

# PRINCIPAIS MODELOS E SIMULADORES UTILIZADOS PARA ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS DAS ATIVIDADES AGRÍCOLAS



(+)(x)(m)(x)(+)  
= (n-m)(x)(+)



**Maria Conceição P. Y. Pessoa**  
**Ariovaldo Luchiari Junior**  
**Elizabeth N. Fernandes**  
**Magda Aparecida de Lima**

MA  
5p  
7  
2006.01390

Principais modelos e  
1997 LV-2006.01390



37489-1



# **REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL**

Presidente: Fernando Henrique Cardoso

Ministro da Agricultura e do Abastecimento:

Arlindo Porto

## **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa**

Presidente: Alberto Duque Portugal

Diretores: Dante Daniel Giacomelli Scolari

José Roberto Rodrigues Peres

Elza Angela Battaglia Brito da Cunha

## **Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento e Avaliação de Impacto Ambiental - CNPMA**

Chefe Geral: Clayton Campanhola

Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento: Ariovaldo Luchiari Júnior

Chefe Adjunto Administrativo: Rosângela Blotta Abakerli

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento e Avaliação de Impacto Ambiental  
Ministério da Agricultura e do Abastecimento*

**PRINCIPAIS MODELOS MATEMÁTICOS E  
SIMULADORES UTILIZADOS PARA  
ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS  
DAS ATIVIDADES AGRÍCOLAS**

Maria Conceição P.Y. Pessoa

Ariovaldo Luchiar Junior

Elizabeth N. Fernandes

Magda Aparecida de Lima

*Ao Diretor Dantas,  
é um início  
futuramente  
teremos mais  
e mais informações  
em próximos 06  
meses  
Ariovaldo  
Janeiro/98*

Jaguariúna, SP

1997

Embrapa-CNPMA. Documentos, 8

Exemplares dessa publicação podem ser solicitados à:

**Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento e Avaliação de Impacto Ambiental - CNPMA**

Rodovia SP 340 - km 127,5 - Bairro Tanquinho Velho

Caixa Postal 69

13820-000 - Jaguariúna, SP

Fone: (019) 867-5633

Fax: (019) 867-5225

e.mail: adi@cnpma.embrapa.br

**Comitê de Publicações:** Ariovaldo Luchiari Júnior  
Cláudia Conti Medugno  
João Fernandes Marques  
José Flávio Dynia  
Raquel Ghini  
Tarcízio Rego Quirino  
Maria Amélia de Toledo Leme  
Margarete Esteves N. Crippa

**Revisão:** Lígia Abramides Testa

**Editoração:** Regina Lúcia Siewert Rodrigues

**Normatização:** Maria Amélia de Toledo Leme

**Tiragem:** 500 exemplares

<b>Embrapa</b>	
Unidade:	AI - Sede
Valor aquisição:	.....
Data aquisição:	.....
N.º N. Fiscal/Fatura:	.....
Fornecedor:	.....
N.º OCS:	.....
Origem:	Diacás
N.º Registro:	01390/06

PESSOA, M.C. P.Y.; LUCHIARI, A. J.; FERNANDES, E.N.; LIMA, M. A. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas.** Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 1997. 83p. (Embrapa-CNPMA. Documentos,8).

CDD 511.8

## SUMÁRIO

	Pág.
APRESENTAÇÃO .....	05
1. INTRODUÇÃO .....	07
2. A MODELAGEM E A SIMULAÇÃO DE SISTEMAS:	
NOÇÕES BÁSICAS .....	13
2.1. Classificação dos modelos.....	14
2.1.1. Modelos matemáticos: considerações adicionais .....	18
2.2. Simulação de sistemas .....	31
2.2.1. Linguagens computacionais utilizadas.....	36
3. PROBLEMAS DA PESQUISA AGROPECUÁRIA ACOMPANHADOS POR MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO .....	45
3.1. Modelos matemáticos e simuladores mais citados na literatura agropecuária.....	47
3.2. Outros modelos citados.....	63
4. COMENTÁRIOS FINAIS .....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72





Os processos ambientais são difíceis de ser caracterizados e interpretados, porquanto envolvem interações complexas que não podem ser estudadas sob o enfoque monodisciplinar. Os modelos matemáticos e os simuladores são ferramentas muito importantes nesse sentido, pois integram informações e permitem análise quantitativa e qualitativa das alterações ocorridas nos diferentes compartimentos ambientais decorrentes da intervenção humana, como é o caso da produção agropecuária.

Mais que isso, os modelos matemáticos e simuladores possibilitam prever alterações ambientais indesejáveis, orientando a tomada de decisão para a introdução de medidas corretivas ou de tecnologias de produção mais adequadas. Seu papel se torna, portanto, relevante para a análise da sustentabilidade ambiental dos sistemas agropecuários de produção, possibilitando projeções de médio e de longo prazos.

Esta publicação traz uma abordagem dos principais modelos matemáticos e simuladores disponíveis para a análise e avaliação dos processos ambientais e visa estimular seu uso ou adequação para a análise complementar e previsão dos riscos e impactos ambientais causados pelas práticas agrícolas.

*Clayton Campanhola*

*Chefe Geral Embrapa-CNPMA*



# PRINCIPAIS MODELOS E SIMULADORES UTILIZADOS PARA ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS DAS ATIVIDADES AGRÍCOLAS

Maria Conceição P.Y. Pessoa<sup>1</sup>

Ariovaldo Luchiari Junior<sup>2</sup>

Elizabeth N. Fernandes<sup>3</sup>

Magda Aparecida de Lima<sup>4</sup>

## INTRODUÇÃO

As atividades agrícolas são reconhecidamente assumidas como causadoras de alterações ambientais. Sua ação impactante se intensificou nas últimas décadas mediante políticas agrícolas dominantes que consideravam somente as necessidades de aumento de produtividade, de competitividade e de lucro. Com base nessa concepção, a exploração indevida do ambiente natural e o uso inadequado de tecnologias têm levado à degradação de ecossistemas naturais e à diminuição da qualidade ambiente, colocando em risco a qualidade de vida de gerações futuras.

---

<sup>1</sup> Matemática Aplicada, Ph.D., Embrapa Meio Ambiente - Caixa Postal 69, CEP 13820-000 Jaguariúna, SP.

<sup>2</sup> Engenheiro-Agrônomo, Ph.D., Embrapa Meio Ambiente.

<sup>3</sup> Engenheira Florestal, M.Sc., Embrapa Meio Ambiente.

<sup>4</sup> Ecóloga, Ph.D., Embrapa Meio Ambiente.

Os problemas ambientais associados à agricultura moderna despertaram preocupações não só nas correntes ambientalistas mundiais como nas mais recentes correntes sociais e econômicas. A tendência de considerar a preservação do meio ambiente e, ao mesmo tempo, buscar a qualidade dos produtos agrícolas e o bem-estar social, reflete-se na adoção de novo conceito de desenvolvimento agrícola, fundamentado no princípio da sustentabilidade.

Vê-se, nesse novo paradigma, a importância da crescente relação agricultura/homem/ambiente, na qual o conhecimento dos fatores e processos funcionais envolvidos nos sistemas formados a partir dela (agroecossistemas) é fundamental para assegurar-lhes a sustentabilidade.

A necessidade de conhecer determinada área visando a sua ocupação agrícola requer a análise do ambiente e a avaliação de impactos ambientais relacionados às atividades que se pretende empreender. Por outro lado, quando as alterações ambientais já se fazem sentir, os efeitos negativos presentes e acumulados devem ser investigados à luz de metodologias específicas que constatem os principais fatores geradores ou causadores desses impactos. Em ambos os contextos, é essencial a identificação dos principais processos ecológicos, econômicos e sociais, bem como os fatores importantes à compreensão dos mecanismos de funcionamento do sistema agrícola.

A avaliação de impacto ambiental, observada do ponto de vista tanto legal quanto técnico como um instrumento de decisão, tem como propósitos principais a análise (identificação e caracterização) e a predição das conseqüências de uma ação proposta (Fig. 1). Diferentes mecanismos de coleta, análise, comparação e organização de informações e dados sobre os impactos ambientais compõem os chamados métodos de avaliação de impacto ambiental (AIA). Entre os principais, encontram-se, entre outros, as matrizes de interação, redes de interação, listagens de controle ("checklist"), superposição de cartas e simulação.

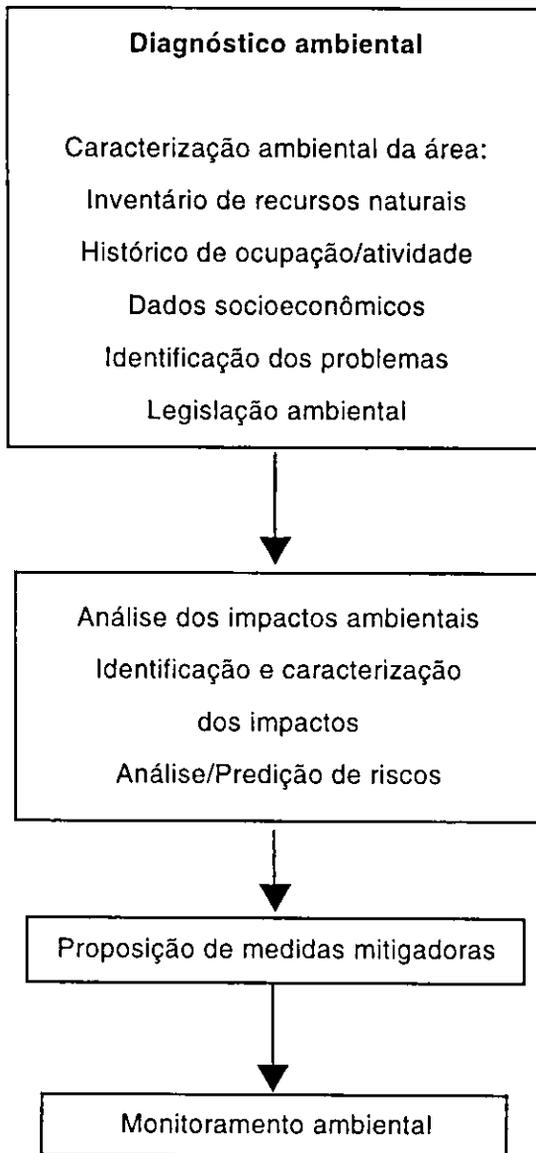


FIG. 1. Fluxograma das etapas envolvidas na avaliação de impacto ambiental

Nos estudos de avaliação de impacto ambiental emprega-se um conjunto de técnicas específicas, como as de predição de impacto, destinadas a estimar a magnitude das alterações a serem causadas pelas atividades propostas. Exemplos das técnicas desenvolvidas para esse fim envolvem o emprego de modelagem matemática, simulação de sistemas, avaliação da paisagem, projeções estatísticas e de fatores econômicos, além de experimentos de campo e de laboratório.

Em vista da complexidade de se estudar impactos ambientais, de maneira geral, associada à formação reducionista de pesquisadores, que direcionam suas pesquisas a interesses específicos, torna-se difícil o estudo integrado do problema analisado dado que os processos envolvidos na agricultura não ocorrem de modo isolado. Essa complexidade é ainda maior quando se observam as diferentes formas em que tais processos são descritos. Na prática, a visualização dos parâmetros relevantes à compreensão dos processos envolvidos no funcionamento dos agroecossistemas, assim como o grau de associação entre eles, têm sido de difícil obtenção, não obstante as tentativas feitas por meio dos mais recentes métodos de cruzamento de dados.

Partindo-se do princípio que dada área agrícola pode ser vista como um sistema, integrando processos ecológicos, econômicos e sociais, o uso de modelos matemáticos e simuladores que representem a integração entre as variáveis envolvidas nos processos de sustentabilidade aparecem como importante ferramenta na pesquisa agrícola. Tais modelos permitem evoluir para um estágio de desenvolvimento metodológico mais avançado, integrando, de forma organizada, o conhecimento gerado e prevendo o comportamento de um ou de vários fenômenos, pelo acompanhamento da dinâmica espaço-temporal do problema.

Isso vem sendo constatado, ao longo das últimas décadas, pela crescente demanda científica relacionada à elaboração de modelos matemáticos e simuladores. Tais modelos buscam avaliar o comportamento de

processos que possam induzir o aparecimento de impactos negativos, além de ser grande ferramenta na compreensão das particularidades envolvidas nos próprios processos. Muitas vezes, também permitem visualizar, probabilisticamente, o comportamento futuro do sistema, ante a criação de diferentes cenários de aplicação, ainda não explorados em experimentos reais, alertando o pesquisador para novas alternativas de pesquisas futuras ou a testes mais direcionados, reduzindo gastos e esforços.

Embora, em outros países, seja comum o uso de modelos matemáticos e simuladores na pesquisa agropecuária, no Brasil essa prática ainda é tímida. Com frequência, o descrédito no uso de modelos está associado a uma visão reducionista, imposta a sua fase de elaboração, descrevendo modelos que não refletem a realidade encontrada no campo. Tal fato é decorrente da ausência de uma equipe multidisciplinar que descreva, em detalhes, os fenômenos intrínsecos aos objetivos do estudo.

Existe também o “mito” de que profissionais de áreas de formação diferentes não possam fazer-se entender em uma linguagem comum, que reflita os mesmos pontos de interesse. Em conseqüência, surgem versões de modelos matemáticos extremamente controlados, que não representam situações encontradas no campo. Tais propostas, quando elaboradas apenas por profissional da área de ciências exatas, descrevem o espectro de seu conhecimento do problema agropecuário, visando a uma solução numérica a seu ver factível. Quando as propostas, porém, são elaboradas somente por profissionais de outras áreas, muitas vezes não se dá atenção a um planejamento amostral moderno e mais adequado, nem à necessidade de validação do modelo para outras regiões.

A falta de conhecimento de técnicas matemáticas mais apropriadas também faz com que pequenos problemas analíticos impeçam o andamento de soluções simples para problemas importantes. Desse modo, a maioria das versões encontradas na literatura são criticadas, com razão, por ambos os profissionais, que passam a desacreditar na possibilidade de um traba-

lho conjunto, dificultando a interdisciplinaridade desejável a uma equipe. A melhor atitude, ao deparar-se com questões dessa natureza, é promover uma discussão franca e paciente entre os membros multidisciplinares da equipe, visando ajustar a linguagem, conhecer os potenciais e limitações de cada área, no intuito de definir uma abordagem ousada e mais eficiente ao problema em estudo.

Soma-se aos impedimentos do uso de modelos matemáticos e simuladores, no Brasil, a ausência de informações quali-quantitativas disponíveis, geralmente em decorrência da falta de publicação de dados que facultem a elaboração, manutenção e atualização de um banco de dados detalhados relativos às questões mais variadas relacionadas ao ambiente agropecuário. Com freqüência, essas informações se encontram esquecidas, anotadas em papéis ou até mesmo perdidas, tornando-se necessário repetir os experimentos para coletá-las.

Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo dar noções básicas sobre modelagem e simulação de sistemas, ajustar termos e referenciar e comentar alguns dos modelos e simuladores mais citados na literatura científica, incentivando seu uso na tomada de decisões em estudos agroambientais pela comunidade científica nacional.

## 2 A MODELAGEM E A SIMULAÇÃO DE SISTEMAS: NOÇÕES BÁSICAS

O mundo real é um sistema complexo que pode ser subdividido em vários níveis organizacionais que vão desde uma simples molécula até ecossistemas. Devido a essa complexidade da natureza, os cientistas agrícolas limitam seus conhecimentos e atenções a pequenas áreas de interesse, nas quais, gradualmente, acumulam conhecimentos e, pouco a pouco, definem os processos que estabelecem os cenários de estudo. A integração entre os conhecimentos adquiridos em várias disciplinas combina os cenários encontrados em cada uma delas, permitindo a compreensão e uma análise de tendências futuras, mais detalhada, do funcionamento do sistema ecológico.

Entretanto, uma investigação no sistema real, envolvendo medições de todas as variáveis que influenciam um processo em uma escala mais ampla é, na maioria das vezes, impossível de ser conduzida, pela limitação de custos, de pessoal, de local, etc.

Uma alternativa para contornar esse problema é partir da proposição de uma descrição do sistema real, que o represente na escala do objetivo do estudo. Essa representação deve basear-se em conhecimento técnico de alto nível, adquirido em pesquisas básicas, que facilitam a descrição dos processos envolvidos. Mediante essa abordagem, torna-se possível a proposição de modelos matemáticos que representem o problema de forma mais eficiente e, posteriormente, sua transcrição para linguagem computacional, viabilizando o acompanhamento da dinâmica desse sistema pela simulação de cenários alternativos, muitos deles ainda não testados em cenário real.

Assim, na área de simulação, entende-se por **sistema** um conjunto de objetos, ou elementos, que descrevem as principais características de uma situação real a estudar. Quanto melhor a interpretação dada aos fenômenos envolvidos no sistema, maior exatidão será alcançada na sua descrição.

De modo geral, um **modelo** é uma representação de um sistema em determinada forma de linguagem, não necessariamente a linguagem matemática. A decisão da forma de descrição mais fidedigna à representação pretendida do sistema está diretamente associada aos interesses envolvidos no estudo por modelagem.

## 2.1. Classificação dos modelos

Existem vários tipos de modelos. Estão descritos, a seguir, alguns dos mais importantes.

Os **modelos conceituais** apresentam, de forma objetiva, clara e ordenada, as considerações pertinentes a um problema em estudo. Através deles, é possível uma visão holística do problema, relacionando as várias áreas do conhecimento envolvidas na sua descrição. Assim, tal tipo de abordagem faz uso do enfoque sistêmico, tendo os seguintes requisitos básicos para a sua elaboração: (a) conhecimento amplo do assunto e (b) clareza e objetividade da finalidade de elaboração do modelo e, conseqüentemente, da definição das variáveis a serem representadas.

Apesar dessa aparente simplicidade, sua construção, muitas vezes, não é tarefa fácil. A impressão de simplicidade é transmitida ao usuário em decorrência da clareza encontrada na representação esquemática da seqüência de idéias a seguir para a apresentação do problema e, conseqüentemente, para sua compreensão. Por esses modelos, viabiliza-se uma primeira identificação de métodos que auxiliem na compreensão e na proposição de medidas mitigadoras ao problema apresentado ou de lacunas no conhecimento científico, estimulando novos temas de pesquisa. O fluxograma apresentado como exemplo (Fig. 2), representa o modelo conceitual do projeto "Impacto ambiental e implicações socioeconômicas da agricultura intensiva em água subterrânea", da EMBRAPA-CNPMA (Pessoa & Gomes, 1996).

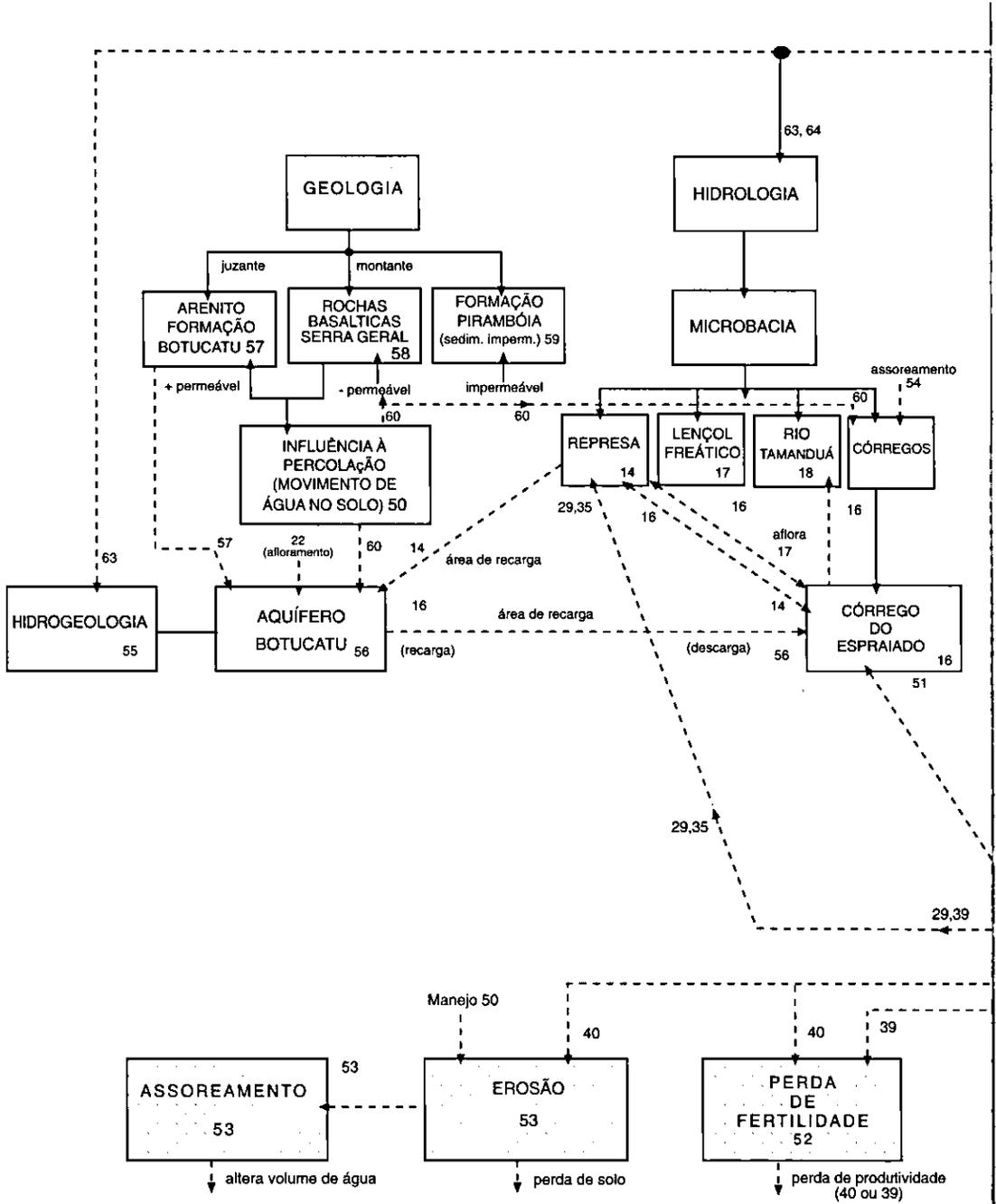
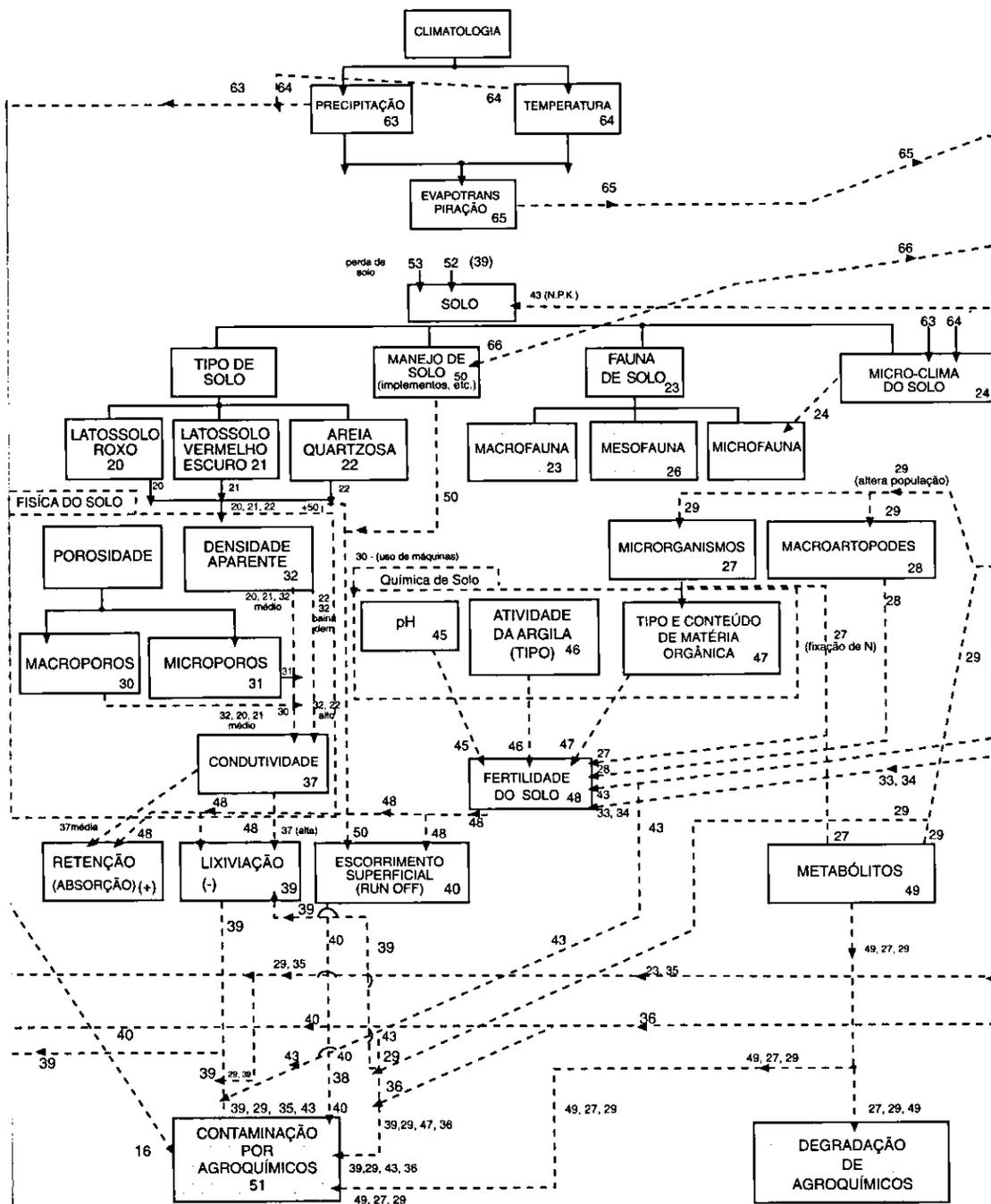
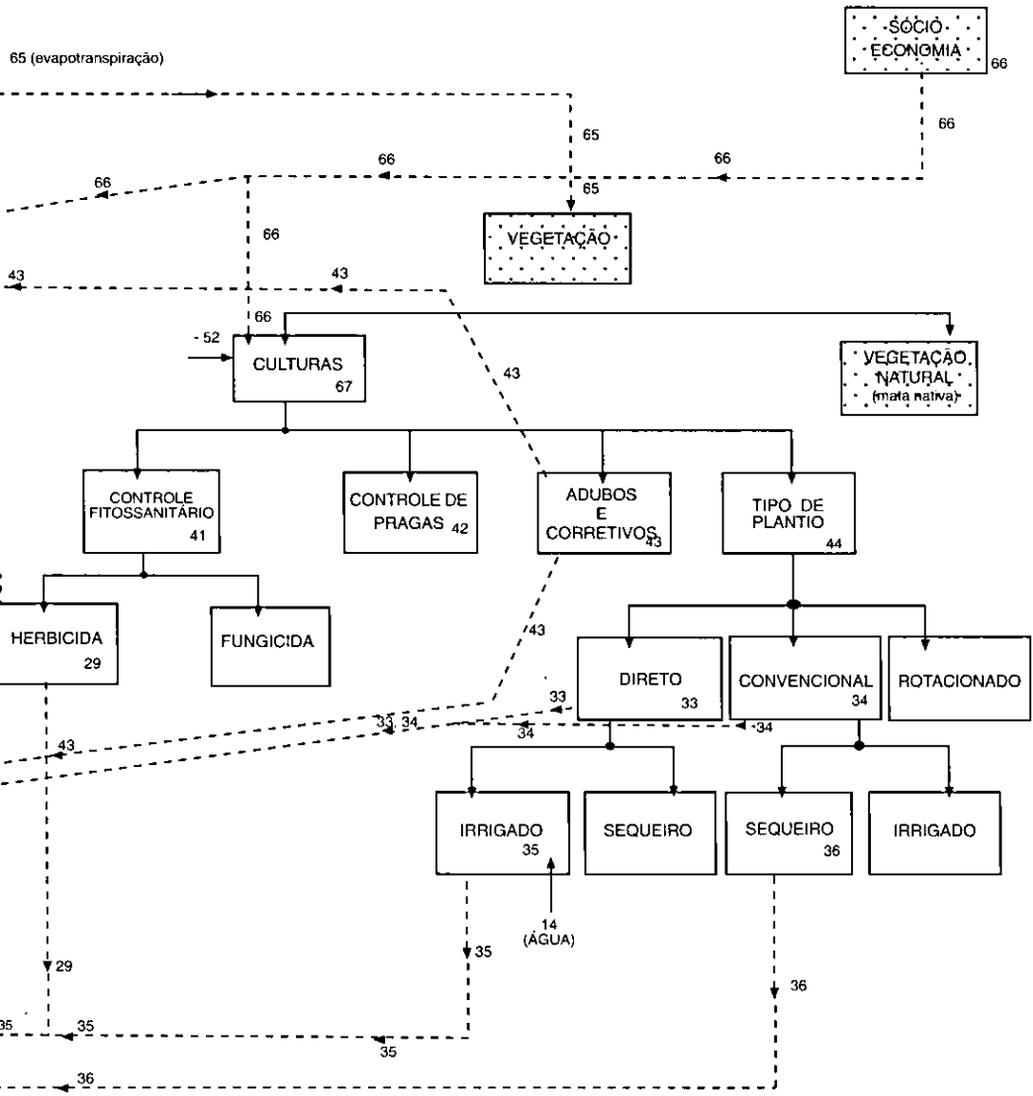


FIG. 2. Modelo conceitual do projeto "Impacto an





Este projeto avalia o impacto do cultivo intensivo de cana-de-açúcar na bacia do córrego Espreado, no município de Ribeirão Preto, SP, em área de recarga do aquífero Botucatu. O local possui alta vulnerabilidade de exposição a risco de contaminação ambiente por agroquímicos, devido, principalmente, às propriedades dos solos e dos depósitos geológicos (arenito Botucatu). O modelo conceitual apresenta os compartimentos representativos das áreas do conhecimento que mais influenciam na identificação do problema exposto: geologia, hidrogeologia, hidrologia, solo, vegetação, climatologia e socioeconomia, detalhando aspectos específicos da área. As interligações entre os compartimentos são assinaladas, apresentando, de forma clara, lógica e objetiva, a sensibilidade de cada compartimento a possíveis reações no ambiente com relação às intervenções humanas na área.

Os **modelos físicos**, dentro da conceituação utilizada na pesquisa agropecuária, são modelos de sistemas de produção, relativamente rígidos, que respeitam as condições dentro das quais foi formulada sua proposta prática. Neles, geralmente, mantêm-se escalas proporcionais às do sistema real. A partir desses modelos, projetados teoricamente mas possuidores de hipóteses claramente definidas, permitem-se identificar possíveis problemas do sistema real (Bressan, 1994). Como exemplos de aplicação de modelos físicos, citam-se: maquetes de estabelecimentos agropecuários e estudos de sistemas de produção leiteiros. Ressalta-se que a classificação de modelos físicos recebe outra conotação entre os profissionais das áreas de Física e Matemática. Neste contexto, essa terminologia é utilizada quando são estudados fenômenos da ciência Física, como, por exemplo, os modelos físicos baseados nas leis de conservação para estudos de frente de onda (Bassanezi & Ferreira Junior, 1988), os quais são muito encontrados em estudos da dinâmica de solutos no solo, ou os modelos utilizados na área de Climatologia.

Os **modelos matemáticos** são descrições construídas em linguagem matemática, mediante simplificações do sistema (Engel, 1984), sendo

representados por: componentes, variáveis, parâmetros e relações funcionais (Naylor et al., 1977).

Os elementos, também conhecidos pelo nome de **entidades**, são os componentes que definem os sistemas. Estes podem ser abertos ou fechados. **Sistemas abertos** são aqueles cujos elementos interagem com elementos do próprio sistema e com elementos pertencentes a seu meio externo. Por sua vez, nos **sistemas fechados**, os elementos interagem somente com elementos pertencentes ao próprio sistema.

As características próprias de cada elemento do sistema, as quais individualizam e, portanto, o diferenciam de outros elementos, recebem o nome de **atributos**. Estes podem ser subdivididos em **parâmetros** e **variáveis**.

Os **parâmetros** são atributos específicos à entidade. Geralmente, são valores constantes, previamente estabelecidos para o funcionamento do sistema (Pessoa, 1994). Um exemplo de parâmetro é a constante de Michaelis-Menten na cinética enzimática (France & Thornley, 1984). Os parâmetros do modelo devem ser calibrados. Este processo é necessário para assegurar o funcionamento do modelo dentro dos limites de validade dos parâmetros. Assim, o processo de calibração consiste em ajustar os parâmetros para assegurar seu bom funcionamento.

Muitas vezes encontram-se modelos com grande número de parâmetros, dificultando a execução da calibração. Nesses casos, devem ser evidenciados os parâmetros mais sensíveis, a fim de que sejam calibrados. Os demais, sem calibração, devem receber valores encontrados em literatura.

As **variáveis** são atributos necessários para descrever as interações entre as entidades do sistema, relacionando um componente a outro. Podem descrever entidades ou variáveis auxiliares aos cálculos necessários. Recebem esse nome porque podem sofrer alterações nos valores das entidades que representam.

Pelo acompanhamento das variáveis e dos parâmetros, permite-se explicar o **estado** e o comportamento do sistema.

As variáveis podem ser exógenas, de estado ou endógenas. As **exógenas** são independentes dos processos ocorridos no sistema. Embora pertençam a ele, não sofrem suas influências. Geralmente, são variáveis de entrada. Quando são controladas por elementos encarregados de tomada de decisão, denominam-se **variáveis exógenas controláveis** (ou **instrumentais**). Caso contrário, quando geradas pelas próprias circunstâncias de existência do sistema, são ditas **variáveis exógenas não-controláveis**.

As variáveis de **estado** definem o estado atual do sistema, ou de um de seus componentes, em determinado instante, ou período de tempo preestabelecido.

As variáveis **endógenas** são aquelas dependentes de outras variáveis do sistema - são geradas pela interação das variáveis exógenas e de estado, de acordo com as características operacionais do sistema. Geralmente, são variáveis de saída.

As relações funcionais descrevem a forma como ocorrem as interações entre as entidades do sistema. Tais relações se apresentam como **identidades** ou como **características operacionais**. As **identidades** são definições ou tautologias e, as características operacionais, são hipóteses, geralmente apresentadas em forma de uma equação matemática, relacionando as variáveis endógenas e as de estado às variáveis exógenas do sistema.

Dá-se o nome de **atividades** aos procedimentos desempenhados pelos elementos do sistema. Quando uma seqüência de atividades é executada durante um período determinado para sua ocorrência, causando alterações no sistema, chama-se **processo**.

### 2.1.1. Modelos matemáticos: considerações adicionais

Na existência de inter-relações entre as entradas, os estados e as saídas, os modelos são denominados **causais**. Nesse caso, são amplamente aplicados à compreensão e ao estudo de agroecossistemas.

Alguns modelos, denominados **caixas-pretas**, não permitem o entendimento das partes que constituem o sistema, nem suas inter-relações; apresentam somente as respostas às entradas definidas pelo usuário (Jorgensen, 1983a).

Quando um modelo matemático é representado por funções analíticas, ou seja, a solução da equação que o representa é decorrente de resolução analítica (teorias conhecidas da matemática pura), recebe o nome de **modelo matemático analítico**.

No meio agrônomo, os modelos matemáticos mais difundidos são os **empíricos**; são essencialmente descritivos e identificados por equações matemáticas capazes de representar os dados experimentais de forma aceitável. Esse tipo de modelo é resultado única e diretamente de trabalho experimental (Prosser, 1993). Seu propósito é descrever o que foi observado experimentalmente ou coletado em um levantamento. Portanto, qualquer tipo de extrapolação para condições diferentes daquelas em que os dados originais foram obtidos, é extremamente perigoso. Isso limita muito a capacidade preditiva do modelo. Em consequência, a experimentação é feita de forma repetitiva no espaço e no tempo, até que se consiga acumular um volume considerável de informações que permitam parametrizar os resultados e fazer inferências e previsões calibradas.

As formas das equações ou funções utilizadas, em princípio, podem ser generalizadas, mas o modelo é válido somente para uma série de dados da qual foi produzido. Admitir que o mesmo modelo será válido para outra série de dados sem os necessários ajustes nos parâmetros das equações não é permitido. Por ser resultante de dados experimentais, geralmente esse tipo de modelo é apresentado em gráficos onde são plotados os valores reais, os valores por ele estimados e os desvios. Exemplos de suas aplicações: as curvas de análise de crescimento, as curvas de resposta de taxas de fotossíntese à radiação solar, à água e à temperatura; os coeficientes de cultura usados em escalonamento de irrigações; as respostas na produção das culturas à adição de fertilizantes etc. A Fig. 3 ilustra um

exemplo de modelo empírico aplicado à obtenção do potencial matricial (J/kg) em função da razão entre a umidade volumétrica atual do solo ( $\theta$ ) e a umidade volumétrica saturada ( $\theta_0$ ) (Luchiari Junior, 1988).

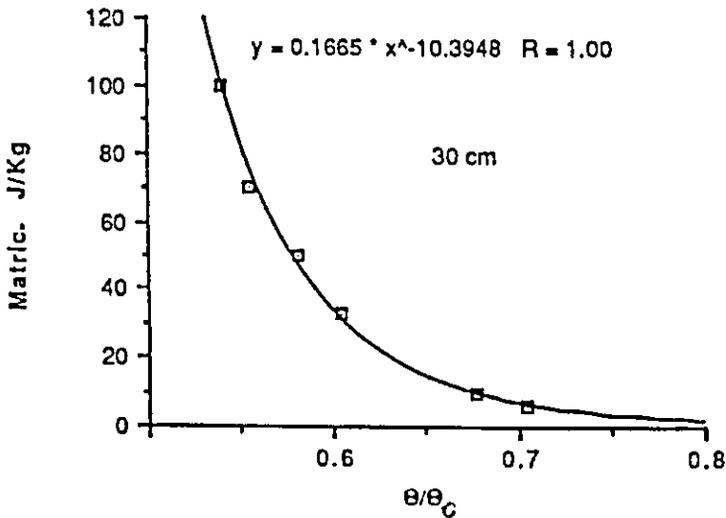
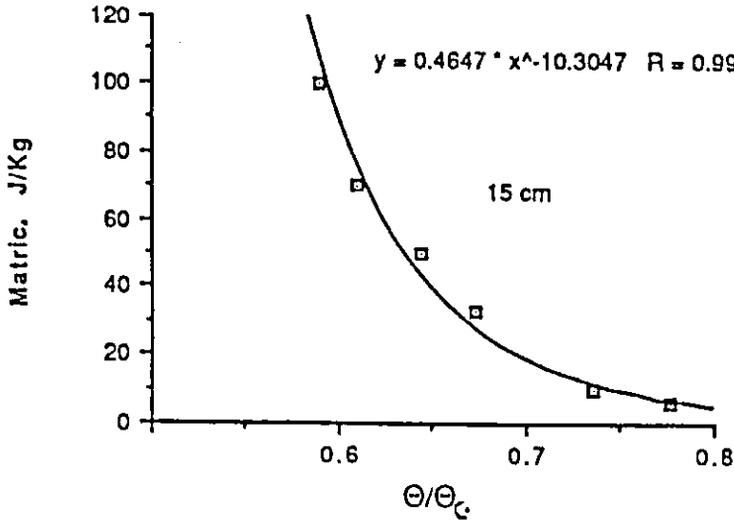


FIG. 3. Modelo empírico: obtenção do potencial matricial (J/kg) em função da razão entre a umidade volumétrica atual do solo ( $\theta$ ) e a umidade volumétrica saturada ( $\theta_0$ ), exemplos para duas profundidades diferentes. (Fonte: Luchiari Junior, 1988.)

A aplicação de modelos matemáticos empíricos é freqüentemente encontrada na área da ciência conhecida como Logística, que estuda a alocação de recursos naturais escassos (Engel, 1984). Por esse motivo, alguns modelos que estudam a disponibilidade de recursos no crescimento de uma população apresentam como solução analítica uma família monoparamétrica de sigmóides freqüentemente referenciadas como **curvas logísticas**. Os termos curva e função de crescimento também são bastante utilizados para denominar modelos empíricos de crescimento de plantas e animais. A função de Richards é um exemplo bem difundido dessa aplicação (France & Thornley, 1984), assim como os seguintes modelos matemáticos logísticos consagrados:

a) **Modelo de Malthus (1798)**: precursor no estudo de estimativas populacionais, o qual refletia uma situação de caos, dado que apresentava evidências de futura explosão populacional humana gerando competição por espaço e por alimento (Bassanezi & Ferreira Junior, 1988). O modelo é dado por:

$$dx/dt = (n - m) x (t)$$

onde: t= tempo;

n= taxa de natalidade;

m= taxa de mortalidade;

x(t)= quantidade de indivíduos presentes

Solução analítica:

$x(t) = x(0) \cdot \exp(bt)$ ,  $x(0)$  = população no instante  $t = 0$ .

b) **Modelo de Verhulst (1838)**: com base no de Malthus, considera limitações de recursos e incorpora um fator inibidor da população à medida que ela aumenta. O modelo fez muito sucesso devido à sua simplicidade de formulação e ao grande número de situações biológicas que pode descrever (Bassanezi & Ferreira Junior, 1988):

$$dx/dt = -bx^2 + bx x_1$$

onde:  $-bx^2$  regula o crescimento da população;

Solução analítica:

$$x(t) = (bx \exp(bx t)) / (c + b \exp(bx t)), \text{ onde } c = b[x - x(0)] / x(0)$$

c) **Modelo de Gompertz (1825)**: é um caso especial do modelo de Malthus; a quantidade de indivíduos no instante de tempo  $t$  é o logaritmo natural do número de indivíduos da população no instante  $t$  (isto é,  $x(t) = \ln(N(t))$ ) (Bassanezi & Ferreira Junior, 1988).

$$dN / dt = -b N \ln(N / N_0)$$

Solução analítica:  $y(t) = \exp(\ln(y(0)) \exp(-bt))$ , onde  $y(t) = N(t)/N_0$ ,  $0 \leq y(t) \leq 1$ , onde  $N = N(t)$  é o número de indivíduos no instante de tempo  $t$  e  $N_0$  é a quantidade inicial de indivíduos, isto é, a população presente no instante de tempo  $t = 0$ .

Esses modelos matemáticos foram sofrendo adaptações ao longo do tempo. Surgiram, assim, o **modelo logístico generalizado**, também conhecido pelos nomes de **modelo de Nelder** ou **modelo de Chapman-Richards**, generalizando o modelo **monomolecular** (ou **modelo de Mitscherlich**) e de Gompertz (Pave, 1988).

Várias aplicações de curvas de crescimento são freqüentemente utilizadas em estudos de controle biológico, como fatores de regulação de populações e de colonização, e em estudos de desenvolvimentos fenológicos de plantas, entre outros. Encontra-se disponível, em Pave (1988), uma série de exemplos de modelos matemáticos baseados em tais curvas. Um deles é o estudo da dinâmica populacional de *Rhizobium japonicum* no solo (Corman et al. em 1986, citados por Pave, 1988). O *Rhizobium japonicum* é um tipo de bactéria que vive em simbiose com certas plantas exploradas

economicamente, como a soja, fixando-se em sua zona de raiz. Sua cinética de sobrevivência em solos não estéreis é um dos possíveis estudos por curvas de crescimento. Em dois experimentos (Pave, 1988), em condições iniciais diferentes relativas a quantidades iniciais de inóculos, os resultados foram descritos pelo modelo de Gompertz, supondo-se que, qualquer que fosse o valor inicial de inóculos, o nível de sobrevivência seria o mesmo na amostra de solo não estéril.

Os modelos matemáticos podem ser classificados como determinísticos, estáticos, estocásticos ou dinâmicos.

Os **modelos determinísticos**, também conhecidos pelo nome de não probabilísticos, não permitem que as variáveis exógenas e endógenas sejam aleatórias. Além disso, suas características operacionais devem ser relações exatas e não funções de densidade de probabilidade (Naylor et al., 1977). Nesse tipo de modelo, a partir de valores iniciais fornecidos pelo usuário, permite-se acompanhar sua completa evolução no tempo, determinada pela equação analítica que o representa.

Os **modelos estáticos** não levam em conta a atuação da variável tempo em nenhuma das entidades do sistema (independente do tempo). Na maioria das vezes, são completamente determinísticos, com soluções normalmente obtidas diretamente pela utilização de técnicas analíticas. Neles, as variáveis que definem o sistema não são dependentes do tempo nem do espaço (Jorgensen, 1983b). O modelo de Vollenweider é um exemplo simples de modelo de eutrofização de estado estacionário utilizado para fins de manejo (Jorgensen, 1983b). A equação de resposta da produtividade de uma cultura ( $y$ ) em função de diferentes níveis de fertilização ( $x$ ) também é exemplo de um modelo estático. Dois dos possíveis modelos estáticos para o problema enunciado anteriormente são:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$$

e

$$y = ax / (x+b) \Rightarrow 1/y = 1/a + b/(ax).$$

Os **modelos estocásticos** ou **probabilísticos** possuem, pelo menos, uma de suas características operacionais dada por uma função de probabilidade. São consideravelmente mais complexos que os determinísticos, pois descrevem processos aleatórios, como a distribuição espacial de indivíduos. Neles, a evolução do estado atual de tempo pode ser apresentada por muitos estados futuros. Dessa forma, tais estados devem ser identificados para, posteriormente, serem apresentadas probabilidades de transição do estado atual para um futuro (Naylor et al., 1977).

Um exemplo de aplicação de modelagem estocástica é encontrado na previsão dos efeitos da heterogeneidade do solo na lixiviação de agroquímicos para águas subterrâneas (Van Der Zee, 1991).

Nos modelos **dinâmicos**, as variáveis modificam-se com o tempo, tornando-o um fator de grande importância na sua representação. Nesses modelos, representa-se o fator tempo de duas formas: discreta ou contínua. A primeira dá-se pela representação do tempo em instantes definidos em passos constantes, em que o comportamento do sistema é apresentado somente nesses instantes coletados no intervalo de tempo total estabelecido para o estudo. Neste caso, as variáveis envolvidas são funções de uma malha de pontos, cujo valor no ponto é um valor médio da variação das quantidades registradas. Assim, os modelos são representados matematicamente por equações a diferenças e são chamados de **modelos dinâmicos discretos**.

A segunda forma de representar modelos dinâmicos é tratando o fator tempo como contínuo. Neste caso, o **sistema dinâmico contínuo**, refletido no modelo, apresenta as variáveis do sistema descrevendo variações fornecidas de forma instantânea, devendo ser descritas para todos os instantes de tempo pertencentes ao intervalo total em estudo. Neste caso, o modelo matemático dinâmico reproduz o fenômeno contínuo, que representa por equações diferenciais e, assim, o modelo dinâmico é dito **contínuo** (Bassanezi & Ferreira Junior, 1988).

Exemplificando, apresenta-se a seguir um mesmo problema, modelado matematicamente nas formas discreta e contínua, para o estudo de dinâmica populacional de uma população constante (modelo SIS). O modelo SIS é representativo de uma infecção na qual um indivíduo recuperado não se torna imune à doença, cujo período de incubação é pequeno.

Esse modelo reflete situações geralmente estudadas em controle biológico, como controle por desencadeamento de processos infecciosos ocorrendo naturalmente no campo. Nesse modelo,  $S = S(t)$  são os indivíduos sadios, mas suscetíveis à infecção quando em contato com indivíduos infectados;  $I = I(t)$  são os infectados e, portanto, transmissores da doença;  $P = P(t)$  são os indivíduos com a doença em forma incubada, isto é, são seus portadores, mas ainda não transmissores;  $R = R(t)$  são os indivíduos removidos da categoria doente (mortos, curados);  $N$  = população total (soma dos indivíduos pertencentes às categorias citadas);  $I_0$  = número inicial de indivíduos infectados;  $\alpha$  = taxa de transmissão da infecção;  $\beta$  = taxa de recuperação da infecção.

● modelo SIS contínuo seria representado pelo seguinte sistema de equações diferenciais:

$$dS/dt = -\alpha SI + \beta I$$

$$dI/dt = \alpha SI - \beta I$$

onde:  $S(t) + I(t) = N$ .

O modelo SIS discreto seria apresentado pelo seguinte sistema de equações a diferenças:

$$S(t + 1) - S(t) = -\alpha S(t) I(t) + \beta I(t)$$

$$I(t + 1) - I(t) = \alpha S(t) I(t) - \beta I(t)$$

onde:  $S(t) + I(t) = N$ , qualquer que seja o instante  $t$  de tempo;

No modelo discreto,  $S(t)$  é o número de indivíduos sadios e  $I(t)$ , o número de indivíduos infectados, ambos em cada instante (discreto) de tempo  $t$  de uma população constante  $N$ . Maiores considerações sobre o modelo SIS podem ser encontradas em Bassanezi & Ferreira Junior (1988).

Quando os modelos fazem uso de métodos de aproximação numérica para a obtenção de soluções factíveis, recebem o nome de **modelos matemáticos numéricos**. Sua utilização, em vez dos modelos analíticos, é freqüentemente encontrada em aplicações a problemas envolvendo processos físicos, nas quais o estabelecimento de derivadas e integrais de uma função, representativa do fenômeno que descrevem, torna-se necessário. Entretanto, essa solução analítica é, muitas vezes, difícil de encontrar (inviabilizando a praticidade do cálculo), ou até mesmo impossível de determinar por meio das ferramentas analíticas disponíveis, como freqüentemente ocorre com processos de integração (Dorn & McCracken, 1981; Pessoa & Chaim, 1996b).

O modelo numérico também pode ser conhecido pelo nome do método numérico que utiliza. Um desses métodos é o de integração de Euler, também conhecido por **método retangular**, para integração de equações de primeira ordem, que governam os modelos eulerianos.

O método de Euler é linear, ou de primeira ordem, com erro da ordem de  $(\Delta t)^2$ , onde  $\Delta t$  é o incremento de variação da variável tempo. É muito utilizado devido a sua facilidade de implementação prática. Exemplos de suas aplicações serão citados no item 3.

O método explícito de Adams também é citado como modelo de Adams. Esse método numérico é usado para a integração numérica de equações de ordens maiores (Jorgensen, 1983a). Tais métodos, assim como outros existentes, são empregados em várias linguagens específicas para simulação.

Freqüentemente, a representação de um sistema real se dá através de um conjunto de processos que reproduzem o mecanismo de seu funcionamento. A modelagem matemática desse sistema real poderá, portanto, utilizar mais de uma equação matemática, resolvidas analítica ou numericamente, e que poderão necessitar de ajustes em diversos parâmetros.

Os **modelos compartimentais** (também conhecidos como de **compartimentos** ou “**Cohort**”) são outra categoria amplamente utilizada nos estudos de dinâmica populacional de insetos pragas (Gutierrez et al., 1987; Pessoa, 1994). Representam determinado grupo de estudo em subgrupos (ou compartimentos) que apresentam as mesmas características. Cada compartimento representa um intervalo de tempo de duração constante, onde, ao término do período estabelecido, os elementos passam para o compartimento seguinte, até que seja atingido o último compartimento. O modelo compartimental é representado por um sistema de equações (discretas ou diferenciais) que representa o comportamento da população.

Os **modelos “Lumped”** apresentam os parâmetros definidos em certa posição espacial, ou de tempo, determinadas, consideradas como constantes (Jorgensen, 1983a).

Os **modelos cibernéticos** representam o sistema cibernético, que envolve grande quantidade de elementos interconectados formando uma rede de informações bem completa (Forrester, 1968). Os elementos dessa rede de informação interagem de forma contínua e complexa no tempo, apresentando recursividade. Este processo reflete a dinâmica do sistema e permite o seu controle. Por isso, esses modelos muitas vezes são conhecidos como **modelos de controle** ou **modelos de servo-mecanismos**, podendo representar sistemas vivos, como as células ou organismos multicelulares. Permitem representar, também, os sistemas agregados, como populações de alguns insetos, famílias, ou a sociedade. Além disso, representam dispositivos cibernéticos feitos pelo homem, como os equipamentos automatizados (Engelberg & Boyarsky, 1979).

Alguns modelos são citados como **modelos não pontuais** e **modelos pontuais**, termo esse geralmente associado à fonte de poluição que está sendo modelada. O modelo de poluição pontual é aquele que tem sua fonte localizada: os lixos industriais, esgotos etc. Os modelos de poluição não pontuais apresentam fontes difusas, isto é, com caminhos dispersos, sendo de difícil controle. Neste contexto, a modelagem matemática dessas fontes de poluição auxilia a prever seu comportamento. Tais modelos são comumente encontrados na representação dos processos envolvidos na avaliação do impacto ambiental de agroquímicos em água subterrânea, por exemplo. Outros exemplos são os processos de salinização, contaminações por metais pesados e por nutrientes.

Os modelos matemáticos podem ser classificados, também, como **modelos normativos**. Nesse caso, sua finalidade não é descrever um fenômeno, mas ditar normas relacionadas a ações a serem tomadas, de forma a otimizar um objetivo pré-determinado. Aqui, enquadram-se os modelos matemáticos elaborados para fins de otimização de sistemas, regidos pela pesquisa operacional, área essa que se utiliza de um conjunto de técnicas quantitativas já bem conhecidas, tais como programação linear, programação não linear, programação dinâmica, programação inteira, fluxos em redes (Ehrlich, 1976).

As aplicações práticas de técnicas de pesquisa operacional encontram-se, principalmente, nas áreas de engenharia, economia e administração (Assad, 1986). Como exemplos, cita-se o uso de técnicas de pesquisa operacional no auxílio ao estabelecimento de transmissões mais eficientes de dados via satélite (Young, 1989), ao balanceamento de linhas de produção em fábricas onde existem compartilhamento de máquinas, ao balanceamento de elementos nutricionais em rações animais, ao controle de estoques e de armazenamento de produtos, ao escoamento de produtos, como cana-de-açúcar, por malhas viárias, ao estabelecimento de prioridades de pesquisa (Affin et al., 1992), e ao estabelecimento de custos

ambientais dos efeitos da erosão do solo no processo de geração de energia elétrica (Marques, 1995).

A seguir, é apresentado um exemplo fictício de modelo matemático para balanceamento de rações, utilizando programação linear. Através dessa técnica, é possível tomar decisões diante diversas atividades que competem entre si pelos mesmos recursos disponíveis, satisfazendo a requisitos preestabelecidos.

$$\text{Min } Z = 12,32 x_1 + 13,28 x_2 + 34,12 x_3$$

(função objetivo: minimizar os custos da formulação da ração) sujeito a:

$$12,9 x_1 + 10,6 x_2 + 6,8 x_3 \geq 20 \text{ (restrição de energia: deve ser no mínimo 20);}$$

$$2,5 x_1 + 0,78 x_2 + 45,7 x_3 \geq 9 \text{ (restrição de cálcio: deve ser no mínimo 9);}$$

$$2,9 x_1 + 10,7 x_2 + 6,0 x_3 \geq 9 \text{ (restrição de fósforo: deve ser no mínimo 9);}$$

$$120 x_1 + 76 x_2 + 230 x_3 \geq 150 \text{ (restrição de proteína: deve ser no mínimo 150);}$$

$$x_3 \geq 1,6 \text{ (restrição do valor mínimo da variável } x_3\text{);}$$

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1,56 \text{ (restrição de peso total da mistura);}$$

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0 \text{ (restrição de não negatividade dos valores).}$$

Embora não seja intuito, neste momento, estabelecer maiores considerações quanto a cada um desses modelos, percebe-se claramente que um modelo matemático deve ser elaborado ou utilizado de acordo com objetivos bem definidos. A partir destes, é escolhido o modelo que melhor convier à realidade a ser modelada.

Em termos de suas aplicações práticas, os modelos recebem certas classificações que, embora não sejam geralmente rígidas, são citadas em vários textos. Principalmente para aplicações na área de ecossistemas, os

modelos são identificados como: (a) modelos biodemográficos, (b) modelos bioenergéticos, e (c) modelos biogeoquímicos (Jorgensen, 1983a).

Os **modelos biodemográficos** são aqueles utilizados para a avaliação populacional de espécies e para a obtenção de informações genéticas a elas relacionadas. Geralmente, levam em consideração os ciclos de vida dessas populações, no intuito de determinar a quantidade de indivíduos em cada uma de suas fases.

Os **modelos bioenergéticos** empregam o princípio de conservação de energia para representar o sistema. Estes modelos quantificam a energia utilizada no sistema, através de fluxos de energia.

Os **modelos biogeoquímicos** levam em consideração o princípio de conservação de massa para a definição do sistema; medem ou a massa ou a concentração dos elementos cujos ciclos são apresentados no sistema.

A fim de simplificar, para os usuários, criaram-se grupos mais abrangentes de classificação dos modelos matemáticos e simuladores, levando em conta a quantidade de dados de entrada necessária para atingir seus objetivos principais, a saber: (a) reducionista; (b) de pesquisa e (c) intermediário.

Os **modelos reducionistas**, também conhecidos como “**screening**” ou previsão, fornecem uma avaliação preliminar, utilizando-se apenas das informações mais relevantes à representação do sistema para a análise e apresentando uma saída limitada ao objetivo principal de desenvolvimento do modelo (Jorgensen, 1983a). São muito úteis na simulação de processos localizados, pois restringem muito o enfoque global do sistema. Muitas vezes, são criticados por apresentarem situações extremamente controladas, pouco abrangentes, e por não refletirem o problema real. Entretanto, dependendo do objetivo do estudo onde serão adotados, são de grande valia para o aprofundamento futuro de problemas locais específicos, auxiliando na comparação de alternativas metodológicas a longo prazo.

Os **modelos de pesquisa**, ricos em detalhes, possuem alto número de variáveis interagindo através de suas funções de transferência. Devido a esse grau de complexidade, demandam, na sua fase de elaboração, grande conhecimento do problema real modelado, expressando o conhecimento de várias áreas da ciência envolvidas no problema, de forma a auxiliar na decisão de medidas mais adequadas a serem tomadas diante de um mesmo cenário, além de permitir vislumbrar lacunas na pesquisa básica. Geralmente, inclui vários submodelos representando os processos a simular. Também precisam de grande quantidade de dados de entrada, embora alguns modelos facultem ao usuário a utilização de sub-rotinas específicas, diminuindo, portanto, a quantidade de informações necessárias. Tais modelos são muito úteis quando pesquisas de campo se tornam muito onerosas ou perigosas quanto à realização.

Os **modelos intermediários** pertencem a uma classe existente entre os **preliminares** e os de **pesquisa**. Não contemplam um detalhamento tão minucioso quanto aquele encontrado nos modelos de pesquisa, mas incorporam heurísticas e dados empíricos aos processos complemplados, no intuito de auxiliar na busca de uma previsão mais confiável. Geralmente, suas aplicações são voltadas para planejamento, monitoramento e manejo, tornando a classe conhecida também por esses nomes.

É claro que a disponibilidade de dados de entrada variam de acordo com as pesquisas realizadas em cada país, fazendo com que modelos e simuladores classificados de determinada forma no país de sua elaboração possam pertencer a outra classe quando aplicados a situações encontradas em outro país.

## **2.2. Simulação de sistemas**

Torna-se pertinente destacar que, erroneamente, algumas pessoas utilizam o termo modelagem matemática às situações que envolvem cria-

ção de cenários de simulação de sistemas. Isso se baseia no fato de a simulação envolver várias etapas de planejamento, em que uma delas é a elaboração de modelo matemático, como apresentadas a seguir.

Etapas da simulação de sistemas:

1. Formulação do problema;
2. Coleta e processamento de dados reais (amostragens e coleta de informações na literatura científica);
3. Formulação de um modelo matemático:
  - 3.1. Especificação dos componentes (elementos);
  - 3.2. Especificação das variáveis e dos parâmetros;
  - 3.3. Especificação das relações funcionais;
4. Estimativa de parâmetros para as características operacionais, através de dados reais;
5. Avaliação do modelo;
6. Formulação de um programa de computador;
7. Validação;
8. Projeto de experiências de simulação (cenários);
9. Análise dos dados obtidos na simulação.

Assim, todo simulador, necessariamente, apresenta um ou mais modelos matemáticos, que, depois de testados e ajustados para o problema em estudo, são transcritos para linguagem computacional, juntamente com as rotinas de entrada de dados, que permitirão a criação de cenários a serem simulados, as rotinas de saídas gráficas e as de alternativas de emissão de relatórios, entre outras opções que auxiliam na análise dos resultados pela simulação realizada. Entretanto, um modelo matemático, por si só, não é um simulador, mas a representação de um problema em linguagem matemática.

O sucesso no uso da simulação de sistemas não está ligado somente ao modelo matemático escolhido para representar o fenômeno real, à linguagem computacional que o implementa e ao tempo de processamento (velocidade de execução de procedimentos) e cálculos oferecidos pelo equipamento computacional. Está intimamente ligado também à elaboração de um planejamento estatístico apropriado, tanto nas etapas de desenvolvimento como nas de validação e utilização de modelos matemáticos e de simuladores. Assim, as fases de coleta de dados (amostragens), de estimativa de parâmetros e distribuições de probabilidades das variáveis aleatórias encontradas a partir de dados reais, bem como os testes estatísticos realizados para a calibração e validação dos resultados obtidos pela simulação, devem ser previstos tanto pelos mentores de simuladores como pelos usuários de simulação, com igual importância, a fim de garantir a confiabilidade da execução e dos resultados. Essa prática geralmente é negligenciada ou feita de forma inadequada, comprometendo a confiabilidade dos resultados.

O processo de validação é, muitas vezes, confundido, erroneamente, com um processo de verificação da execução do simulador para dado cenário. O processo de validação dos resultados obtidos por modelos matemáticos e simuladores envolve a comparação de seu desempenho com os dados reais. Nesse contexto, ressalta-se que os dados utilizados para a elaboração do modelo não devem ser os mesmos empregados na validação. Embora essa afirmação seja aparentemente desnecessária, não é pequena a quantidade de trabalhos que caem neste descuido. Uma vez detectadas diferenças significativas no processo de validação, todos os processos de modelagem matemática ocorridos na representação do sistema devem ser reavaliados.

Para simuladores desenvolvidos em outros países, torna-se fundamental a existência do processo de validação, para que se verifique se são representativos para as condições ambientes encontradas em nosso País.

Não basta apenas entrar dados do nosso ambiente e operar o simulador. Existem processos internos, muitas vezes passados ao usuário como uma “caixa-preta” (isto é, sem permitir o conhecimento de operação), e até mesmo suposições básicas admitidas na elaboração e que, quando não seguidas, podem gerar resultados completamente inviáveis ao Brasil. O pior caso seria aquele cujos dados alcançados pelo uso de simuladores elaborados para países temperados não levaram em consideração situações típicas de países tropicais, como a fauna de solo ou condições climáticas brandas no inverno, por exemplo. Desse modo, o processo de validação impõe a cautela necessária à utilização.

A crescente demanda no uso, proposição e validação de modelos matemáticos e simuladores cada vez mais próximos da realidade reside nas vantagens obtidas com o emprego dessas técnicas, a saber: (a) baixo custo; (b) velocidade; (c) completa informação; (d) criação de cenários diversificados e (e) proposição de cenários ideais.

Importante vantagem da utilização de simulação está associada a seu baixo custo. Na maioria das aplicações, o custo de executar um programa computacional é muitas ordens de magnitude menor do que o correspondente custo relativo à investigação experimental. Esse fator adquire maior importância à medida que o problema real estudado apresenta maiores dimensões e complexidade. Acrescente-se, ainda, que, enquanto os custos operacionais relativos à execução de pesquisas de campo encontram-se cada vez mais elevados, os relativos à aquisição de computadores mais velozes, bem como de equipamentos de informática, encontram-se cada vez mais acessíveis economicamente. A vantagem de baixo custo, entretanto, não elimina a necessidade da pesquisa de campo, mas auxilia na realização de experimentos que, certamente, trarão maior quantidade de informações novas e relevantes à pesquisa básica.

Outra vantagem no uso de técnicas de simulação de sistemas é a velocidade. Uma investigação por simulação pode ser realizada em ques-

tão de segundos. Em um estudo sobre a configuração de um sistema radicular e absorção de água, por exemplo, uma gama enorme de configurações pode ser obtida em um único dia de trabalho quando comparado ao tempo necessário para conduzir cenários semelhantes em investigações experimentais.

Além disso, existe a vantagem de obter uma informação completa sobre o sistema simulado. Os simuladores fornecem relatórios com informações detalhadas e abrangentes sobre as atividades desempenhadas pelo sistema durante todo o período simulado, além dos valores assumidos pelas suas variáveis. Essas informações permitem uma visualização total da operação do sistema, evidenciando pontos conflitantes e importantes na condução de novas investigações experimentais.

A possibilidade de criação de cenários, isto é, a simulação de condições diversas, já é bem conhecida. Através dela, é possível investigar cenários alternativos, muitos deles ainda não explorados em experimentos reais.

A simulação também permite acompanhar cenários ideais. Nesse sentido, os cenários chegam a idealizações experimentais que dificilmente seriam obtidas, mesmo em experimentos cuidadosamente planejados. Tais cenários despertam a atenção do pesquisador, concentrando-a em parâmetros mais essenciais ao estudo, e não nos irrelevantes.

É claro que toda técnica não apresenta somente vantagens. Faz-se necessário o conhecimento das suas limitações e dos problemas relativos a essa ferramenta de trabalho, para a realização de trabalhos sérios com base no seu uso. Cabe agora discuti-los.

A necessidade de validação dos modelos e simuladores já existentes pode ser considerada uma desvantagem. Este processo, às vezes, é demorado e requer conhecimento amplo do problema, além da obtenção dos dados em campo. Entretanto, sem a execução dessa etapa, todo o resultado obtido por simulação poderá estar seriamente comprometido, repercutindo na obtenção de tendências equivocadas.

Os modelos analíticos sempre são preferenciais aos numéricos. Aqueles, na maioria das vezes, não apresentam problemas, desde que utilizados dentro das condições impostas a sua elaboração.

Quando o problema em estudo puder admitir mais de uma solução, isto é, apresenta um conjunto de soluções factíveis, fica difícil determinar qual delas seria a mais conveniente.

Não há dúvida de que a experimentação é o melhor método para investigar um fenômeno básico desconhecido. Nesse sentido, a experimentação lidera as ações e a simulação as segue. Entretanto, é no processo de sintetizar as interações entre vários processos conhecidos que a simulação tem seu desempenho mais eficiente. Mesmo assim, suficiente validação dos resultados obtidos por comparação com resultados experimentais é requerida. Por outro lado, a simulação é muito útil como ferramenta auxiliar no dimensionamento de novas linhas de pesquisa, elaboração de novos experimentos, extrapolação de resultados, otimização, estimativa de parâmetros não mensuráveis diretamente, testar hipóteses ou mecanismos etc. Simulações preliminares podem reduzir o número de experimentos.

A escolha dos modelos e simuladores deve basear-se na natureza do problema, nos objetivos da simulação, nos fatores econômicos disponíveis, na disponibilidade de equipamentos, entre outros condicionantes relacionados a cada situação.

### **2.2.1. Linguagens computacionais utilizadas**

Para a elaboração do simulador, é necessário transcrever os modelos matemáticos que descrevem o sistema para linguagens computacionais. Entre as mais utilizadas no desenvolvimento de programas-fontes de vários simuladores encontram-se as seguintes, que fornecem recursos para aplicações, inclusive em simulação: FORTRAN, PASCAL, C e C++.

Graças aos recursos computacionais encontrados nessas linguagens, associados à inteligência e à versatilidade do programador para

utilizá-las, elas permitem maior flexibilidade no que se refere à proposição do programa principal, de sub-rotinas de geração das variáveis exógenas, aleatórias (quando necessárias), de formatos de acesso aos dados de entrada e de saída, nos passos de simulação etc.

Existem, contudo, linguagens computacionais específicas para a simulação de sistemas, como SIMULA, DYNAMO e GPSS (Arthur, 1986). Embora essas linguagens não dêem ao programador muita liberdade, agilizam o tempo de elaboração do programa computacional do simulador. Tal agilidade é decorrente da existência de comandos específicos a cada uma delas, que executam situações comumente encontradas na simulação de sistemas, o que, em outras linguagens, representaria a necessidade de elaboração/utilização de sub-rotinas para desempenhar a mesma função.

Embora não seja objetivo descrever detalhadamente o potencial de tais linguagens, dar-se-á a título de esclarecimento, um breve comentário a respeito de cada uma delas.

As linguagens de programação mais conhecidas são ASSEMBLY, FORTRAN, BASIC, COBOL, ALGOL, PASCAL, C e C++. Embora não sejam específicas para simulação, são usadas pela grande maioria dos profissionais dessa área, por seus recursos computacionais e flexibilidade.

ASSEMBLY é uma linguagem de primeira geração, cujo processamento se dá de forma muito mais rápida, por encontrar-se já em código de máquina, uma representação simbólica do código binário real que o computador executa diretamente. Essa linguagem não é de alto nível. Sendo desestruturada, torna-se muito difícil de trabalhar, dada a dificuldade de desenvolver, encontrar erros, entender versões anteriores e sugerir novas versões na programação.

Antes do aparecimento dos microcomputadores, a linguagem FORTRAN ("FORmula TRANslation"), criada por volta de 1957 pela IBM, era a linguagem de programação oficial dos cientistas e engenheiros, pela precisão numérica fornecida. Ante a facilidade encontrada no seu aprendi-

zado e utilização, essa linguagem de alto nível possui grande gama de aplicações. Neste tipo de programação as diferentes fases envolvidas no processo de desenvolvimento do programa computacional encontram-se documentadas através do próprio código de programação. Sua idéia básica é reduzir a complexidade envolvida no desenvolvimento do programa, permitindo facilitar sua escrita, leitura, verificação, manutenção, modificação e eficiência. Basicamente, é constituída por cinco componentes: constantes, variáveis, variáveis subscritas, expressões e funções. Além do programa principal, possibilita a elaboração de sub-rotinas (ou a utilização das já existentes), se necessário. Geralmente, os compiladores dessa linguagem de segunda geração identificam os erros de escrita de linguagem, mas não os de lógica de programação.

Com a popularização dos microcomputadores, a linguagem BASIC, desenvolvida em meados dos anos 60s pelos professores John Kemeny e Thomas Kurtz, no Dartmouth College, tornou-se bem difundida. Tal fato ocorreu por esta linguagem estar residente no sistema do microcomputador pessoal, evitando a necessidade de comprá-la. Em vista da facilidade de poder contar com um computador portátil, várias pessoas passaram a escrever programas mais complexos nessa linguagem. Surgiram, assim, algumas alterações, a saber: BASIC-PLUS, EXTEND-BASIC, MBASIC, MINIMAL-BASIC, QBASIC (“Quick BASIC”) e BASICA (da IBM).

A linguagem de segunda geração COBOL foi amplamente aplicada a processamento de dados comerciais, por ser autodocumentável, possuir grande capacidade de definição dos dados e ampla faixa de técnicas procedimentais relevantes a aplicações na área comercial.

ALGOL, outra linguagem de segunda geração, tem sua maior aplicação na Europa. Tanto ALGOL-66 quanto ALGOL-68 permitem estrutura de blocos, alocação e armazenamento dinâmico e recursividade. Essa linguagem serviu de base para muitas outras linguagens de programação, como PASCAL.

A linguagem PASCAL foi idealizada por Wirth para ser uma linguagem de programação para estudantes. Entretanto, sua facilidade de programação e recursos fizeram com que se tornasse tão divulgada quanto FORTRAN. É estruturada, sendo tida, portanto, como de alto nível. Possui a estrutura de apontadores, que diminuem a utilização de memória na programação (Wirth, 1976; Naylor et al., 1977; Guimarães & Lages, 1985; Schmitz & Teles, 1986).

A linguagem C foi criada por Dennis Ritchie, com o objetivo inicial de servir para implementar sistemas operacionais, como o UNIX (Kernighan & Ritch, 1990), por exemplo. Ela dá ao programador muito mais flexibilidade que PASCAL e FORTRAN, embora utilize muito menos comandos (28 palavras-chaves). Permite maior conversão e utilização conjunta de tipos, além de uma forma de manipulação direta de “bits”, “bytes”, palavras e ponteiros. Entretanto, por esse mesmo motivo, impõe menos restrição na forma de utilizá-la na programação. Em consequência, é menos rígida na identificação de erros de linguagem e aconselhável para quem já conta com bastante experiência em programação.

Também as linguagens orientadas a objeto vêm ganhando espaço nas aplicações em simulações e em sistemas integrados. As mais conhecidas são: Smalltalk, C++ e Eiffel.

A linguagem SMALLTALK foi desenvolvida em meados de 1970 visando incluir os conceitos da linguagem de programação orientada a objeto. Seu uso, entretanto, é limitado.

A linguagem C++ é derivada da linguagem C, incorporando seus conceitos básicos e adicionando definição e heranças de classes, polimorfismos e abstração de dados, entre outros recursos (Dewhurst & Stark, 1990).

Já a EIFFEL pertence a uma geração mais recente das linguagens orientadas a objeto, apresentando maior robustez e aplicabilidade.

Além dessas linguagens, com o aparecimento de microcomputadores com maior capacidade de memória e recursos, surgiram implementações das linguagens PASCAL e C, inclusive para o ambiente WINDOWS.

Como citado, existem outras linguagens específicas para a simulação de sistemas, como: SIMULA, DYNAMO, GASP, SIMSCRIPT, GPSS, SIMPAC, SIMULATE, GSP, ESP, CSL, MONTECODE e CLP. Embora muitas delas tenham sido elaboradas para uso em computadores de grande porte, ainda são encontrados na literatura programas escritos nessas linguagens. Portanto, será tecido breve comentário a respeito das mais encontradas, deixando a critério do leitor maior aprofundamento ou levantamento das não comentadas neste trabalho.

SIMULA (“SIMUlation LAnguage”) é uma linguagem de alto nível, elaborada para facilitar uma descrição formal das regras de operação de um sistema com eventos discretos (modificações do estado). Nela são apresentados somente os comandos, declarações e opções mais importantes para a simulação desejada. SIMULA trabalha por processos que operam simultaneamente, em um modo denominado “quase-paralelo”. Cada processo realiza uma série de operações agrupadas denominadas “fases ativas” ou “eventos”. Os processos podem pertencer a quatro estados: ativo, suspenso, passivo ou terminado. A descrição do SIMULA é feita com auxílio de uma metalinguagem. Esta linguagem facilita a elaboração de simuladores para sistemas administrativos, sociais e comunicação, entre outros, pois facilitam o processamento das informações (Dahl & Nygaard, 1966).

A linguagem DYNAMO, desenvolvida pelo MIT (Fox & Pugh, citado em Naylor et al., 1977), foi elaborada para a simulação de alguns sistemas dinâmicos retroalimentados, descritos em termos de equações a diferenças finitas. Essa linguagem utiliza equações e instruções como tipos de comandos, sendo as variáveis subclassificadas como: níveis, auxiliares, taxas, suplementares, filas de blocos fechados e iniciais. A linguagem

também possui funções especialmente definidas. O incremento de tempo é fixo, isto é, tem intervalos de tempo iguais. A saída do programa DYNAMO fornece as opções tabular e gráfica ao final de cada iteração.

No GASP - uma linguagem modular desenvolvida em FORTRAN, constituída por 23 sub-rotinas principais e uma de geração de números pseudo-aleatórios e por funções - o modelo é elaborado com base na previsão de eventos, sendo cada um deles considerado como um programa separado. O GASP EXECUTIVE é o programa principal, onde são executados os subprogramas, de forma a refletir a dinâmica do sistema. Por ser escrita em FORTRAN, essa linguagem facilita alterações nas rotinas já existentes, de forma a se adequar às necessidades do novo sistema. Além disso possui recursos para detectar e eliminar erros de programação, bem como para a apresentação de estatísticas nos relatórios de saída (Naylor et al., 1977).

A programação SIMSCRIPT baseia-se nos conceitos de entidade, atributo, conjunto, estado e evento. Sua compilação é um terço do tempo daquela em FORTRAN. Entretanto, já não é tão utilizada quanto no passado (Naylor et al, 1977)

O GPSS ("General Purpose System Simulator") foi desenvolvido no intuito de simplificar as tarefas de elaboração de simuladores de sistemas discretos. Nessa linguagem, o sistema é descrito, inicialmente, por um diagrama de blocos, onde cada bloco é representado por formas diferentes, cujo significado está relacionado a uma operação básica. Cada bloco recebe um número que o identifica e um nome que descreve a ação que executa. Os blocos são conectados de modo a expressar a seqüência de ações. Assim, após um bloco aparecem especificados os números dos blocos para os quais a operação deve seguir. Essa linguagem, cujos componentes principais do sistema são classificados por: transações, facilidade, depósito e fila, dá ênfase ao fluxo de atividades que atuam sobre as entidades temporárias (transações). Cada transação permanece em um bloco por determinado intervalo de tempo até ser liberada para outro bloco.

Esta linguagem também caiu em desuso, com o aumento das capacidades de memória e de aquisição dos microcomputadores (Naylor et al., 1977).

Embora essas linguagens específicas para simulação facilitem sobremaneira a elaboração de simuladores, por incorporar rotinas pré-definidas e algumas facilidades específicas, muitas vezes não fornecem a flexibilidade necessária à simulação de sistemas biológicos e ambientais, nos quais os processos nem sempre se apresentam de forma bem comportada, como numa linha de produção industrial, estando, freqüentemente, sujeitos a alterações provocadas pelas condições do ambiente. Dessa forma, para sistemas biológicos e ambientais mais complexos, geralmente encontram-se simuladores escritos em linguagens de computação tradicionais, como as descritas. Assim, perdendo em recursos específicos às linguagens de simulação, os autores desses simuladores ganharam mais flexibilidade computacional para descrever peculiaridades importantes ao sistema, aproximando-o ainda mais ao sistema real.

Existem, também, linguagens que possuem uma sintática não usual e que, portanto, restringem seus adeptos e sua utilização a áreas específicas do conhecimento, a saber: LISP, PROLOG e APL.

A LISP é muito utilizada em aplicações associadas à resolução de problemas combinatoriais, dada sua facilidade ao processamento de listas e busca em estruturas de árvores. Além disso, a manipulação de símbolos propiciada pela linguagem torna-a aplicada a áreas de matemática pura e de inteligência artificial.

A inteligência artificial (IA) é um conjunto de técnicas que tentam simular o processo básico do aprendizado humano, por meio do qual as novas informações são absorvidas e se tornam rapidamente disponíveis para futura referência (Levine et al., 1988). Desse modo, os programas ditos "inteligentes" tentam reunir, em sua estrutura, elementos básicos do processo de tomada de decisão e aprendizado (Pessoa, 1994). As aplicações das técnicas de IA são encontradas nas áreas de processamento de

linguagem natural, representação do conhecimento, reconhecimento de padrões, controle, robótica, percepção, problemas combinatoriais etc (Nilsson, 1987; Schildt, 1989). Dentro da área de IA, os sistemas especialistas se destacaram substancialmente, apresentando aplicações na agricultura, isoladamente ou acoplado a simuladores e a sistemas de informações geográficas (SIG) (Pessoa et al., 1993; Pessoa, 1994; Fernandes, 1994; Fernandes et al., 1995). O SE contém informações armazenadas em sua base de conhecimentos, sobre determinado domínio do conhecimento, fornecidas por profissional qualificado (especialistas) e que, quando solicitado, analisa os fatos fornecidos, interrogando novas informações ao usuário, se necessário, para auxiliar na tomada de decisões diante do cenário apresentado.

Na área de inteligência artificial, não são raros os sistemas especialistas elaborados em LISP, dado que os recursos de linguagens expostos são extremamente propícios à elaboração da base de conhecimentos e mecanismos de inferências de tais sistemas.

Assim como LISP, a linguagem PROLOG também apresenta recursos atrativos à elaboração de sistemas especialistas, facilitando a representação do conhecimento, tão importante na elaboração das bases de conhecimentos dos sistemas especialistas. Um programa PROLOG consiste em um grupo de cláusulas que representam fatos, regras e inferências. Tanto LISP quanto PROLOG podem ser encontradas em programas que representam sistemas integrados.

APL é uma linguagem puramente simbólica, cuja listagem do programa se apresenta criptografada por símbolos passíveis de interpretação apenas por programadores APL. Cada símbolo apresenta uma série de facilidades operacionais que, na maioria das outras linguagens necessitariam de elaboração de sub-rotinas para obtenção do mesmo resultado. Não é tipicamente utilizada em aplicações à simulação de sistemas, embora existam na literatura citações de seu uso (Godron et al., 1989).

Página em Branco



### **PROBLEMAS DA PESQUISA AGROPECUÁRIA ACOMPANHADOS POR MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO**

Várias áreas do conhecimento integram seus esforços no sentido de diagnosticar, avaliar e monitorar os problemas relacionados às atividades agrícolas. Métodos alternativos são aplicados e gradativamente melhorados, visando obter a maior quantidade de informações fidedignas da situação encontrada no campo, para posterior tentativa de solucioná-las.

Entre os problemas abordados, encontra-se a identificação dos processos envolvidos nas formas alternativas de aplicações de agroquímicos, principalmente a perda por deriva de produto químico aplicado, ocasionando contaminações em locais não alvo e perdas econômicas. Além disso, vários trabalhos mostram indicativos de que extensas áreas de monocultura e formas de controle de pragas e práticas de manejo, como na cultura de arroz, poderiam estar contribuindo ao aumento da emissão de gases metano e dióxido de carbono que afetam a camada de ozônio.

Também com relação à planta cultivada, verificam-se processos relacionados ao monitoramento de pragas (insetos e patógenos), crescimento, produtividade, escoamento superficial e absorção de produtos aplicados para sua manutenção e conservação, bem como alternativas de controle biológico e testes de novos limiares econômicos de danos para diversas culturas. Além desses, a zona de raiz da planta e, conseqüentemente, os processos envolvendo a fauna e o microclima do solo, as zonas vadosa e a de água subterrânea, também são apresentados em níveis de estudo cada vez mais elevados. Aqui são estudados os processos relacionados ao manejo de pragas de solo, aos processos erosivos, a absorção pela raiz, a lixiviação de agroquímicos para camadas mais profundas do

solo, e ao comportamento de metabólitos derivados dos princípios ativos utilizados na formulação de produtos químicos aplicados no solo ou lixiviados da superfície, bem como sua persistência no meio e influência da população do solo (microartrópodes, bactérias) na decomposição desses metabólitos, na fertilidade do solo, na fixação de nitrogênio na raiz da planta.

Estudos contemplando a zona vadosa evidenciam processos existentes nas profundidades do solo, onde ocorre transporte dos agroquímicos que conseguiram persistir aos processos de decomposição na zona de raiz da planta.

Trabalhos relativos à água subterrânea também são citados, nos quais se estudam os processos envolvidos na dinâmica de contaminação de lençóis freáticos, e conseqüente contaminação de rios e mananciais de abastecimento de cidades que deles se utilizam, por agroquímicos aplicados na superfície e/ou no solo.

No que tange ao ambiente aquático, são desenvolvidos estudos da dinâmica populacional de seres aquáticos sensíveis à presença de agroquímicos oriundos de práticas agrícolas instaladas na vizinhança, bem como das alterações verificadas em rios e mananciais, decorrentes da deposição de sedimentos, entre outros fatores de semelhante importância, os quais ocasionam assoreamento e transbordamento.

Constata-se, entretanto, que, embora todos os processos descritos estejam sendo bem embasados cientificamente e, conseqüentemente, bem entendidos pelos profissionais que os vivenciam, nem sempre é fácil encontrar ferramentas que possibilitem integrá-los como um único macroprocesso. Nesse sentido, a utilização de um enfoque sistêmico torna-se fundamental (Csáki, 1985; Dent & Blackie, 1984).

Através da união e interação de uma equipe multidisciplinar, cada um dos processos pode ser descrito pelos especialistas em termos de suas variáveis, seus parâmetros, suas funções de transferência para outros

processos e suas constantes, permitindo a representação sistemática do macroprocesso. A transcrição dessa representação sistêmica para a linguagem matemática facilita a formulação de modelos matemáticos e, por conseguinte, facilita a elaboração de simuladores e de sistemas integrados, permitindo o acompanhamento da dinâmica temporal do macroprocesso em um rico nível de detalhamento.

Embora a maioria dos modelos matemáticos em ampla utilização por profissionais da área de pesquisa agropecuária contemplem, principalmente, os processos de transporte de agroquímicos para camadas mais profundas do solo até águas subterrâneas e a erosão, vem crescendo o aparecimento de novos sistemas que viabilizam o acompanhamento de determinados problemas ambientais, gerados pelas atividades agrícolas, através das zonas ambientais (Fernandes, 1994; Pessoa, 1994).

No sentido de viabilizar a busca de um sistema, de acordo com as necessidades de estudo de cada pesquisador, serão apresentados, a seguir, os principais modelos matemáticos e simuladores referenciados na literatura científica. Juntamente, serão fornecidos resumos dos seus objetivos de desenvolvimento, permitindo que o pesquisador escolha o que melhor convier ao seu trabalho e a uma futura utilização.

### **3.1. Modelos matemáticos e simuladores mais citados na literatura agropecuária**

Através de um levantamento minucioso em bases de dados agropecuários dos últimos cinco anos, possibilitou-se identificar os modelos matemáticos e simuladores mais citados por pesquisadores agropecuários. Uma breve descrição a respeito de seu objetivo e, quando possível, de suas variáveis, é apresentada, juntamente com uma referência a maiores informações, em ordem alfabética de siglas.

### **AGCHEMS (“Agricultural chemical evaluation and management system”)**

**Referência:** Haan et al. (1993).

**Resumo:** este sistema foi desenvolvido para investigar o impacto de agroquímicos nos cenários de manejo, bem como seu movimento em microbacias, integrando um modelo que viabiliza o estudo de transporte de agroquímicos (CMLS), um modelo de simulação de dados climáticos (WGEN) e um sistema de informações geográficas.

### **AGDISP (“Agriculture DISPersion model”)**

**Referência:** Bilanin et al. (1989,1991) Teske et al. (1993).

**Resumo:** modelo matemático de pulverização aérea firmado na descrição do movimento de gotas discretas, é amplamente adotado para avaliar a trajetória de tamanhos de gotas grandes. Leva em consideração os fatores decorrentes das turbulências atmosféricas e de arrasto, da gravidade, dos processos de evaporação e dos sistemas de lançamento da calda. Traça o movimento de grupos de gotas de tamanhos similares, nascidas de bicos de pulverização com locais especificados. As gotas de tamanho similares são combinadas em uma distribuição de tamanhos de gota para gerar a nuvem de gotas pulverizada. A dispersão do grupo de gotas de tamanhos similares, resultantes da flutuação de fluido turbulento, é quantitativamente calculada no arrasto da aeronave, como um grupo de gotas caindo em direção ao solo.

### **CFTIM (“Computer program for calculating non-equilibrium transport parameters from observed column effluent curves”)**

**Referência:** Van Genuchten (1981).

**Resumo:** serve para calcular parâmetros encontrados em modelos de fluxo de transporte, tanto em equilíbrio quanto em não-equilíbrio, através de

colunas de curvas efluentes observadas. Consiste em uma rotina principal e de duas sub-rotinas elaboradas no intuito de calcular as concentrações de saída para cada modelo de transporte escolhido, e a matriz de inversão necessária à análise de mínimos quadrados, a ser utilizada para encontrar os parâmetros desejados. Programa computacional desenvolvido em linguagem FORTRAN.

### **CHEMFLO (“One dimensional water and chemical movement in unsaturated soils”)**

**Referência:** Nofziger et al. (1989).

**Resumo:** modelo interativo usado pela EPA (“Environmental Protection Agency”) USA para simular o fluxo de água e de químicos em solos não saturados e os respectivos processos de transporte associados. Utiliza métodos numéricos (diferenças finitas) para resolver as equações de Richards, usadas para modelar o movimento da água, e a de convecção-dispersão, para simular o transporte de químicos. Apresenta respostas de simulações em formatos gráfico e tabular, sendo suas principais limitações: movimentação unidimensional de químicos e água; não considera fluxo preferencial; assume particionamento de químicos entre as fases sólida e líquida como sendo instantâneo e reversível, e não considera o particionamento e a movimentação de químicos na fase de vapor.

### **CMLS (“Chemical Movement in Layered Soils”)**

**Referência:** Nofziger & Hornsby (1987).

**Resumo:** é uma expansão de um modelo mais simples denominado CMIS (Nofziger & Hornsby, 1985) para o movimento de compostos químicos orgânicos em solo uniforme (homogêneo). É um modelo interativo que estima o local de picos de concentração de compostos químicos orgânicos não polares, assim como seu movimento através do solo em resposta ao

movimento da água para maiores profundidades. Permite estimar a quantidade relativa de cada químico ainda no solo em qualquer instante de tempo (durante a simulação). Trabalha com até 20 camadas ou horizontes de solo, possibilitando que suas propriedades não sejam uniformes para todas as profundidades, além de facultar ao usuário a entrada de coeficientes de partição e especificar o tempo de meia-vida para degradação de químicos de interesse para cada horizonte. As variáveis de solo consideradas para cada horizonte são: (a) profundidade do limiar inferior do horizonte; (b) percentagem de carbono orgânico; (c) densidade aparente; (d) conteúdo de água no potencial mátrico de -0,01 Mpa (-0,1 bar); (e) conteúdo de água no potencial mátrico de -1,5 Mpa (-1,5 bar); (f) conteúdo de água em saturação. As variáveis físico-químicas são o coeficiente de partição normalizada para o conteúdo de carbono orgânico e a meia-vida da degradação. Como variáveis climáticas, considera a precipitação diária efetiva e a evapotranspiração diária. O modelo é constituído basicamente por cinco arquivos: o que contém o programa executável, o de dados de solo, o de produtos químicos, o de dados de precipitação diários e o de dados diários de evapotranspiração. Os resultados podem ser apresentados em forma de tabelas ou gráficos.

## **DRAINMOD**

**Referência:** Skaggs (1978).

**Resumo:** desenvolvido para simular o desempenho dos sistemas de manejo de água na agricultura sob um longo período de dados climatológicos disponíveis (séries temporais), baseia-se na equação de balanço de água para superfície e perfil do solo. Utiliza métodos de aproximação para caracterizar o movimento e o armazenamento de água. O uso desses métodos reduz significativamente o tempo computacional necessário para a simulação de um longo período, quando comparado ao tempo gasto na resolução da equação de Richards por diferenças finitas. Infiltrações no

perfil do solo são simuladas, utilizando-se a equação de Green e Ampt. Utiliza valores de hora em hora para precipitações. A evapotranspiração potencial pode ser fornecida por entrada de dados ou calculada pelo método de Thornthwaite(1948) citado em Skaggs (1978).

### **EPIC (“Erosion productivity impact calculator”)**

**Referência:** Sharpley & Williams (1990).

**Resumo:** baseia-se em componentes físicos (hidrologia, clima, erosão-sedimentação, ciclagem de nutrientes, preparo (cultivo) da área, temperatura do solo) para simular escoamento superficial, erosão, crescimento de plantas e processos relacionados. Basicamente, o componente erosão-hidrologia incorpora um fator de energia de escoamento e a equação universal de perda de solo modificada (“MUSLE”), para simular o escoamento superficial e alterações de sedimentos. Este modelo é capaz de auxiliar nas decisões envolvendo drenagem, irrigação, controle de erosão, clima, fertilizantes, manejo de resíduos culturais, controle de pragas, datas alternativas de plantio, etc. Permite análise de sensibilidade para determinar a importância das variáveis experimentais e suas interações. Pode trabalhar até com dez camadas de solo, na vertical; considera a área de drenagem de aproximadamente 1 ha e possui componentes econômicos para avaliar custos da erosão e determinar estratégias ótimas de manejo.

### **FESHM (“Finite element storm hydrograph model”)**

**Referência:** Ross et al. (1979).

**Resumo:** este modelo divide a área total de microbacias complexas em unidades menores, menos complexas, de forma a permitir uma análise mais detalhada. Posteriormente, os resultados obtidos para cada unidade são combinados de forma a simular a resposta da área da microbacia como um todo. Inclui três submodelos distintos e dois esquemas de discretização: um deles foi elaborado para calcular a taxa de infiltração e o excesso de

chuva; outro mapeia o excesso gerado através do fluxo plano e da rede de canais, e o último apresenta cálculos de sedimentos no campo. A primeira técnica de discretização disponível no modelo fornece uma descrição da variação da capacidade de infiltração através da microbacia, dividindo-a em unidades de respostas hidrológicas (HDU), que possuem características próprias de uso da terra, solo homogêneo e uniforme e resposta à entrada de precipitações, para o cálculo do seu excesso. A segunda técnica de discretização considera a variação de drenagem e características topográficas presentes na microbacia. Dependendo da complexidade da microbacia e da disponibilidade de resolução dos dados, permitem-se diferentes níveis de discretização. Este método consiste no particionamento da microbacia em submicrobacias definidas pelos principais afluentes da rede de drenagem. Cada submicrobacia é discretizada em fluxo de cobertura descoberta com a drenagem para o canal. O fluxo descoberto pode ser posteriormente dividido em elementos de fluxo de cobertura seqüencial. O resultado é uma estrutura de malha de elementos finitos. O objetivo da discretização é estabelecer o fluxo de rotas através da microbacia, cujo acompanhamento se dá através da resolução da equação de St. Venant por procedimento numérico de elementos finitos.

### **FSCBG (“Forestry service, cramer, barry, grim model)**

**Referência:** Teske et al. (1993).

**Resumo:** simulador elaborado para avaliar a dispersão de gotas de agroquímicos pulverizados, incorpora efeitos de evaporação para componentes voláteis da calda, de sedimentação, de interceptação com a cobertura vegetal de florestas e de dispersão (analítica) para múltiplas fontes lineares orientadas na direção do vento. Tem como entrada de dados: condições meteorológicas, detalhes da aeronave, especificações dos bicos de pulverização, informações sobre a calda pulverizada, características da cobertura vegetal e cenário de caminho do voo da aeronave.

### **GAPS (“General-purpose atmosphere-plant-soil system”)**

**Referência:** Riha et al. (1994).

**Resumo:** este modelo, desenvolvido para fins de pesquisa, serve especialmente para o ensino dos princípios e práticas de simulação dinâmica, modelando o sistema atmosfera-planta-solo. Representa os processos do solo, da planta e da atmosfera de vários modos, em que cada representação pode ser selecionada independentemente das outras, sujeita a alguma limitação. Desse modo, o usuário do modelo pode comparar o efeito de diferentes formas de simular o mesmo fenômeno. O programa permite a apresentação de gráficos durante e ao término da simulação. Além disso, simula uma seqüência de culturas e climas em uma única execução.

### **GLEAMS (“Groundwater loading effects of agricultural management Systems”)**

**Referência:** Leonard et al. (1987).

**Resumo:** modelo desenvolvido pelo ARS-USDA (“Agricultural Research Service - United States Department of Agriculture”), fundamenta-se em processo criado a partir do CREAMS (módulos de hidrologia e erosão), diferenciando-se na incorporação de aperfeiçoamento nos subsistemas de pesticidas e nutrientes. Visa calcular os efeitos dos sistemas de manejo agrícola no movimento de agroquímicos dentro e através da zona de raiz da planta, apresentando: (a) **componente hidrológico:** simula a infiltração de água no solo e o movimento vertical do soluto através das camadas do solo; (b) **componente de erosão do solo:** estima a perda de solo por tamanho de partícula e inclui agrotóxicos absorvidos pela argila e por partículas de matéria orgânica e (c) **processos agroquímicos:** degradação, extração na superfície de escoamento, absorção por partículas de solo erodido e movimento da água através do perfil. Para os Estados Unidos, os dados de entrada, em sua maioria, encontram-se disponíveis na literatura (manuais, mapas ou pesquisas em solo). São eles: (a) **para cada tipo de solo:**

número de horizontes, profundidade da raiz, curva-número, condutividade saturada; (b) **propriedades do solo**: profundidade, porosidade, capacidade de campo, ponto de murcha e percentagem de matéria orgânica e (c) **características do inseticida**: solubilidade em água, coeficiente de adsorção para o carbono orgânico, meia-vida foliar, meia-vida no solo, fração de remoção por lavagem da folha ("washoff"), e taxa de aplicação. A versão 1.8.55 inclui a opção de vegetação de floresta. Os dados resultantes da simulação são: (a) **saída hidrológica**: total de precipitação, precipitação líquida, superfície de escoamento superficial, evapotranspiração total, percolação, conteúdo médio de água no solo e (b) **saída do agroquímico**: perda de massa, percentagem de aplicação no fluxo de escoamento superficial, absorvido pelo sedimento, percolação abaixo da zona de raiz, concentrações aplicadas no fluxo de escoamento superficial e lixiviação. O código-fonte do programa foi desenvolvido em FORTRAN.

### **LEACHM ("Leaching estimation and chemistry model")**

**Referência:** Wagenet & Hutson (1989).

**Resumo:** modelo determinístico do movimento e fluxo de água e solutos no solo, com respeito a condições específicas de fatores de textura do solo e clima, utiliza equações de balanço de massa para descrever os processos de transporte e as transformações que ocorrem na região não saturada. Simula os processos de armazenamento, transporte e transformação dos pesticidas no solo e permite contabilizar seus vários componentes e processos: volatilização, deposição de sedimentos, escoamento superficial, transporte e armazenamento para zona não saturada, concentrações de pesticidas e sua localização em função do tempo para o perfil vertical do solo considerado.

Obs.: Considera parâmetros de solo não necessariamente tropicais. Dado que características específicas dos solos tropicais desempenham um papel

relevante no balanço de massa, existe a necessidade de sua validação nas condições brasileiras.

### **MAGIC (“Modelling acidification of groundwater in catchment”)**

**Referência:** Cosby et al. (1985 a,b).

**Resumo:** utilizado para analisar a acidificação em águas subterrâneas, permite a identificação de fatores que afetam a acidificação: retenção de ânions pelos solos da microbacia, adsorção e alterações nos cátions base e Al pelos solos, alterações de íons H para cátions base etc. O modelo numérico é integrado com parâmetros baseados em processo. Pode ser usado tanto no estado estacionário como dinâmico (projeções para cenários específicos). Necessita, como entrada de dados, a quantidade de produção de ácido decorrente da nitrificação, fornece predição da concentração de cátion base e suas tendências temporais, e assume reações instantâneas através do perfil do solo. Foi desenvolvido para avaliar efeitos geoquímicos de mineral em meio aquoso, alterações de cátions no solo, absorção de ânions, caminhos de fluxos hidrológicos solo-água. Uma vez calibrado, pode-se usá-lo para simular alterações na química do solo e da água, ao longo do tempo, sob diferentes cenários de futuras deposições de  $\text{SO}_4$  (forma de operação conhecida por “dynamic MAGIC”). Possibilita determinar compostos químicos na água e no solo que serão atingidos no estado estacionário do sistema (forma de operação conhecida por “steady state MAGIC”).

### **MILLER spray model**

**Referência:** Miller (1980).

**Resumo:** modelo bidimensional, é usado para avaliar a dispersão de agroquímicos pulverizados por aviões, helicópteros e equipamentos de pulverização no solo. Não leva em consideração fatores de evaporação da

gota do produto pulverizado. As funções de distribuição do tamanho das gotas encontradas na saída do bico de pulverização são calculadas com base na medida do padrão de deposição do produto.

### **NLEAP (“Nitrate leaching and economic analysis package”)**

**Referência:** Shaffer et al. (1991 a,b).

**Resumo:** modelo preditivo usado no manejo de fertilizantes, requer poucos dados. Foi desenvolvido pelo ARS-USDA, para ser usado sob condições de solo, clima e manejo, de forma a identificar concentrações de nitrato lixiviado, bem como sugerir técnicas no intuito de minimizar a lixiviação do nitrato para águas subterrâneas. Para estimar a quantidade de nitrato, utiliza as quantidades de nitrogênio adicionadas à cultura por água de chuva ou irrigação, produzida por decomposição da matéria orgânica do solo, usada na cultura, perdida por escoamento ou atividade biológica, ou ainda disponível no solo. O modelo também fornece informações para auxiliar o usuário a interpretar seus dados de saída.

### **NTRM-MS (“Nitrogen-tillage-residue-management model - multiple species competition”)**

**Referência:** Balls & Shaffer (1993).

**Resumo:** expansão do modelo NTRM, foi elaborado visando permitir simular o desenvolvimento natural de várias espécies de plantas crescendo juntas em uma comunidade de plantas agrícolas, em campo limitado. É capaz de prever o desenvolvimento de área foliar em áreas irrigadas/não irrigadas e sob condições de uso/não-uso de fertilizantes nitrogenados. Além disso, permite a simulação de interações competitivas entre componentes das espécies das plantas, por densidade média diária do fluxo de luz unidirecional, cobertura vegetal e zona de raiz.

## **PICOT**

**Referência:** Basak & Picot (1984).

**Resumo:** este simulador lagrangeano, empregado para avaliar a dispersão e a deposição de agroquímicos em florestas, foi elaborado levando em consideração a influência de turbulências atmosféricas, deposição gravitacional, tipo de pulverizador, processos de evaporação de gotas e cobertura vegetal. Limita os efeitos de arrasto.

## **PLUME**

**Referência:** Wagner et al. (1984 a,b).

**Resumo:** esse modelo, cujo código fonte é apresentado em linguagem FORTRAN, encontra-se em versões de plumas bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), na presença de fluxo uniforme de água subterrânea. Ambas as versões consideram o fluxo de água subterrânea horizontal, contínuo, uniforme, através do aquífero e com regime saturado. O modelo assume que todas as propriedades do aquífero são constantes e uniformes para todo o aquífero, e que ele é infinito em extensão. A taxa de entrada do fluxo de massa do produto químico é constante e o modelo fornece informações sobre suas distribuições espacial e temporal.

## **PREFLO (“Preferential flow model”)**

**Referência:** Workman & Skaggs (1990).

**Resumo:** firmado na solução da equação de Richards, de 1931, por diferença finita unidimensional, através de dados do conteúdo de água no solo e da condutividade hidráulica, medidos ou estimados, simula infiltração, drenagem, escoamento superficial e evaporação. É sensível a alterações relativas ao conteúdo de água saturada estimada pela textura do solo. Utiliza dados climáticos, da cultura e do solo para prever o armazenamento

de água no solo e o movimento acima do lençol freático. A equação de balanço de massa de água no perfil do solo é resolvida por diferenças finitas, com espaçamento não uniforme dos pontos nodais, de forma a permitir a modelagem das camadas de solo. Requer como dados de entrada o conteúdo de água no solo e a condutividade hidráulica para cada camada do perfil. Valores de hora em hora ou diários de pluviosidade são usados no modelo para simular os efeitos de pequenas chuvas ou alta intensidade de temporais, que podem causar escoamento superficial e o movimento de água ao longo de fluxos preferenciais encontrados no solo. O modelo permite também estimar drenagens.

### **PRZM (“Pesticide root zone model”)**

**Referência:** Carsel et al. (1985).

**Resumo:** modelo unidimensional, dinâmico e compartimental, desenvolvido pela EPA para calcular respostas de pesticidas na zona de raiz é usado para simular a movimentação de produtos químicos em sistemas de solo não saturado e imediatamente abaixo da zona de raiz da planta. Possui dois componentes principais: hidrológico (e hidráulico) e transporte químico. O **hidrológico** calcula o escoamento superficial e a erosão, com base na “Universal Soil Loss Equation” (USLE). O movimento da água no solo é simulado por parâmetros gerais do solo, incluindo capacidade de campo, ponto de murcha e conteúdo de água saturada. O componente de **transporte químico** permite simular a aplicação de agroquímicos no solo ou nas folhas das plantas. Possui um módulo de biodegradação possibilitando avaliar o efeito de populações metabolizadoras e co-metabolizadoras na decomposição do produto químico e seus derivados. Suas limitações se encontram nos módulos de hidrologia e hidráulica de solo, no método utilizado na solução da equação de transporte e na sua natureza determinística.

## **PRZM-2 ("Pesticide root zone model" - versão 2)**

**Referência:** US-EPA (1994).

**Resumo:** modelo determinístico contemplando as zonas de raiz e vadosa. Capaz de simular a influência de vários agroquímicos e seus metabólitos, bem como de estimar probabilidades de concentrações ou fluxos de entrada e saída, com o propósito de avaliar a exposição a agroquímicos. Simula o transporte e as transformações sofridas pelos pesticidas aplicados no campo, na zona de raiz e abaixo da zona não saturada, considerando os efeitos das práticas agrícolas de manejo. Fornece uma probabilidade da concentração exposta, levando em conta a variabilidade do sistema natural e a incerteza nas propriedades e processos do sistema. Possui três rotinas principais: PRZM, VADOFT e MCARLO. Utiliza o PRZM (Carsel et al., 1985) para simular a zona de raiz, o VADOFT, para simular o fluxo e o transporte na zona vadosa. Nesta rotina, o processo de transporte leva em consideração a dispersão hidráulica, a infiltração e a taxa de recarga, o fluxo de massa do soluto entrando na zona saturada, a advecção unidimensional, absorção, dispersão unidimensional e decaimento de primeira ordem. Usa curvas características de água no solo baseadas na sua textura. Assume que as propriedades do fluido são independentes de concentrações contaminantes e supõe que o fluxo de fase do fluido é unidimensional, isotermal e governado pela lei de Darcy. Não assume efeitos de histerese. Permite simulações diárias e relatório de saída com opções diária, mensal e anual. Ignorar a presença de uma segunda fase de fluxo (ar). Não simula fluxo ou transporte em solos de média porosidade fraturada ou solos estruturados. O fluxo de água diária da rotina PRZM é usado como entrada da VADOFT. O módulo de simulação de Monte Carlo (MCARLO) lê os dados utilizados como parâmetros (tipos de distribuições e momentos) e como variáveis de saída a serem observadas, efetuando a geração de números aleatórios, correlacionando-os e efetuando as transformações funcionais. Fornece valores gerados como parâmetros para o módulo

PRZM-2 e desempenha análises estatísticas das variáveis de saída, assim como emite resumos das análises obtidas.

### **RUSLE (“Revised USLE”)**

**Referência:** Renard et al. (1991).

**Resumo:** este modelo utiliza os seis fatores da USLE (que incluem dados climáticos, dados de lavoura e dados de operações de campo), diferenciando as equações usadas para produzir os fatores. Nele, o fator R representa o direcionamento forçado de erosão ribeirinha (as diferenças no R correspondem a variações na erosividade do clima). O fator K é um indicador de erodibilidade inerente ao solo e é estimado em função da chuva; o fator C representa, as condições que podem ser modificadas por manejo (cobertura de manejo), para reduzir a erosão; o fator P representa, como as condições de superfície afetam os fluxos de caminho e hidráulico (práticas agrícolas), e o fator L diz respeito, a topografia. O modelo é útil para auxiliar na tomada de decisões de manejo de campo que afetam perdas de solo, fornecendo a perda total, em tonelada por hectare, encontrada no final do período estipulado.

### **RZWQM (“Root zone water quality model”)**

**Referência:** Decoursey & Rojas (1990).

**Resumo:** modelo de pesquisa desenvolvido pelo ARS-USDA, exige grande nível de detalhamento para simular o movimento de água e soluto em cada camada do perfil do solo. Inclui fluxo em poros largos e a descrição de todas as formas de perdas de pesticidas ou alterações do solo. O ciclo de nitrogênio é simulado no solo usando níveis de umidade, temperatura, população de bactérias, grau de acidez, quantidade e qualidade de matéria orgânica. Inclui um submodelo de crescimento da planta, o qual simula seu crescimento vegetativo da superfície até a zona de raiz, além da produção

de grãos. Inclui, também, as propriedades físicas do solo. É mais utilizado em pesquisa, em vista de sua rica descrição dos processos envolvidos.

### **SPISP (“Soil pesticide interaction screening procedure”)**

**Referência:** Goss & Wauchope (1991).

**Resumo:** modelo preditivo elaborado para calcular a perda relativa de pesticidas do solo. Desenvolvido pelo SCS/USDA (“Soil Conservation Service/United States Department of Agricultural”), estima a perda de pesticidas por escoamento superficial, partículas de solo erodido e carregamento de água para a zona abaixo da raiz da planta. Este programa auxilia o usuário na interpretação das perdas. Como entrada de dados, necessita de informações a respeito das propriedades físicas e hidráulicas do solo, profundidade de mananciais, pluviosidade e característica dos produtos químicos a serem analisados.

### **USLE (“Universal soil loss equation”)**

**Referência:** Wischmeier & Smith, (1978).

**Resumo:** a modelagem de qualidade de água geralmente requer estimativas da quantidade de material erodido que cai nos cursos d’água. Esta informação é necessária porque os sedimentos freqüentemente transportam produtos químicos adsorvidos. A USLE, usada pela maioria desses modelos, leva em consideração os seguintes fatores: chuva (erosividade - R); solo (erodibilidade - K); comprimento da rampa (L); grau de declividade (S); uso e manejo (C); e as práticas conservacionistas (P). Essa equação fornece o total de erosão em tonelada/hectare, para o período total escolhido para simulação. Apresenta algumas limitações em alguns tipos de uso e manejo utilizados para solos brasileiros, cujas adaptações e dados já estão sendo estudados por algumas instituições.

**WEPP (“Water erosion prediction project”)**

**Referência:** Foster & Lane (1987).

**Resumo:** utilizado para avaliação e planejamento de conservação de água e solo, este modelo requer quatro arquivos de entrada de dados, descrevendo declividade, clima, solo e manejo da área a ser modelada. Possui sub-rotinas para simular o crescimento da planta e a decomposição de culturas agrícolas, bem como de culturas marginais. O modelo de crescimento da planta estima alterações temporais na planta, tanto para culturas perenes como anuais, usando funções de crescimento com base no crescimento em graus-dias. Assume o ciclo da cultura de julho a dezembro, diferente do período de cultivo no Brasil.

**WEPP (“Water erosion prediction project” - watershed model)**

**Referência:** Lane & Nearing (1989).

**Resumo:** modelo para predição de erosão e hidrologia em área de microbacias, foi desenvolvido para prever os impactos dos diferentes usos da terra, na erosão de solo resultante de práticas de manejo aplicadas às terras cultivadas e florestas. Esta versão foi elaborada considerando variações espaço-temporais dos processos erosivos, tanto nos sistemas de canal como em declividades montanhosas. O componente de canal do WEPP foi elaborado a partir de modificações do modelo CREAMS. Existem duas opções para estimar o pico de descarga na microbacia: uma delas é baseada no CREAMS e permite estudar os efeitos na declividade do canal para prever o pico de descarga, a outra forma, baseia-se no modelo SPUR (Wight & Skiles, 1987).

**WORM (“Water and solute movement in the root zone”)**

**Referência:** Van Genuchten (1987).

**Resumo:** este modelo, desenvolvido em linguagem de programação FORTRAN-77, simula o fluxo de água e o transporte de solutos em um perfil de solo unidimensional, não homogêneo e cultivado. O objetivo inicial de seu desenvolvimento foi o estudo da movimentação de água e sal através das zonas de raiz e vadosa de um solo agrícola irrigado e altamente afetado pela presença de sal. Posteriormente, possibilitou-se utilizá-lo para avaliar o transporte de agroquímicos incluindo equações de adsorção e representação dos processos envolvidos.

### **3.2. Outros modelos citados**

#### **ACTMO (“Agricultural chemical transport model”)**

**Referência:** Frere et al. (1975).

**Resumo:** desenvolvido para estimar escoamento superficial através do “USDA Hydrograph Laboratory Model” (Holtan & Lopez, 1971), transporte de sedimentos com base na USLE e transporte de agroquímicos em campos situados em áreas de bacias. Não necessita dados históricos para calibrações.

#### **ADOM**

**Referência:** Shim (1993).

**Resumo:** fornece a quantidade de deposição sedimentar ácida utilizada na entrada de dados de vários modelos aquáticos, como ETD, MAGIC e ILWAS.

#### **AGNPS (“Agricultural non-point source pollution model”)**

**Referência:** Young et al. (1987).

**Resumo:** desenvolvido pelo ARS-USDA, para avaliar áreas de microbacias agrícolas sujeitas a poluições de fontes não pontuais.

**ANSWERS (“Aerial non-point source watershed environment response simulation”)**

**Referência:** Beasley et al. (1979,1980).

**Resumo:** simula o movimento de poluentes em pequenas microbacias. Prevê taxas de escoamento superficial e transporte de sedimentos para microbacias.

**BAM (“Behavior assessment model”)**

**Referência:** Jury et al. (1983).

**Resumo:** modelo determinístico elaborado para a previsão da vulnerabilidade do solo à lixiviação de agroquímicos para água subterrânea.

**CFEST (“Coupled fluid , energy and solute transport”)**

**Referência:** Gupta et al. (1982).

**Resumo:** modelo tridimensional, baseado em elementos finitos, elaborado para analisar a união de fluídos, energia e transporte de solutos, é muito utilizado na avaliação de impacto de agroquímicos em água subterrânea. Simula o impacto de fatores, tais como tamanho (área) da fonte, distância da fonte à bacia, movimentação de agroquímicos de acordo com tipos de solo e condições climáticas, na concentração de resíduos desses produtos encontrados em águas subterrâneas.

**CMIS (“Chemical movement in soils”)**

**Referência:** Nofziger & Hornsby (1985).

**Resumo:** modelo simples elaborado para avaliar o movimento de compostos químicos orgânicos em solos homogêneos, a partir do qual foi construído o CMLS, mais usado e difundido atualmente.

### **CREAMS (“Chemical, runoff and erosion from agricultural management systems”)**

**Referência:** Knisel (1980).

**Resumo:** com ampla aplicação em problemas relacionados ao manejo agrícola, modela a trajetória de químicos através de escoamento superficial e da erosão de partículas de solo, mas não fornece a rota dos compostos químicos através do perfil do solo para determinar seu carregamento potencial para águas subterrâneas.

### **EPIC-PST (“EPIC with pesticides activities”)**

**Referência:** Sabbagh et al. (1991).

**Resumo:** este modelo permite simular os efeitos de diferentes práticas de manejo agrícola e as perdas de agroquímicos ocorridas por escoamento superficial, movimentação de sedimentos e lixiviação abaixo da zona de raiz. Permite, ainda, estimar a percolação anual de nitrogênio em vários tipos de solo, sistemas de irrigação e diferentes taxas de aplicações. Foi elaborado a partir do modelo EPIC, integrando as sub-rotinas de agroquímicos utilizadas pelo modelo GLEAMS.

### **EXACT**

**Referência:** Van Genuchten (1981).

**Resumo:** calcula uma solução analítica geral para uma equação de transporte unidimensional de soluto, aplicáveis a meios semi-infinitos, com produção de ordem zero e decaimento de primeira ordem. As condições iniciais e de limites podem ser função constante ou exponencial no tempo (concentração de entrada), assim como funções da distância (condição inicial) ou “step-type”. O programa computacional, escrito em linguagem FORTRAN-77, calcula tanto o volume médio (residente) quanto as concentrações de fluxos médios.

**GCM (“Global climate model”)**

**Referência:** Decoursey (1991).

**Resumo:** usado para prever alterações na temperatura da Terra e nas precipitações, bem como níveis de indicadores de gases que influenciam no chamado efeito estufa: dióxido de carbono e metano.

**GUS (“Groundwater ubiquity score”)**

**Referência:** Gustafson (1989).

**Resumo:** também conhecido pelo nome de “índice de GUS”, é um modelo do tipo “screening”, ou seja, reducionista. Foi desenvolvido para fornecer uma avaliação do potencial do agroquímico na contaminação de águas subterrâneas. Para o cálculo do índice, são necessárias informações sobre o coeficiente de adsorção do produto e sua respectiva meia-vida. Este modelo fornece uma informação qualitativa do potencial de contaminação, mas não estima quantitativamente o risco de contaminação relativo.

**HSPF (“Hydrologic simulation program Fortran”)**

**Referências:** Donigian et al. (1983); Johanson et al. (1984).

**Resumo:** modelo hidrológico, desenvolvido inicialmente pela EPA para simular processos de qualidade de água, agroquímicos e comportamento de nutrientes no solo e corpos d’água, bem como transporte de sedimentos contaminantes. Apresentado em linguagem de programação FORTRAN, necessita de grande quantidade de dados para calibração.

**MOSS (“Modification of the steady state method”)**

**Referência:** Shaffer et al. (1991).

**Resumo:** modelo empírico que incorpora diferentes suposições sobre a resposta de águas superficiais a alterações de decomposição.

**MUSLE (“Modified USLE”)**

**Referências:** Williams (1975), Chaves (1991).

**Resumo:** Este modelo é derivado da USLE, alterando os fatores K (erodibilidade) e C (uso e manejo). Leva em consideração o volume e o pico da enxurrada e apresenta a quantidade de sedimentos perdidos em eventos individuais (diferenciando-a da USLE e da RUSLE).

**NTRM (“Nitrogen - tillage - residue - management model”)**

**Referência:** Radke et al. (1991).

**Resumo:** foi elaborado para estimar perdas de nitrogênio decorrentes de práticas agrícolas, das condições climáticas e do solo.

**PESTAN (“Pesticide analytical solution”)**

**Referência:** Enfield et al. (1982).

**Resumo:** este modelo, do tipo “screening”, foi elaborado com base na equação de fluxo de água no estado estacionário, assumindo fluxo de água em apenas uma direção em um perfil de solo uniforme.

**PRMS (“Precipitation run-off modelling system”)**

**Referência:** Leavesley et al. (1983).

**Resumo:** modelo desenvolvido pela “United States Geological Survey Water Resources Investigations”, inicialmente para ser um modelo hidrológico.

**PRT (“Pesticide Runoff Transport”)**

**Referência:** Crawford & Donigian (1973).

**Resumo:** simulador com baseado em modelos matemáticos contínuos que estimam o escoamento superficial (“run-off”), a erosão e as perdas de

agroquímicos. Utiliza o “Stanford Watershed Model” (Crawford & Linsley, 1966) para simular a parte hidrológica.

### **QSAR (“Quantitative structure-activity relationships”)**

**Referência:** Fiedler et al. (1990).

**Resumo:** modelo de particionamento do carbono orgânico, permite a previsão do potencial de toxicidade aquática decorrente da utilização de agroquímicos organoclorados e, conseqüentemente, os danos causados aos organismos aquáticos a eles sujeitos. Tem, como entrada, dados físico-químicos da molécula em estudo.

### **RADM**

**Referência:** Shim (1993).

**Resumo:** modelo euleriano de deposição de ácido, fornece a quantidade de deposição utilizada como entrada de dados de vários modelos aquáticos (ETD, MAGIC, ILWAS).

### **RETC**

**Referência:** Yates et al. (1992).

**Resumo:** desenvolvido em FORTRAN-77, para analisar a retenção de água observada no solo e a condutividade hidráulica não saturada ou difusividade.

### **SAFE**

**Referência:** Jack (1993).

**Resumo:** modela a acidificação em água subterrânea e permite examinar as relações entre água subterrânea e acidificação de águas superficiais.

**SESOIL (“Seasonal soil compartment model”)**

**Referência:** Bonazountas & Wagner (1984).

**Resumo:** modelo compartimental utilizado para manejo.

**SSWC (“Steady-state water chemistry”)**

**Referências:** Henriksen (1979); Brakke et al. (1990).

**Resumo:** usado para estimar alterações na capacidade de neutralização de ácidos na superfície da água, em função das alterações nas concentrações de ânion livre ( $\text{SO}_4$ ).

**STEM-II**

**Referência:** Shim (1993).

**Resumo:** modelo euleriano de deposição de ácido. Assim como o RADM, o STEM-II fornece a entrada de dados de vários modelos aquáticos (ETD, MAGIC, ILWAS), no que se refere à quantidade de deposição de ácido.

**SWAG (“Simulated waste access to groundwater”)**

**Referência:** Enfield et al. (1986).

**Resumo:** modelo compartimental unidimensional desenvolvido para descrever o movimento de produtos químicos orgânicos em sistemas de tratamento de esgotos. O modelo assume que o volume do fluxo de infiltração na bacia passa todo através do perfil do solo para a água subterrânea. A precipitação é assumida igual à quantidade de evapotranspiração e não existindo influência de escoamento superficial. É usado para tratamento de dejetos onde há grande quantidade de água gerando recarga.

**SWAM (“Small watershed agricultural model”)**

**Referências:** Decoursey (1982); Schreiber (1990).

**Resumo:** usado para avaliar o movimento de compostos químicos e sedimentos em água, adota conceitos similares ao CREAMS.

**SWATRE (“Simulation model for water transport effect”)**

**Referência:** Belmans et al. (1983).

**Resumo:** modelo baseado na resolução da equação de Richards por diferenças finitas, utiliza dados de solo, clima e da cultura para prever o armazenamento e o movimento de água no solo acima do lençol freático.

**SWRRB (“Simulator for water resources in rural basins”)**

**Referência:** Williams et al. (1985).

**Resumo:** simulador baseado nos princípios do “Pesticide Runoff Simulator” (Computer Sciences Corp., 1980), com seus submodelos de hidrologia e de transportes de sedimento/erosão adaptados daqueles apresentados inicialmente. Também é similar ao CREAMS.

**VULPEST (“Vulnerability pesticide model”)**

**Referência:** Villeneuve et al. (1990).

**Resumo:** avalia, probabilisticamente, a vulnerabilidade de áreas de microbacias sujeitas a contaminações por produtos agroquímicos.

**WGEN (“Weather generator computer simulation model”)**

**Referência:** Richardson (1989).

**Resumo:** modelo de geração de variáveis climáticas diárias.

## **4** COMENTÁRIOS FINAIS

A preocupação com o desenvolvimento e a utilização de métodos de análise de impactos ambientais fez crescer a necessidade de uma visão holística do ambiente, mais abrangente que as já apresentadas e, portanto, contempladoras das interações entre os processos e sua sensibilidade a alterações provocadas.

Tal fato se constatou também na pesquisa agropecuária, em que os impactos ambientais decorrentes de atividades agropecuárias começaram a ser vislumbrados de forma mais criteriosa.

Técnicos de diversas áreas do conhecimento passaram a integrar equipes multidisciplinares, identificando processos ainda não incluídos em estudos anteriores e chamando a atenção a fatos ainda não explorados.

Como resultado dessas atividades, tornou-se mais crescente, na literatura científica, o aparecimento de modelos matemáticos que, certamente, contribuíram para a elaboração de simuladores cada vez mais próximos da realidade em estudo.

Através dessa ferramenta, permitiu-se um acompanhamento mais detalhado da dinâmica dos principais processos causadores de impactos ambientais na agricultura, bem como da sensibilidade de algumas variáveis dos processos sujeitas a alterações, ainda não evidenciadas em teste experimentais. A partir desses cenários, reduziram-se os custos experimentais e encontraram-se lacunas na pesquisa básica que impediam novas inferências.

Diante dos melhores resultados obtidos entre a combinação de pesquisa básica, de simuladores apoiados em modelos matemáticos mais fidedignos da realidade de campo e de equipamento computacional de baixo custo e de maior rapidez no processamento das informações, houve uma rápida ascensão na divulgação da aplicação dessas técnicas.

Entretanto, algumas etapas importantes no uso de simuladores foram deixadas ao acaso, acreditando-se que os simuladores elaborados para situações e informações encontradas em determinados países pudessem ser utilizados em outros locais, sem necessidade de validação prévia e criteriosa de seus resultados. Somando-se a isso, tornaram-se crescentes os desenvolvimentos de novos simuladores, quando adaptações aos já existentes facultariam seu processo de validação.

Além disso, a necessidade do trabalho multidisciplinar demandou um nivelamento técnico superficial das equipes, a fim de ajustar termos utilizados e de intensificar o questionamento, a discussão e, conseqüentemente, a proposição de ações mais integradas e efetivas ao solucionamento do problema.

Nesse sentido, o presente trabalho teve por objetivo apresentar considerações pertinentes à simulação de sistemas, bem como servir como um guia de referência dos principais modelos matemáticos e simuladores encontrados na literatura científica para a área de pesquisa agropecuária.

A partir destas referências, espera-se facilitar o acesso a aplicações mais recentes da modelagem matemática visando à simulação aplicada à pesquisa agropecuária, além de propiciar o nivelamento básico do leitor à terminologia empregada na área.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFFIN, O.A.D.; BARCELLOS, J.M.; LUIZ, A.J.B.; SILVA, F.A.M. da; RODRIGUEZ CASTRO, L.H.; ZOBY, J.L.F. *Uso de modelos matemáticos de simulação para estabelecimento de prioridades de pesquisa*. Planaltina : EMBRAPA-CPAC, 1992. 43p. (EMBRAPA-CPAC. Documentos, 49).
- ARTHUR, R.F. Microcomputer simulation systems. *Computer and Operational Research*, London, v.13, n.2/3, p.167-183, 1986.
- ASSAD, A. A. Project management using a microcomputer. *Computer and Operational Research*, London, v.13, n.2/3, p.231-260, 1986.

- BALLS, D.A.; SHAFER, M.J. Simulating resource competition in multiespecies agricultural plant communities. *Weed Research*, Oxford, v.33, n.4, p.299-310, 1993.
- BASAK, N.; PICOT, J.C.C. Lagrangian simulator of forest pesticide spray dispersion and deposition. In: VOLSEY, P.W., ed. *Proceedings of a Symposium on Agriculture and Forestry Aviation*. Ottawa : National Research Council, 1984. p.373-398.
- BASSANEZI, R.C.; FERREIRA JUNIOR, W.C. *Equações diferenciais com aplicações*. São Paulo: HARBRA, 1988. 572p.
- BEASLEY, D.B.; HUGGINS, L.F.; MONKE, E.J. Planning for water quality using the ANSWERS approach. In: Hydrologic Transport Modeling Symposium, 1979, New Orleans. *Proceedings...* St. Joseph: ASAE, 1979. p.21-30.
- BEASLEY, D.B.; HUGGINS, L.F.; MONKE, E.J. ANSWERS: a model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.23, p.938-944, 1980.
- BELMANS, C.; WESSELING, J.G.; FEDDES, R.A. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.63, n.3, p.271-286, 1983.
- BILANIN, A. J.; TESKE, M.E.; BARRY, J.W.; EKBLAD, R.B. AGDISP: The aircraft spray dispersion model, code development and experimental validation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v.32, p.327-334, 1989.
- BILANIN, A. J.; TESKE, M.E.; MORRIS, D. O. *Predicting aerially applied particle deposition by computer*. Kansas City: Society of Automotive Engineering, 1991.
- BONAZOUNTAS, M.; WAGNER, J. *SESOIL*: a seasonal soil compartment model. Cambridge : D.Little, 1984.
- BRASSE, D.F.; HENRIKSEN, A.; Norton, S.A. A variable F factor to explain changes in base cation concentrations as a function of strong acid deposition. *Verhandlungen für International Limnologie*, Berlin, v.24, p.146-149, 1990.
- BRESSAN, M. *Desafios para a pesquisa de sistemas pecuários: workshop sobre modelos físicos de sistemas de produção*. Coronel Pacheco: EMBRAPA-CNPGL, 1994. 26p.

- CARSEL, R.F.; MULKEY, L.A.; LORBER, M.N.; BASKIN, L.B. The pesticide root zone model (PRZM): a procedure for evaluating pesticide leaching threats to groundwater. *Ecological Modelling*, Amsterdam, v.30, p.49-69, 1985.
- CHAVES, H.M.L. Análise global de sustentabilidade dos parâmetros da equação universal de perda de solo modificada (MUSLE). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.15, p.345-350, 1991.
- COSBY, B.J.; HORNBERGER, G.M.; GALLOWAY, J.N.; WRIGHT, R.F. Modelling the effects of acid deposition: assessment of a lumped parameter model of soil water and stream water chemistry. *Water Resources Research*, Washington, v.21, p.51-63, 1985a.
- COSBY, B.J.; WRIGHT, R.F.; HORNBERGER, G.M.; GALLOWAY, J.N. Modelling the effects of acid deposition: estimation of long term water quality responses in a small forested catchment. *Water Resources Research*, Washington, v.21, p.1591-1601, 1985b.
- CRAWFORD, N.H.; DONIGIAN, A. S. *Pesticide transport and runoff model for agricultural lands*. Washington: US Government Printing Office, 1973. (USEPA EPA. Research Report, 660/2-74-013.)
- CRAWFORD, N.H.; LINSLEY, R.K. *Digital simulation in hydrology: stanford watershed model IV*. Stanford: Stanford University, 1966. (Stanford University Technical Report, 39)
- CSÁKI, C. *Simulation and systems analysis in agriculture*. New York : Elsevier, 1985. 262p.
- DAHL, O.J.; NYGAARD, K. Simula-an ALGOL-based simulation language. In: KNUTH, D.E., ed. Programming language. *Communications of the ACM*, Washington, v.9, n.9, p.671-678, 1966.
- DECOURSEY, D.G. ARS small watershed model. In: SUMMER MEETING, 1982, Madison. *Proceedings...* St. Joseph: ASAE, 1982 (ASAE Paper n.82-2094).
- DECOURSEY, D.G.; ROJAS, K.W. RZWQM - A model for simulating the movement of water and solutes in the root zone. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF WATER QUALITY MODELING OF AGRICULTURAL NON-POINT SOURCES, 1990, Logan: *Proceedings...* USDA, 1990. Parts 1 e 2, p.813-821. (USDA, ARS-81.)

- DECOURSEY, D.G. Computer models for pesticide and fertilizer use. In: USDA. *Agriculture and Environment: the 1991 yearbook of agriculture*. Washington: U.S. Government Printing Office, 1991. Chapter 22, p.160-172.
- DENT, J.B.; BLACKIE, M.J. *Systems simulation in agriculture*. London: Applied Science, 1984. 180p.
- DEWHURST, S.C.; STARK, K.T. *Programando em C++*. Rio de Janeiro: Campus, 1990. 249p.
- DONIGIAN, A S.; IMHOFF, J.C.; BICHNELL, B.R. Predicting water quality resulting from agricultural nonpoint source pollution via simulation - HSPF. In: SCHALLER, F.W.; BAILEY, G.W., ed. *Agricultural management and water quality*. Ames: Iowa State University Press, 1983. p.200-249.
- DORN, W.S.; McCracken, D.D. *Cálculo numérico com estudos de casos em FORTRAN IV*. Rio de Janeiro: Campus; São Paulo: Ed. da USP, 1981. 568p.
- EHRlich, P.J. *Pesquisa operacional: curso introdutório*. São Paulo: Atlas, 1976. 189p.
- ENGEL, A.B. *Introdução à biomatemática determinista dos sistemas ecológicos*. Campinas: CNMAC/Editora da UNICAMP, 1984. 173p. (CNMAC. Minicurso, 6).
- ENGELBERG, J.; BOYARSKY, L.L. The noncybernetic nature of ecosystems. *The American Naturalist*, Chicago, v.114, n.3, p.317-324, 1979.
- ENFIELD, C.G.; CARSEL, R.F.; COHEN, S.Z.; PHAN, T.; WALTERS, D.M. Aproximate pollutant transport to groundwater. *Ground Water*, v.20, p.711-722, 1982
- ENFIELD, C.G.; WALTERS, D.M.; WILSON, J.T.; PIWONI, M.D. Behavior of organic pollutants during rapid-infiltration of wastewater into soil. *Wastes Hazard Materials*, v.3, p.57-76, 1986.
- FERNANDES, E.N. *Sistema especialista para planejamento e desenho de sistemas agroflorestais em duas macrorregiões do Estado de Minas Gerais*. Viçosa: UFV, 1994. 82p. Tese Mestrado.

- FERNANDES, E.N.; SILVA, E.; PESSOA, M.C.P.Y. Sistema integrado para avaliação de impacto ambiental das práticas agrícolas: enfoque para perda de solo. In: ENCONTRO ANUAL DA SEÇÃO BRASILEIRA DA INTERNATIONAL ASSOCIATION FORM IMPACT ASSESSMENT-IAIA, 4., 1995, Belo Horizonte. *Resumos Expandidos*. Belo Horizonte: IAIA, 1995.
- FIEDLER, H.; HERRMAN, G.; SCHRAMM, K.W.; HUTZINGER, O. Applications of QSARs to predict potential aquatic toxicities of organochlorine pesticides. *Toxicology and Environmental Chemistry*, London, v.26, n.1/4, p.157-160, 1990.
- FORRESTER, J.W. *Industrial dynamics*. Cambridge: MIT Press, 1968.
- FOSTER, G.R.; LANE, L.J. *User requirements: USDA - Water Erosion Prediction Project (WEPP)*. West Lafayette: USDA - Agricultural Research Service, 1987. Draft 6.3. (NSERL Report, 2.)
- FRANCE, J.; THORNLEY, J.H.M. *Mathematical models in agriculture: a quantitative approach to problems in agriculture and related sciences*. London: Butterworth, 1984. 335p.
- FRERE, M.H.; ONSTAD, C.A.; HOLTAN, H.N. *ACTMO-Agricultural Chemical Transport Model*. Washington : US Government Printing Office, 1975. (USDA-ARS. Research Report, ARS-H-3.)
- GODRON, M.; MATTOS, C.O.; SCARAMUZZA, C.A M.; MIRANDA, E.E.; YOUNG, M.C.P. Desenvolvimento de modelo preditivo do impacto ambiental da atividade agrícola em projetos de colonização na Amazônia (o caso de Machadinho d'Oeste-RO). In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE ECOLOGIA, 1., 1989, Montevideo. *Resumos Expandidos*. Montevideo, 1989.
- GOSS, D.; WAUCHOPE, R.D. The SCS/ARS/CES Pesticides properties database: II using it with soil data in a screening procedure. In: WEIGMANN, D.L., ed. *Pesticide in the next decade: the challenges ahead*. Blacksburg: Virginia Water Center, 1991. p.471-493.
- GUIMARÃES, A. DE M.; LAGES, N.A. DE C. *Algoritmos e estruturas de dados*. Rio de Janeiro: LTC Ed., 1985. 216p. (Ciência da Computação).
- GUPTA, S.K.; KINKAID, C.T.; MEYER, P.R.; NEWBILL, C.A.; COLE, C.R. *A multi-dimensional finite-element code for the analysis of coupled fluid, energy and solute transport (CFEST)*. Richland : Battelle Pacific Northwest Labs., 1982. (Report, PNL-4260.)

- GUSTAFSON, D.I. Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. *Environmental Toxicology and Chemistry*, New York, v.8, pp.339-125, 1989.
- GUTIERREZ, A. P.; SCHULTHESS, F.; WILSON, L.T.; VILLACORTA, A. M.; ELLIS, C.K.; BAUMGAERTNER, J.U. Energy acquisition and allocation in plants and insect: a hypothesis for the feeding patterns in insects. *Canadian Entomologist*, Ottawa, v.119, p.109-129, 1987.
- HAAN, C.T.; NOFZIGER, D.L.; GREGORY, M. An agricultural chemical evaluation and management system. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, v. 56, n.4, p.301-312, 1993.
- HENRIKSEN, A. A simple approach for identifying and measuring acidification of freshwater. *Nature*, London, v. 278, p.542-545, 1979.
- HOLTAN, H.W.; LOPEZ, N.C. *USDAHL-70* model of watershed hydrologic. Washington: US Government Printing Office, 1971. (Technical Bulletin, 1435.)
- JACK, G. Acid precipitation. In: ALLEY, W.M., ed. *Regional ground-water quality*. S.l.:s.n., 1993 p.405-421.
- JOHANSON, R.C.; IMHOFF, J.C.; KITTLE, J.L.; DONIGIAN, A.S. *Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF): user's manual for release 8.0*. Washington : EPA, 1984. (EPA 600/3-84-066.)
- JORGENSEN, S.E., ed. *Application of ecological modelling in environmental management - Part A*. Amsterdam : Elsevier, 1983. 735p. (Developments in Environmental Modelling, 4a.)
- JORGENSEN, S.E.; MITSCH, W.J., ed. *Application of ecological modelling in environmental management - Part B*. Amsterdam: Elsevier, 1983. 438p . (Developments in Environmental Modelling, 4b.)
- JURY, W.A.; SPENCER, W.F.; FARMER, W.J. Behavior assessment model for trace organics in soil. I. Model description. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v.12, p-558-564, 1983.
- KERNIGHAN, B.W.; RITCHIE, D.M. C: a linguagem de programação padrão ANSI. Rio de Janeiro : Campus, 1990. 289p.
- KNISEL, W.G., ed. *CREAMS: a field scale model for chemical run-off and erosion from agricultural management systems*. Washington : USDA-SEA, 1980. (USDA-SEA Research Report, 26.)

- LANE, L.J.; NEARING, M.A., ed. *USDA - Water Erosion Prediction Project: hillslope profile model documentation*. 2.ed. West Lafayette: USDA-ARS - National Soil Erosion Research Laboratory, 1989. (NS ERL Report, 2.)
- LEAVESLEY, G.H.; LICHTY, R.W.; Thoutmane, B.M.; Saindon, L.G. *Precipitation-runoff modelling system: user's manual*. S.I. : US Geological Survey Water Resources Investigations, 1983. (Report 83-4238.)
- LEONARD, R.A.; Knisel, W.G.; Still, D.A. GLEAMS: Grounwater Loading Effects of Agricultural Management Systems. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.30, n.5, p. 1403-1418, 1987.
- LEVINE, R.I.; DRANG, D.E.; EDELSON, B. *Inteligência artificial e sistemas especialistas - aplicações e exemplos práticos*. São Paulo : McGraw-Hill, 1988. 264p.
- LEWIS, S.M. *PRORI- A probabilistic physically based erosion model*. Lexington : University of Kentucky - Department of Agricultural Engineering, 1990. M.Sc. Thesis.
- LUCHIARI JUNIOR, A. *Measurement and predictions of evaporation rates from irrigated wheat in the cerrados region of central Brazil*. Ithaca: Cornell University, 1988. Ph.D. Dissertation.
- MARQUES, J.F. *Efeitos da erosão do solo na geração de energia elétrica: uma abordagem da economia ambiental*. São Paulo : USP, Departamento de Economia, 1995. Tese Doutorado.
- MILLER, C. O. A mathematical model of aerial deposition of pesticides from aircraft. *Environmental Science and Technology*, Washington, v.14, n.7, p.824-831, 1980.
- NAYLOR, T.H.; BALINTFY, J.L.; BURDICK, D.S.; KONG, C. *Técnicas de simulação em computadores*. São Paulo: Vozes, 1977. 402p.
- NILSSON, N.J. *Princípios de inteligência artificial*. Madrid: Ediciones Diaz de Santos, 1987. 422p.
- NOFZIGER, D.L.; HORNSBY, A.G. *Chemical movement in soil*: IBM PC user's guide. s.l. : University of Florida- IFAS, 1985. (Circular 654.)
- NOFZIGER, D.L.; HORNSBY, A.G. A microcomputer-based management tool for chemical movement in soil. *Applied Agricultural Research*, New York, v.1, p.50-56, 1986.

- NOFZIGER, D.L.; HORNSBY, A.G. *Chemical movement in layered soils: user's manual*. Gainesville : University of Florida - Institute of Food and Agricultural Sciences, Cooperative Extension Service, 1987. 44p. (Circular, 780.)
- NOFZIGER, D.L.; RAJENDER, K.; NAYUDU, S.K.; SU, P. *CHEMFLO: one-dimensional water and chemical movement in unsaturated soils*. Oklahoma : EPA, 1989. 106p. (EPA/600/8-89/076.)
- PAVE, A. *Les cahiers d'EDORA*. France: Institute National de Recherche en Informatique et en Automatique, 1988. 240p. (INRA. Rapports de Recherche, 866.)
- PESSOA, M.C.P.Y. *Simulação e inteligência artificial aplicadas ao estudo da dinâmica populacional do bicudo do algodoeiro na região de Campinas/SP*. Campinas: UNICAMP/FEE-DENSIS, 1994. 320p. Tese Doutorado.
- PESSOA, M.C.P.Y.; CHAIM, A. Modelagem matemática da deriva de herbicidas por aplicação aérea em agroecossistemas de arroz irrigado. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO DE AGROQUÍMICOS (SINTAG), 1., 1996, Águas de Lindóia. 1996. *Resumos...* Águas de Lindóia, 1996a.
- PESSOA, M.C.P.Y.; CHAIM, A. Numeric model to estimate pesticide deposition and lossess from aerial spraying. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON QUANTITATIVE METHODS FOR ENVIRONMENTAL SCIENCES - ENVIRONMENTRICS, 7., 1996. São Paulo. *Abstracts...* São Paulo : USP, 1996b.
- PESSOA, M.C.P.Y.; GOMES, M.A.F. Visão holística do impacto ambiental da cultura de cana-de-açúcar na microbacia do córrego do Espreado, Ribeirão Preto/SP: uma abordagem preliminar. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Piracicaba. *Resumos...* Piracicaba : SBCS, 1996.
- PESSOA, M.C.P.Y.; PIEROZZI JUNIOR., I.; HABIB, M.E.E. Sistema especialista para identificação de fatores de mortalidade natural dos estágios imaturos do bicudo do algodoeiro, na região de Campinas, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 14., 1993, Piracicaba. *Resumos...* Piracicaba: SEB, 1993. p.233.
- PROSSER, J.I. Mathematical modelling of genetically engineered microorganisms in the environment. In: Edwards, C., ed. *Monitoring genetically manipulated microorganisms in the environment*. New York: John Wiley, 1993.

- RADKE, J. Application of the nitrogen-tillage-residue management (NTRM) Model for corn grown in low-input and conventional agricultural systems. *Ecological Modelling*, Amsterdam, v.55, n.3, p.241-255, 1991.
- RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; MCCOOL, D.K., eds. *Predicting soil erosion by water - a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington : USDA-ARS, 1991.
- RICHARDSON, C.W. Weather simulation for crop and resource management models. In: SUMMER COMPUTER SIMULATION CONFERENCE, 1989, San Diego. *Proceedings*. The Society for Computer Simulation, 1989. p.655-658.
- RIHA, S.J.; ROSSITER, D.G.; SIMOENS, P. *GAPS - General Purpose Atmosphere-Plant-Soil System: user's manual version 3.0*. Ithaca : Cornell University - Department of Soil Crop & Atmospheric Sciences, 1994.
- ROSS, B.B.; CONTRACTOR, D.N.; SHANHOLTZ, V.O. A finite element model of overland and channel flow for assessing the hydrologic impact of land use change. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.41, p.11-30, 1979.
- SABBAGH, G.L.; GELETA, S.; ELLIOT, R.L.; WILLIAMS, J.R.; GRIGGS, R.H. Modification of EPIC to simulate pesticides activities: EPIC-PST. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.34, n.4, p.1683-1692, 1991.
- SCHILDT, H. *Inteligência artificial utilizando linguagem C*. São Paulo : Mc Graw-Hill, 1989. 349p.
- SCHMITZ, E.B.; TELES, A.A. de S. *Pascal e técnicas de programação*. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC Ed., 1986. 205p. (Ciência da Computação.)
- SCHREIBER, J.D. Estimating soluble phosphorus from green crops and their residues in agriculture run-off. In: DeCoursey, D.G., ed. *Small watershed model (SWAM) for water, sediment and chemical movement*. supporting documentation. Washington: USDA-ARS, 1990. p.77-95.
- SHAFFER, M.J.; Halvorson, A.D.; Pierce, F.J. Nitrate leaching and economic analysis package (NLEAP): model description and application. In: Follet, R.F. et al., ed. *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability*. Madison: Soil Science Society of America, 1991a. Chapter 13.

- SHAFFER, P.W.; ROSENBAUM, B.; HOLDREN JR., G.R.; STRICKLAND, T.C.; MC DOWELL, M.K.; RINGOLD, P.L.; TURNER, R.S.; RYAN, P.F.; BERNARD, D. *Estimating critical loads of sulfate to surface waters in the northeastern United States: a comparison assessment of three procedures for estimating critical loads of sulfate for lakes*. Corvallis: USEPA, 1991b. (EPA Report 600-2-91-062.)
- SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R., ed. *EPIC erosion-productivity impact calculator: I. Model documentation*. Springfield: NTIS, 1990. (USDA. Technical Bulletin, 1768.)
- SHIM, S.G. Acid deposition models: required development for coupling with aquatic models. *Fresenius Environmental Bulletin*, v. 2, n.10, p. 608-613, 1993.
- SKAGGS, R.W. *A water management model for shallow water table soils*. s.l.: Water Resources Institute of the University of North Carolina, 1978. (Report, 134.)
- SOGN, T.A. A test of chemical equilibrium equations and assumptions commonly used in soil-oriented charge balance models for soil and freshwater acidification. *Ecological Modelling*, Amsterdam, v.70, n. 3/4, p.221-238, 1993.
- TESKE, M.E.; BOWERS, J.F.; RAFFERTY, J.E.; BARRYS, J.W. FSCGB - an aerial spray dispersion model for predicting the fate of released material behind aircraft. *Environmental Toxicology and Chemistry*, New York, v.12, p.453-464, 1993.
- US-EPA. *PRZM-2-Users's manual version 2.0*. Athens: CEAM - Center for Exposure Assessment Modelling/EPA-Environmental Protection Agency, 1994.
- VAN DER ZEE, S.E.A.T.M. Effects of heterogeneity on pesticide leaching to groundwater. *Water Resources Research*, Washington, v.27, n.12, p. 3051-3063, 1991.
- VAN GENUCHTEN, M.Th. *Non-equilibrium transport parameters from miscible displacement experiments*. Riverside: USDA-ARS. U.S. Salinity Laboratory, 1981. 61p. (Report, 119.)
- VAN GENUCHTEN, M.TH. *A numerical model for water and solute movement in and below the root zone*. Riverside: USDA-ARS. U.S. Salinity Laboratory, 1987. 61p. (Research Report, 121.)

- VILLENEUVE, J.P.; BANTON, O.; LAFRANCE, P. A probabilistic approach for the groundwater vulnerability to contamination by pesticides: the VULPEST model. *Ecological Modelling*, Amsterdam, v.51, n.1, p.47-58, 1990.
- WAGNET, R.J.; HUTSON, J.L. *LEACHM: Leaching Estimation and Chemistry Model*. Ithaca : Cornell University - Center for Environment Resource, 1989. v.2, version 2.
- WAGNER, J.; WATTS, S. A.; KENT, D.C. *PLUME 3D three-dimensional plumes in uniform ground water flow*. Ada : USEPA-Robert S.Kerr Environment Research Laboratory, 1984a ( Project Report, CR 811142.EPA 600/2-85-067 - PB85-214443.)
- WAGNER, J.; WATTS, S. A.; KENT, D.C. *PLUME 2D two-dimensional plumes in uniform ground water flow*. Ada : USEPA-Robert S.Kerr Environment Research Laboratory, 1984b (Project Report, CR 811142.EPA 600/2-85-065 - PB85-214450.)
- WIGHT, J.R.; SKILES, J.W. *SPUR: Simulator of Production and Utilization of Rangelands: documentation and user's guide*. Washington. : USDA-ARS, 1987. (USDA-ARS, 63.)
- WILLIAMS, J.R. Sediment yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. In: USDA-ARS. *Present and prospective technology for predicting sediment yields and source*. Washington, 1975. p. 244-252. ( USDA-ARS. Handbook 5-40.)
- WILLIAMS, J.R.; NICKS, A. D.; ARNOLD, J.G. Simulation for water resources in rural basins, *ASCE Journal of Hydraulic*, v.111, p.970-986, 1985.
- WIRTH, N. *Algorithms + data structures = Programs*. New Jersey : Prentice-Hall, 1976. 366p.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. *Predicting rainfall erosion e losses - a guide of conservation planning*. Washington: USDA, 1978. (Agricultural Handbook , 537.)
- WORKMAN, S.R.; SKAGGS, R.W. PREFLO: a water management model capable of simulating preferential flow. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.33, n.6, p.1939-1948, 1990.

- YATES, S.R.; VAN-GENUCHTEN, M.T.; WARRICK, A.M.; LEIJ, F.L. Analysis of measured, predicted and estimated hydraulic conductivity using RETC computer program. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.56, n.2, p.347-354, 1992.
- YOUNG, M.C.P. *Obtenção de códigos convolucionais ótimos de memória unitária por programação matemática*. Campinas: UNICAMP-FEE, Departamento de Telemática, 1989. Tese Mestrado.
- YOUNG, R.A.; ONSTAD, C.A.; BOSH, D.B.; ANDERSON, W.P. *AGNPS - Agricultural non-point source pollution model*. Washington: USDA-ARS, 1987. (Conservation Research Report, 35).

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Centro Nacional de Pesquisas de Monitoramento e Avaliação do Impacto Ambiental  
Missão: na Agricultura e do Abastecimento*