

Novas abordagens, tendências e oportunidades no uso de modelos de simulação para a avaliação de sistemas agrícolas em regiões tropicais

New approaches, trends and opportunities of simulation models use to evaluate agricultural systems in tropical regions

Elisandra Solange Oliveira Bortolon^{1,*}, Leandro Bortolon¹, Luiz Fernando Carvalho Leite² e Ariovaldo Luchiar Junior³

¹Embrapa Pesca e Aquicultura, Prolongamento da Avenida NS 10, Cruzamento com Avenida LO 18, Sentido Norte, Loteamento Água Fria CEP 77008900 Palmas, TO, Brasil

²Embrapa Meio Norte, Caixa Postal 001 CEP 64006-221 Teresina, PI, Brasil

³Embrapa Informática Agropecuária, Caixa Postal 6041 CEP 13083-886 Campinas, SP, Brasil

(*E-mail: elisandra.bortolon@embrapa.br)

<https://doi.org/10.19084/rca.15756>

Recebido/received: 2018.11.26

Aceite/accepted: 2019.07.20

RESUMO

A modelagem de agroecossistemas pode contribuir na definição de programas de pesquisa em regiões tropicais e subtropicais, antecipando o processo de obtenção de resultados de pesquisa e auxiliar na tomada de decisão, potencializando o desenvolvimento regional e reduzindo os impactos negativos das atividades agropecuárias nas mudanças climáticas globais. Assim, este trabalho tem como propósito o de apresentar uma revisão bibliográfica sobre esse tema analisando as principais tendências e oportunidades de pesquisa em regiões tropicais relacionadas com o uso de modelos de simulação como ferramentas para a avaliação de sistemas de produção agropecuária.

Palavras-chave: modelagem de sistemas, agroecossistema, trópicos e subtrópicos.

ABSTRACT

Agricultural systems modeling can contribute to define research programs in both tropical and subtropical regions (as Brazil), and it can accelerate research process and it can be an ancillary to decision making process, potentializing regional development as well reducing negative agricultural systems production impact on climate change. This study aims to present a review of the literature on this topic analyzing the major research challenges and opportunities in tropical regions related with the use of simulation models as tool to evaluate agricultural systems production.

Keywords: agricultural systems modeling, agroecosystems, tropics and subtropics.

INTRODUÇÃO

A população mundial deverá atingir 9 bilhões de pessoas até 2050 o que, aliado aos desafios impostos pelas incertezas climáticas, põem em risco a segurança alimentar global tornando imprescindível que a produção de alimentos aumente para atender às novas demandas devendo ocorrer de forma racional e sustentável (Rosenzweig *et al.*, 2015). Desse modo, deverão ocorrer adaptações em nível biotecnológico, ou por meio de práticas agronômicas como o manejo do solo e das culturas nos sistemas de produção visando o aumento da resiliência dos mesmos (Hatfield, 2014). Tais adaptações, em geral, necessitam de tempo e recursos para a sua avaliação completa.

Neste contexto, a modelagem de agroecossistemas poderá desempenhar um papel fundamental na avaliação ágil e confiável dos impactos advindos de adaptações ou modificações nos sistemas de produção, possibilitando ainda uma análise integrada destes impactos na qualidade do solo, da água e do ar, bem como no rendimento das culturas. Os modelos podem ajudar técnicos, produtores e formuladores de políticas públicas a identificar as opções de manejo mais adequadas para a maximização da sustentabilidade na agropecuária, considerando o tempo e o espaço de acordo com a necessidade e partindo de informações edafoclimáticas, socioeconômicas e de manejo dos agroecossistemas já disponíveis, auxiliando na identificação de potenciais áreas de risco onde os estudos de campo mais detalhados podem ser realizados (Jones *et al.*, 2015).

Em virtude destas aplicabilidades, vários modelos de sistemas agrícolas têm sido desenvolvidos nos últimos anos (McCown *et al.*, 1994; Metherel *et al.*, 1994; Jones *et al.*, 1994; Arnold *et al.*, 1998, entre outros). No entanto, embora recentemente haja um esforço para globalizar o uso dos modelos de agroecossistemas (Jones *et al.*, 2015), tais estudos são mais abundantes para regiões de clima temperado (Boote *et al.*, 1996; Smith *et al.*, 1997; Basso *et al.*, 2011; Rosenzweig *et al.*, 2015), para as quais a maioria dos modelos foi desenvolvida, havendo carência de informações detalhadas sobre o potencial de uso dos diferentes modelos de simulação e suas limitações, considerando a diversidade de sistemas produtivos encontrados em regiões tropicais e subtropicais.

Assim, o objetivo desta revisão foi de analisar as tendências e oportunidades de pesquisa em regiões tropicais, especialmente no Brasil, relacionados com o uso de modelos de simulação de agroecossistemas como ferramentas para a avaliação de sistemas de produção agropecuária, potencializando o desenvolvimento regional e reduzindo os impactos das atividades agropecuárias nas mudanças climáticas globais.

NOVAS ABORDAGENS, APLICABILIDADES E TENDÊNCIAS NO USO DE MODELOS DE AGROECOSSISTEMAS

Os avanços ocorridos nos últimos anos na área da informática e de tecnologia de informação têm proporcionado à ampliação do entendimento e uso de modelos de simulação como ferramentas de pesquisa e de tomada de decisão. Com os modelos de simulação de agroecossistemas não é diferente, onde novas abordagens, aplicabilidades e tendências têm sido apresentadas visando melhorar o entendimento do funcionamento dos agroecossistemas e reforçam a importância dos estudos com modelos aplicados e adaptados para condições tropicais e subtropicais.

Segundo Matthews *et al.* (2000), as abordagens de modelagem podem contribuir para o desenvolvimento agrícola internacional no futuro nas seguintes grandes áreas emergentes: a) pesquisa sobre como as pessoas influenciam e são influenciados pelo mundo biofísico; b) integração do uso de modelos existentes em projetos onde é possível fazer o melhor uso das pesquisas passadas e acrescentar valor para as pesquisas em andamento; c) uso de modelos para ajudar a desenvolver sistemas de suporte à decisão para ajudar na disseminação do conhecimento existente e; d) estudos-piloto para investigar a contribuição que os modelos de simulação de agroecossistemas no avanço de programas de melhoramento de culturas.

No que se refere aos trópicos e subtropicais dentre os principais aspectos e abordagens que têm recebido atenção dos desenvolvedores de modelos e de seus usuários destacam-se os seguintes tópicos.

Manejo de nutrientes

Estudos sobre resposta de cultivos (Keating *et al.*, 1993) indicaram que apenas a análise de longo prazo (25-30 anos) é capaz de dar uma indicação clara dos riscos associados com estratégias alternativas de aplicação fertilizantes nitrogenados. Além disso, resultados experimentais são ainda limitados em termos de avaliação de restrições e oportunidades para melhoria do uso dos recursos naturais e produtividade das culturas. Nestes casos, os modelos de simulação podem ser usados para simular estratégias alternativas de manejo de solo e de culturas e para avaliar estes riscos em longo prazo, possibilitando a integração da modelagem de agroecossistemas como ferramenta complementar em programas tradicionais de pesquisa agrônômica.

O módulo de nitrogênio (N) do modelo DSSAT é baseado no modelo PAPRAN (Seligman e van Keulen, 1981), que foi originalmente projetado para sistemas agrícolas de alto rendimento e alto aporte de insumos de regiões onde a matéria orgânica do solo (MOS) geralmente não é considerada de grande importância para o fornecimento de nutrientes para as culturas. Portanto, seu uso para simular sistemas onde a MOS e resíduos são as principais fontes de nutrientes para as culturas, como é o caso de regiões tropicais e subtropicais, pode não ser o mais adequado, até porque essa versão do DSSAT trata a MOS como um compartimento único. Além disso, o submodelo de N assume que todos os resíduos de culturas são incorporados ao solo e não distingue uma camada de resíduo em cima do solo, tendo seu uso restrito a sistemas agrícolas que são baseados no revolvimento do solo, em detrimento daqueles que utilizam o plantio direto, por exemplo, onde os resíduos culturais são depositados na superfície do solo. Com tudo, as limitações de submodelos de N dependem de seu uso particular.

Avaliação da sustentabilidade

Há pouco consenso sobre o que sustentabilidade significa precisamente, mas a maioria das definições contém o conceito de tempo, geralmente em longo prazo e alguma medida do desempenho de sistemas biológicos, ambientais ou

socioeconômicos. Sistemas sustentáveis de produção agrícola devem atender aos requisitos de sustentabilidade da unidade de produção em termos de alimentos, renda e lazer, sem comprometer a capacidade produtiva da base de recursos naturais (FAO, 2015). Para avaliar o grau de sustentabilidade de um sistema particular, há uma necessidade de entender quantitativamente os processos de produção e determinar como estes são influenciados por características do solo, condições ambientais e práticas de manejo.

A experimentação de longo prazo é uma forma de reunir as informações solicitadas. Tais experimentos podem dar informações valiosas sobre as questões da qualidade química, física e biológica do solo e da sustentabilidade dos rendimentos das culturas, embora estudos relacionados com fertilidade do solo e rendimento das culturas sejam os mais comuns. No entanto, apesar de fornecer informações valiosas, os experimentos de longa duração são a exceção e não a regra e eles têm as suas limitações. Eles são trabalhosos, demorados e onerosos, e geralmente levam muito tempo para dar resultados considerando o prazo para tomar decisões. Além disso, a variabilidade das condições ambientais torna difícil de usar resultados específicos em termos de tempo e local para a extrapolação para outros ambientes (van Keulen, 1995).

Modelos de simulação de sistemas agrícolas, em especial os de cultura e de solo, oferecem abordagens complementares aos experimentos de longa duração, sendo estas mais baratas e mais rápidas podendo avaliar facilmente uma série de estratégias alternativas em termos de sua sustentabilidade em curto, médio e longo prazos, as quais, devido a grande diversidade de fatores que podem ser testados, tornariam inviável a sua avaliação a partir da instalação de experimentos de longa duração. Tais modelos são capazes de estimar as tendências futuras e auxiliar na tomada de decisão visando à indicação de sistemas de manejo agropecuário adequados para as diferentes situações encontradas no campo, tais como o uso de culturas apropriadas, variedades adaptadas e mudanças no uso da terra e nas práticas de manejo de solo e de cultura, para minimizar os efeitos indesejados aos sistemas biológicos, ambientais ou socioeconômicos.

Planejamento do uso do solo

Planejamentos regionais e nacionais envolvem a análise de informações de diferentes áreas, abrangendo muitos meios de vida e sistemas de produção diferentes bem como a tomada de decisões para cumprir as metas especificadas para a área. A função do planejamento de uso da terra é “orientar as decisões sobre uso da terra de tal forma que os recursos do ambiente sejam submetidos ao uso mais benéfico para o homem, enquanto, ao mesmo tempo haja a conservação destes recursos para o futuro” (FAO, 2015). Assim, precisam ser levadas em conta as informações básicas sobre os solos, topografia, clima, vegetação, bem como as variáveis socioeconômicas, tais como relações de mercado, habilidade dos usuários da terra e o nível de desenvolvimento econômico e social. Dados sobre as atividades produtivas já praticadas em uma região podem ser obtidos a partir das estatísticas e cenários agrícolas, mas para as atividades produtivas ainda não praticadas na agropecuária a predição de modelos é a fonte mais viável. Então, técnicas reiterativas “buscam” a melhor combinação de estratégias de produção para atingir as metas especificadas.

Por exemplo, Thornton *et al.* (1997) descreve como o modelo CERES-Millet foi usado em conjunto com um sistema de informações geográficas (SIG) e sensoriamento remoto para estimar a produção de milho sob estações contrastantes em 30 províncias de Burkina Faso, na África Ocidental. Pisani (1987) usou o modelo CERES-Maize para avaliar impactos da seca no milho em um estágio inicial do período seco para fornecer uma medida objetiva que os legisladores poderiam usar para declarar áreas como atingidas pela seca e, em seguida, implementar programas de subsídios de forma imparcial na África do Sul.

A integração de modelos de simulação com SIG também está emergindo como uma ferramenta útil para os planejadores. Esta técnica tem sido útil para estudos do ciclo de carbono (C) em larga escala, permitindo que as estimativas atuais de sequestro de C regional possam ser refinadas. Também é possível analisar a sensibilidade de combinações específicas de uso da terra, tipo de solo e características de clima predominantes, considerando perturbações no clima, no uso da terra

e no manejo. Assim, os sistemas particularmente sensíveis e com grande potencial para sequestro de C podem ser identificados. Entretanto, uma das grandes dificuldades na aplicação de técnicas de análise de sistemas para o planejamento do desenvolvimento regional é a validação dos modelos dinâmicos utilizados. Como, em geral, o objetivo dos planejadores é explorar novas opções para o desenvolvimento regional, em vez de prever os já existentes, o estabelecimento de dados para validação do modelo é geralmente impossível.

Outro aspecto importante refere-se às abordagens da modelagem espacialmente explícita, como ferramenta em análises regionais do impacto da adoção de um determinado sistema agropecuário. Neste caso, estimativas obtidas por meio da modelagem dinâmica são associadas ao histórico de distribuição espacial das mudanças num determinado sistema, a partir de produtos de sensores remotos (fotos aéreas e imagens de satélites) e técnicas de geoprocessamento, possibilitando o entendimento espacializado das alterações ocorridas neste sistema, abrangendo um contexto regional e, portanto, mais amplo (Nørgaard, 2004). E isso pode auxiliar no planejamento e definição de sistemas agropecuários mais adequados para uma determinada região e que sejam ambientalmente sustentáveis em longo prazo.

Neste sentido, o CENTURY, modelo de simulação da dinâmica da MOS, tem sido associado à SIG para estimar estoques de carbono orgânico do solo (COS), considerando o tempo e o espaço, em nível de microbacias hidrográficas e municípios da região do Planalto gaúcho, que é a principal produtora de grãos do Rio Grande do Sul (Brasil), sob condições de clima subtropical e no bioma Mata Atlântica (Lopes *et al.*, 2008; Tornquist *et al.*, 2009; Bortolon *et al.*, 2012). De modo geral, tais estudos indicaram que a remoção de florestas nativas seguida de 85 anos (1900-1985) de uso agrícola dos solos levou à redução dos estoques de COS em até 50% em relação à vegetação nativa, devido principalmente ao manejo convencional do solo (com aração e gradagem) adotado e baixa adição de resíduos pelos sistemas de culturas com queima da palhada no período de 1970-1985. Entretanto, estimativas para o ano de 2050 indicaram que a utilização de práticas conservacionistas de manejo de solo, como o plantio direto, associadas a sistemas

de culturas que envolvam rotações mais complexas e que incluam o milho, têm grande potencial para recuperar as perdas históricas dos estoques de COS, podendo até, em muitos casos, superar os estoques encontrados sob vegetação nativa.

Auxílio à programação e direcionamento de ações de pesquisa agropecuária

Os modelos de simulação podem atuar como provedores de uma estrutura para um programa de pesquisa, sendo particularmente valiosos para a sintetização do conhecimento, possibilitando a integração das “partes” obtidas a partir de um processo de pesquisa reducionista. Para tanto, a experimentação e o desenvolvimento e/ou adaptação dos modelos devem andar juntos, com o conhecimento novo sendo usado para refinar e melhorar os modelos e os modelos sendo usados para identificar as lacunas em nosso conhecimento, definindo, assim, as prioridades de pesquisa (Boote *et al.*, 1996). Um modelo de simulação é uma ferramenta de pesquisa, em primeira instância, para ajudar a explorar e desenvolver relações entre os componentes internos dos sistemas de produção. Possíveis funções que essas ferramentas podem realizar incluem:

Avaliação de novas tecnologias - Uma importante contribuição que os modelos poderiam dar é na filtragem de tecnologias com baixo potencial de sucesso, evitando o desperdício de fundos de pesquisa;

Extrapolação a partir de locais específicos - Os modelos também poderiam ser usados para extrapolar os resultados de um número limitado de locais de estudo para áreas mais amplas, além de ajudar a identificar “zonas de extrapolção”;

Fornecimento de uma dimensão temporal - Pesquisas sócio-econômicas e agrônomicas tradicionais normalmente fornecem apenas uma análise instantânea de um sistema atual, mas não permitem facilmente uma análise das mudanças futuras para o sistema. Os modelos de simulação de dinâmica, usualmente incluem a variável tempo em suas estimativas, podendo ser usados para fornecer uma avaliação do risco de curto prazo enfrentadas pelas unidades produtivas e também da sustentabilidade de diversas intervenções em longo prazo.

Estratégias complexas poderiam ser exploradas desta maneira para avaliar a estabilidade da produção e crescimento econômico;

Prever o efeito de influências externas sobre a vulnerabilidade dos sistemas produtivos - Os modelos podem fornecer uma maneira de avaliar objetivamente o impacto de influências externas (por ex. políticas governamentais, preços das commodities, os impactos ambientais) em vários componentes de um sistema. Por exemplo, as questões de como as mudanças no código florestal influenciarão na conservação da qualidade da água; como o elevado preço de venda da soja na safra 2012/13 no Brasil, devido à seca ocorrida nos Estados Unidos, influenciará na dinâmica de abertura de novas áreas de fronteira agrícola e na expansão da área plantada com milho safra nos próximos anos, podendo-se explorar qual será o impacto disso sobre o custo da carne e de outros alimentos, bem como na vulnerabilidade familiar, etc;

Fornecer mecanismos para prever os efeitos de melhorias nos meios de produção sobre o ambiente - Da mesma forma que o efeito das influências externas pode ser explorado, os modelos poderiam permitir a avaliação do impacto ambiental que uma melhoria nos meios de produção pode ter.

Intercomparação de modelos de agroecossistemas

A criação do projeto AgMIP - Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project, em 2010, foi um marco importante na evolução dos modelos de sistemas agrícolas. Esta iniciativa criou uma comunidade global de modeladores de sistemas agrícolas com os objetivos de intercomparação de modelos de clima, cultura e econômicos com tecnologia da informação de ponta para produzir melhorias nos modelos de culturas e econômicos e de próxima geração de projeções de impacto do clima na agropecuária (AgMIP, 2018). Desde o seu início, o AgMIP criou a colaboração entre praticamente todos os grupos de modelagem de agroecossistemas no mundo, criando novas oportunidades para melhorar substancialmente a capacidade de compreender e prever as respostas dos sistemas agrícolas ao clima, incluindo efeitos interativos do dióxido de carbono (CO₂), temperatura e água (Jones *et al.*, 2015).

DESAFIOS X OPORTUNIDADES NO USO DA MODELAGEM DE AGROECOSSISTEMAS

A pesquisa ambiental, especialmente nos países em desenvolvimento, é claramente uma área em que modelos de culturas e de solos podem dar uma contribuição importante. Os avanços na produção agrícola ao longo das últimas três décadas não têm sido sem custo para o ambiente, havendo evidências de degradação do solo causada por muitos fatores incluindo o mau planejamento do uso do solo, resultando em desmatamento e limpeza de terrenos marginais para o cultivo, a má gestão dos recursos hídricos e áreas agrícolas, o uso excessivo de defensivos e fertilizantes, descarga descontrolada de resíduos e a deposição de poluentes do ar (UNEP, 2017).

Por causa da tendência prevista de aumento da população global, há uma necessidade definida de aumento na produtividade agrícola, mas isso deve ser alcançado de forma sustentável e ambientalmente amigável para que a base de recursos naturais seja preservada (Rosenzweig *et al.*, 2015). Além disso, por causa da natureza multifacetada dos problemas ambientais, o desafio emergente é desenvolver formas de integrar dados científicos, sociais e ambientais de forma significativa para ajudar a atingir essas metas. Em relação à agricultura, duas áreas em particular foram destacadas em um relatório do Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP, 2017): as mudanças climáticas e N no ambiente.

No tocante às mudanças climáticas, a análise das evidências tem sugerido que existe uma perceptível influência humana no clima global (IPCC, 1996). Embora muitas das atividades humanas estejam envolvidas, e a agricultura é uma delas, tanto por influenciar nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera, como pelo impacto que as mudanças climáticas podem causar na produção agrícola e isso indo de encontro ao aumento da demanda devido à expansão da população. Futuros trabalhos nesta área deverão focar na integração, através da modelagem, de resultados oriundos de um grande número de estudos sobre diferentes componentes relacionados às mudanças climáticas. A agricultura intensiva, a queima de combustíveis fósseis e o cultivo generalizado de leguminosas têm levado ao depósito de quantidades

adicionais de N nos ecossistemas terrestre e aquático. Surpreendentemente, há poucos modelos que tratam da fixação biológica de N. Neste sentido, uma área de pesquisa deve ser o desenvolvimento de um modelo baseado em processos que descrevem taxas de fixação de N potencial em relação aos fatores ambientais como temperatura, disponibilidade de água, crescimento das culturas fixadoras de N entre outros.

Neste contexto, Sheehy *et al.* (1987) fez um modelo de alguns dos processos de fixação biológica de N em nível de nódulo individual, mas este não foi incorporado a modelos maiores de crescimento de plantas. Alguns dos modelos DSSAT de culturas leguminosas (por exemplo, CROPGRO) têm uma sub-rotina simples que descreve fixação de N, mas isso não tem sido testado em toda uma ampla gama de ambientes. Esse modelo seria de uso considerável, por exemplo, na determinação de “melhor aposta” como tecnologias de fertilidade do solo para diferentes condições ambientais (levando em conta a temperatura, disponibilidade de água e crescimento da planta hospedeira). Entender e prever a fixação biológica de N é de grande importância especialmente com a crescente preocupação com o uso excessivo de fertilizantes nitrogenados sintéticos, em particular a poluição com N tem sido destacado como um grande problema ambiental do próximo século (UNEP, 2017).

Além disso, não há dúvida de que os modelos de simulação de culturas, ao descreverem o crescimento e rendimento das plantas em relação ao clima, solo e práticas de manejo, chegaram a um estágio onde eles podem fornecer informações úteis em complexos sistemas de produção, embora, eles ainda não sejam perfeitos (Rosenzweig *et al.*, 2015). Nesse sentido, algumas áreas em que modelos de simulação de culturas precisam de maior desenvolvimento referem-se à incorporação de submodelos sobre a dinâmica de processos do solo, além da dinâmica de pragas, doenças e plantas daninhas, processos envolvidos nas suas populações e como a produtividade das culturas é afetada.

Uma compreensão dos processos do solo tem sido cada vez mais reconhecida como fundamental para a manutenção dos meios de produção sustentáveis, especialmente na avaliação das implicações de longo prazo das estratégias de produção. Por

exemplo, as dinâmicas do C e N do solo são fundamentais para a fertilidade do sistema solo e para a manutenção da produtividade das culturas, em especial nas regiões tropicais e subtropicais. No entanto, o módulo original de transformações de N do solo usado no DSSAT e outros modelos de culturas baseiam-se em um submodelo originalmente projetado para sistemas agrícolas de alta adição de insumos (Seligman e van Keulen, 1981), seguindo no sentido oposto às questões relacionadas com a sustentabilidade do sistema produtivo, proteção ambiental e de uso eficiente de fertilizantes e insumos agropecuários, por exemplo. Algumas dessas limitações foram resolvidas com a substituição, por Gijsman *et al.* (1999), de rotinas do modelo CENTURY (Smith *et al.*, 1997) que é um modelo de MOS mais abrangente e bem testado. No CENTURY a matéria orgânica do solo é subdividida em três compartimentos (pools) teóricos, MOS passiva, MOS lenta, e MOS ativa ou microbiana, e inclui duas camadas de litera, uma na superfície do solo e outra no solo. Testes com este modelo modificado (DSSAT-CENTURY) em comparação com um conjunto de experimentos sobre a decomposição de resíduos de leguminosas no Brasil (Bowen *et al.*, 1992) mostraram boa concordância entre os dados observados e simulados (Gijsman *et al.*, 1999), embora ainda possa haver limitações em solos altamente intemperizados (Gijsman *et al.*, 1996).

Processos do solo de longo prazo também precisam ser validados. A inclusão de submodelos mecanísticos que descrevem a dinâmica e uso de fósforo (P) e potássio (K) também devem ser feitos para muitos modelos de culturas e de solo. Jones *et al.* (1984) descrevem o desenvolvimento de um modelo de P que tem sido utilizado com alguns dos modelos DSSAT, mas tem havido problemas na inicialização de vários compartimentos de P. Vários modelos mecanísticos têm sido desenvolvidos para a dinâmica de K e absorção deste nutriente pelas culturas agrícolas (por exemplo, Silberbush e Barber, 1984; Greenwood e Karpinets, 1997), mas a incorporação de qualquer um destes em modelos detalhados de culturas e de solo tem sido limitada.

A acidez do solo é um dos fatores que é frequentemente apontada como responsável pelo declínio no rendimento das culturas em regiões tropicais

devido a uma diminuição no pH do solo como um resultado de: 1) efeito acidificante dos adubos nitrogenados; 2) fixação de N por leguminosas e; 3) um grau elevado de lixiviação. No entanto, poucos modelos consideram o pH do solo de forma explícita.

A salinidade é outro problema muito importante em algumas áreas dos trópicos, particularmente onde a irrigação tem sido praticada por longos períodos de tempo. Algum progresso tem sido feito em modelos que consideram os efeitos da salinidade (por exemplo, Asch *et al.*, 1997; Castrignano *et al.*, 1998), mas esses submodelos ainda não têm sido testados extensivamente para uso geral.

Em áreas ou regiões de expansão agropecuária, em geral, o estímulo ao desenvolvimento regional está associado à degradação ambiental pelo desmatamento acelerado e pela adoção de práticas de manejo inadequadas, levando a degradação dos recursos naturais, como é o caso do Brasil. Nestas situações os modelos de agroecossistemas adaptados e validados para condições locais e regionais poderão ser importantes ferramentas para acelerar o processo de pesquisa, pois os resultados experimentais são ainda limitados nestas regiões, especialmente em termos de avaliação de restrições e oportunidades para melhoria do uso dos recursos naturais, bem como da adaptação de materiais genéticos e produtividade das culturas. Assim, tais modelos podem ser usados para simular cenários alternativos, considerando estratégias de manejo de solo e de culturas, para avaliar os riscos em médio e longo prazo, enquanto avaliações experimentais de estratégias condicionais e/ou alternativas não sejam possíveis. Portanto, a modelagem de agroecossistemas pode ainda se constituir como uma ferramenta complementar em programas tradicionais de pesquisa agrônômica, possibilitando abordagens mais baratas e mais rápidas que permitam avaliar facilmente uma série de estratégias alternativas em termos de incorporação de diferentes níveis tecnológicos e de sua sustentabilidade, tendo grande potencial de contribuir para o avanço e direcionamento de pesquisas, programas de suporte à tomada de decisão e de desenvolvimento de políticas públicas.

CONCLUSÃO

O uso de modelos de agroecossistemas adaptados e validados para as condições edafoclimáticas brasileiras, e em especial para regiões de expansão agrícola, poderá trazer importantes avanços ao setor agropecuário. A abordagem de modelos de simulação como ferramenta auxiliar no direcionamento de pesquisas, programas de suporte à tomada de decisão e de desenvolvimento de políticas públicas pode evitar que sejam desperdiçados tempo e recursos (financeiros e humanos) em perseguir metas inatingíveis na busca por alternativas de sistemas de produção sustentáveis.

Os exemplos de aplicações, aplicabilidade, tendências e oportunidades para o uso da modelagem de sistemas nos trópicos e subtropicais devem servir como fortes incentivos para a definição de estratégias de investimentos no estudo e adaptação de modelos de simulação de agroecossistemas no Brasil, visando a superação das limitações existentes na busca da sustentabilidade dos sistemas de produção agropecuária, reduzindo a degradação ambiental e mitigando os efeitos da agropecuária sobre as mudanças climáticas globais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AgMIP (2018) - *Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project*. [cit. 2018.06.23]. www.agmip.org.
- Arnold, J.G.; Srinivasan, R.; Muttiah, R.S. & Williams, J.R. (1998) - Large Area Hydrologic Modeling and Assessment. Part I: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 34, n. 1, p.73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.
- Asch, F.; Dingkuhn, M.; Wopereis, M.C.S., Dorffling, K., Miézan, K. (1997) - A conceptual model for sodium uptake and distribution in irrigated rice. In: Kropff, M.J.; Teng, P.S.; Aggarwal, P.K.; Bouma, J.; Bouman, B.A.M.; Jones, J.W. & Van Laar, H.H. (Eds.) - *Applications of Systems Approaches at the Field Level*. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands. p. 177-187.
- Basso, B.; Gargiulo, O.; Paustian, K.; Robertson, P.G.; Porter, C.; Grace, P.R. & Jones, J.W. (2011) - Procedures for initializing soil organic carbon pools in DSSAT-Century model for agricultural systems. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 75, n. 1, p. 69-78. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0115er>
- Boote, K.J.; Pickering, N. & Jones, J.W. (1996) - Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal*, vol. 88, n. 5, p. 704-716. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800050005x>
- Bortolon, E.S.O.; Mielniczuk, J.; Tornquist, C.G.; Lopes, F.; Giasson, E. & Bergamaschi, H. (2012) - Potencial de uso do Modelo Century e SIG para avaliar o impacto da agricultura sobre estoques regionais de carbono orgânico do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 36, n. 3, p. 831-849. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000300014>
- Bowen, W.T.; Jones, J.W.; Carsky, R.J. & Quintana, J.O. (1992) - Evaluation of the nitrogen submodel of CERES-Maize following legume green manure incorporation. *Agronomy Journal*, vol. 85, n. 1, p.153-159. <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500010028x>
- Castrignanò, A.; Katerji, N.; Karam, F.; Mastroianni, M. & Hamdy, A. (1998) - A modified version of CERES-Maize model for predicting crop response to salinity stress. *Ecological Modelling*, vol. 111, n. 2-3, p. 107-120. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00084-2)
- FAO (2015) - *The Millennium Development Goals Report*. United Nations, New York. 75 p. [http://www.un.org/millennium-goals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20rev%20\(July%201\).pdf](http://www.un.org/millennium-goals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20rev%20(July%201).pdf).
- Gijsman, A.J.; Hoogenboom, G. & Parton, W.J. (1999) - Linking DSSAT and CENTURY for improved simulation of smallholder agricultural systems. In: Donatelli, M.; Stockle, C.; Villalobos, F. & Mir, J.M.V. (Eds.) - *Proceedings of the International Symposium on Modelling Cropping Systems*. 21-23 June 1999, Lleida, Spain, University of Lleida, Spain. pp. 189-190.
- Gijsman, A.J.; Oberson, A.; Tiessen, H. & Friesen, D.K. (1996) - Limited applicability of CENTURY model to highly weathered tropical soils. *Agronomy Journal*, vol. 88, n. 6, p. 894-903. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962003600060008x>

- Greenwood, D.J. & Karpinets, T.V. (1997) - Dynamic model for the effects of K-fertilizer on crop growth, K-uptake and soil-K in arable cropping. 1. Description of the model. *Soil Use and Management*, vol. 13, p. 178–183. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1997.tb00582.x>
- Hatfield, J.L. (2014) - Climate Change: Challenges for Future Crop Adjustments. In: Tuteja, N. & Gill, S.S. (Eds.) - *Climate Change and Plant Abiotic Stress Tolerance*, Wiley Blackwell, Weinheim, Germany. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800050005x>
- IPCC (1996) - XII. Summary for policymakers. In: Houghton, J.T.; Meira-Filho, L.G.; Chancellor, B.A.; Kattenberg, A. & Maskell, K. (Eds.) - *Climate Change 1995: The Scientific Basis of Climate Change*. p. 572. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jones C.A.; Sharpley A.N. & Williams J.R. (1984) - A simplified soil and plant phosphorus model. I. Documentation. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 48, n. 4, p. 800-805. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800040020x>
- Jones, J.W.; Tsuji, G.Y.; Hoogenboom, G.; Hunt, L.A.; Thornton, P.K.; Wilkens, P.W.; Imamura, D.T.; Bowen, W.T. & Singh, U. (1994) - *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 3*. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Jones, J.W.; Antle, J.M.; Basso, B.; Boote, K.J.; Conant, R.T.; Foster, I.; Godfray, H.C. J.; Herrero, M.; Howitt, R.E.; Janssen, S.; Keating, B.A.; Carpena, R.M.; Porter, C.H.; Rosenzweig, C. & Wheeler, T.R. (2015) - *Towards a New Generation of Agricultural System Models, Data, and Knowledge Products: Model Design, Improvement and Implementation: Introduction*. AgMIP. <http://goo.gl/MjNjHy>
- Keating, B.A.; McCown, R.L. & Anderson, J.R. (1993) - Adjustment of nitrogen inputs in response to a seasonal forecast in a region of high climatic risk. In: Penning de Vries, F.W.T.; Teng, P. & Metselaar, K. (Eds.) - *Systems Approaches for Agricultural Development*. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands. pp. 233-252.
- Lopes, F.; Merten, G.H.; Mielniczuk, J.; Tornquist, C.G. & Oliveira, E.S. (2008) - Simulação da dinâmica do carbono do solo numa microbacia rural pelo modelo Century. *Revista Agropecuária Brasileira*, vol. 43, n. 6, p. 745-753. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2008000600011>
- Matthews, R.; Stephens, W.; Hess, T.; Middleton, T. & Graves, A. (2000) - Applications of crop-soil simulation models in tropical agricultural systems. *Advances in Agronomy*, vol. 76, p. 31-124. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)76003-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)76003-3)
- McCown, R.L.; Hammer, G.L.; Hargreaves, J.N.G.; Holzworth, D.P. & Freebairn, D.M. (1994) - APSIM: a Novel Software System for Model Development, Model Testing and Simulation in Agricultural Systems Research. *Agricultural Systems*, vol. 50, n. 3, p. 255-271. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)00055-V](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00055-V)
- Metherel, A.K.; Harding, L.A.; Cole, V.C. & Parton, J.W. (1994) - *Century: soil organic matter model environment*. Technical documentation agrossystem version 4.0., Fort Collins: USDA-ARS. 123 p. (Great Plains System Research Unit. Technical Report, 4).
- Nørgaard, A. (2004) - *Spatial modeling of soil organic carbon by linking Century and GIS*. Copenhagen, University of Copenhagen. Dissertation. 170 f.
- Pisani, A.L.D. (1987) - The CERES-Maize model as a potential tool for drought assessment in South Africa. *Water SA*, vol. 13, n. 3, p. 159-164.
- Rosenzweig, C.; Jones, J.W.; Hatfield, J.L.; Antle, J.M.; Ruane, A.C. & Mutter, C.Z. (2015) - The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project: Phase I activities by a global community of science. In: Rosenzweig, C. & Hillel, D. (Eds.) - *Handbook of Climate Change and Agroecosystems: The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) Integrated Crop and Economic Assessments, Part 1*. - ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation, and Mitigation. New York, Imperial College Press. vol. 3, p. 3-24. https://doi.org/10.1142/9781783265640_0001
- Seligman, N.G. & Van Keulen, H. (1981) - PAPRAN: A simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. In: Frissel, M.J. & van Veen, J.A. (Eds.) - *Simulation of Nitrogen Behaviour in Soil-Plant Systems*, PUDOC, Wageningen, The Netherlands. p. 192–221.
- Sheehy, J.E.; Bergersen, F.J.; Minchin, F.R. & Witty, J. (1987) - A simulation study of gaseous diffusion resistance, nodule pressure gradients and biological nitrogen fixation in soyabean nodules. *Annals of Botany*, vol. 60, n. 3, p. 345–351. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087454>

- Silberbush, M. & Barber, S.A. (1984) - Phosphorus and potassium uptake of field-grown soybean cultivars predicted by a simulation model. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 48, n. 3, p. 592–596. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800030025x>
- Smith, P.; Smith, J.U.; Powlson, D.S.; McGill, W.B.; Arah, J.R.M.; Chertov, O.G.; Coleman, K.; Franko, U.; Frohking, S.; Jenkinson, D.S.; Jensen, L.S.; Kelly, R.H.; Klein-Gunnewiek, H.; Koramov, A.S.; Li, C.; Molina, J.A.E.; Mueller, T.; Parton, W.J. & Whitmore, A.P. (1997) - A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, vol. 81, n. 1-2, p. 153-225. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00087-6)
- Thornton, P.K.; Bowen, W.T.; Ravelo, A.C.; Wilkens, P.W.; Fazendeiro, G.; Brock, J. & Brink, J.E. (1997) - Estimating millet production for famine early warning: an application of crop simulation modelling using satellite and ground-based data in Burkina Faso. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 83, n. 1-2, p. 95-112. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(96\)02348-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(96)02348-9)
- Tornquist, C.G.; Gassman, P.W.; Mielniczuk, J.; Giasson, E.; Campbell, T. (2009) - Spatially explicit simulations of soil C dynamics in Southern Brazil: integrating Century and GIS with i-Century. *Geoderma*, vol. 150, n. 3-4, p. 404-414. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.001>
- UNEP (2017) - The Global Environment Facility - Delivering solutions for a sustainable future. *In: Our Planet*. Nairobi, Kenya. UNEP.
- van Keulen, H. (1995) - Sustainability and long-term dynamics of soil organic matter and nutrients under alternative management strategies. *In: Bouma, J.; Kuyvenhoven, A.; Bouman, B.A.M.; Luten, J.C. & Zandstra, H.G. (Eds.) - Eco-regional Approaches for Sustainable Land Use and Food Production*. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands. p. 353–375.