variável independente fosse a $T_{\text{mín}}$ (Tabela 1).

Tabela1. Modelos de estimativa de taxa média de acúmulo (TMA) em função da temperatura mínima (T_{mín}) para os agrupamentos de cultivares conforme Tonato et al.(2010), atualmente em uso pelo software Invernada.

Gênero	Grupo	Equação
Brachiaria	Marandu, Basilisk e Arapoty	TMA= -94,92 + 8,19T _{mín}
	Capiporã e Xaraés	TMA= -128,07 + 10,66T _{mín}
Cynodon	Tifton 85 e Estrela	TMA= -84,69 + 9,06T _{mín}
	Coastcross, Florico e Florona	TMA= -67,01 + 7,97T _{mín}
Panicum	Atlas e Mombaça	TMA= -55,22 + 6,36T _{mín}
	Tanzânia e Tobiata	TMA= -29,15 + 5,93T _{mín}

Os modelos obtidos podem ser considerados eficientes para estimar o acúmulo potencial de forragem com base na temperatura mínima, mas com capacidade estimadora diferente para cada cultivar, em decorrência das características do conjunto de dados usado no seu desenvolvimento. Além disso, a pequena abrangência geográfica dos conjuntos de dados analisados e a ausência de informações sobre fertilidade do solo, adubações e deficit hídrico, para as cultivares modeladas, limitam a aplicação prática dos modelos em larga escala.

Apesar de ainda apresentarem limitações, os modelos hoje disponíveis para estimativa da produtividade potencial de gramíneas forrageiras no Brasil incorporados ao Invernada, são o que há de melhor e mais atual nessa área de conhecimento em nosso país, cabendo a partir de agora, com a identificação de suas deficiências, à comunidade científica gerar uma maior quantidade de dados de forma a paulatinamente sanar tais deficiências e melhorar o uso dos modelos.

Com o objetivo de minimizar alguns desses pontos fracos, foi acoplado um modelo de balanço hídrico no solo aos modelos de produção potencial no Invernada (Barioni et al., 2012) melhorando as estimativas em relação à ocorrência de déficit de água comum em boa parte de nosso país em determinadas épocas do ano.

Como o Invernada visa fazer o planejamento de todo o sistema de produção, não apenas da produção de forragem outros modelos existentes na literatura foram incorporados, complementando a simulação dos sistemas brasileiros. O modelo que contempla o pastejo e seus efeitos no animal e na planta foi desenvolvido com base em conceitos de Woodward et al. (1997 e 2001) e Freer et al. (1997) e calibrado com

avaliações pré e pós-pastejo de massa de forragem e composição de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (Gimenes, 2010). O modelo de crescimento animal da Universidade da Califórnia (Oltjen et al., 1986) foi adotado para a previsão do crescimento animal e da composição corpórea dos animais, com parâmetros estimados também para Nelore (Sainz et al., 2004). O modelo NRC para necessidades energéticas e nutricionais com alguns dos novos desenvolvimentos incluídos na RLM também foi incorporado ao Invernada.

De acordo com Barioni et al. (2012) o Invernada também apresenta rotinas para otimização de dietas, tanto de custo mínimo de dieta como de produção.

CROPGRO

O CROPGRO é um modelo mecanístico que prediz produção e composição de culturas baseado nas informações de planta, clima, manejo e solo. Além disso, tem a habilidade de simular balanço hídrico e de nitrogênio, matéria orgânica e dinâmica de resíduos no solo, bem como danos por pragas e/ou doenças, aspectos que aumentam a sua utilidade (Rymph, 2004). O modelo é do tipo genérico e utiliza código FORTRAN para prever o crescimento de leguminosas tais como soja [*Glycine max* (L.) Merr.], amendoim (*Arachis hypogaea* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), bem como de outras culturas como tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) (Scholberg, 1997) e fava (*Vicia faba* L.) (Boote et al., 1998a; Boote et al., 2002; Boote et al., 1998b). Isto é possível, pois o modelo CROPGRO trabalha usando arquivos de entrada que definem características da espécie e atributos de cultivares.

Um dos objetivos no desenvolvimento do CROPGRO foi o de obter um modelo que pudesse ser facilmente adaptado para simular o crescimento de diferentes espécies vegetais. O CROPGRO foi criado como uma maneira de consolidar os modelos existentes SOYGRO, PNUTGRO, e BEANGRO em um único programa (Boote et al., 1998a). Os três programas compartilhavam boa parte de seu código, o que possibilitou a fusão dos modelos inicialmente envolvidos, movendo os parâmetros que descrevem espécies e cultivares no código atual. Esta estrutura permite que uma nova espécie seja modelada criando novos arquivos de parâmetros (entrada).

O CROPGRO foi desenvolvido no início da década de 1990, como um modelo autônomo, mas que poderia também ser trabalhado dentro do Sistema de Decisão e Suporte a Transferência de Agrotecnologia (DSSAT) (ICASA, 1998), permitindo que fosse ligado a outro programa de modelagem de culturas, assim como os programas de gráficos para automatizar a apresentação dos resultados. Depois que a versão 3.1 do

DSSAT foi liberada em 1996, o código do CROPGRO foi reorganizado em uma estrutura modular. O código para simular processos diferentes da planta e solo foi organizado em sub-rotinas individuais para cada processo. As novas sub-rotinas foram projetadas para serem executadas em quatro etapas comuns (iniciação, cálculo da taxa, integração e final/sumário) organizadas pelo modelo principal. A estrutura modular foi projetada para permitir que o usuário adicione um novo código ou ligue o código a outros programas introduzidos pela inserção de módulos novos na estrutura de CROPGRO. Esta abordagem foi aplicada ao DSSAT, pois o CROPGRO é um componente integral do Modelo de Sistemas de Culturas (MSC) (Jones et al., 2003). O CROPGRO serve como o módulo padrão da cultura (Hoogenboom et al., 2003; Jones et al., 2003); uma interface universal para modelar diversas espécies.

O CROPGRO e o MSC incorporam diversos módulos para simular respostas ambientais e de manejo, transformações do N do solo, disponibilidade da água no solo, etc. Os módulos individuais que descrevem diferentes processos são executados uma vez dentro de cada uma das quatro etapas da estrutura modular. Esta estrutura modular deve realçar o futuro desenvolvimento destes programas, pois permite adicionar outras novas características pela introdução de seus próprios módulos. Também, com a separação das etapas de taxas e integração, a ordem de execução dos módulos dentro de cada etapa é geralmente menos crítica, outra vez, facilitando ainda mais o seu desenvolvimento (Jones et al., 2003).

Os arquivos de espécie contêm os parâmetros que descrevem a resposta da cultura ao ambiente assim como parâmetros que descrevem o crescimento e a fotossíntese. Estes parâmetros são ajustados durante o desenvolvimento do modelo e geralmente não são alterados pelo usuário. Alguns parâmetros podem ser ajustados para refletir diferenças na resposta de diferentes cultivares e ecótipos através dos parâmetros adicionais nos arquivos de cultivares e ecótipos. Os parâmetros nestes arquivos incluem fatores tais como, diferenças no tempo fisiológico entre os estágios do crescimento, diferenças relativas na taxa fotossintética, tamanho da folha, entre outros.

O usuário alimenta o programa com dados de clima, tipo de solo (junto com o perfil de informação específico do solo), localização do experimento, informações de manejo (data de plantio, calendário de adubação e irrigação, data de colheita, etc.), e controles da simulação, tais como: opção de fotossíntese usada, se o modelo foi usado para prever o crescimento potencial (supondo inexistência de estresses), ou crescimento com limitações hídricas, ou crescimento com limitações de N e água, e outras opções que determinam os módulos do modelo a serem usados (Hoogenboom et al., 2003; Rymph, 2004).

A iniciação de uma simulação começa na data determinada, que pode ser a data de plantio ou numa condição mais avançada. A data de plantio pode ser o dia da semeadura ou o dia em que as mudas (transplântio) são levadas ao campo. A opção do transplântio pode ser usada para inicializar a simulação com um estande de forragem estabelecida, incluindo quantidade (massa) e idade das mudas. A data de plantio provoca o começo da simulação do crescimento da cultura. Iniciar a simulação antes da data de plantio permite ao modelo estimar condições do solo no dia do plantio, o que pode ser útil se o usuário tiver informação limitada sobre as condições reais que existem no local nesse dia.

A velocidade das etapas é gerada em cada dia da simulação, calculando as taxas variáveis (a variabilidade representa a quantidade de mudanças na variável estado além de um tempo específico – normalmente um dia ou menos) para o dia atual da simulação. Para cada dia simulado, antes de rodar o CROPGRO com as condições determinadas para a planta, é necessário informar a data, as temperaturas mínimas e máximas diárias, a pluviosidade diária, e a radiação solar diária, que são capturadas do arquivo de clima

A informação do clima e de manejo é alimentada no módulo dos processos do solo, predizendo as taxas de mudança da água disponível do solo, NH_4^+ , e NO_3^- (Boote et al., 2006). Os dados do clima junto com a informação da planta e do solo do fim do dia anterior são usados para calcular a evapotranspiração diária.

A estimativa da fenologia da planta ou do estágio de maturidade é componente chave do CROPGRO. Diversos parâmetros, tais como: partição do novo crescimento entre órgãos da planta (folha, haste, raízes), e a sensibilidade do desenvolvimento ao comprimento do dia são dependentes ou podem variar com o estágio da maturidade. O estágio da maturidade é uma função do tempo fisiológico acumulado, que é uma combinação do tempo e da temperatura.

As temperaturas (mínima, ótima, e máxima) para vários estádios do desenvolvimento de cada colheita são descritas no arquivo SPE. Geralmente, não há nenhum desenvolvimento em temperaturas abaixo da mínima ou acima das temperaturas máximas, dessa forma plantas maduras com taxas mais rápidas estão com temperaturas do ar próximas da faixa ótima. Esta taxa de mudança/progressão para o estágio seguinte pode ser alterada pelo comprimento do dia e pelo estresse hídrico. O progresso durante o crescimento vegetativo se dá pelo aumento progressivo no número das folhas por planta e com a indução floral começa uma progressão para uma série de estádios reprodutivos (Boote et al., 1998a; Boote et al., 1998b).

A taxa diária de danos por pragas também é calculada em cada etapa. Os códigos do arquivo de pragas permitem que o usuário especifique a quantidade (kg MS ha^{-1}) ou a

proporção de folhas e colmos a ser removida ou a redução da produção de assimilados devido à doença ou aos danos por pragas. Assim como todas as outras taxas variáveis, as taxas dos danos causadas por pragas não são deduzidas da massa existente da planta até a etapa da integração que sinaliza o fim do dia atual. Isto assegura que todas as novas taxas estejam baseadas nas mesmas circunstâncias - a massa da planta no fim do dia anterior.

Para o cálculo da taxa fotossintética no CROPGRO, a fonte de assimilados, é função da radiação solar absorvida e da fotossíntese, determinando o peso da planta e o desempenho (fonte-dirigida). Uma exceção é que algumas espécies de planta podem exibir um período “juvenil” em que a demanda da plântula é limitada e pode ser realimentada na produção do fotoassimilados. O CROPGRO oferece duas opções para prever a fotossíntese: uma opção diária da fotossíntese do dossel e uma opção de hora em hora de fotossíntese foliar (Boote & Pickering, 1994; Boote et al., 1998a).

O CH_2O potencialmente disponível para ser armazenado como reserva é calculado e adicionado à produção diária de fotoassimilados para determinar a quantidade máxima de CH_2O disponível para o dia. O custo da respiração da manutenção diária e algumas perdas devido a danos por pragas são subtraídos do total e, o remanescente é a quantidade de CH_2O disponível para consumo de nutrientes e crescimento. A demanda potencial de CH_2O para o crescimento da semente, custo de CH_2O por grama de novo crescimento vegetativo (baseado nas proporções da folha e colmo preditos pelo novo estágio vegetativo), é tanto quanto a demanda potencial de nitrogênio (N) para a “reposição” do N que tem sido mobilizado do tecido velho são calculados e subtraídos dos CH_2O remanescentes disponíveis (Boote et al., 1998b; Jones et al., 2003).

A quantidade de novo crescimento que pode ser produzido em função do CH_2O disponível depende do custo deste, que é função de sua composição. A composição do crescimento novo total é, por sua vez, determinada pela partição do novo crescimento entre os órgãos da planta (folha, colmo, raízes, sementes, etc.) e a concentração de proteína, carboidrato (compreendido por parede celular e amido), lipídios, lignina, ácidos orgânicos e cinzas em cada novo órgão de crescimento. Os parâmetros que descrevem a partição para os órgãos e sua composição são listados no arquivo da espécie. Uma série de coeficientes descrevem o custo para montar cada um destes componentes (ambos, custos direto de C para os esqueletos carbono, assim como a energia usada nas vias bioquímicas para formá-los) (Penning de Vries et al., 1974) expressados em equivalentes glicose, os quais são usados junto com os parâmetros de composição para calcular o custo da glicose nos novos tecidos (Rymph, 2004). A proteína bruta ou as concentrações

de N no crescimento de novas folhas, colmos e raízes podem variar dentro de uma escala de valores desses três parâmetros: uma concentração máxima para o novo crescimento, uma concentração “normal” do crescimento e uma concentração residual após o senescência. Se houver disponibilidade adequada de CH_2O , mas o N disponível for limitante, o novo crescimento pode ocorrer em concentrações reduzidas de N (Boote et al., 2006).

A demanda por nitrogênio pode ser suprida por duas fontes diferentes: pelo consumo “real” de N pela planta, e se este consumo não suprir a demanda de N para o novo crescimento, o N é mobilizado dos tecidos vegetativos. Uma vez que o consumo de N e a mobilização são calculados, o custo em CH_2O para isto será subtraído do CH_2O remanescente, atualizando o orçamento energético. Se a cultura for uma leguminosa, a fixação de N será estimada, adicionada ao “pool” de N disponível, e o custo de CH_2O subtraído dos CH_2O disponíveis. O CH_2O restante é alocado ao novo crescimento, primeiramente para formação de semente, depois para crescimento vegetativo (Boote et al., 1998a).

O aumento no comprimento das raízes associado com o novo crescimento de raiz estimado para o dia é calculado. O comprimento total das raízes e sua distribuição são usados para determinar o consumo de nutrientes e água do dia seguinte. As perdas também são calculadas e a senescência de folhas, colmos e raízes para o dia são estimadas bem como qualquer dano por baixas temperaturas.

Finalmente, todos os ganhos em novo crescimento e as perdas devido à senescência, pragas e geada são adicionados à massa do tecido do dia anterior e um novo total é calculado, representando a massa da planta no fim do dia atual. Assim termina o “dia” e depois as saídas são impressas em seus respectivos arquivos, a etapa da integração termina e todas as etapas são repetidas no dia seguinte.

A estrutura do modelo tem se mostrado boa para trabalhar tanto com culturas anuais de grãos e hortaliças, como o tomate. Para adaptar o modelo para simular o crescimento de gramíneas tropicais perenes, parâmetros exatos devem ser desenvolvidos para o arquivo de espécie. Qualquer processo de uma planta é importante, se esta planta ainda não está incluída no modelo, e isso pode requerer algumas definições nos parâmetros ou mesmo mudanças e adições ao código do modelo (Rymph, 2004).

Na década 90, o modelo CROPGRO-forragem foi adaptado para simular a cultura do amendoim na Florida (Kelly, 1995), e como a gramínea *Paspalum notatum* Flugge era usado na rotação de culturas, passou a fazer parte do programa. Os resultados destas simulações foram inseridos num modelo econômico para predizer a sustentabilidade e a

viabilidade da cultura do amendoim. Os arquivos de espécie, cultivar e ecótipos foram liberados mais tarde como um modelo de “pastagens” no DSSAT (Sistema de Suporte a Decisão na Transferência de Agrotecnologia), versão 3.5 (ICASA, 1998).

Anos depois, essa versão do modelo foi usada para simular experimentos de produção de feno de *P. notatum*, mas revelaram uma consistente superestimativa da produção de matéria seca, particularmente nos meses mais frios. Assim, a busca por aplicações mais rigorosas para o uso do modelo impôs diferentes padrões de acurácia, e mais do que isso, capacidade de precisão mais acurada e representação mais realística dos padrões sazonais e dos padrões rápidos de rebrotação para *P. notatum* foram requeridos, incluindo um órgão de armazenamento de reservas (Rymph et al., 2004). Por estas razões, a parametrização e testes mais rígidos foram feitos no modelo de simulação de crescimento CROPGRO versão 4.0, conferindo a ele a habilidade de estimar o crescimento e a composição nitrogenada nos tecidos de *P. notatum* em resposta às variações diárias no clima, adubação e manejo de colheita, embora estas melhorias ainda não tenham sido incorporadas ao DSSAT.

Além de estimar a produção de *P. notatum*, a versão 4.5 do software foi lançada incluindo o modelo CROPGRO-ferragem adaptado para *Brachiaria decumbens* (Giraldo et al., 2001), utilizando dados da Rede Internacional de Avaliação de Pastos Tropicais, CIAT, Colômbia.

Outro grupo de pesquisadores (Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e Universidade da Florida) utilizando como base o CROPGRO – ferragem, desenvolvido para *P. notatum*, adaptou o modelo para estimar o crescimento de *B. brizantha* cv Xaraés (Pedreira et al., 2011) e a seguir para *Panicum maximum* cv Tanzânia (Lara et al., 2012).

Com isso, hoje, é possível simular a produção de matéria seca em diferentes locais, disponibilizando mais uma ferramenta de auxílio no planejamento. Para ambos os capins (Xaraés e Tanzânia) a adaptação do modelo foi eficiente e as dificuldades foram semelhantes.

O índice de área foliar durante sucessivos intervalos de crescimento (Fig. 1 e 2) indica uma boa predição do IAF durante cada ciclo. No inverno, o IAF simulado não foi tão bem quanto o predito no verão, e isso pode estar associado com grandes quantidades de material morto nas pastagens durante a estação fria. Isso é, possivelmente, associado com o equipamento utilizado nestas medidas (analisador de dossel, LAI-2000), o qual pode superestimar o IAF, pois pode considerar as altas quantidades de material morto como área foliar.

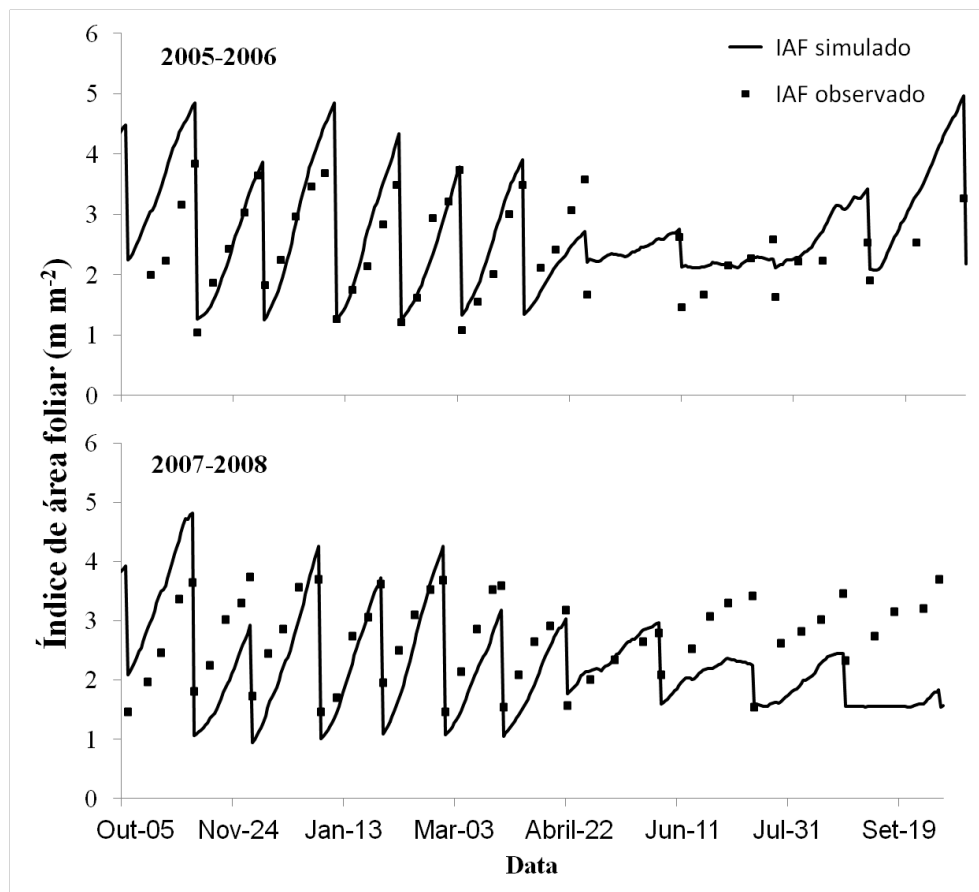


Figura 1. Índice de área foliar simulado vs. observado durante o primeiro (2005-2006) e segundo (2007-2008) ano experimental em função da data do ano, para capim Xaraés em Piracicaba, SP.

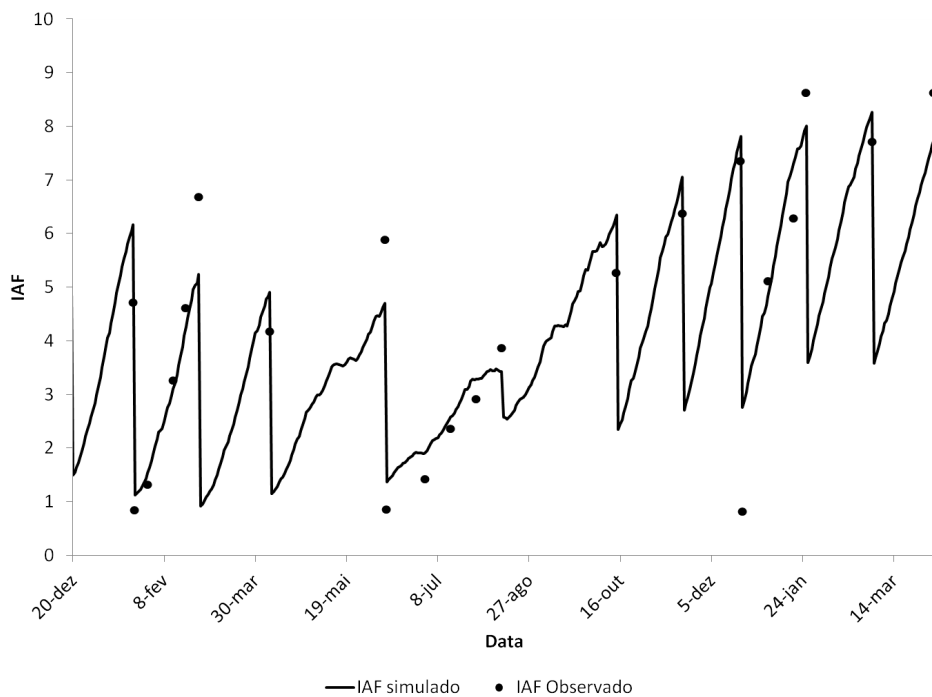


Figura 2. Índice de área foliar simulado vs. observado durante o período experimental (2002-2004) em função da data do ano, para capim Tanzânia em Piracicaba, SP.

A simulação da massa de raízes (Fig. 3 e 4) mostra um padrão cíclico em resposta as variações de comprimento de dia ao longo do ano. Os genótipos de *Brachiaria* e *Panicum* não apresentam rizomas ou estolões, assim, reservas orgânicas como carboidratos não estruturais totais e nitrogênio são armazenados na base do colmo e na raiz. Para fins de modelagem, assumiu-se que o órgão de reserva nessa simulação foi basicamente a base do colmo e as raízes (mas no modelo, o órgão de reserva não tem um local definido e não é removido pela colheita, como um rizoma).

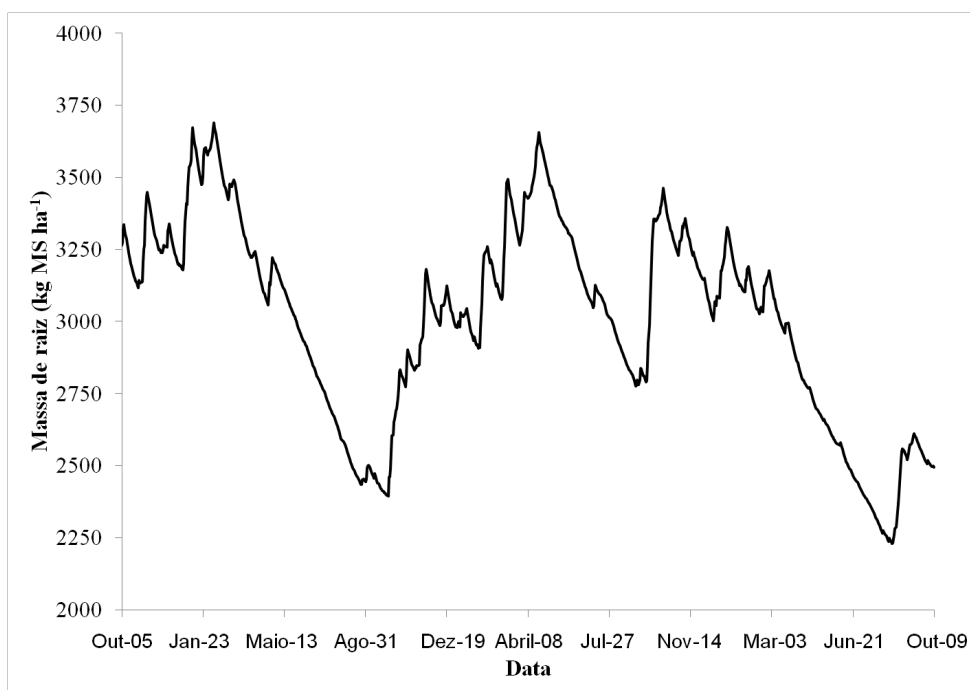


Figura 3. Massa de raiz simulada em função da data ao longo de três anos para capim Xaraés em Piracicaba, SP.

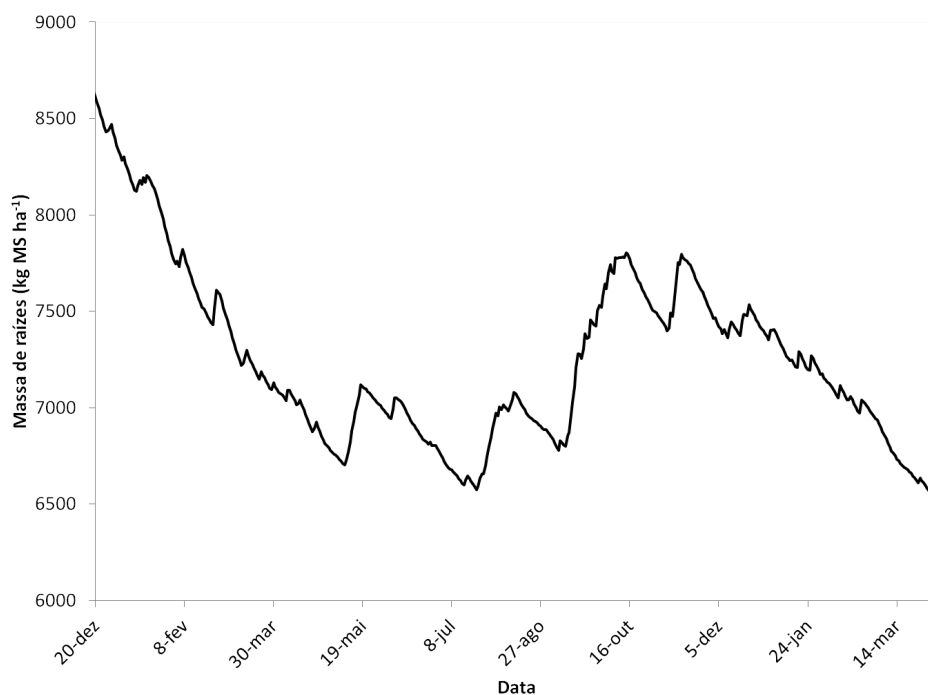


Figura 4. Massa de raiz simulada durante o período experimental (2002-2004) em função da data do ano, para capim Tanzânia em Piracicaba, SP.

Se o pastejo permite mais área foliar residual, a rebrotação será menos dependente de reservas, pois de área foliar remanescente provem fotoassimilados para sintetizar novos tecidos a partir da fotossíntese atual. Por outro lado, quando o pastejo é severo e pouca ou nenhuma área foliar, novo crescimento dependerá da existência de reservas orgânicas, com menores taxas iniciais de crescimento (Donaghy & Fulkerson, 2002; Rodrigues et al., 2007).

Os parâmetros padrão do modelo CROPGRO-forragem foram modificados para simular maiores crescimentos de folha e colmo com menor crescimento de raiz. Ao mesmo tempo, melhorias foram feitas nos parâmetros influenciando a área foliar específica, tanto quanto a senescência de vários órgãos da planta (folha, colmo, raiz e reservas).

Após estas mudanças, a biomassa acumulada foi melhor simulada (Fig. 5 e 6), mais próxima dos valores observados e com maior índices de confiança (D-Willmott).

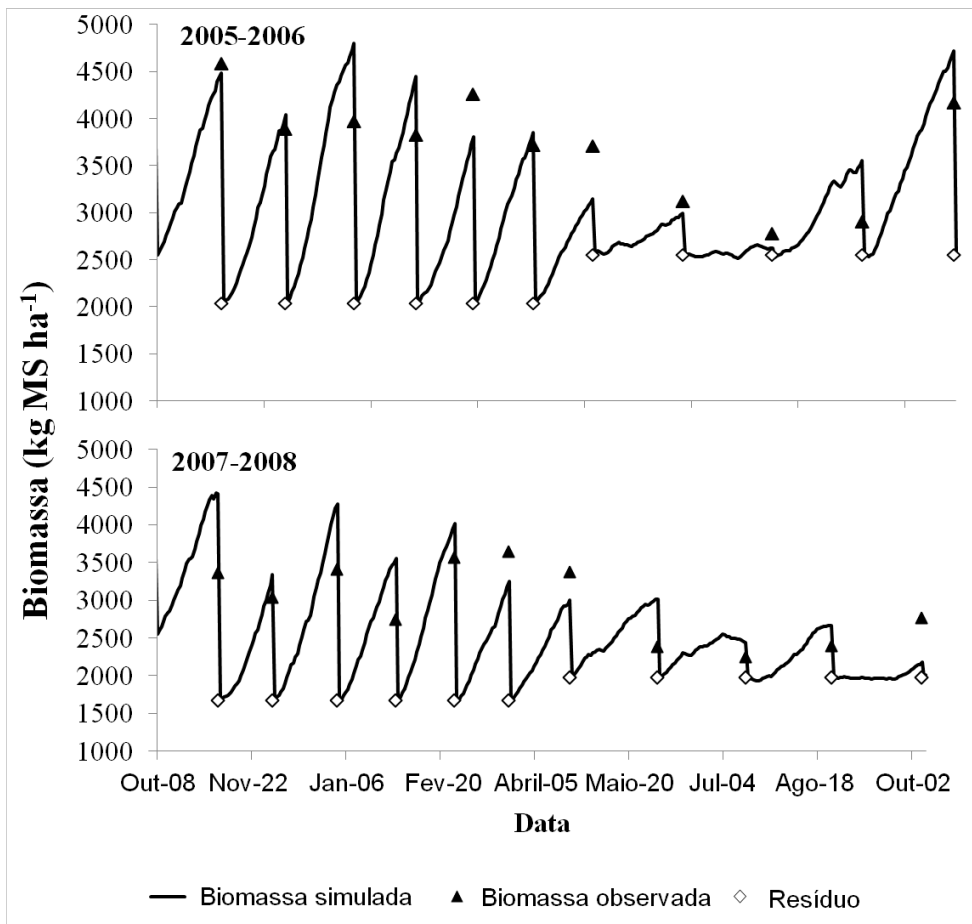


Figura 5. Biomassa simulada vs. observada durante o primeiro (2005-2006) e segundo (2007-2008) ano experimental em função da data do ano, para capim Xaraés em Piracicaba, SP.

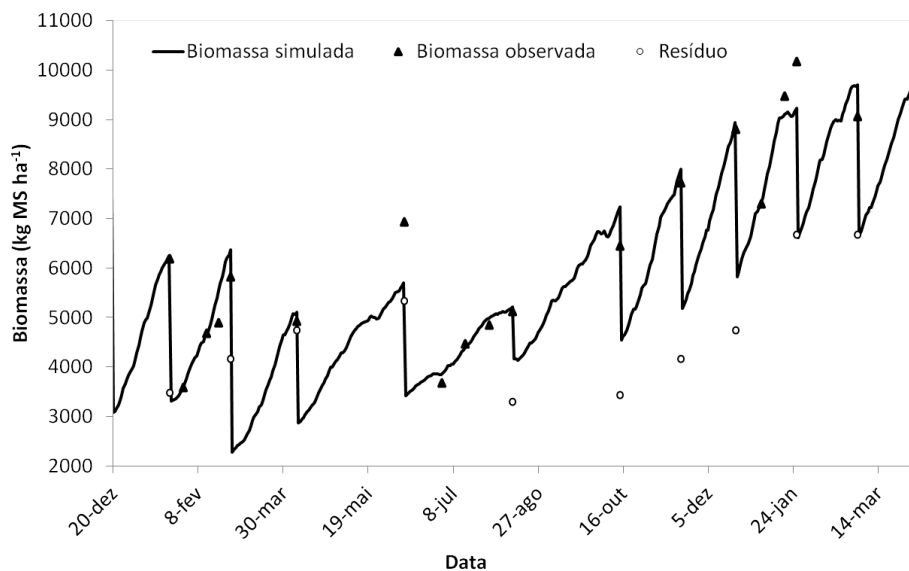


Figura 6. Biomassa simulada vs. observada durante o período experimental (2002-2004) em função da data do ano, para capim Tanzânia em Piracicaba, SP.

Além destes, alguns ajustes foram necessários nos efeitos de temperatura e fotoperíodo. Com isso, os resultados indicam que o crescimento e composição de *Brachiaria brizantha* e *Panicum maximum* podem ser feitos utilizando o CROPGRO-forragem.

Modelagem e a sustentabilidade

Para se entender os possíveis impactos da adoção de técnicas de modelagem na sustentabilidade dos sistemas pastoris, é necessário se entender primeiramente o que é sustentabilidade, termo que ainda suscita muita confusão em sua interpretação.

De maneira generalista, sustentabilidade é definida por característica de um processo ou estado que pode manter-se indefinidamente (Huawermeiren, 1998), ou seja traz a idéia de perpetuação de uma situação por ter atingido um estado equilibrado.

Atualmente, sustentabilidade tem sido um termo usado apenas para definir o aspecto ambiental, principalmente quando relacionada ao setor agropecuário, sendo freqüentemente usada como sinônimo de preservação, o que é um erro. Contemplando apenas o aspecto ambiental, sustentabilidade pode ser conceituada como uma estratégias de uso dos recursos existentes nos diversos ecossistemas com mínima deterioração ambiental, e não sem nenhum impacto no ambiente. O desenvolvimento de qualquer sociedade implica em mudanças, e qualquer mudança por mais gradual e controlada que seja, gera impacto, por tanto, sustentabilidade não pode ser sinônimo de preservação.

A associação de sustentabilidade apenas ao aspecto ambiental também é por si só um erro, já que é um conceito é incompleto, mesmo quando aplicado apenas à agropecuária.

Sustentabilidade, na realidade, tem um sentido muito mais amplo, se referindo ao uso de recursos humanos, naturais e artificiais de forma que permitam que gerações atuais satisfaçam suas necessidades, sem contudo, comprometer a capacidade de futuras gerações de satisfazerem as suas (Claro et al., 2007). Assim sendo a prática sustentável envolve aspectos sociais, econômicos e ambientais que devem ser entendidos conjuntamente.

Assim sendo, segundo um conceito mais amplo a sustentabilidade deve considerar a aptidão das terras e das populações nelas existentes, sua capacidade de atendimento das necessidades sociais das famílias e das comunidades rurais, gerando produtividade econômica viável, e sustentação digna, com o mínimo de degradação ambiental, de modo

que os recursos naturais sejam considerados no melhor do seu potencial de uso, ao mesmo tempo em que são preservados para gerações futuras (Lepsch et al., 1991; Veiga, 1994).

Os modelos, como mecanismos de geração e gerenciamento da informação, são ferramentas que possibilitam o planejamento das atividades no campo, minimizando suas incertezas e seus riscos. Desta forma, a modelagem é uma das estratégias que mais poderiam contribuir para o aumento de eficiência, tanto técnica como econômica, dos sistemas de produção brasileiros.

A possibilidade de simular vários cenários, e de gerar estimativas da repercussão dos diferentes cursos de ação sobre os sistemas de produção, permitindo a comparação entre diferentes situações, e a identificação de possíveis pontos de estrangulamento dos sistemas são benefícios da modelagem. Além disso, a possibilidade de racionalização dos processos e otimização dos recursos disponíveis torna os modelos de simulação a ferramenta ideal para se conseguir o desenvolvimento sustentável da agropecuária.

O emprego da modelagem permite que se estime a produtividade que se pode obter em um dado local para uma dada cultura ou criação, qual o risco climático existente para a atividade, qual a necessidade de área e insumos para o desenvolvimento dessa atividade, e qual o impacto que a atividade pode causar no ambiente. Dessa forma, é possível se avaliar a viabilidade econômica, técnica e ambiental, e realizar um zoneamento local, indicando as áreas com maior ou menor potencial para as diferentes atividades agropecuárias, facilitando a tomada de decisões, a adoção de técnicas apropriadas para diminuir riscos e aumentar a produtividade, e até a definição de prioridades pelos órgãos de financiamento da agricultura.

As ferramentas de modelagem hoje existentes ou já em desenvolvimento possibilitam que um sistema de produção animal em pastagens seja planejado e otimizado, ajustando a demanda e a oferta de alimentos, e adequando a lotação das pastagens a cada época do ano, por exemplo, maximizando o desempenho do sistema, minimizando o desperdício de tempo e dinheiro e possibilitando que se consiga o máximo desempenho operacional e econômico da propriedade, com o mínimo impacto ao meio ambiente. As bases para um desenvolvimento sustentável.

Modelos e sistemas de apoio à tomada de decisão devem ser desenvolvidos ou aperfeiçoados com o intuito de ajudar ainda mais na obtenção de sistemas de produção mais econômicos, socialmente mais equilibrados e ambientalmente menos impactantes, mas esse processo já está em transito, e as bases para esse desenvolvimento já estão disponíveis.

A agropecuária brasileira, essencial na base de sustentação econômica do país, e responsável por grande parte do superávit comercial brasileiro, possui uma nova dimensão socioeconômica e ambiental, demandando ciência, inovação, tecnologias modernas e atenção redobrada quanto aos seus impactos sobre os recursos naturais.

Literatura citada

ACOCK, B.; TRENT, A. **The soybean crop simulator, GLYCIM**: documentation for the modular version 91. Moscow: University of Idaho, Department of Plant, Soil and Entomological Sciences, 1991. 242p.

AGRICULTURAL AND FOOD RESEARCH COUNCIL – AFRC. **Energy and protein requirements of ruminants**. Wallingford: CAB International, 1993. 159p.

ANDERSON; J. R.; DILLAN, J. L.; HARDAKER, R. **Agricultural Decision Analysis**. Ames: Iowa State University Press, 1977. 344p.

BARIONI, L.G. **Modelagem dinâmica e otimização metaheurística para apoio à tomada de decisões na recria e engorda de bovinos de corte**. 2002. 100p. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

BARIONI, L.G.; MARTHA JUNIOR, G.B.; RAMOS, A.K.B.; VELOSO, R.F.; RODRIGUES, D.C.; VILELA, L. Planejamento e gestão do uso de recursos forrageiros na produção de bovinos em pastejo. In: Simpósio sobre manejo da pastagem, 20, 2003. Piracicaba. **Anais**. FEALQ, 2003. p.105-153.

BARIONI, L.G.; RAMOS, A.C.B.; MARTHA JÚNIOR, G.B.; FERREIRA, A.C.; SILVA, F.A.M.; VILELA, L.; VELOSO, R.F. Orçamentação forrageira e Ajustes em Taxas de Lotação. In: Simpósio sobre manejo da pastagem, 22, 2005. Piracicaba. **Anais**. FEALQ, 2005. p.217-245.

BARIONI, L.G., TONATO, F.; ALBERTINI, T. Z. Orçamentação forrageira: revisitando os conceitos e atualizando as ferramentas. In: Simpósio sobre manejo da pastagem, 26., 2011, Piracicaba. **Anais**. Piracicaba: FEALQ, p. 71-96.

BARIONI, L.G.; ALBERTINI, T.Z.; TONATO, F.; MEDEIROS, S.R. Using computer models to assist planning beef production: experiences in Brazil. *Revista Argentina de Producción Animal*, 2012 (no prelo).

BLACKIE, M.J.; DENT, J.B. **Information systems for agriculture**. London: Applied Science Publishers, 1979. 176 p.

BOOTE, K.J.; PICKERING, N.B. Modeling photosynthesis of row crop canopies. **Hortscience** 29:1423-1434.1994.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N. B. Potential uses and limitations of crop model. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p.704-716, 1996.

- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: PEART, R. M.; CURRY, R. B. (Ed.) **Agricultural systems modeling and simulation**. New York: Marcel Dekker, 1998. p.651-692.
- BOOTE, K.J.; MINGUEZ, M.I.; SAU F. Adapting the CROPGRO legume model to simulate growth of faba bean. **Agronomy Journal**, v.94, p.743-756, 2002.
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N.B. The CROPGRO model for grain legumes, in: TSUJI, G.Y.; et al. (Eds.), **Understanding options for agricultural production**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1998. p. 99-128.
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; INGRAM, K.T. Modeling N-Fixation and Its Relationship to N Uptake in the CROPGRO Model, ASA-CSSA-SSSA Annual Meeting, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America and Soil Science Society of America, Indianapolis, 2006.
- BÜRGI, R.; PAGOTTO, D.S. Aspectos mercadológicos dos sistemas de produção animal em pastagens. In: PEIXOTO, A.M.; MOURA, J.C.; PEDREIRA, C.G.S.; FARIA, V.P.de (Ed.) Simpósio sobre manejo da pastagem, 19., 2002. **Anais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. p.217-231.
- BURTON, G.W.; HOOK, J.E.; BUTLER, J.L.; HELLWING, R.E. Effect of temperature, daylength and solar radiation on production of Coastal bermudagrass. **Agronomy Journal**, Madison, v.80, p.557-560, 1988.
- BYWATER, A.C. Exploitation of the system approach in technical design of agricultural enterprises. In: Jones, J.G.W.; Street, P.R. (Eds.). **Systems theory applied to agriculture and food chain**. London: Elsevier Applied Sciences, 1990.
- CACHO, O.J. A practical equation for pasture growth under grazing. **Grass and Forage Science**, Oxford, v.48, n. 4, p.387-394, 1993.
- CHANTER, D.O. The use and misuse of linear regression methods in crop modeling. In: ROSE, D.A.; CHARLES-EDWARDS, D.A. (Ed.) **Mathematics and plant physiology**. London: Academic Press, 1981. p.253-266.
- COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANIZATION – CSIRO. **Feeding standards for Australian livestock, Ruminants**. Melbourne: CSIRO Publishing, 1990. 266p.
- COSTA, L.C., BARROS, A.H.C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n.1, p. 75-82, 2001.
- CRUZ, P.G.; SANTOS, P.M.; PEZZOPANE, J.R.; OLIVEIRA, P.P.A.; ARAÚJO, L.C. Modelos empíricos para estimar o acúmulo de matéria seca de capim marandu com variáveis agrometeorológicas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.46, p.675-681, 2011.
- CURRY, R.B.; CHEN, H. Dynamic simulations of plant growth, Part II, Incorporation of actual daily weather data and partitioning of net photosynthate. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.14, p.1170-1175, 1971.
- DALLACORT, R.; FREITAS, P.S. L.; FARIAS, R.T.; GONÇALVES, A.C.A.; REZENDE, R.; BERTONHA, A. Utilização do modelo Cropgro-soybean na determinação de melhores

épocas de semeadura da cultura da soja, na região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Science Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 4, p. 583-589, 2006.

DETOMINI, E.R. **Modelagem da produtividade potencial de *Brachiaria brizantha* (variedades cultivadas marandu e xaraés)**. 2004. 112p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

DIAS, C.T. dos S. **Planejamento de uma fazenda em condições de risco: programação linear e simulação multidimensional**. 1996. 100p. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

DONAGHY, D.J.; FULKERSON, W.J. The impact of defoliation frequency and nitrogen fertilizer application in spring on summer survival of perennial ryegrass under grazing in subtropical Australia. **Grass and Forage Science**, v.57, p.351-359, 2002.

DOURADO NETO, D.; TERUEL, D.A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: I, Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.55, p.46-50, 1998.

DURU, M.; DUDROCQ, H.; FABRE, C.; FEUILLERAC, E. Modeling net herbage accumulation of an orchardgrass sward. **Agronomy Journal**, Madison, v.94, p.1244-1256, 2002.

FERRAZ, J.B.S.; FELÍCIO, P.E. Production systems - An example from Brazil. **Meat Science**. v.84, p.238-243, 2010.

FIGUEREDO JÚNIOR, L.G.M. **Modelo para a estimação da produtividade de grãos de milho no Estado de São Paulo**. 2004. 67p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

FOX, D.G.; SNIFFEN, C.J.; O'CONNOR, J.D.; RUSSELL, J.B.; VAN SOEST, P.J. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: III. Cattle requirements and diet adequacy. **Journal of Animal Science**, v.70, p.3578-3596, 1992.

FREER, M.; MOORE, A.D.; DONNELLY, J.R. GRAZPLAN: decision support systems for Australian grazing enterprises - II, The animal biology model for feed intake, production and reproduction and the GrassFeed DSS. **Agricultural Systems**, Essex, v.54, p.77- 126, 1997.

GILL, M.; BEEVER, D.E.; FRANCE, J. Biochemical bases needed for the mathematical representation of whole animal metabolism. **Nutrition Abstract Review**, v.2, p.181-200, 1989.

GIMENES, M. F. A. Produção e produtividade animal em capim-marandu submetido a estratégias de pastejo rotativo e adubação nitrogenada. 2010. 109p. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

GIRALDO, L.M.; LIZCANO, L.J.; GIJSMAN, A.J.; RIVERA, B.; FRANCO, L.H. Adapting the CROPGRO Model of DSSAT to Simulate the Growth of *Brachiaria decumbens*, In:

BOWEN, W. T.; et al. (Eds.), Third International Symposium on Systems Approaches for Agricultural Development, International Potato Center (CIP), Lima, Peru. 2001.

GRAY, D.I.; PARKER, W.J. **The planning, implementation and control of pastoral based system**. Palmerston North: Agricultural and Horticultural Systems Management Department, Massey University, 1994. 112p.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; GIJSMAN, A.J.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; BOWEN, W.T. DSSAT v4 cropping system simulation model, in: HOOGENBOOM, G. et al. (Eds.), Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0., University of Hawaii, Honolulu. 2003.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Brazilian Institute of Geography and Statistics. 2008.

ICASA. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT), ICASA, Honolulu. pp. DSSAT. 1998.

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE – INRA. **Ruminant Nutrition, recommended allowance and feed tables**. Montrouge: Libbey Eurotext, 1989. 389p.

JONES, C.A.; KINIRY, J.R. **CERES-Maize**: a simulation model of maize growth and development. College Station: Texas: A & M University Press, 1986. 194p.

JONES, J. W.; BOOTE, K. J.; JAGTAP, S. S. **Soygro V.5.41**: soybean crop growth simulation user's guide. Gainesville: Agriculture Experimental Station Journal, 1988.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy** v.18, p.235-265, 2003.

JOYCE, L.A.; KICKERT, R.N. Applied plant growth models for grazinglands, forests and crops. In: WISIOL, K.; HESKETH, J.D. (Ed.) **Plant growth modeling for resource management**: current models and methods. Boca Raton: CRC Press, v.1. 1987. p.141-156.

KAY, R.D. **Farm management**: planning control and implementation. New York: McGraw-Hill, 1986. 370p.

KELLY, T.C. A bioeconomic system approach to sustainability analysis at the farm level, Ph.D. in Agronomy, University of Florida, Gainesville. p. 114. 1995.

KINIRY, J.R.; BURSON, B.L.; EVERS, G.W.; WILLIAMS, J.R.; SANCHEZ, H.; WADE, J. W.; FEATHERSTON, J.W.; GREENWADE, J. Coastal Bermudagrass, Bahiagrass, and Native Range Simulation at Diverse Sites in Texas. **Agronomy Journal**, Madison, v.99, p.450-461, 2007.

KIRKWOOD, C.W. **Strategic Decision Making - Multiobjective Decision Analysis with spreadsheets**. Belmont: Duxbury Press, 1997. 352p.

LANNA, D. P. D.; ALMEIDA, R.; NEPOMUCENO, N.H.; BARIONI, L.G., et al. 2011. RLM 3.2 - Ração de Lucro Máximo version 3.2. Accessed in Sept. 24, 2011. <http://www.integrasoftware.com.br/rlm31/produto.php>.

LARA, M.A.S. **Respostas morfofisiológicas de cinco cultivares de *Brachiaria* spp, às variações estacionais de temperatura do ar e fotoperíodo.** 2007. 91p. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

LARA, M.A.S. **Respostas morfofisiológicas de genótipos de *Brachiaria* spp. sob duas intensidades de desfolhação e modelagem da produção de forragem em função das variações estacionais da temperatura e fotoperíodo: adaptação do modelo CROPGRO.** 2011. 102p. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

LARA, M.A.S.; PEDREIRA, C.G.S.; BOOTE, K.J.; PEDREIRA, B.C.; MORENO, L.S.B.; ALDERMAN, P.D. Predicting growth of *Panicum maximum*: An adaptation of the CROPGRO-Perennial Forage model. **Agronomy Journal**, v.104, p.600-611, 2012.

LIMA, M.G. **Calibração e validação do modelo CERES MAIZE em condições tropicais do Brasil.** 1995. 119p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

LIU, W.T.H., BOTNER, D.M., SAKAMOTO, C.M. Application of CERES-Maize model to yield prediction of Brazilian maize hybrid. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, v.45, p.299-312, 1989.

LOEWER, O.J. Graze: a beef-forage model of selective grazing, In: PEART, R.M.; CURRY, R.B, (Ed.) **Agricultural Systems Modeling and Simulation**. New York: Marcel Dekker, 1998. p.301-418.

LOVATTO, P.A.; SOUVANT, D. Premissas básicas para o desenvolvimento de modelos na agricultura. In: EVERLING, D.M. et al. **Modelos para a tomada de decisões na produção de bovinos e ovinos.** (Eds.), Santa Maria: UFSM, 2002. p.9-33.

MANZATTO, C. V.; RAMALHO FILHO, A.; COSTA, T. C. E. C.; SANTOS, M. L. M.; COELHO, M. R.; SILVA, E. F. da; OLIVEIRA, R. P. de. Potencial de uso e uso atual das terras. In: MANZATTO, C. V.; FREITAS, E. J.; PERES, J. R. R. (Org.). **Uso agrícola dos solos brasileiros.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002, p.13- 21.

MARSHALL, P.R.; McCALL, D.G.; JOHNS, K.L. Stockpol: a decision support model for livestock farms. In: NEW ZEALAND GRASSLAND ASSOCIATION, 1991. Palmerston North. **Proceedings**. Palmerston, 1991, v.53, p.137-140.

MEDEIROS, H.R. de; PEDREIRA, C.G.S. ; VILLA NOVA, N.A.; BARIONI, L.G.; MELLO, A.C.L. Prediction of herbage accumulation of *Cynodon* Grasses by an empirical model based on temperature and daylength. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 19., 2001, Piracicaba . **Proceedings**. Piracicaba:FEALQ, 2001. p.263-265.

MEIRELES, E.J.L.; PEREIRA, A.R.; SENTELHAS, P.C.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, F.J.P. Calibration and test of the CROPGRO-DRY BEAN model for edaphoclimatic conditions in the savanas of central Brazil. **Scientia Agricola**, v.59, n.4, p.723-729, 2002.

MEYER, G.E.; CURRY, R.B.; STREETER, J.G.; MEDERSKI, H.J. SOYMOD/OARDC: a new dynamic simulator of indeterminate soybean growth, development and seed yield: I, Theory, structure and validation, Ohio: Ohio Agricultural Research and Development Center, 1979. (Research Bulletin, 1113)

MEYER, G.E.; CURRY, R.B.; STREETER, J.G.; BAKER, C.H. Simulation of reproductive processes and senescence in indeterminate soybeans. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.24, p.421, 1981.

MONTEITH, J.L. The Quest for Balance in Crop Modeling. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, p.696-697, 1996.

MOORE, A.D.; DONNELLY, J.R.; FREER, M. GRAZPLAN: decision support systems for Australian grazing enterprises, III, Pasture growth and soil moisture submodels and the GrassGro DSS. **Agricultural Systems**, Oxford, v.55, p.535-582, 1997.

MORENO, L.S.B. **Produção de forragem de capins do gênero *Panicum* e modelagem de respostas produtivas e morfofisiológicas em função de variáveis climáticas**. 2004. 86p. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

MORENO, L.S.B., MEDEIROS, H.R.; PEDREIRA, C.G.S. Estimativa de produção de forragem de grama estrela por um modelo matemático baseado na temperatura do ar e fotoperíodo (compact disc). In: Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP, 8., Piracicaba, 2000. Anais. Piracicaba.

NABINGER, C. Aspectos ecofisiológicos de manejo de pastagens e utilização de modelos como ferramenta de diagnóstico e indicação de necessidades de pesquisa. In: REUNIÃO DO GRUPO TÉCNICO EM MELHORAMENTO E UTILIZAÇÃO DE RECURSOS FORRAGEIROS DAS ÁREAS TROPICAL E SUBTROPICAL DO CONE SUL. 1996. Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: UFRGS, 1996. p.17-62

NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. **Nutrient requirements of beef cattle**. 8th ed. Washington: National Academic Press, 2000. 248p.

NELSON, B.L. **Stochastic Modeling: Analysis and simulation**. New York: McGraw-Hill, 1995. 321p.

O'CONNOR, J.D.; SNIFFEN, C.J.; FOX, D.G.; CHALUPA, W. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: IV. Predicting amino acid adequacy. **Journal of Animal Science**, v.71, p.1298-1311, 1993.

OLTJEN, J.W.; BYWATER, A.C.; BALDWIN, R.L.; GARRET, W.N. Development of a dynamic model of beef cattle growth and composition. **Journal of Animal Science**, v.62, p.86-97, 1986.

OVERMAN, A.R.; ANGLE, E.A.; WILKINSON, S.R. Evaluation of an empirical model of Coastal bermudagrass production. **Agricultural Systems**, Oxford, v.28, p.57-66, 1988.

PASSIOURA, J.B. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering. **Agronomy Journal**, v.88, p.690-694, 1996.

PEDREIRA, B.C. ; PEDREIRA, C.G.S. ; BOOTE, K.J. ; LARA, M.A.S. ; ALDERMAN, P.D. Adapting the CROPGRO Perennial Forage model to predict growth of *Brachiaria brizantha*. **Field Crops Research**, v. 120, p. 370-379, 2011.

PENNING de VRIES, F.W.T.; BRUNSTING, A.H.W.; VAAN LAAR, H.H. Products, requirements and efficiency of biosynthesis: A quantitative approach. **Journal of Theoretical Biology**, v.45, p.339-377, 1974.

PEREIRA, A.R. Simulação do crescimento e da produtividade. In: VIEGAS, G.P. (Ed.). SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, 1987. Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1987, v.17 p.201-209.

RAGSDALE, C.T. **Spreadsheet modeling and decision analysis: a practical introduction to management science**. Cincinnati: South Western College Publishing, 1997. 730p.

RODRIGUES, D.C. **Produção de forragem de cultivares de *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf. e modelagem de respostas produtivas em função de variáveis climáticas**. 2004. 94p. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

RODRIGUES, R.C.; MOURAO, G.B.; VALINOTE, A.C.; HERLING, V.R. Organic reserves, aerial part, root and C:N ratio and elimination of the apical meristem in xaraes - grass under nitrogen and potassium doses. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.8, p.505-514, 2007.

ROMANELLI, T.L. **Modelagem do balanço energético na alimentação suplementar para bovinos**. 2002. 110p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

RUSSELL, J.B.; O'CONNOR, J.D.; FOX, D.G.; VAN SOEST, P.J.; SNIFFEN, C.J. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: I. Ruminal fermentation. **Journal of Animal Science**, v.70, p.3551-3561, 1992.

RYMPH, S.J. Modeling growth and composition of perennial tropical forage grass, Doutorado em Agronomia, University of Florida, Gainesville. 316p., 2004.

RYMPH, S.J.; BOOTE, K.J.; IRMAK, A.; MISLEVY, P.; EVERS, D.G.W. Adapting the CROPGRO model to predict growth and composition of tropical grasses: Developing physiological parameters. **Soil Crop Science Proceedings**, Gainesville, v.63, p.37-51, 2004.

SAINZ, R.D.; BARIONI, L.G.; PAULINO, P.V.; VALADARES FILHO, S.C.; OLTJEN, J.W. Growth patterns of Nellore vs British beef cattle breeds assessed using a dynamic, mechanistic model of cattle growth and composition. In: KEBREAB, E.; DIJKSTRA, J.; BANNINK, A.; GERRITS, W.J.J.; FRANCE, J. (Ed.), Nutrient digestion and utilization in farm animals: modeling approaches. CABI, Oxfordshire. p.160-170. 2004.

SANTOS, P.M.; BALSALOBRE, M.A.A.; CORSI, M. Morphogenetic characteristics and net herbage accumulation rate of mombacagrass under three grazing intervals. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.33, p.843-851, 2004.

SANTOS, P.M.; CORSI, M.; PEDREIRA, C.G.S.; LIMA, C.G. Tiller cohort development and digestibility in Tanzania guinea grass (*Panicum maximum* cv. Tanzania) under three levels of grazing intensity. **Tropical Grasslands**, v.40, p.84-93, 2006.

SCHOLBERG, J.M.S.; BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; McNEAL, B.L. Adaptation of the CROPGRO model to simulate the growth of field-grown tomato., In: M. J. e. a. Kropff (Ed.), **Application of system approaches to the field level**, Kluwer Academic Publishers, London. p.131-151. 1997.

SILVA, S.C.; PEDREIRA, C.G.S. Princípios de ecologia aplicados ao manejo da pastagem, In: FAVORETTO, V.; RODRIGUES, L.R.A.; RODRIGUES, T.J.D. (Ed.) Simpósio sobre ecossistema de pastagens, 3., 1997. Jaboticabal. **Anais**. Jaboticabal: FUNEP, 1997. p.1-62.

SILVA, S.C. da; SBRISSIA, A.F. A planta forrageira no sistema de produção. In: Simpósio sobre manejo da pastagem, 17., 2000, Piracicaba. **Anais**. Piracicaba: FEALQ, 2000. p.3-21.

SMITH, G.M., **The TAMU beef cattle production model**. College Station: Texas A&M University, 1979. 10p.

SMITH, E.M.; LOEWER, O. J. A nonspecific crop growth model. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.24, p.421, 1981.

SNIFFEN, C.J.; O'CONNOR, J.D.; VAN SOEST, P.J.; FOX, D.G.; RUSSELL, J.B. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. **Journal of Animal Science**, v.70, p.3562-3577, 1992.

SOTO, A.H. **Um modelo simples de estimativa de produção de forragem para colônia (*Panicum maximum* Jacq.) e pangola (*A-24 Digitaria pentzii* Stent) usando parâmetros climáticos**. 1981. 58p. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1981.

SPITTERS, C.J.T.; TOUSSAINT, H.A.J.; GOUDRIAAN, J. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modelling canopy photosynthesis, I. Components of incoming solar radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.38, p.217-229, 1986a.

SPITTERS, C.J.T.; TOUSSAINT, H.A.J.; GOUDRIAAN, J. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modelling canopy photosynthesis, II. Calculation of canopy photosynthesis. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.38, p.231-242, 1986b.

SPLINTER, W.E. Modelling of plant growth for yield prediction. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v.14, p.243-245, 1974.

STUTH, J.W.; SCIFRES, C.J.; HAMILTON, W.T.; CONNER, J.R. Management systems analysis as guidance for effective interdisciplinary grazingland research. **Agricultural Systems**, Oxford, v. 36, p. 43-63, 1991.

TDSSoftware. Super crac - Ração de custo mínimo. Acesso em 26 de janeiro de 2012. http://www.agropecuaria.inf.br/td/Script/super_crac.php.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I. R. **Plant and crop modeling**. Oxford: Oxford University Press, 1990. 669p.

THORNLEY, J.H.M. Modeling grassland ecosystems. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 19., 2001. Piracicaba. **Anais**., Piracicaba:FEALQ, 2001. p.1029-1036.

TONATO, F. **Determinação de parâmetros produtivos e qualitativos de *Cynodon* spp, em função de variáveis climáticas**. 2003. 86p. Dissertação (Mestrado em Ciência

Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

TONATO, F. **Desenvolvimento e avaliação de modelos preditores de acúmulo de forragem em pastagens tropicais para apoio à tomada de decisão.** 2009. 110p. Tese (Doutorado em Ciência animal e Pastagens) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

TONATO, F.; BARIONI, L.G.; PEDREIRA, C.G.S.; DANTAS, O.D.; MALAQUIAS, J.V. Desenvolvimento de modelos preditores de acúmulo de forragem em pastagens tropicais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.5, p.522-529, 2010.

TURBAN, E. **Decision support systems: managerial perspectives.** New York: Macmillan Publishing, 1988. 116p.

TURBAN, E. **Decision support and expert system: management support systems.** New York: MacMillan, 1993. 833p.

VAN SOEST, P.J. **Nutritional ecology of the ruminant.** Ithaca: Cornell, 1994. 476p.

VAN KEULEN, H.; PENNING DE VRIES, F.W.T.; DRESS, E.M. A summary model for crop growth. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H. H. (Ed). **Simulation of plant growth and crop production.** Wageningen: Pudoc, 1982. p.87-97.

VELOSO, R.F.; BARIONI, L.G.; MARTHA JUNIOR, G B. **Emprego de modelos matemáticos para pesquisa e gerenciamento de sistemas integrados de lavoura e pecuária.** Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2003. 24p. (EMBRAPA Cerrados. Documentos, 96).

VILLA NOVA, N. A.; BARIONI, L. G.; PEDREIRA, C. G.; PEREIRA, A. R. Modelo para previsão de produtividade do capim elefante cv. Napier em função da temperatura do ar, fotoperíodo e frequência de desfolha. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 1, p. 75-79, 1999.

VILLEGAS, J.R.; HERNÁNDEZ, V.A.G.; SALAZAR, J.A.C.; MUÑOZ, M.L.; CASTILLO, F.S.D.; ENCISO, T.O. Modelos empíricos del crecimiento y rendimiento de tomate podado a tres racimos. **Revista Fitotecnia Mexicana**, Chapingo, v. 27, n. 1, p. 63-67, 2004.

WOODWARD, S.J.R. Formulae for predicting animals' daily intake of pasture and grazing time from bite weight and composition. **Livestock Production Science**. v.52, p.1-10, 1997.

WOODWARD, S.J.R. Dynamical systems models and their application to optimizing grazing management. In: PEART, R.M.; CURRY, R.B. (Ed.). **Agricultural systems modeling and simulation.** New York: Marcel Dekker, 1998. p.419-473.

WOODWARD, S.J.R.; LAMBERT, M.G.; LITHERLAND, A.J.; BOOM, C.J. Can a mathematical model accurately predict intake of grazing animals? Testing the Q-Graze model. *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production*. 61, p.4-7, 2001.