

Modelagem de Sistemas Agroflorestais: conceitos e aplicações

Ricardo Bohrer Sgrillo
Centro de Pesquisas do Cacau, CEPEC/CEPLAC
Rod. Ilhéus-Itabuna, km 22
45650-000 Ilhéus, Ba

Kátia, R. P de Araújo Sgrillo
Faculdade de Ciências e Tecnologia de Itabuna
Praça José Bastos, nº 55 - Centro
45.600-000 Itabuna, Ba

1. Introdução

Desde a popularização dos micro computadores ocorrida nas décadas de 60 e 70 a modelagem matemática para simulação de sistemas teve um impulso considerável. Modelos que até então exigiam computadores "mainframe", com elevado custo de processamento, passaram a ser desenvolvidos e utilizados nos PCs, com baixo custo e capacidade crescente de processamento.

Novas técnicas de modelagem surgiram e/ou foram aprimoradas, tornando a simulação uma ferramenta eficiente e confiável para dar suporte a tomada de decisões. Dentre eles destaca-se a Dinâmica de Sistemas cuja origem está no trabalho pioneiro de Jay W. Forrester *Industrial Dynamics* (Forrester, 1961). Inicialmente as principais aplicações desta disciplina que ram dirigidas à modelagem de sistemas industriais e econômicos, passaram também a ser utilizadas em diversas outras áreas do conhecimento (Sterman, 2000) . As aplicações em sistemas agro-ecológicos tiveram, nos países desenvolvidos, crescimento considerável a partir dos anos 80. No Brasil, no entanto, são relativamente poucos os grupos e pesquisadores que utilizam esta técnica na solução de problemas relacionados à produção agrícola.

Sistemas especialistas, autômatos celulares e redes neurais são algumas outras técnicas que surgiram nos últimos anos e hoje apresentam ampla aplicação nos mais diversos campos do conhecimento.

2. Sistemas

Um sistema é um conjunto de partes, que interagem de acordo com algum tipo de processo, para funcionar como um todo, normalmente visualizado como uma série de blocos interconectados. Os blocos representam quantidades de matéria ou energia e as conexões os fluxos destas quantidades entre eles. São, portanto, basicamente compostos de quantidades que variam no tempo. Por exemplo, altura da planta e área basal são quantidades, enquanto taxa de crescimento (m/ano ou m²/ano) são fluxos. A magnitude e forma de variação dos fluxos dependem das interações entre os elementos constituintes. Os sistemas naturais são vistos como entidades que mantêm sua existência através das interações mútuas de suas partes.

As conexões entre estes blocos representam as interações entre as partes e delas emergem as propriedades dos sistemas. As propriedades emergentes do sistema são chamadas de *holismo*, ou seja *o todo é mais do que a soma das partes*. O conceito de propriedade emergente pode ser melhor ilustrado por um simples sistema químico, como a água, por exemplo. Seus componentes são hidrogênio e oxigênio. Quando estes componentes interagem emergem propriedades como fluidez e transparência que somente o sistema (água) possui, mas que nenhum dos seus elementos individuais apresenta. Este conceito é especialmente importante nos sistemas agro-florestais, onde vários indivíduos de diferentes espécies interagem entre si e respondem de modo diverso às variáveis do

ambiente. Normalmente as propriedades emergentes não podem ser inferidas da análise do sistema. Elas só são percebidas através dos resultados gerados pelo modelo.

As fronteiras do sistema delimitam sua abrangência e são estabelecidas unicamente em função dos objetivos do pesquisador. Por exemplo, um sistema poderia abranger toda a biosfera, ou uma área com populações de diversas espécies, ou a população de uma única espécie, ou somente um indivíduo, ou órgãos deste indivíduos, ou ainda, reações químicas e bioquímica nestes órgão, etc.

O comportamento do sistema é determinado por sua estrutura. Conforme o foco do estudo passa do comportamento para a estrutura, o grau de compreensão que se tem do sistema aumenta (Figura 1). Somente quando se entende a estrutura é possível realizar ações efetivas para levar o sistema a ter o comportamento desejado. Talvez um dos maiores benefícios resultante do processo de desenvolvimento de um modelo seja o aumento no grau de compreensão do sistema.

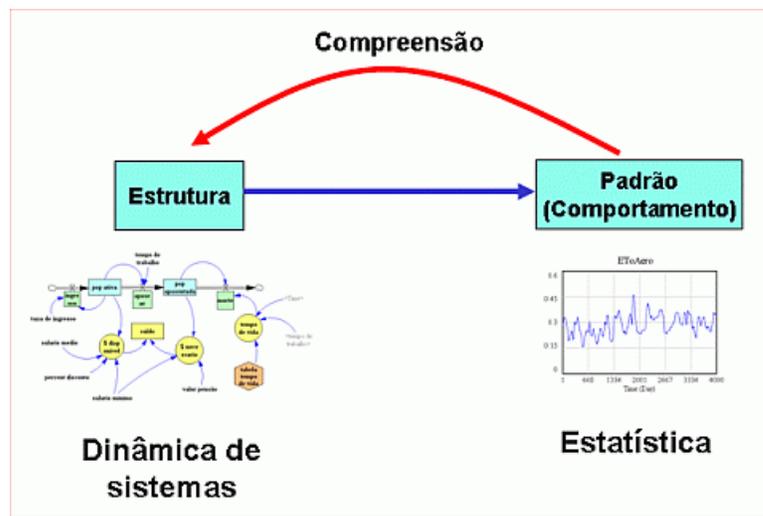


Figura 1. Relação entre estrutura e comportamento de um sistema

3. Representações dos Sistemas

O desenvolvimento de modelos matemáticos de sistemas complexos inicia normalmente com a delimitação de suas fronteiras, que são estabelecidas em função dos objetivos do modelo. Este processo permite a escolha dos elementos constituintes e a construção de um modelo conceitual que represente as hipóteses estabelecidas com relação as interações entre os componentes. Para a elaboração deste tipo de modelo pode ser utilizado o diagrama de causas, onde se traçam linhas apontando da causa para o efeito. As relações diretas (quando a causa aumenta ou diminui o efeito também aumenta ou diminui) são assinaladas por um sinal positivo no extremidade da linha. Se a relação é inversão (quando a causa aumenta o efeito diminui e se a causa diminui, o efeito aumenta) um sinal negativo é utilizado. O diagrama de causas deve agregar os componentes mais relevantes do sistema, sejam eles quantidades como populações ou indivíduos, ou fluxos como taxas de nascimento ou mortalidade, assim como outras variáveis importantes.

4. Estruturas dos sistemas

Todos os sistemas naturais apresentam mecanismos de retroalimentação (*feedback*) que fazem com que o valor de um componente em um determinado instante no tempo altere, direta ou indiretamente, seu próprio valor futuro. As principais estruturas deste tipo são os *feedback* positivos e negativos.

Um *feedback* positivo gera o crescimento exponencial. Por exemplo, o crescimento de algumas plantas pode apresentar este comportamento durante uma fase inicial. Nesta fase, quanto maior a área foliar maior será a fotossíntese que possibilita aumento da taxa de crescimento, o que faz com que a área foliar aumente ainda mais, aumentando conseqüentemente a taxa de crescimento e assim sucessivamente (Figura 2 A).

O feedback negativo pode aparecer em seguida quando a taxa de crescimento vai sendo reduzida até que atinja o valor zero (quando a área foliar atinge a área foliar máxima da espécie) quando a planta entra em equilíbrio dinâmico, sendo produzida biomassa somente para repor a biomassa perdida. O *feedback* negativo é, essencialmente, uma estrutura auto-reguladora.

O crescimento tipo logístico (sigmóide) que muitas plantas apresentam, nada mais é do que a interação de um *feedback* positivo com um negativo, conforme representado na Figura 2 B.

Uma outra estrutura importante são os atrasos temporais (*delays*) que também ocorrem na maioria dos sistemas naturais. Eles representam o atraso que pode existir na resposta do efeito devido a alterações na causa. Para representar um *delay* em um Diagrama causal utiliza-se duas retas paralelas interrompendo a linha que liga a causa ao efeito

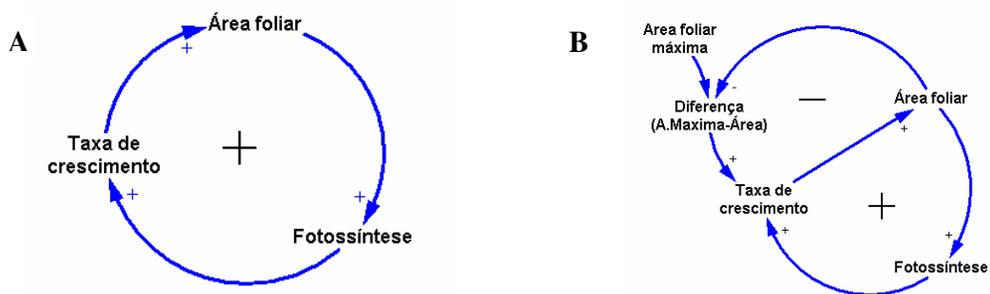


Figura 2 - Diagrama de causas. A- Feedback Positivo. B - Crescimento logístico.

5. Modelos de sistemas

Modelos são representações simplificadas da realidade que incluem declarações (hipóteses) sobre as relações entre os componentes do sistema. Se estas relações são suficientemente detalhadas os modelos podem ser formulados em termos matemáticos e podem ser estabelecidas conseqüências lógicas das hipóteses estabelecidas.

A partir do diagrama de causas pode ser construído o modelo matemático, composto basicamente de um sistema de equações diferenciais, que representam os fluxos e um conjunto de equações algébricas que calculam os coeficientes das equações diferenciais. Estas equações são integradas numericamente para obter-se o valor dos compartimentos em cada instante no tempo.

Surgiram nos últimos anos diversos programas para o desenvolvimento e utilização de modelos, como o *Vensim* e o *Stella*. Estes programas possuem uma interface gráfica que permite o desenho do modelo e a introdução das equações necessárias. Do pesquisador é exigido somente um conhecimento básico de matemática, não sendo necessário nenhum conhecimento de programação. A Figura 3 apresenta o modelo de crescimento logístico (Figura 2B) no *Vensim* assim como os resultados gráficos da simulação.

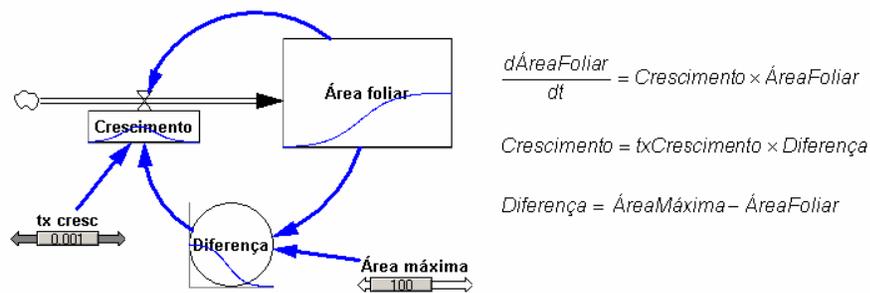


Figura 3. Modelo do crescimento logístico da Fig. 2B representado no sistema Vensim

6. Aplicações de Modelos de Simulação

As aplicações de modelos de simulação podem ser agregadas em:

- ✓ **Entendimento do sistema.** Modelos podem ser desenvolvidos para aumentar a compreensão sobre sistema em estudo. Podem auxiliar consideravelmente na organização das informações disponíveis e no planejamento experimental, através da identificação das variáveis mais importantes para amostragem, frequência de amostragem, precisão necessária, etc.
- ✓ **Projeções.** Um objetivo comum de modelos de simulação é o de realizar projeções, ou seja, avaliar as tendências de variáveis do sistema em diferentes cenários.
- ✓ **Previsões.** As previsões tem como objetivo gerar resultados futuros, como perdas, por exemplo, mais exatos possíveis, em diferentes cenários.
- ✓ **Otimização.** Os modelo podem também ser utilizados para encontrar-se alternativas que maximizem ou minimizem o valor de certas variáveis em determinadas condições.

7. Modelos para simulação de sistemas agroflorestais

Existem diversos modelos desenvolvidos especialmente para a simulação de sistemas agroflorestais, sendo alguns deles apresentados a seguir.

a. Modelo de Trenbath (1989) para interações arvores/solo/cultivo, com pousio

Este é um modelo simples que tem como objetivo estabelecer o numero ideal de ciclos do cultivo anual em um sistema agroflorestal como função da fertilidade do solo, conforme o digrama de causas da figura 4.

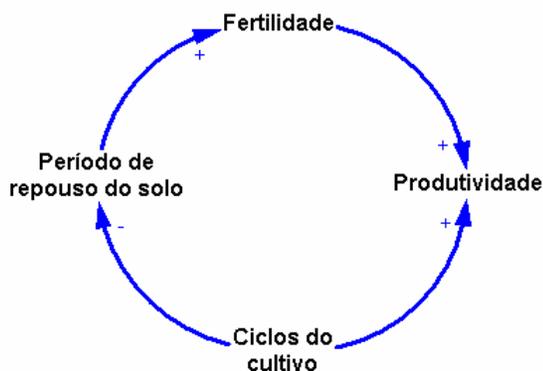


Figura 4. Diagrama de causas simplificado do modelo de Trenbath

As hipóteses do modelo são simples e claras: quando o número de ciclos do cultivo é aumentado o período de repouso diminui, o que tende a fazer com que a fertilidade do solo diminua (ou tenha muito lenta recuperação), diminuindo então a produtividade. Por outro lado, o aumento no número de ciclos do cultivo pressiona para aumentar a produtividade. Assim, a alteração no número de ciclos provoca efeitos contrários na produtividade.

Para exemplificar o uso do modelo é interessante citar Van Noordwijk (1999) que introduziu algumas alterações no modelo original, concluindo que a produtividade máxima que pode ser obtida, mantendo o sistema sustentável, requer que a fase de repouso seja interrompida, para iniciar um novo ciclo, quando a fertilidade relativa do solo atinge 50%-60% da fertilidade máxima. O modelo também indica que a intensificação (diminuição do período de repouso) pode levar a um aumento de produtividade, até que o nível de 50%-60% seja atingido. Além desse limite qualquer redução adicional no período de repouso leva a uma perda de produtividade por unidade de área como por unidade de trabalho. A maior produtividade pode ser obtida para uma seqüência de quatro cultivos, mas o aumento obtido a partir de 3 cultivos pode não compensar o aumento de trabalho requerido; cinco cultivos por ciclo resultam em menos produtividade do que quatro.

b. Modelo WaNuLCAS (Van Noordwijk and Lusiana, 1999)¹

O WaNuLCAS (Water, Nutrients and light Capture in Agroforestry Systems) é um modelo eco-fisiológico muito complexo, desenvolvido em *Stella* pelo *World Agroforestry Center* (ICRAF) que exige uma quantidade considerável de parâmetros. Este modelo contempla os processos envolvendo água, nutrientes e luz em sistemas agroflorestais onde diversas culturas e árvores competem por água e nutrientes, enquanto parcialmente se complementam no desenvolvimento radicular, na demanda por nutrientes e pela água sobre o solo e retornam matéria orgânica ao solo. O modelo necessita de muitos parâmetros que caracterizam a arquitetura das árvores e outros cultivos, tanto das partes subterrâneas como aéreas. É possível realizar simulações de alguns ciclos até períodos de 25 anos.

Van Noordwijk et al (2001) descrevem os resultados obtidos em uma simulação específica, cujo cenário inicia com uma floresta sendo derrubada. Quando os restos secam a um determinado nível de umidade o material é queimado. Os restos que não foram consumidos são agrupados para uma segunda queima. O fogo causa perda de nitrogênio mas também causa alteração na sorção de fósforo da camada superior do solo aumentando assim a disponibilidade deste nutriente para as plantas que serão cultivadas. Neste cenário os fazendeiros vão plantar milho e iniciar o cultivo de dendezeiro no local. Após a colheita do milho será plantado

¹ <http://www.worldagroforestry.org/sea/products/afmodels/wanulcas/DOWNLOAD.HTM>

amendoim, sendo este padrão repetido no ano seguinte. O dendê começa a produzir os primeiros frutos no terceiro ano após a plantação.

Os resultados desta simulação indicaram que milho e amendoim praticamente não produzem nada no segundo ano. No entanto, no terceiro ano o amendoim volta a produzir, porem com baixa produtividade. Também no segundo ano o dendê apresenta-se com forte stress hídrico o que é refletido em baixa produtividade pela redução no numero de flores femininas. Embora o modelo *WaNuLCAS* possa detalhar a performance de uma grande variedade de sistemas agroflorestais com diferentes tipos de cultivos, não foram desenvolvidos procedimentos para facilitar o processo de otimização.

c. *Spatially Explicit Individual-based forest simulator (SEXI-FS)*²

É um modelo baseado na arquitetura das plantas, de complexidade media e fácil utilização. O modelo *SEXI-FS* para simulação de florestas tem o foco nas interações planta-planta em um ambiente com mistura de varias espécies. A alta complexidade estrutural deste tradicional sistema agroflorestal desafia o enfoque clássico no que se refere a otimização das praticas de manejo.

O modelo utiliza um enfoque orientado a objetos onde cada árvore é representada por uma instancia de uma classe genérica de árvores. As árvores virtuais, simulando as árvores reais, interagem, modificando o ambiente de suas vizinhas. Estas modificações são mediadas através de dois recursos importantes: espaço e luz. Uma representação 3D de uma parcela de um hectare serve como base para representar a simulação desta competição.

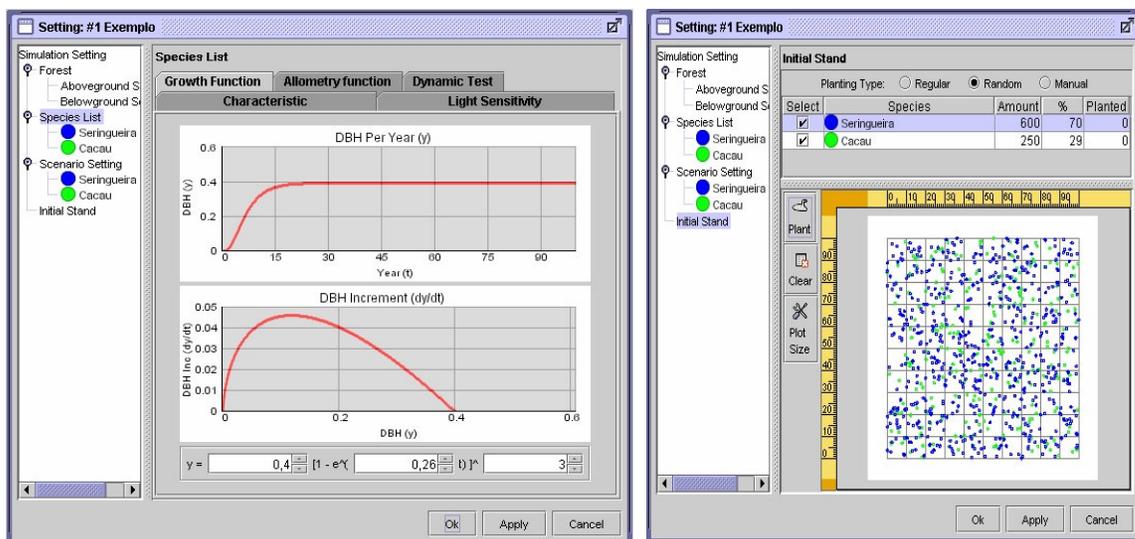
O principal objetivo deste modelo é obter uma representação dinâmica coerente de um sistema complexo, onde complexidade neste contexto refere-se ao resultado de interações individuais locais com diferentes propriedades, mais especificamente, ao grau de interconexão entre plantas individuais. O modelo clarifica os processos críticos e os parâmetros repensáveis pela dinâmica do sistema. Ele deve facilitar a exploração de cenários prospectivos de manejo, auxiliar no estabelecimento da relevância das técnicas de manejo utilizadas, etc.

Teste de sensibilidade do modelo confirmaram a importância dos parâmetros relacionados à geometria das árvores. Isto vem do fato da competição ser simulada por meio de interações espaciais assim, qualquer coisa que altere a forma, o tamanho ou a posição relativa das plantas tem impacto direto nos resultados da competição e portanto na dinâmica do crescimento. Apesar destas influências serem diretas seus efeitos são difíceis de prever sem a ajuda de simulação porque existem vários processos de retroalimentação e pela natureza não linear do sistema. Como ilustração destes processos pode-se examinar um caso simples. Quando é simulado o crescimento das plantas em um stand mono-específico, com espaçamento regular e em densidade media, as árvores do centro vão apresentar maior altura que as das bordas, pois a competição por luz estimula o crescimento em altura. No entanto, se a densidade das plantas é aumentada, as arvores das bordas apresentaram maior altura, pois no centro o nível de competição pela luz e demasiadamente elevado o que prejudica o crescimento das plantas.

Aplicações mais diretas do modelo incluem comparações de cenários alternativos com respeito ao retorno econômico de sistemas rotativos e permanentes, por exemplo.

A figura 5 apresenta algumas telas de configuração e resultados do modelo.

² <http://www.worldagroforestry.org/sea/products/afmodels/SEXI/index.htm>

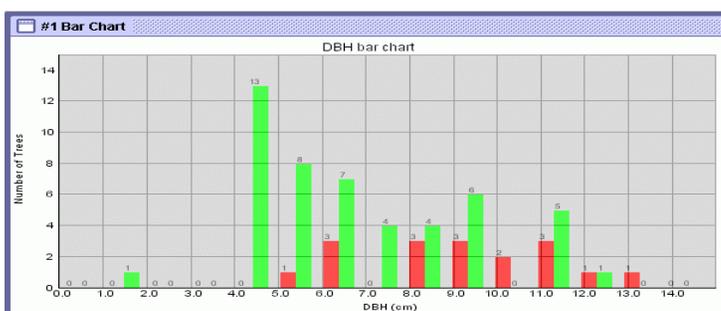


A

B



C



D

Figura 5 Telas do modelo *SEI-FS*. A. Configuração do padrão de crescimento das árvores; B. Configuração do desenho de plantio; C. Resultados da simulação do crescimento da área basal e D. Distribuição do número de plantas em cada classe de DBH.

d. *BwinPro/TreeGross*³

TreeGross é um modelo estatístico desenvolvido pela Estação de Pesquisas Florestais (Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt) da Baixa Saxônia, Alemanha. Como modelo estatístico de regressões lineares e não lineares os parâmetros devem ser estimados por medidas (altura da planta, diâmetro da copa, etc) tomadas em locais específicos e seus resultados a rigor só poderiam ser aplicados com segurança para os locais de onde foram obtidos os dados.

O modelo é baseado na análise de regressão de quatro variáveis dependentes (diâmetro, altura, base e largura da copa) e quatro variáveis independentes (área da copa, competição da copa, mudança no índice de competição devido ao desbaste e idade da planta). A análise de regressão foi realizada para diversas espécies, separadamente. Para estimativa dos parâmetros utilizaram-se dados de parcelas para as quais haviam amostragens por, pelo menos, seis anos.

Também foram incluídos no modelo alguns componentes adicionais, como mortalidade, colheita, etc. As informações geradas pelo modelo auxiliam aos produtores no planejamento do

³ <http://www.nfv.gwdg.de/A/BwinPro/bwinpro.php>

manejo das parcelas, especialmente no que se refere ao estabelecimento das épocas de colheita. A Figura 6 apresenta resultados de uma simulação realizada.

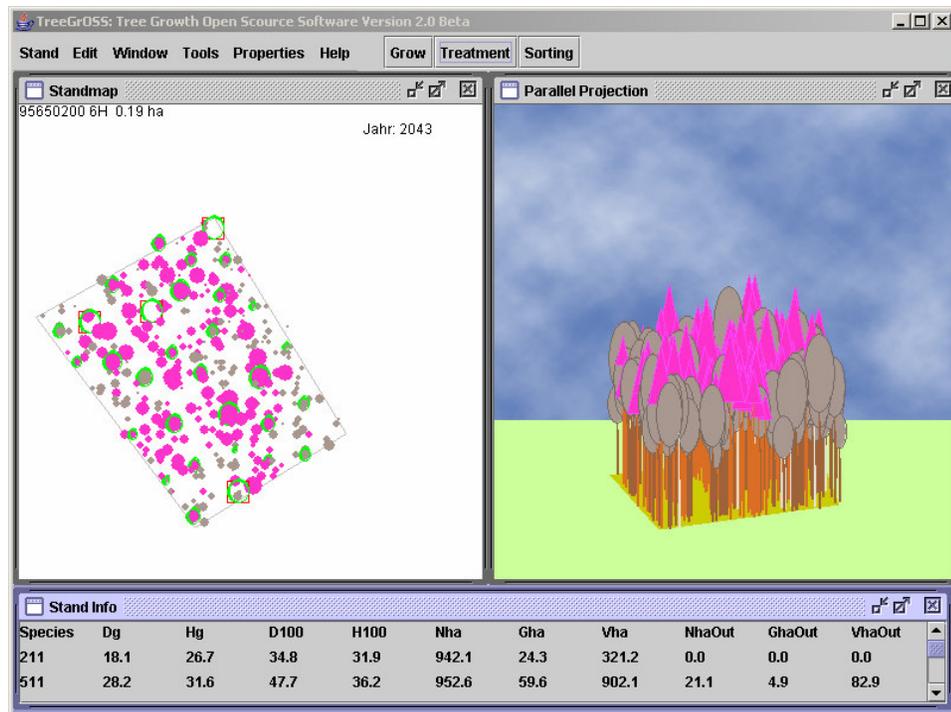
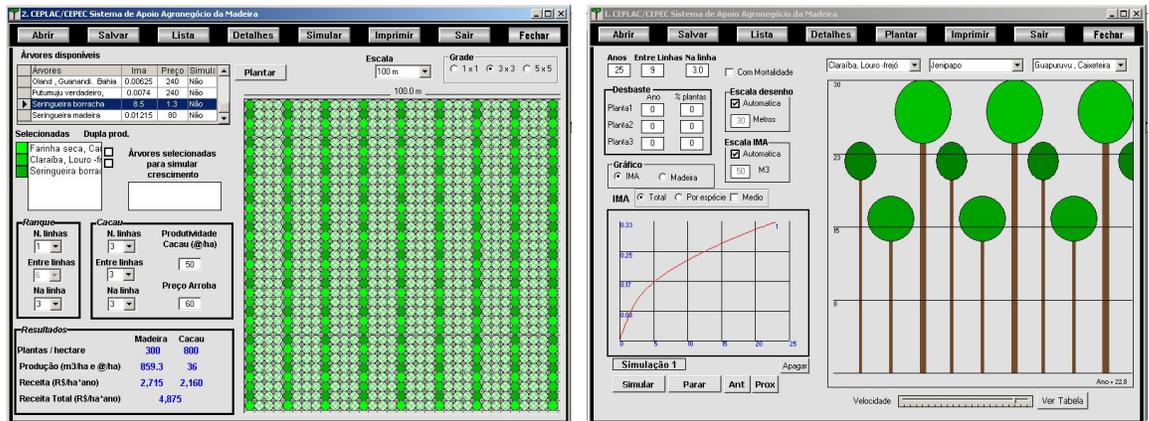


Figura 6. Resultados de uma simulação realizada com o modelo TreeGross

e. SAAM - Sistema de apoio ao agronegócio da madeira

Este sistema encontra-se atualmente em desenvolvimento no Centro de Pesquisas do Cacau (CEPLAC/CEPEC), e tem como objetivo auxiliar na seleção de essências florestais e desenhos de plantio em consórcio com cacau.

O sistema possui três módulos principais. Uma base de dados com principais informações sobre árvores, principalmente da Mata Atlântica; um sistema para desenho do plantio em consórcio com cacau e um modelo para simular o crescimento e produção das plantas. O modelo de simulação, desenvolvido em *Vensim*, adota conceitos e equações semelhantes aos utilizados pelo modelo *SEXI-FS*, considerando a competição entre as essências florestais em diferentes espaçamentos e/ou combinações de espécies. Na Figura 7 são apresentadas algumas telas do sistema.



A

B

Figura 7. Telas do sistema SAAM. A - Módulo de plantio; B - Módulo de simulação

8. Metodologia de desenvolvimento de modelos

A metodologia para modelos de simulação (Sgrillo e Araújo. 1996), é representada na Figura 8.

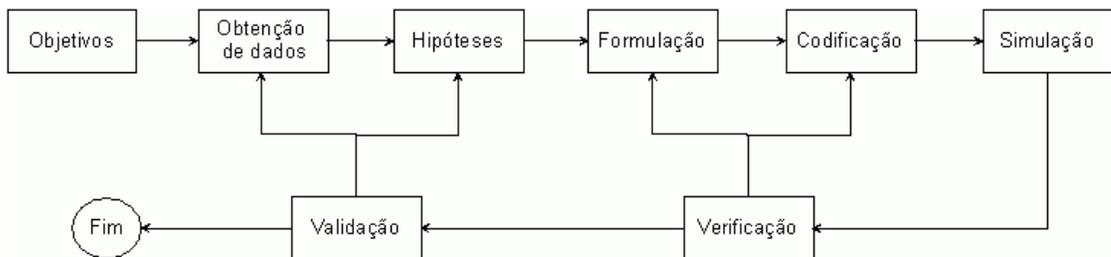


Figura 8. Metodologia para desenvolvimento de modelos para simulação (Sgrillo e Araújo, 1996)

Os objetivos envolvem uma colocação clara do problema que o modelo deve resolver, e são necessários para determinar os componentes do sistema, determinar os dados, necessários, fornecer critérios para especificar a precisão necessária dos parâmetros e fornecer critérios para a conclusão do modelo.

As hipóteses representam as inter relações e a estrutura do sistema. Como os modelos são representação simplificadas do sistema, processos e estruturas reais podem ser omitidos do modelo, se não forem relevantes para os objetivos estabelecidos.

A formulação das hipóteses necessárias é função do conhecimento que se tem do sistema. Normalmente o processo inicia com hipóteses simples, estabelecidas a partir das informações sobre o sistema real e dos dados disponíveis. O estabelecimento das hipóteses pode ser facilitado através da utilização de diagramas de causas e da formulação de perguntas sobre "como" e "porque" ocorrem os processos/interações do sistema real. As conseqüências lógicas das hipóteses formuladas a partir destas perguntas devem ser deduzidas e avaliadas

Avaliar hipóteses é mais formal e fácil de ensinar. Por isso é mais enfatizado no ensino formal. Formular hipóteses é mais "artístico" e difícil, mas toda a boa ciência começa com boas hipóteses.

Modelos para simulação representam hipóteses complexas sobre os mecanismos que operam no sistema real. Estas hipóteses, atuando em conjunto, representam uma hipótese única, mais complexa, sujeita a aceitação ou rejeição. Este processo faz avançar o conhecimento científico.

Matematicamente os modelos são representados por um sistema de equações diferenciais (ou a diferenças finitas - equação 1) e por um conjunto de equações algébricas que calculam os coeficientes das equações diferenciais. A formulação é a expressão das hipóteses em termos matemáticos

A solução é numérica: a partir dos valores iniciais, no tempo zero, são calculados novos valores para o próximo intervalo de tempo e assim sucessivamente. O intervalo de tempo de cada integração é pequeno (0.001, por exemplo) .

$$X_{(t+\Delta t)} = X_{(t)} + \Delta t(in - out) \quad \dots 1$$

A equação acima está representado que o valor futuro de X no próximo intervalo de tempo será igual ao valor atual somado das diferenças entre os fluxos de entrada (*in*) e saída (*out*) do compartimento. Como a solução de sistemas de equações deste tipo é numérica não ha praticamente limite para a sua complexidade e todos os processos não lineares necessários podem ser incorporados. Os coeficientes (in e out) podem ser variáveis e ser função dos valores do próprio ou de outros compartimentos.

A codificação é a transposição das equações que representam as hipóteses do modelo para um programa de computador. No passado este processo demandava um tempo considerável do esforço para desenvolvimento do modelo exigindo, muitas vezes a participação de colaboradores da área de informática. Em anos mais recentes o processo de codificação foi muito facilitado com o desenvolvimentos de aplicativos para o desenvolvimento de modelos de simulação. Este tópico será abordado mais adiante.

Com a primeira versão do modelo terminada devem ser realizadas simulações para os processos de verificação e validação. O processo de verificação tem como objetivo verificar se as equações matemáticas representam com fidelidade as hipóteses formuladas e se estas equações foram transpostas corretamente para o programa. Este processo é normalmente executado através da comparação dos resultados das simulações com aqueles que o modelo deveria apresentar. Os resultados esperados podem ser provenientes de dados experimentais ou, mais normalmente nesta fase, de deduções lógicas dos interações das variáveis.

O processo de validação é implementado para verificar se as hipóteses estabelecidas são corretas e adequadas para se atingir os objetivos propostos. Normalmente é feito através da comparação dos resultados da simulações com dados reais que não tenham sido utilizados para a estimativa dos parâmetros do modelo. Existem diversas metodologias qualitativas e quantitativas para validação de modelos.

Uma vez que o modelo atinja os critérios estabelecidos para sua validação o seu desenvolvimento é dado como concluído. Caso contrario, normalmente são coletados novos dados que permitam a reformulação das hipóteses. Nesta fase muitas vezes novos componentes são agregados ao modelo e componentes não significativos podem ser retirados. Este processo cíclico continua até que o modelo seja concluído.

9. Ferramentas de desenvolvimento

Modelos de simulação podem ser (e ainda são) desenvolvidos com as linguagens de programação científica clássica, como FORTRAN, BASIC, C+, etc. No entanto, nos últimos anos,

b. *Simile*⁵

Simile foi desenvolvido pela *Simulstic Ltda*, companhia de software irlandesa, inicialmente para simulação de sistemas agroflorestais. O *Simile*, como o *Vensim*, pode ser utilizado para desenvolvimento de qualquer sistema dinâmico descrito por equações diferenciais. No âmbito das ciências agroflorestais podem ser modelados processos como crescimento, competição, colheita e rendimento, dinâmica da água e nutrientes, etc.

Uma característica do *Simile*, com bastante utilidade para desenvolvimento de modelos de sistemas agroflorestais, é ser orientado a objeto, isto é, pode ser desenvolvido um modelo para um único indivíduo da população e criar-se diversas instancias deste modelo cujos parâmetros necessariamente não são os mesmo. Estas instancias podem ser localizadas no espaço através de coordenadas x e y.

Para realizar as simulações (integrar numericamente as equações) *Simile* gera, compila e executa um programa C++.

Os resultados das simulações podem ser visualizados em gráficos, tabelas ou animações. A Figura 10 apresenta os resultados de uma simulação do crescimento de plantas, com base em um modelo simplificado de um único indivíduo. Este modelo é replicado, e suas replicas (instancias) são distribuídas no espaço (no caso a distribuição é ao acaso, em um hectare). Os parâmetros, como a taxa de crescimento, de cada réplica são gerados ao acaso, com base na variabilidades (media e variância) das estimativas dos parâmetros reais.

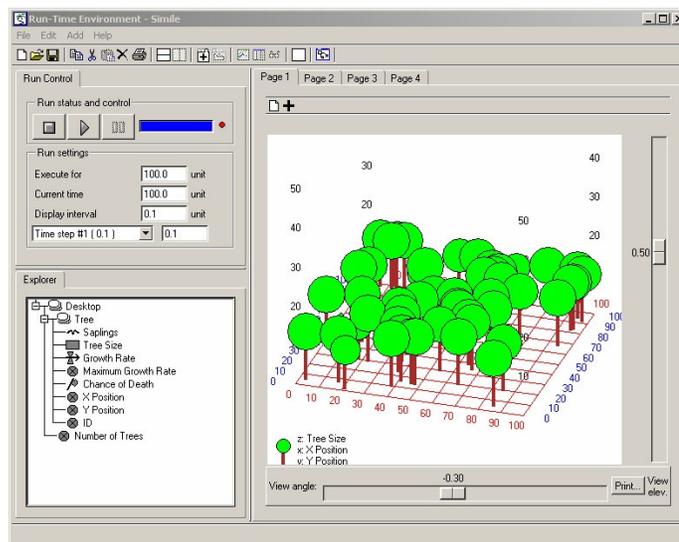


Figura 10. Tela do *Simile*, apresentado resultados gráficos da simulação de um sistema agroflorestal.

c. Outras Ferramentas

Outras ferramentas similares incluem o *Stella*⁶ (muito semelhante ao *Vensim*), o *PowerSim*⁷, o *Berkeley Madonna*⁸, o *AnyLogic*⁹ e o *MyStrategy*¹⁰

⁵ <http://www.simulistics.com/>

⁶ <http://www.iseesystems.com/>

⁷ <http://www.powersim.com>

⁸ <http://www.berkeleymadonna.com/>

⁹ <http://www.xjtek.com/>

10. Conclusões

No passado normalmente era gasto mais tempo na implementação do modelo em computador (programação), do que no desenvolvimento do modelo conceitual. O desenvolvimento de modelos para simulação exigia que o pesquisador tivesse um conhecimento considerável de matemática e principalmente, de programação de computadores. Quando isto não ocorria era necessário agregar à equipe especialistas para suporte ao desenvolvimento do modelo. Nos últimos anos, com o surgimento de ferramentas como o *Vensim*, *Simile* e *Stella*, os processos de desenvolvimento dos modelos conceituais e de sua implementação em computadores ficaram bastante simplificados. Qualquer pesquisador com conhecimento dos conceitos e técnicas da dinâmica de sistemas, de matemática básica (álgebra linear), familiarizado com o uso de computadores e, obviamente, com conhecimento suficiente do sistema que quer modelar, pode desenvolver modelos para simulação de sistemas reais para atingir os objetivos de sua pesquisa, com maior rapidez e facilidade.

A utilização das técnicas de modelagem matemática para sistemas agroflorestais apresenta diversas vantagens. Nas fases iniciais de desenvolvimento do modelo evidenciam-se as variáveis que são mais importantes na determinação da dinâmica do sistema o que otimiza os processos de planejamento experimental e coleta de dados. A aplicação da análise de sensibilidade nas fases iniciais de construção do modelo permite o estabelecimento do grau de precisão e da variabilidade que pode ser tolerada na estimativa dos parâmetros. Assim, o número de repetições dos tratamentos experimentais ou de amostras coletadas, pode ser estabelecido com critérios justificados, o que otimiza a experimentação, minimizando seus custos e mantendo a precisão necessária.

Os modelos possibilitam também um aumento considerável no grau de compreensão do funcionamento e estrutura de um sistema real. Os modelos estatísticos, como modelos de regressão por exemplo, embora tenham utilidade, não são modelo "explicativos", ou seja não explicam, em termos do sistema real, porque a variável Y depende da variável X. Nos modelos de simulação, por outro lado, as relações entre as variáveis devem corresponder às relações existentes no sistema real. Também, nestes modelos, todas as variáveis e parâmetros utilizados possuem um significado biológico (ou físico, químico, etc) compreensível, o que não ocorre nos modelos estatísticos onde, por exemplo, os valores dos parâmetros b_0, b_1, \dots, b_n de uma regressão múltipla não contem nenhum significado que os vinculem ao sistema real e não contribuem para a compreensão de estrutura deste sistema.

Nas ciências agroflorestais, onde alguns elementos, como as árvores, por exemplo, apresentam longos períodos de crescimento, o tempo necessário para a obtenção de dados experimentais é, muitas vezes, proibitivo. Dentre as possíveis aplicações de modelos para simulação destaca-se, neste caso, o desenvolvimento de "experimentos" no computador. Uma vez que esteja desenvolvido e validado um modelo de crescimento de plantas, com o grau de detalhamento considerado suficiente, podem ser realizados "experimentos" com o modelo para, por exemplo, determinar o melhor espaçamento e/ou combinação de essências florestais em um determinado ecossistema. Também, a aplicação de técnicas como "... e se" (*.. and if*), pode permitir a obtenção de resultados confiáveis, frente a situações reais imprevisíveis, como estiagens prolongadas, por exemplo.

Conclui-se, em resumo, que os modelos para simulação apresentam-se como uma ferramenta de utilidade considerável que pode ser aplicada com relativa facilidade para solução de problemas no âmbito da pesquisa agroflorestal.

¹⁰ <http://www.strategydynamics.com/mystrategy/>

11. Bibliografía Citada

Forrester, J.W. 1961. Industrial dynamics. Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1v.

Sgrillo, R.B. & K.R.P. Araújo. 1996. Modelaje y simulación de sistemas epizoóticos, p.293-311. In R.E. Lecuon, (ed), Microorganismos patógenos empleados en el control microbiano de insectos plaga. E.R.Lecuona ed. Buenos Aires, 338p.

Sterman, J.D. 2000. Business dynamics. System thinking and modeling for a complex world. Boston, McGraw Hill Higher Education. 982 p.

Trenbath BR. 1989. The use of mathematical models in the development of shifting cultivation. In: J. Proctor (Ed.) Mineral Nutrients in Tropical Forest and Savanna Ecosystems, Blackwell, Oxford. pp 353-369.

Van Noordwijk M. 1999. Productivity of intensified crop fallow rotations in the Trenbath model. Agroforestry Systems 47: 223-237

Van Noordwijk, M. B. Verbist, G. Vincent and T. P. Tomich. 2001. Simulation models that help us to understand local action and its consequences for global concerns in a forest margin landscape. International Centre for Research in Agroforestry, Bogor, Indonesia. ASB Lecture Note 11A, 31 pp.