

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final da dissertação de Mestrado defendida por Monica Luri Giboshi e aprovada pela Comissão Julgadora em 24 de maio de 1999. Campinas, 16 de setembro de 1999.

x Henrique Rodrigues
Presidente da Banca

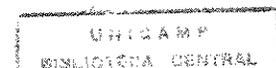
**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA
PARA DETERMINAR A CAPACIDADE DE USO DA TERRA**

MONICA LURI GIBOSHI

Orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Antunes Rodrigues

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração: Planejamento e Produção Agropecuária.

**Campinas - SP
MAIO - 1999**



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	G.356d
V.	Ex.
T.º PARO	05/393.26
PROX.	229/99
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	29/10/99
N.º CPD	

CM-00136620-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

G356d Giboshi, Monica Luri
Desenvolvimento de um sistema especialista para
determinar a capacidade de uso da terra. / Monica Luri
Giboshi.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Luiz Henrique Antunes Rodrigues
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Sistemas especialistas (Computação). 2. Solo -
Uso - Planejamento. I. Rodrigues, Luiz Henrique
Antunes. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Ao meu marido, Francisco, pelo
carinho, apoio e compreensão.

Aos meus filhos Renata e Guilherme
por compreenderem os momentos de
ausência.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luiz Henrique Antunes Rodrigues pela orientação, pela confiança, incentivo e amizade.

Ao Dr. Francisco Lombardi Neto do Instituto Agronômico de Campinas, cuja participação e ajuda foi de fundamental importância para a realização deste trabalho, pela contribuição na minha formação profissional, pela confiança e incentivo.

À Dra. Adriana Cavalieri por ter contribuído intensamente para a realização deste trabalho, mesmo estando longe, pelo incentivo, apoio, confiança e amizade.

À CAPES pela concessão de bolsa de estudos no período de junho de 1997 à maio de 1999.

Ao Prof. Dr. Carlos Roberto Espíndola, da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas e ao Dr. João Bertoldo de Oliveira, pesquisador científico aposentado da Seção de Pedologia do Instituto Agronômico de Campinas, pela atenção e tempo despendidos com este trabalho, pela colaboração e sugestões.

Aos especialistas do Centro de Solos e Recursos Ambientais do Instituto Agronômico de Campinas, Dr. Pedro Luiz Donzelli, Dr. Hélio do Prado, Dra. Isabella Cléríci De Maria e Dr. Jener Fernando Leite de Moraes pela colaboração.

Aos colegas da FEAGRI, em especial à Emília e ao Lauro.

Ao meu sogro, Antônio Grando, pelo tempo despendido na revisão do texto dessa dissertação.

A toda família, pelo apoio e ajuda, em especial à Dona Margarida por ter ficado, por muitas vezes, com as crianças.

A todos que de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

CONTEÚDO

I – INTRODUÇÃO	1
II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 – Capacidade de uso da terra.....	6
2.2 – SISTEMAS ESPECIALISTAS.....	10
2.2.1 – Principais componentes de um Sistema Especialista	15
2.2.2 – Desenvolvimento de um Sistema Especialista.....	18
2.2.2.1 – Planejamento.....	19
2.2.2.2 – Engenharia de conhecimento.....	21
2.2.2.3 – Implementação	23
III – MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1– ÁREA DE ESTUDO.....	25
3.1.1 – Solos	25
3.2 – CAPACIDADE DE USO DA TERRA	27
3.2.1 – Fatores limitantes.....	28
3.2.1.1 – Pedregosidade / rochiosidade	28
3.2.1.2 – Risco de geada	30

3.2.1.3 – Risco de inundação.....	31
3.2.1.4 – Profundidade efetiva	32
3.2.1.5 – Disponibilidade de água.....	32
3.2.1.6 – Drenagem interna ou excesso de água.....	33
3.2.1.7 – Risco de erosão	33
3.2.1.8 – Restrição à mecanização.....	36
3.2.1.9 – Disponibilidade de nutrientes.....	37
3.2.1.10 – Fixação de fósforo.....	37
3.2.1.11 – Toxicidade por alumínio	38
3.2.2 – Classes e subclasses de capacidade de uso.....	38
3.3 – SISTEMA ESPECIALISTA	39
3.3.1 – Aquisição de conhecimento.....	40
3.3.2 – Validação do sistema especialista	42
IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1 – SISTEMA ESPECIALISTA	44
4.1.1 – Validação do sistema especialista	48
4.2 – CAPACIDADE DE USO DA TERRA DA MICROBACIA DO RIBEIRÃO DA CACHOEIRA.....	52
V – CONCLUSÕES	58
VI – RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	62
VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
ANEXOS.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Elementos de um sistema especialista (SAWYER & FOSTER, 1986). .	16
Figura 2: Fases do desenvolvimento de um sistema especialista (SAWYER & FOSTER, 1986).	20
Figura 3: Localização da microbacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira (composição colorida das bandas 3, 4 e 5 da imagem Landsat TM de 1996 da área de estudo). Fonte: CAVALIERI (1998).	26
Figura 4: Mapa de solos da microbacia do Ribeirão da Cachoeira. Fonte: CAVALIERI (1998).	26
Figura 5: Classes de declividade da área teste.	29
Figura 6: Diagrama de fluxo do sistema especialista desenvolvido.	45
Figura 7: Exemplo de perguntas feitas pelo sistema especialista para obter informações sobre a área em estudo.	47
Figura 8: Exemplo de classificação segundo a capacidade de uso da terra, obtida com a aplicação do sistema especialista desenvolvido.	48
Figura 9: Mapa com as classes de capacidade de uso das terras da microbacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira.	53

Figura 10: Mapa com as subclasses de capacidade de uso da microbacia do
Ribeirão da Cachoeira 54

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: Caracterização das classes de capacidade de uso da terra.	9
QUADRO 2: Símbolo, classificação taxonômica e unidade dos solos da área de estudo (OLIVEIRA, 1992).....	27
QUADRO 3: Classes de declividade.....	28
QUADRO 4: Profundidade efetiva do solo	32
QUADRO 5: Erodibilidade dos solos da área de estudo.	34
QUADRO 6: Graus de limitação devido à erodibilidade.	35
QUADRO 7: Exemplos de regras utilizadas no sistema especialista desenvolvido.	41
QUADRO 8: Identificação, em ordem alfabética, dos especialistas que participaram da validação.	43
QUADRO 9: Classes e subclasses de capacidade de uso obtidas pelos especialistas e com o uso do sistema especialista.....	50

QUADRO 10: Área das classes de capacidade de uso e porcentagem de ocorrência em relação à área total de terras, para microbacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira.	55
QUADRO 11 : Área das subclasses de capacidade de uso e porcentagem de ocorrência em relação à área total de terras, para microbacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira.	55
QUADRO 12: Classificação obtida com a aplicação do sistema especialista para a área teste.	56
QUADRO A1: Graus de limitação devido à pedregosidade em função da porcentagem de fragmentos grosseiros em relação à massa de solo... ..	71
QUADRO A2: Graus de limitação devido à rochosoidade em função da porcentagem de matações e afloramentos rochosos em relação à massa do solo.....	71
QUADRO A3: Graus de limitação devido ao risco de geada em função da posição no relevo.	72
QUADRO A4: Graus de limitação devido ao risco de inundação em função da duração e frequência da inundação.....	72
QUADRO A5: Graus de limitação devido à profundidade efetiva.	73
QUADRO A6: Graus de limitação devido à disponibilidade de água em função da textura e profundidade do solo e deficiência hídrica anual.....	73
QUADRO A7: Graus de limitação devido à drenagem interna ou excesso de água.	74
QUADRO A8: Graus de limitação devido ao risco de erosão em função da erodibilidade e da classe de declividade.	74
QUADRO A9: Graus de limitação devido à mecanização em função da classe de declividade, risco de inundação e/ou pedregosidade.....	75

QUADRO A10: Grau de limitação devido à disponibilidade de nutrientes em função da saturação de bases e da capacidade de troca de cátions (CTC). 75	75
QUADRO A11: Graus de limitação devido à fixação de fósforo em função da textura superficial e da cor do solo. 76	76
QUADRO A12: Grau de limitação devido à toxicidade por alumínio em função da capacidade de troca catiônica (CTC) e da saturação de alumínio. 76	76
QUADRO B1: Classificação obtida com a aplicação do sistema especialista. 77	77

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de um sistema especialista (SE) para determinar a capacidade de uso da terra para auxiliar as decisões a serem tomadas no planejamento do uso da terra. O sistema foi desenvolvido com o uso de uma linguagem de programação de alto nível e que tem o sistema de inferência construído como uma parte dela, conhecida como CLIPS (C Language Integrated Production System). Para o desenvolvimento do sistema, foi utilizado o encadeamento para frente ou "forward chaining" por ter sido considerado o mais apropriado para este trabalho, pois a determinação da capacidade de uso é um problema cuja solução é encontrada a partir de dados da área em estudo, tais como natureza do solo, relevo e clima. Por essa razão o sistema de inferência utilizado foi o "orientado por dados". Foram feitos vários testes para verificar a consistência da base de conhecimento. Para a validação foi criado um cenário com oito diferentes classes de solos. A subjetividade da classificação de terras influenciou o processo de validação do SE, pois a avaliação ficou sujeita à experiência e ao conhecimento do avaliador. A validação

mostrou que o sistema especialista desenvolvido foi mais rigoroso que os especialistas em relação às classes de declividade, por considerar estas em conjunto com os fatores limitantes que apresentam maior restrição ao uso da terra. As regras que determinam as classes de capacidade de uso devem ser revistas, pois houve um avanço da ciência do solo referente a aspectos morfológicos e de classificação. Considerando que os sistemas de classificação de terras devem sofrer revisões periódicas para mantê-los atualizados à medida que a ciência do solo evolui, a base de conhecimento pode ser facilmente modificada. O SE desenvolvido é de fácil utilização, não exige equipamentos sofisticados, podendo ser utilizado em qualquer microcomputador pessoal. O usuário do sistema não precisa ser um especialista, mas é necessário que tenha algum conhecimento sobre o assunto para responder as perguntas que são feitas pelo SE a fim de obter informações a respeito da natureza do solo, do relevo e do clima. A linguagem de programação utilizada, CLIPS, é relativamente fácil de programar, bastando para isso um certo conhecimento de programação com alguma linguagem de alto nível.

ABSTRACT

The objective of this work was to develop an expert system (ES) to determinate the land capability classification, which aids land use planning. The ES was developed with CLIPS (C Language Integrated Production System), an expert system shell designed by NASA. The inference process used was "forward chaining". It was considered more suitable for this work, since the land capability determination starts with all data of the region studied. For this reason the inference system chosen was the "data-driven". Many tests were done to verify consistency of the knowledge base. A scenario with eight different soil classes was created for the validation of the system. The subjectivity of land classification influenced the validation process, since the evaluation was submitted to expertise and knowledge of human experts. The validation showed that the ES was more rigorous than human experts with regard to slope steepness classes, since it considers them taking account other factors that present major restriction to land use. The land capability rules should be reviewed because there was an advance in soil science concerning morphology and classification aspects. Periodic reviews are made in land classification systems, when advances in soil science occur, and, in this case, modifications at knowledge base are easy. The ES developed is simple to use, and does not need sophisticate hardware. The expert system user

does not need to be an expert, although have some knowledge about this subject is necessary to answer questions done by the system. The expert system shell, CLIPS, is not difficult to work, although some knowledge about programming using a high level language is necessary.

I – INTRODUÇÃO

O uso inadequado e intensivo dos recursos naturais é a principal causa da degradação do meio ambiente. Uma das conseqüências disso é a diminuição da capacidade produtiva da terra e o comprometimento da produção agrícola devido, principalmente, ao aumento da erosão do solo.

Por isso um planejamento do uso racional da terra é essencial para aqueles que desejam utilizá-la de maneira correta, de acordo com a sua sustentabilidade e produtividade econômica, de forma que os recursos naturais sejam conservados.

A avaliação de terras representa a maior parte das atividades desse planejamento e refere-se ao estabelecimento de critérios do comportamento das terras, quando usadas para propósitos específicos, e requer uma abordagem multidisciplinar.

Para a avaliação de terras existem diversas metodologias, entre as quais a classificação de terras segundo a sua capacidade de uso, que pode ser conceituada como a adaptabilidade da terra às diversas formas de utilização agrícola, sem que ocorra o depauperamento do solo pelos fatores de desgaste e empobrecimento, através do seu uso.

O sistema de capacidade de uso constitui uma classificação técnica, com a finalidade de fornecer dados que permitam decidir qual a melhor combinação de uso agrícola para um aproveitamento mais intensivo da terra sem risco de empobrecimento do solo. Seu objetivo principal está relacionado à conservação dos solos, onde são analisadas suas potencialidades, dando maior ênfase às suas limitações.

Porém sua determinação é um trabalho que envolve conhecimentos diversos e interdisciplinares, tais como: condições climáticas, natureza do solo, relevo, recursos hídricos, práticas conservacionistas, entre outros, necessitando, portanto, de técnicos especializados para a sua execução.

Existe, portanto, a necessidade de se desenvolverem ferramentas para auxiliar aqueles que desejam fazer um planejamento adequado do uso da terra para obter uma produção agrícola sustentável.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma ferramenta para auxiliar o planejamento do uso da terra, desenvolvendo um sistema especialista (SE) para determinar a capacidade de uso da terra.

Sistemas especialistas são programas computacionais que permitem a sistematização da lógica utilizada por especialistas, em suas áreas de domínio. Como os especialistas humanos, estes sistemas usam lógica simbólica e heurística para encontrar soluções.

SEs têm inúmeras vantagens sobre sistemas tradicionais. Uma delas é a capacidade de armazenar e processar uma vasta quantidade de informações e conhecimentos necessários para avaliar e resolver problemas. Outra vantagem diz respeito à escassez de especialistas em algumas áreas de conhecimento. Em geral especialistas são pessoas muito ocupadas e sem muito tempo disponível, e com o uso de sistemas especialistas em um determinado domínio, o tempo que eles usariam resolvendo certos tipos de problemas, poderia ser usado para treinamento de outros profissionais, para a expansão de conhecimentos ou, eventualmente, para a resolução de problemas mais complexos.

Estes sistemas permitem o incremento contínuo da sua base de conhecimento, um componente do sistema que contém o conhecimento necessário à resolução do problema, sem ter que modificar a estrutura do programa, porque esta não é rígida como nos programas tradicionais, onde as alterações devem ser cuidadosamente examinadas para não causarem impactos em outras partes do programa.

Segundo WATERMAN (1986), os fatores chaves que justificam o desenvolvimento de um sistema especialista são a natureza, a complexidade e o escopo do problema a ser resolvido. Quanto à natureza, deve ser um problema

que possa ser resolvido por manipulação de símbolos e estruturas simbólicas. Muitos problemas que são apropriados para sistemas especialistas são de natureza heurística, isto é, requerem o uso de regras práticas para encontrar soluções aceitáveis. O problema deve ser complexo e difícil de ser resolvido para justificar o custo e o esforço do desenvolvimento de um sistema especialista. Finalmente, o problema deve ter um escopo apropriado. Deve ser suficientemente limitado para que o problema seja manuseável e bem demarcado para assegurar que ele tenha algum interesse prático.

A determinação da capacidade de uso da terra é um problema cuja solução não pode ser encontrada com o uso de modelos matemáticos ou de algoritmos tradicionais, mas pode ser mais facilmente resolvido com o uso de métodos heurísticos. É complexo, pois envolve conhecimentos diversos e interdisciplinares e é recomendado para planejamentos conservacionistas, aplicável para propriedades agrícolas ou pequenas bacias hidrográficas, sendo, portanto, um problema com limite bem demarcado.

Os sistemas de classificação de terras devem sofrer revisões periódicas, para mantê-los atualizados à medida que mais e melhores dados de interpretação se tornem disponíveis. Com o uso do sistema especialista proposto, essa revisão torna-se mais fácil, devido à sua estrutura que permite o incremento contínuo de conhecimento sem que isso altere outras partes do programa.

Com base nas afirmações apresentadas, a determinação da capacidade de uso da terra apresenta o típico potencial para o desenvolvimento de um sistema

especialista. Por isso, é possível desenvolver tal sistema para auxiliar a classificação das terras com relação à sua capacidade de uso da forma proposta neste trabalho, e o mesmo pode ser uma ferramenta de grande utilidade para engenheiros e planejadores que queiram fazer um planejamento racional do uso da terra e assim obter uma produção sustentável.

Assim, o objetivo específico desse trabalho foi desenvolver um sistema especialista para determinar a capacidade de uso da terra e utilizá-lo para fazer a classificação de terras da microbacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira, próxima à cidade de Mogi Guaçu, Estado de São Paulo.

II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este trabalho envolve dois temas diferentes, portanto, a revisão bibliográfica foi dividida em duas partes:

2.1 – Capacidade de uso

2.2 – Sistemas Especialistas

2.1 – Capacidade de uso da terra

Segundo BERTONI & LOMBARDI NETO (1990), o trabalho de NORTON (1939) foi fundamental para a implantação do sistema de classificação de capacidade de uso da terra em vários países do mundo. No Brasil, a implantação desse sistema teve início com uma tradução do trabalho original, "Classificação de terras como auxílio às operações de conservação do solo", em 1945 (WEILL, 1990).

Depois, esse sistema sofreu várias adaptações. A primeira foi feita em 1957 por MARQUES et al. (1957). A segunda aproximação foi feita em 1958, sob a forma de *Manual Brasileiro para levantamentos conservacionistas* (MARQUES, 1958) e, em 1971, foi publicada a terceira aproximação (MARQUES, 1971). A quarta aproximação é uma adaptação feita por LEPSCH et al. (1991) do sistema desenvolvido pelo Serviço de Conservação do solo dos EUA, por KLINGEBIEL & MONTGOMERY (1961), para agrupar solos em classes de capacidade de uso.

OLIVEIRA & BERG (1985) utilizaram uma classificação que é uma variação da classificação americana da capacidade da terra (KLINGEBIEL & MONTGOMERY, 1961) adaptada às condições do Estado de São Paulo. Segundo estes autores, as principais diferenças dizem respeito à classe V, onde se utilizou um conceito mais amplo independente do relevo, e ao fato de a legenda ser aberta, permitindo a inclusão de tantos fatores limitantes quantos fossem identificados, tornando a interpretação mais precisa.

A avaliação de terras segundo a sua capacidade de uso é um sistema qualitativo, de propósito geral e voltado para as limitações das terras, principalmente no que diz respeito à suscetibilidade à erosão. Baseia-se nas combinações de efeito do clima, do relevo e das características permanentes do solo, que limitam o uso agrícola da terra e/ou impõem riscos de degradação pela erosão acelerada (PRADO, 1995).

As classes de capacidade de uso representam um agrupamento de terras com o mesmo grau de limitação, definindo condições de aproveitamento e riscos

de degradação semelhantes. São designadas por algarismos romanos de I a VIII, e quanto maior o seu valor, maior é a restrição ao uso. Assim a classe I abrange as terras praticamente sem limitações, cujo número de alternativas é muito grande, enquanto a classe VIII é atribuída às terras com riscos de degradação e/ou restrições em grau muito severo, onde são impossíveis ou extremamente reduzidas as possibilidades de utilização agrícola.

São quatro classes de terras de cultura, três de pastagens e reflorestamento, e uma de terras impróprias para a vegetação produtiva, descritas de forma sintética no Quadro 1.

Para a determinação da capacidade de uso devem ser inventariados os fatores que têm maior influência sobre o uso da terra. Estes deverão ser devidamente interpretados e analisados em conjunto, para determinação e separação das classes, subclasses e unidades de capacidade de uso.

As interpretações para fins agrícolas devem ser feitas segundo critérios que reflitam a maior ou menor adaptabilidade dos solos e do ambiente em que ocorrem, para determinado cultivo ou grupo de cultivos.

Estabelecidas as condições ambientes ideais para a maioria das culturas, qualquer desvio ou afastamento delas representa uma limitação à utilização agrícola das terras. Logo, a determinação da capacidade de uso consiste em estabelecer a intensidade de variação de cada condição agrícola considerada,

atribuindo-lhe graus de limitação em função do maior ou menor afastamento das condições ideais (LEPSCH et al., 1991).

QUADRO 1: Caracterização das classes de capacidade de uso da terra.

	Classes de capacidade de uso
A – Terras que podem ser utilizadas para culturas anuais ou perenes, pastagens, reflorestamento e preservação ambiental	I – terras cultiváveis, aparentemente sem restrições ao uso, não necessitando de práticas especiais de conservação do solo;
	II – terras cultiváveis com ligeiras restrições ao uso, necessitando práticas especiais de conservação, de fácil execução;
	III – terras cultiváveis com severas restrições ao uso, apresentando problemas complexos de conservação;
	IV – terras cultiváveis apenas ocasionalmente ou em extensão limitada, apresentando sérios problemas de conservação.
B – Terras impróprias para culturas intensivas, mas adaptadas para pastagens, reflorestamento e preservação ambiental	V – terras sem restrição para uso com pastagens, reflorestamento ou preservação ambiental, não necessitando de práticas especiais de conservação, podem ser cultivadas em casos especiais;
	VI – terras com restrições moderadas ao uso, com problemas simples de conservação, cultiváveis em casos especiais de algumas culturas permanentes protetoras do solo;
	VII – terras com severas restrições ao uso, adaptadas em geral somente para pastagens ou reflorestamento, com problemas complexos de conservação.
C – Terras impróprias para cultivos anuais, perenes, pastagens ou reflorestamento, mas apenas para preservação ambiental ou recreação	VIII – terras impróprias para cultivos anuais, perenes, pastagens ou reflorestamento, servindo apenas como abrigo e proteção da fauna e flora silvestre, como ambiente de recreação, ou para fins de armazenamento de água.

Esse sistema é recomendado para fins de planejamento de práticas de conservação do solo, ao nível de propriedades ou empresas agrícolas, ou de pequenas bacias hidrográficas.

O sistema de capacidade de uso trabalha usualmente com nível de manejo médio ou alto, embora possa ser adaptado para outras situações.

2.2 – SISTEMAS ESPECIALISTAS

Uma das conquistas mais importantes na área de inteligência artificial é o desenvolvimento de sistemas conhecidos como “especialistas” ou “baseados em conhecimento”, que são programas computacionais que resolvem problemas com a mesma sistematização da lógica utilizada por especialistas em suas áreas de domínio.

Especialistas são pessoas que têm conhecimento sobre um domínio particular, entendem os problemas dentro desse domínio e têm habilidade para resolvê-los. O conhecimento é usualmente de dois tipos: público e privado. Conhecimento público inclui informações amplamente conhecidas e geralmente publicadas, disponíveis dentro do domínio. Mas os especialistas possuem também o conhecimento privado, que não é encontrado em literatura publicada, e é formado por regras práticas e experiências. Esse conhecimento os torna capazes de fazer suposições, reconhecer problemas e lidar efetivamente com

erros ou dados incompletos. Elucidar e reproduzir tal conhecimento é a tarefa central na construção de sistemas especialistas (HAYES-ROTH et al., 1983).

Existem diversas vantagens e desvantagens do “especialista artificial” em relação ao perito humano. Segundo WATERMAN (1986), uma das vantagens é a sua imunidade ao desgaste e à capacidade de produzir atitudes constantes frente a uma situação, uma vez que o ser humano se desgasta facilmente em atividades que requerem muito esforço físico ou mental. A performance do especialista humano pode ser afetada por fatores emocionais ou cansaço, conduzindo a diferentes decisões em situações idênticas.

Outra vantagem é a facilidade com que o conhecimento pode ser transferido e reproduzido. Essa transferência de um ser humano para outro é um processo demorado e difícil, que requer estudo, aprendizado e treinamento. A transferência artificial é um processo trivial de cópia de um programa ou base de dados.

A documentação de experiência humana é extremamente difícil e demorada, mas para o conhecimento artificial é relativamente simples, resumindo-se ao mapeamento entre a maneira de representação do conhecimento e sua descrição em linguagem natural.

É difícil obter a opinião conjunta de vários especialistas, e conseguir uma opinião de consenso é quase impossível. Um sistema pode armazenar o conhecimento de mais de um especialista, consultar cada um deles e oferecer diversas opções (HART, 1989).

O especialista artificial tem algumas limitações. Uma delas é a criatividade. O ser humano nesse ponto é imbatível, podendo reorganizar informações e usá-las para sintetizar novos conhecimentos, manusear eventos inesperados, usando imaginação ou novas abordagens para a solução do problema, criando analogias com situações de um outro domínio completamente diferente.

Outra área onde o especialista humano se sobressai é no aprendizado. Ele se adapta a mudanças de condições, ajustando suas estratégias de acordo com novas situações. Sistemas especialistas não são capacitados para aprender novos conceitos ou regras. Este aprendizado é uma tarefa muito difícil para um sistema especialista (SE). Progressos têm acontecido no desenvolvimento de programas que aprendem, mas esses programas trabalham em domínios extremamente simples, não funcionando bem quando confrontados com a complexidade e detalhes de problemas reais.

Especialistas humanos podem usar entradas complexas do sistema sensorial, disponíveis pelos cinco sentidos. Sistemas especialistas manipulam símbolos. Assim, dados sensoriais devem ser transformados em símbolos para que possam ser compreendidos pelo sistema. Uma parte da informação pode ser perdida na transformação. Especialistas humanos vêem o problema de maneira ampla, examinando todos os seus aspectos, selecionando os relevantes; por outro lado, SEs focalizam-se no problema em si, ignorando informações isoladas que poderiam ser importantes.

Finalmente, os seres humanos, especialistas ou não, possuem o chamado conhecimento do senso comum, que se constitui num largo espectro de conhecimento geral sobre o mundo, acumulado durante toda sua vida e que permeia todas as suas decisões. Devido à enorme quantidade de conhecimento de senso comum, torna-se difícil construir um programa inteligente, particularmente um sistema especialista (WATERMAN, 1986).

Por estas razões, SEs são freqüentemente utilizados no aconselhamento, como um consultor, ou, ainda, como ajuda para um especialista ou usuário iniciante com algum problema.

Segundo DOLUSCHITZ & SCHMISSEUR (1988), muitas das vantagens citadas podem ser benéficas para a agricultura. É de grande interesse a preservação da experiência de especialistas de extensão, de produtores experientes e planejadores agrícolas, a distribuição do conhecimento de pesquisadores altamente qualificados, ou a incorporação de sofisticados modelos de simulação e otimização.

Sistemas especialistas podem ser usados para a recomendação do uso de fertilizantes, de esquemas de irrigação, de práticas de conservação do solo, para avaliar a saúde financeira de uma propriedade agrícola, ou, ainda, para diagnosticar doenças em culturas e criação de animais, além de recomendar o tratamento adequado. Também pode ser desenvolvido para controlar a irrigação e a injeção de nutrientes em estufas, para o planejamento de operações em uma propriedade agrícola, para monitorar e controlar máquinas agrícolas, entre outros.

O primeiro sistema especialista desenvolvido para uso agrícola foi o PLANT/ds, em 1982. É um sistema de diagnóstico de doenças da cultura de soja e contém conhecimento de diagnóstico representado por regras de decisão que especificam todas as condições indicadoras de cada doença (DOLUSCHITZ & SCHMISSEUR, 1988). Porém o primeiro sistema a atrair a atenção em sistemas de produção e agricultura em geral foi o COMAX, desenvolvido em 1985, que usa uma combinação de regras derivadas de especialistas e resultados gerados por um modelo de simulação de produção de algodão chamado GOSSYM, para a recomendação de fertilizantes e esquemas de irrigação para essa cultura.

Como alguns exemplos de sistemas especialistas podemos citar: SOYBUG (JONES et al., 1986), um sistema especialista que faz recomendações a respeito de pragas de insetos; FinARS, um sistema para avaliar a saúde financeira de uma propriedade agrícola (BOGGESS et al., 1989); DELEITE - sistema especialista capaz de emitir diagnósticos sobre problemas relacionados com alimentação, sanidade e manejo reprodutivo de rebanhos leiteiros (BRAGA et al., 1997); TOMEX-UFV é um sistema especialista de diagnóstico de doenças do tomateiro (POZZA et al., 1997).

Sistemas especialistas também podem ser ligados a outros tipos de sistemas, a modelos matemáticos e ainda a modelos de simulação, e junto com estes constituir uma ferramenta de grande utilidade para auxiliar produtores e técnicos agrícolas na tomada de decisões. Um exemplo disso é o sistema de suporte a decisão para o planejamento de conservação do solo, desenvolvido no

Canadá por MONTAS & MADRAMOOTOO (1992), que integra um Sistema de Informações Geográficas (SIG) com um sistema especialista para avaliar a quantidade perdida de terra e recomendar práticas conservacionistas para uma microbacia.

LOH et al. (1994) integraram um sistema especialista com um SIG para auxiliar no planejamento e avaliação ambiental. FERNANDES FILHO (1996) também integrou SE com SIG para determinar a aptidão agrícola das terras. Outro exemplo é o EROSYS, desenvolvido por FERNANDES (1997), que integra SIG, sistema especialista e modelagem matemática para a avaliação de impacto ambiental das atividades agrícolas sobre o solo.

2.2.1 – Principais componentes de um Sistema Especialista

Todo sistema especialista é formado pelo menos por três componentes básicos, mostrados na Figura 1: uma base de conhecimento do domínio, um sistema ou mecanismo de inferência ou estrutura de controle para utilização da base de conhecimento e uma interface com o usuário.

A base de conhecimento do sistema especialista contém a representação do conhecimento do domínio do problema, isto é, fatos e conhecimentos heurísticos que são desenvolvidos com a ajuda de pelo menos um especialista no domínio.

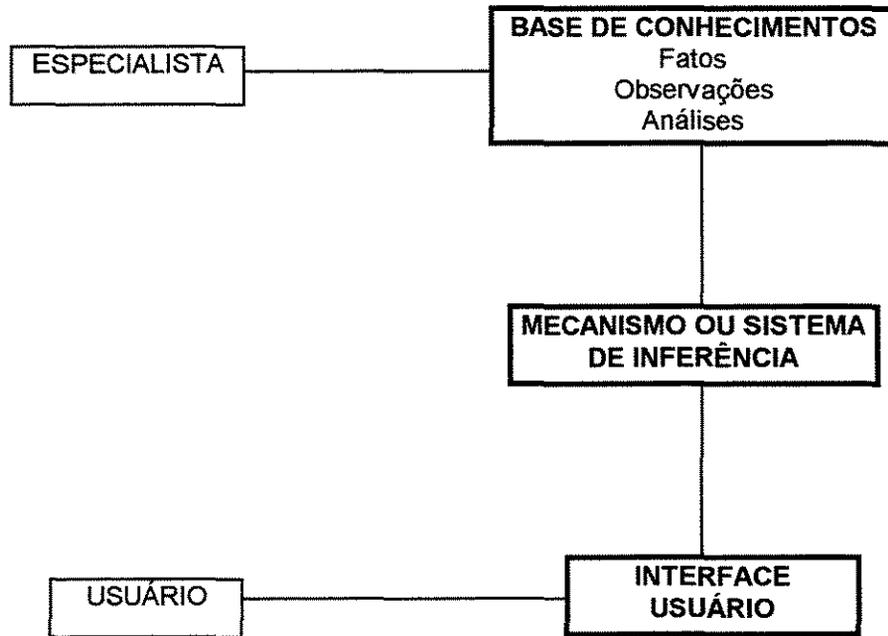


Figura 1: Elementos de um sistema especialista (SAWYER & FOSTER, 1986).

O conhecimento é codificado na forma de regras do tipo IF-THEN ou SE-ENTÃO, e consiste de duas partes: uma antecedente (ou lado esquerdo), que lista a condição, e uma conseqüente (ou lado direito), que estipula o que concluir ou o próximo passo.

"SE	<i><condições forem verdadeiras></i>	ENTÃO	<i><ação></i> "
	antecedente		conseqüente
	lado esquerdo		lado direito

O sistema especialista pode chegar a conclusões, ativar ações ou outras regras, através da utilização de informações contidas nos fatos. Esse tipo de representação do conhecimento é chamado de *baseado em regras*.

Segundo SAWYER & FOSTER (1986), é o mecanismo ou sistema de inferência que aplica as regras de lógica racional para pesquisar a base de conhecimento em busca de soluções. Como o próprio nome indica, a principal função do mecanismo é obter inferências, isto é, conclusões. O procedimento é similar ao raciocínio de um especialista quando avalia um problema e propõe soluções.

Há dois tipos de controle de inferência: um conhecido como *encadeamento para frente (forward chaining)* e o outro, *encadeamento para trás (backward chaining)*. No primeiro, o sistema avalia se as condições da regra são satisfeitas e, caso isso ocorra, ele executa alguma ação ou ativa novas regras até obter a solução. Nesse tipo de controle, o sistema usa os fatos ou dados do lado esquerdo para inferir as informações do lado direito. Essa técnica é conhecida como "*orientada por dados*".

No encadeamento para trás, o sistema parte de uma hipótese (objetivo) e executa as regras que possam confirmá-la. Essa técnica é conhecida como "*orientada por objetivos*".

Para WATERMAN (1986), a maneira como o sistema especialista deve ser estruturado depende da natureza do problema e do modo como o conhecimento é

representado e organizado. Muitos sistemas usam linguagens de alto nível que têm o sistema de inferência construído como uma parte da mesma. Outras linguagens de baixo nível requerem o desenvolvimento e a implementação do mecanismo de inferência.

A interface com o usuário é conhecida como o sistema de entrada e saída que permite a comunicação bidirecional, isto é, a troca de informações entre o operador e o mecanismo de inferência. Uma linguagem natural de interface simula uma conversação casual, usando expressões do dia-a-dia do usuário. Através desse sistema, ele entra com conhecimentos que descrevem o problema e recebe solicitações de informações adicionais sobre o mesmo e também conselhos ou recomendações, e as razões das mesmas.

É através desse componente que o sistema especialista desenvolvido neste trabalho, solicita informações ao usuário sobre a natureza do solo, relevo, clima, recursos hídricos e outros dados necessários para a determinação da capacidade de uso, fornecendo os resultados encontrados, isto é, classes e subclasses de capacidade de uso.

2.2.2 – Desenvolvimento de um Sistema Especialista

As pessoas envolvidas no desenvolvimento de um sistema especialista são:

- *Engenheiro de conhecimento*: é a pessoa encarregada de extrair o conhecimento dos especialistas, geralmente através de entrevistas, e depois organizá-lo e sistematizá-lo na base de conhecimento;
- *Usuário*: deve dizer como o sistema será usado, que tipos de problemas deverá resolver e como o programa deverá se comunicar com o usuário;
- *Especialista*: ou melhor, um time de especialistas, que estipula o assunto do problema para fornecer conhecimento, informações de fatos e a relação de métodos analíticos que ele usa para resolver problemas do seu domínio.

Para SAWYER & FOSTER (1986), todo sistema especialista deve ser considerado um experimento, cuja obtenção de resultados satisfatórios depende da especificidade do problema e da exatidão da definição do mesmo. O desenvolvimento de sistemas especialistas apresenta três fases especiais: planejamento, aquisição de conhecimento e implementação, resumidos na Figura 2.

2.2.2.1 – Planejamento

Qualquer experimento deve começar com uma minuciosa análise dos objetivos do projeto. O engenheiro de conhecimento deve conhecer a natureza do problema a ser resolvido. Ele deve ser capaz de descrever o problema e os efeitos ou resultados esperados da solução. A idéia é eliminar ambigüidade e

facilitar o desenvolvimento de medidas específicas que podem validar, expandir e redefinir o sistema.

No início do desenvolvimento do processo são necessários dados, que devem ser fornecidos pelo usuário final, para assegurar que o sistema será operacionalmente prático e de acordo com a condição na qual irá operar.

FASE I	PLANEJAMENTO
<i>Domínio</i>	<ul style="list-style-type: none">• Especificar objetivos• Definir problemas• Desenvolver controles e medidas
FASE II	ENGENHARIA DE CONHECIMENTO
<i>Especialista</i>	<ul style="list-style-type: none">• Seleção de Especialistas• Extração de conhecimento• Desenvolvimento da base de conhecimento
FASE III	IMPLEMENTAÇÃO
<i>Usuário</i>	<ul style="list-style-type: none">• Programação• Teste preliminar• Refinamento

Figura 2: Fases do desenvolvimento de um sistema especialista (SAWYER & FOSTER, 1986).

O usuário participa na especificação de problemas, esclarecendo, com a sua experiência, como os problemas são originados e como suas soluções devem ser implementadas.

Uma vez definidos os objetivos, tornam-se aparentes os tipos de problemas e subproblemas que precisam ser resolvidos e a maneira como o programa os abordará, também que tipo de ação, evento ou implementação devem ser esperados como resultados de uma consulta ao sistema.

Nessa fase, a necessidade de especificação é grande. A base de conhecimento deve ser completa em detalhes, mas também deve ser limitada aos fatos e regras requeridas para alcançar os objetivos estabelecidos.

2.2.2.2 – Engenharia de conhecimento

A segunda fase do desenvolvimento de um SE envolve: adquirir, estruturar e traduzir o conjunto de experiências necessárias à resolução dos problemas identificados.

A próxima etapa é a escolha de um ou mais especialistas de acordo com a complexidade do problema. Após a escolha dos especialistas, o passo seguinte é a aquisição do conhecimento necessário para a resolução do problema.

Esta fase é apontada pela literatura como o gargalo no desenvolvimento de um SE (HAYES-ROTH et al., 1983; WATERMAN, 1986; DOLUSCHITZ & SCHMISSEUR, 1988; HART, 1989; JONES, 1989). Em geral, os especialistas têm grande dificuldade para exprimir qual método ou regras foram usadas para a solução de um determinado problema do domínio.

O conhecimento de um SE provém de vários recursos, tais como: livros textos, publicações científicas, base de dados, casos estudados, dados empíricos e experiência pessoal. Contudo a fonte principal é o conhecimento dos especialistas no domínio, que é obtido através de uma série de intensas e sistemáticas entrevistas.

Existem diversas técnicas de extração de conhecimento, que são essencialmente entrevistas de vários tipos e métodos psicológicos. É comum iniciar com entrevistas e então empregar outros métodos.

Segundo a forma de condução, as entrevistas podem ser de dois tipos: estruturada e não estruturada. A entrevista estruturada é feita com questões e objetivos específicos. Já a entrevista não estruturada é mais uma conversação dominada pelo especialista, iniciada com uma questão do tipo “com quais tipos de problema você normalmente lida?”. A maioria dos projetos começa com algumas entrevistas não estruturadas.

Existem diversos métodos de questionamento para as entrevistas. Dependendo do conhecimento que se quer extrair e do especialista, devem-se

usar métodos diferentes. HART (1989) descreve diversos métodos para a aquisição do conhecimento necessário para a resolução do problema.

Nenhuma das técnicas existentes resolve totalmente o problema de aquisição de conhecimento, mas podem ser usadas de forma combinada para obter diferentes tipos de conhecimento. Além disso, os resultados da aplicação de uma técnica podem ser utilizados como auxílio para o uso de outras técnicas.

2.2.2.3 – Implementação

Após a aquisição de conhecimento, este deve ser organizado e sistematizado, na forma de fatos e regras, na base de conhecimento, cuja natureza será determinada pela definição do problema.

O engenheiro de conhecimento pode, agora, começar a trabalhar na implementação do sistema, empregando a representação escolhida para o desenvolvimento da base de conhecimento.

A próxima etapa consiste na avaliação do SE, que refere-se aos procedimentos aplicados para assegurar que o sistema foi desenvolvido de acordo com o seu propósito inicial. Essa etapa pode ser dividida em: verificação, validação e análise de sensibilidade (HARRISON, 1991).

A verificação consiste em checar se não há regras incorretas, se a base de conhecimento está completa e, também, se para toda entrada o sistema especialista produz alguma conclusão e se esta é consistente.

A validação consiste em comparar o resultado obtido com a aplicação do sistema especialista e o resultado esperado. Essa comparação pode ser feita entre as saídas do SE com julgamentos de alta qualidade obtidos de outras fontes, para cenários selecionados

Essa etapa é uma tarefa complexa, pois os SEs, além dos problemas apresentados por sistemas tradicionais, têm problemas causados pelo fato do domínio de conhecimento ser impreciso, incompleto e às vezes até incorretos (SCHMISSEUR, 1992).

A análise de sensibilidade consiste em analisar a extensão da variação nas saídas do sistema quando são feitas mudanças na base de conhecimento ou nos dados de entrada.

III – MATERIAL E MÉTODOS

3.1– ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo utilizada para testar o sistema especialista foi a microbacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira, com uma área de 1917,9 ha, localizada entre as coordenadas UTM (Zona23S): 7517500 e 7525000m N, e 2999000 e 308990m L, próxima à cidade de Mogi Guaçu, Estado de São Paulo (Figura 3).

3.1.1 – Solos

Os tipos de solos encontrados na área de estudo foram caracterizados por OLIVEIRA (1992) no levantamento semidetalhado da quadrícula de Moji Mirim. São quatro unidades simples de mapeamento e uma associação de classes de solos, e estão representados no Quadro 2 e na Figura 4.

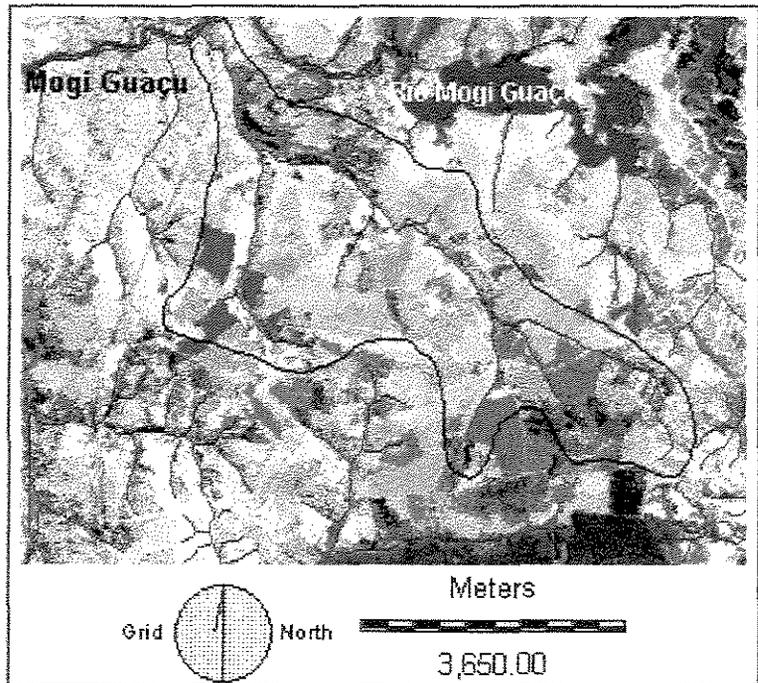


Figura 3: Localização da microbacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira (composição colorida das bandas 3, 4 e 5 da imagem Landsat TM de 1996 da área de estudo). Fonte: CAVALIERI (1998).

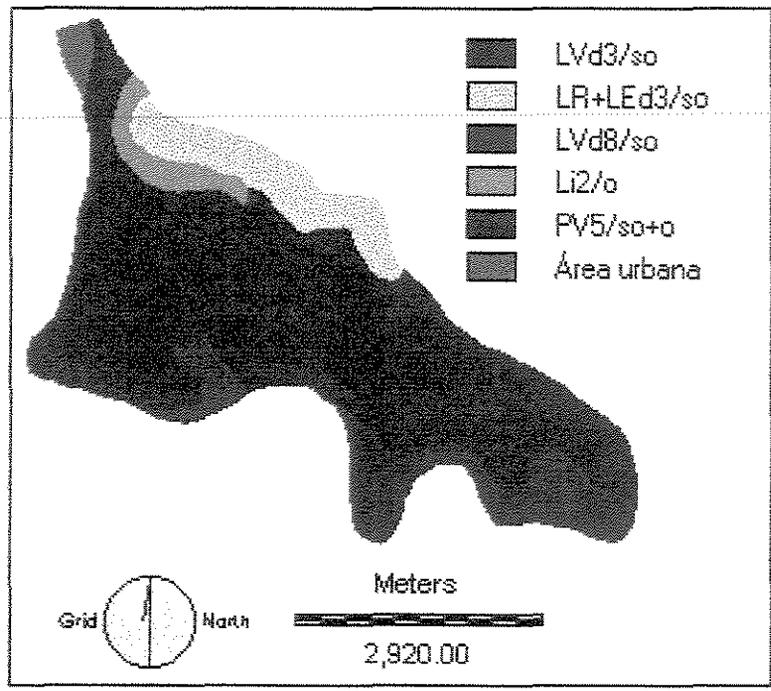


Figura 4: Mapa de solos da microbacia do Ribeirão da Cachoeira. Fonte: CAVALIERI (1998).

QUADRO 2: Símbolo, classificação taxonômica e unidade dos solos da área de estudo (OLIVEIRA, 1992).

Símbolo	Classificação taxonômica	Unidade de solo	Área (ha)	Área (%)
LVd3	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, A moderado, textura argilosa	Mato Dentro	1332,63	70,52
LRd	Associação de Latossolo Roxo distrófico, A moderado, textura muito argilosa	Barão Geraldo	200,52	10,61
+	+	+		
LEd3/so	Latossolo Vermelho-Escuro álico, A moderado, textura muito argilosa	Limeira		
LVd8	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico ou álico, A húmico, textura média ou argilosa leve	Camarguinho	262,98	13,92
Li2/o	Solo Litólico eutrófico ou distrófico, A moderado, textura argilosa, substrato basalto ou diabásio	-----	66,42	3,51
PV5	Solos Podzólicos Vermelho-Amarelos, indiscriminados, relacionados a materiais do Complexo Cristalino. Predominância de solos sem e com cascalho	-----	27,18	1,44

3.2 – CAPACIDADE DE USO DA TERRA

O desenvolvimento do sistema especialista para determinar a capacidade de uso da terra teve como base o sistema desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo dos EUA, por KLINGEBIEL & MONTGOMERY (1961) e adaptado por LEPSCH et al. (1991).

No Quadro 3 estão representadas as classes de declividade adotadas.

O mapa da Figura 5 foi obtido com a reclassificação do mapa de declividade (CAVALIERI, 1998), utilizando um software de sistema de informações geográficas, o IDRISI for Windows, versão 2.0.

QUADRO 3: Classes de declividade.

CD	Declividade
	(%)
A	0 - 3
B	3 - 6
C	6 - 9
D	9 - 12
E	12 - 18
F	18 - 25
G	> 25

3.2.1 – Fatores limitantes

Neste item estão descritos os fatores limitantes considerados. A forma como foram determinados os graus de limitação atribuídos aos mesmos estão relacionados em anexo.

3.2.1.1 – Pedregosidade / rochosidade

A pedregosidade e a rochosidade causam impedimentos à mecanização, além de causar danos aos implementos agrícolas e diminuir o volume de terra explorado pelas raízes, com repercussão na quantidade de nutrientes e água

disponível por unidade de volume e, especialmente no caso das rochas, pela diminuição do espaço útil para o desenvolvimento da cultura (OLIVEIRA & SOSA, 1995).

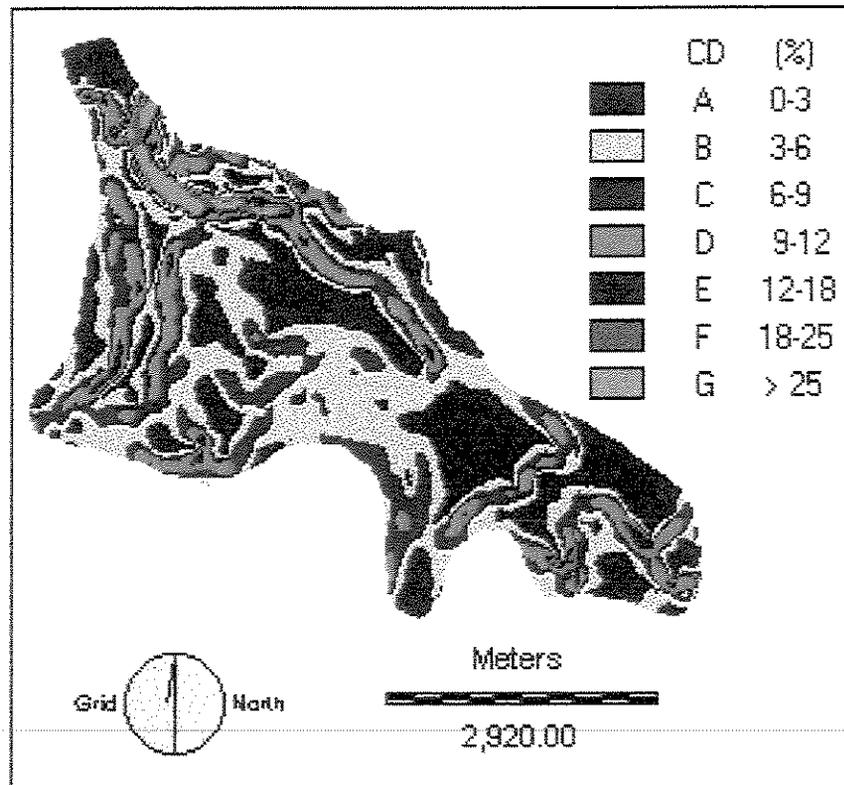


Figura 5: Classes de declividade da área teste.

Neste trabalho, para a pedregosidade e rochosidade foram considerados os tamanhos e naturezas de pedras conforme LEPSCH et al. (1991) que são as seguintes:

- a) fragmentos grosseiros: cascalhos (diâmetro médio entre 0,2 e 2 cm)
pedras (diâmetro médio entre 2 a 20cm);
- b) matacões: fragmentos rochosos com diâmetro médio superior a 20cm;
- c) afloramento rochoso: rochas fixas aflorando na superfície.

O grau de restrição ao uso da terra apresentado pela pedregosidade foi determinado em função da quantidade de fragmentos grosseiros em relação à massa do solo. Já, para a rochosidade, foram considerados a quantidade de matacões e afloramentos rochosos.

3.2.1.2 – Risco de geada

Refere-se a locais onde existe a possibilidade de ocorrência de geadas que, devido à sua intensidade, podem influenciar na escolha dos cultivos.

A posição do solo no relevo e a sua declividade foram considerados fatores importantes para determinar o grau de restrição ao uso da terra, apresentado por este fator limitante¹.

¹ Informação pessoal do Dr. Ângelo Paes de Camargo (1998) do Centro de Ecofisiologia e Biofísica do Instituto Agrônomo de Campinas – IAC.

3.2.1.3 – Risco de inundação

O risco de inundação é indicado pela freqüência e pela duração usual com que ocorre. A freqüência e a duração das inundações consideradas neste trabalho são as mesmas consideradas por LEPSCH et al. (1991) e estão relacionadas a seguir:

- Freqüência:
 - a) ocasionais: com mais de cinco anos de recorrência provável;
 - b) freqüentes: com recorrência provável entre um e cinco anos;
 - c) muito freqüentes ou anuais: ocorrendo sistematicamente todo ano, repetindo-se uma ou mais vezes nas várias estações do ano.

- Duração:
 - a) curtas: menos de dois dias;
 - b) médias: entre dois e trinta dias;
 - c) longas: mais de trinta dias.

A análise da combinação da freqüência e da duração das inundações foi utilizada para determinar os graus de limitação devido a este fator.

3.2.1.4 – Profundidade efetiva

Refere-se à espessura máxima do solo em que as raízes não encontram impedimento físico para penetrar livremente, facilitando a fixação da planta e servindo como meio para a absorção de água e nutrientes (LEPSCH et al., 1991).

No Quadro 4 estão representadas as classes de profundidade efetiva consideradas neste trabalho.

QUADRO 4: Profundidade efetiva do solo .

Classe de profundidade efetiva	Profundidade
	(m)
Muito profundo	mais de 2,00
Profundo	1,00 a 2,00
Moderadamente profundo	0,50 a 1,00
Raso	0,25 a 0,50
Muito raso	menos de 0,25

Fonte: LEPSCH et al., 1991.

3.2.1.5 – Disponibilidade de água

A capacidade de armazenamento da água no solo está diretamente relacionada com a granulometria do espaço poroso, que depende de várias características do solo, como a textura, a estrutura, a densidade, a matéria orgânica e a profundidade (OLIVEIRA & BERG, 1985).

Os graus de limitação devido à disponibilidade de água foram determinados considerando a textura do solo, a sua profundidade e a deficiência hídrica anual.

3.2.1.6 – Drenagem interna ou excesso de água

O excesso de água no solo por tempo prolongado constitui um importante fator limitante ao uso da terra, pois os solos mal drenados apresentam deficiência de oxigênio e, como consequência, inibição do crescimento das raízes.

Para determinar os graus de limitação devido a este fator limitante, neste trabalho, foram consideradas a presença ou não de lençol freático elevado e camadas pouco permeáveis no perfil do solo, pois estas diminuem consideravelmente o fluxo descendente da água.

3.2.1.7 – Risco de erosão

Alguns solos sofrem mais erosão que outros, mesmo sob condições idênticas de declividade, de cobertura vegetal e de práticas de manejo. Essa diferença é denominada erodibilidade do solo, que pode ser definida como a vulnerabilidade ou susceptibilidade à erosão, sendo, portanto, um dado obtido a partir da natureza do solo (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990).

O grau de limitação ao uso devido ao risco de erosão foi determinado em função da erodibilidade do solo e da classe de declividade em que o mesmo se encontra.

No Quadro 5 estão representadas a erodibilidade dos solos da área de estudo.

QUADRO 5: Erodibilidade dos solos da área de estudo.

Solos (Símbolo)	Erodibilidade (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)
LRd + LVd3/so	0,0246
LRd+ LEd3/so	0,0144
LVd8/so	0,0125
Li2/o	0,0250
PV5/so+o	0,0343

Fonte: BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990.

Para o caso de agrupamento de classes de solos em associações, o índice de erodibilidade foi estabelecido calculando-se a média ponderada, de acordo com o seguinte critério²:

- associação de duas classes de solos: 60% da primeira e 40% da segunda classe
- associação de três classes de solos: 50% da primeira, 30% da segunda e 20% da terceira classe.

O grau de limitação devido à erodibilidade foi estabelecido de acordo com o Quadro 6.

² Comunicação pessoal do Dr. Francisco Lombardi Neto.

QUADRO 6: Graus de limitação devido à erodibilidade.

Grau de limitação	Erodibilidade (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)
0: nulo	0 a 0,005
1: Ligeiro	0,005 a 0,020
2: moderado	0,020a 0,030
3: forte	0,030 a 0,040
4: muito forte	> 0,040

Fonte: LOMBARDI NETO (comunicação pessoal).

Foi desenvolvida uma base de dados com valores da erodibilidade para alguns solos. O sistema especialista calcula o valor da erodibilidade, se este não estiver na base de dados, usando o modelo proposto por DENARDIN (1990), expresso na equação [1], exceto para solos podzólicos. Para estes, a erodibilidade é determinada conforme LOMBARDI NETO & BERTONI (1975), ou seja, pela razão entre a relação de dispersão (teor de argila natural / teor de argila dispersa em água) e a relação argila dispersa/umidade equivalente (1975), pois esta representa melhor a erodibilidade para esta classe de solo (comunicação pessoal Dr. Lombardi Neto).

O grau de limitação devido ao risco de erosão é determinado combinando a classe de declividade com o grau de limitação devido à erodibilidade.

$$K = [(0,00000748 \times M) + (0,00448059 \times p) - (0,06311750 \times DMP) + (0,01039567 \times r)] \quad [1]$$

onde: K é o valor a ser estimado para o fator erodibilidade do solo, expresso em t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹;

M = novo silte x (nova areia + novo silte) ;

DMP = [(0,65 x areia grossa) + (0,15 x areia fina) + (0,0117 x silte) + (0,00024 x argila)] / 100 ;

r = (nova areia x m.o) / 100;

m.o = % de carbono x 1.73;

novo silte = areia fina + silte;

nova areia = areia grossa;

p = permeabilidade do perfil de solo.

3.2.1.8 – Restrição à mecanização

A mecanização pode ser efetuada sem riscos até uma declividade de 16-18% para cultivo em nível. Acima desse valor, o uso de máquinas agrícolas é considerado inadequado, pois estas trabalham no sentido do declive, contribuindo muito, dessa forma, para a erosão do solo.

Os graus de limitação devido à mecanização foram determinados considerando a declividade, o risco de inundação, a pedregosidade e a atividade da argila.

3.2.1.9 – Disponibilidade de nutrientes

A quantidade de nutrientes disponíveis no solo é um fator de grande importância na determinação da capacidade de uso da terra.

OLIVEIRA & BERG (1985) relacionaram a saturação em bases (V%) com a capacidade de troca de cátions (CTC) para determinar os graus de limitação devido à disponibilidade de nutrientes. Segundo os autores, em dois solos com a mesma saturação em bases, o que tiver a CTC mais elevada apresenta maior reserva de bases. Também solos com CTC muito baixa, mesmo apresentando V% > 50, foram considerados como tendo forte limitação quanto à disponibilidade de nutrientes.

A determinação do grau de limitação devido à disponibilidade de nutrientes foi feita como no trabalho de OLIVEIRA & BERG (1985) por esta ser qualitativa, o que torna a classificação no sistema de capacidade de uso um pouco mais precisa, isto é, menos subjetiva.

3.2.1.10 – Fixação de fósforo

Os solos das regiões tropicais são pobres em fósforos e, por essa razão, este é o elemento que freqüentemente limita a produção agrícola nessas regiões.

A determinação dos graus de limitação devido à fixação de fósforo foi feita com base no trabalho de OLIVEIRA & SOSA (1995).

3.2.1.11 – Toxicidade por alumínio

Este fator limitante refere-se às altas concentrações de alumínio trocável na camada subsuperficial do solo, apresentando problemas de toxicidade para a maioria das plantas cultivadas (LEPSCH et al., 1991).

Pelas mesmas razões apresentadas no item 3.2.1.9, os graus de limitação devido à toxicidade por alumínio foram determinados como OLIVEIRA & BERG (1985) fizeram em seu trabalho.

3.2.2 – Classes e subclasses de capacidade de uso

As classes de capacidade de uso da terra foram determinadas pelo sistema especialista em função das classes de declividade e dos graus de limitação dos fatores limitantes considerados.

Para casos de classes de solos em associações, a classe de capacidade de uso é determinada, pelo SE, considerando o primeiro solo, por este ser dominante.

A subclasse representa a classe de capacidade de uso em função da natureza da limitação, tornando, assim, mais explícitas as práticas ou grupos de práticas conservacionistas a serem adotadas (LEPSCH et al., 1991).

Foram adotadas as seguintes subclasses:

- e: limitações por risco de erosão (risco de erosão e mecanização);
- s: limitações relativas ao solo (pedregosidade, rochosidade, profundidade efetiva e disponibilidade de água);
- f: limitações relativas à fertilidade do solo (disponibilidade de nutrientes, toxicidade por alumínio e fixação de fósforo);
- a: limitações por excesso de água (risco de inundação e drenagem interna)
- c: limitações climáticas (geada).

Todas as limitações com grau de restrição ao uso maior ou igual a dois são indicadas na subclasse.

3.3 – SISTEMA ESPECIALISTA

O sistema especialista foi desenvolvido em um microcomputador Pentium 166Mhz, com 32MB de memória RAM, com o uso de uma linguagem de programação de alto nível que tem o sistema de inferência construído como uma parte dela, conhecida como CLIPS (C Language Integrated Production System), desenvolvida por Software Technology Branch (STB), NASA/Lyndon B. Johnson Space Center (GIARRATANO & RILEY, 1993).

CLIPS pode ser considerado um “shell”, isto é, um sistema especialista “vazio”, sem a sua base de conhecimento, mas com o sistema de inferência e a interface do usuário. Além disso, essa linguagem possui alta portabilidade, isto é,

pode ser usada em diversos tipos de computadores (VAX, Cray, PC, Sun Workstations etc), tem um baixo custo, pode ser gratuito, se captado na Internet. Existe uma vasta documentação a respeito, tais como, Guia do Usuário e Manual de Referência (User's Guide e Reference Manual).

O SE em questão trabalha com encadeamento para frente ou "forward chaining", que foi considerado o mais apropriado para este trabalho, pois a determinação da capacidade de uso é um problema cuja solução é encontrada a partir de dados da área em estudo, tais como natureza do solo, relevo e clima, entre outros. Por essa razão o sistema de inferência utilizado foi o "orientado por dados".

O sistema foi desenvolvido em um microcomputador Pentium 166MHz, com 32MB de memória RAM. Utilizou-se a versão 6.0 do CLIPS.

3.3.1 – Aquisição de conhecimento

O conhecimento do SE proposto foi adquirido da literatura existente sobre o assunto e de especialistas do domínio do problema.

A aquisição de conhecimento dos especialistas foi feita, basicamente, através de entrevistas e, uma pequena parte, por questionários.

As entrevistas iniciais eram não estruturadas com o objetivo de deixar o especialista à vontade para falar sobre o problema. Após, foram feitas entrevistas estruturadas, com questões e objetivos específicos.

O conhecimento adquirido foi sistematizado com base em regras do tipo IF-THEN. Alguns exemplos de regras do SE desenvolvido estão apresentadas no Quadro 7.

QUADRO 7: Exemplos de regras utilizadas no sistema especialista desenvolvido.

Conhecimento sistematizado em regras do tipo IF-THEN	Regras em CLIPS
<p>SE erodibilidade menor que 0.005</p> <p>ENTÃO grau de limitação devido à erodibilidade é nulo</p>	<pre>(defrule grau-de-limitacao-nula (erodibilidade ?fatorK &:(<= ?fatorK 0.005)) => (assert (erodibilidade-limitacao 0)))</pre>
<p>SE CTC maior que 5 E V% entre 50 e 100</p> <p>ENTÃO grau de limitação devido à disponibilidade de nutrientes é nulo</p>	<pre>(defrule dispnutri-nula (dispnutri ?CTC ?V) (test (> ?CTC 5)) (test (and (> ?V 50)(<= ?V 100))) => (assert (dispnutrientes-limitacao 0)))</pre>
<p>SE classe de declividade igual D ou E</p> <p>ENTÃO grau de limitação devido à mecanização é forte</p>	<pre>(defrule mecanizacao-forte (CD D E) => (assert (mecanizacao-limitacao 3)))</pre>

3.3.2 – Validação do sistema especialista

Para a validação foi criado um cenário com oito diferentes classes de solos, sendo cinco da área de estudo e três da Microbacia do Córrego Carretão, Jaboticabal – SP (DONZELLI et al., 1998). Considerando que esses solos ocorrem em pelo menos duas ou três classes de declividade diferentes, tem-se no total vinte e duas situações possíveis que foram analisadas por sete especialistas, cujas identificações se encontram no Quadro 8.

Informações relativas à natureza do solo, classes de declive e clima foram entregues aos especialistas, e foi solicitado aos mesmos que indicassem o grau de limitação ao uso devido aos fatores limitantes considerados neste trabalho e também as classes e subclasses de capacidade de uso, totalizando 135 avaliações.

Os resultados foram analisados observando a concordância entre o sistema e os especialistas.

QUADRO 8: Identificação, em ordem alfabética, dos especialistas que participaram da validação.

Especialista	Função	Área de atuação
Adriana Cavalieri	Engenheira Agr ^a , professora da Escola de Agronomia do Centro Regional Universitário Espírito. Sto. do Pinhal	Planejamento, sistema de informações geográficas e meio físico
Carlos Roberto Espíndola	Engenheiro Agr ^o , professor titular da Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP	Pedologia, qualidade dos solos, relações solos – paisagem
Hélio do Prado	Engenheiro Agr ^o , pesquisador científico do Centro de Solos e Recursos Ambientais, Instituto Agronômico de Campinas	Classificação de solos
Isabella Clérice De Maria	Engenheira Agr ^a , pesquisadora científica do Centro de Solos e Recursos Ambientais, Instituto Agronômico de Campinas	Manejo e conservação do solo
Jener Fernando Leite de Moraes	Engenheiro Agr ^o , pesquisador científico do Centro de Solos e Recursos Ambientais, Instituto Agronômico de Campinas	Geoprocessamento e sensoriamento remoto, sistema de informações geográficas
João Bertoldo de Oliveira	Engenheiro Agr ^o , pesquisador científico aposentado, Seção de Pedologia, Instituto Agronômico de Campinas. Professor visitante da Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP	Morfologia e classificação de solos
Pedro Luiz Donzelli	Engenheiro Agr ^o , pesquisador científico do Centro de Solos e Recursos Ambientais, Instituto Agronômico de Campinas	Geoprocessamento e sensoriamento remoto, sistema de informações geográficas

IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – SISTEMA ESPECIALISTA

O SE desenvolvido tem 500 regras, sendo que 65% são regras que representam o conhecimento necessário para determinar a capacidade de uso da terra e 35% são regras de controle, ou seja, para entrada de dados e saída dos resultados.

A base de conhecimento está dividida em três partes (Figura 6):

- a) **Solos**: conjunto de regras que representam os graus de restrição ao uso dos fatores limitantes de algumas classes de solo;
- b) **Limitações**: conjunto de regras que representam o conhecimento necessário para determinar os graus de limitação ao uso da terra para as classes de solo que não fazem parte da base de conhecimento **Solos**;

c) **Classe e subclasse**: conjunto de regras que representam o conhecimento necessário para determinar as classes e subclasses de capacidade de uso da terra.

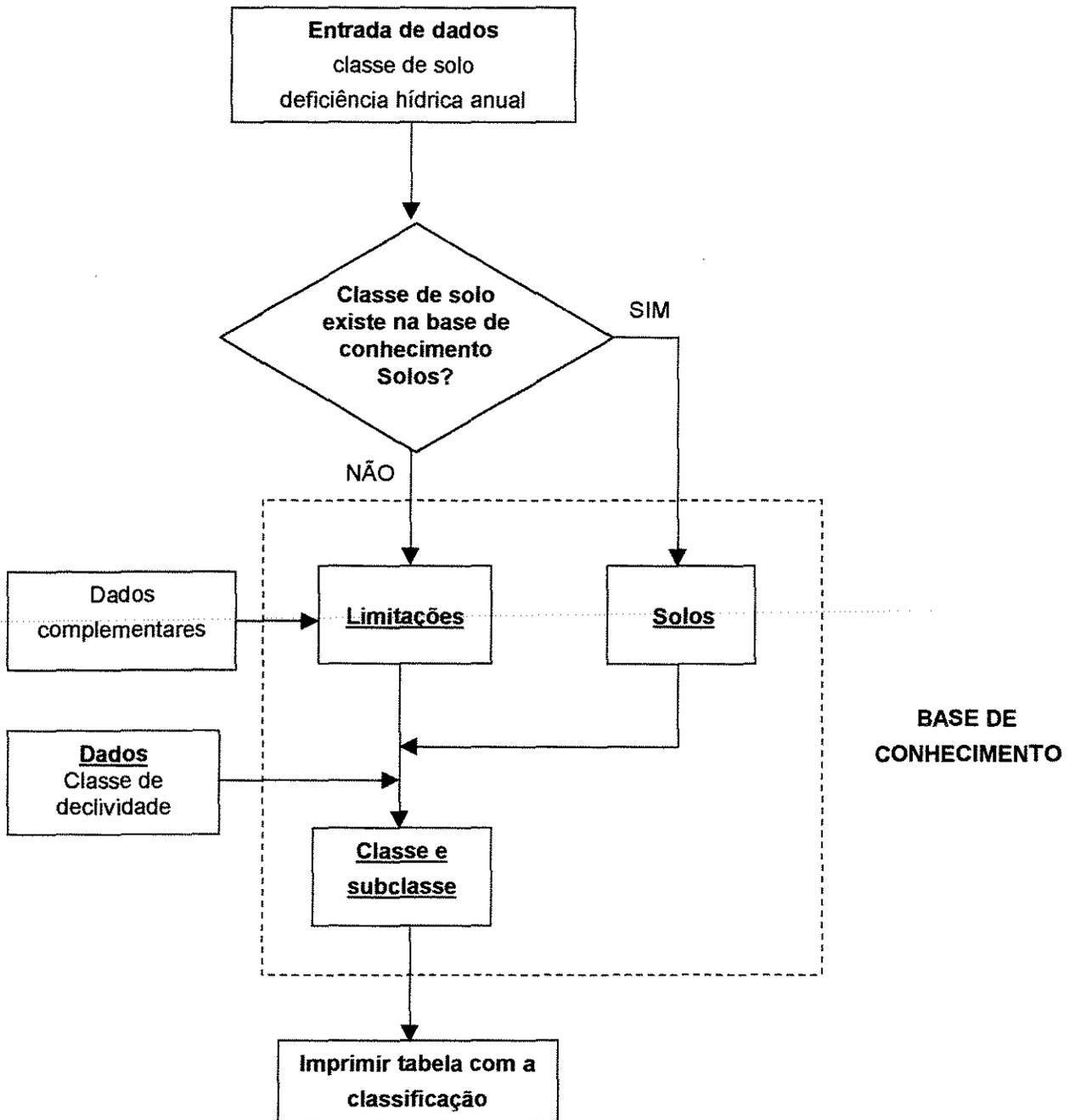


Figura 6: Diagrama de fluxo do sistema especialista desenvolvido.

A entrada de dados é feita via tela, através de perguntas feitas ao usuário, e está dividida em três partes, como pode ser observado na Figura 6.

A primeira entrada de dados pede ao usuário a classe de solos e a deficiência hídrica anual. Se a classe de solo fizer parte da base de conhecimento **Solos**, o sistema pede informações sobre as classes de declividade e, então, determina as classes e subclasses de capacidade de uso da terra. Se a classe de solo não fizer parte da base **Solos**, o sistema determina os graus de restrição ao uso com a entrada de dados complementares, através da base de conhecimento **Limitações**, e então, determina as classes e subclasses.

O usuário do sistema não precisa ser um especialista, mas é necessário que tenha algum conhecimento sobre o assunto para responder as perguntas que são feitas pelo SE para obter informações a respeito da natureza do solo, do relevo e do clima. A Figura 7 mostra algumas perguntas feitas pelo sistema para obter essas informações.

A classificação segundo a capacidade de uso da terra da área em estudo, obtida com a aplicação do sistema, é apresentada em um arquivo que pode ser facilmente impresso (Figura 8).

Qual o número de solos da área em estudo?
 Não considerar associações de classes de solos. 1

Qual a deficiência hídrica anual da região (mm)? 7

Qual o solo 1 dessa área? Escolher uma das seguintes alternativas:

1- Latossolo	8- Glei
2- Podzólico	9- Solo Litólico
3- Terra Roxa	10- Litossolo
4- Podzol	11- Regossolo
5- Brunizem	12- Areia Quartzosa
6- Cambissolo	13- Aluvial
7- Hidromórfico	14- Orgânico

15- Outro

1

Qual é o Latossolo? Escolha uma das seguintes alternativas:

- 1- Ferrífero
- 2- Roxo
- 3- Vermelho-Escuro
- 4- Vermelho-Amarelo
- 5- Amarelo
- 6- Variação Una
- 7- Bruno
- 8- Não sei

4

Você conhece a unidade desse solo?(s/n) n

Qual a textura da camada superficial desse solo?
 Escolha uma das seguintes alternativas:

- 1- Arenosa
- 2- Siltosa
- 3- Média
- 4- Argilosa
- 5- Muito argilosa

4

Existe risco de inundação nessa região? (s ou n) n

Existe risco de geada nessa região? (s ou n). n

Qual o valor da CTC da camada subsuperficial desse solo? 4.32

Qual o valor da saturação de bases da camada subsuperficial desse solo? 7

A CTC é 4.32 e V% é 7. Você confirma esses valores? (s/n). s

Qual o valor da saturação em alumínio (m) da camada subsuperficial? 76

A saturação em alumínio é: 76. Você confirma essa resposta? (s/n). s

Você conhece o fator erodibilidade (fator K) desse solo? (s/n) s

Qual o valor do fator K? 0.0246

O fator K é 0.0246. Você confirma essa resposta? (s/n). s

Existe alguma associação de classes de solos? (s ou n). n

Figura 7: Exemplo de perguntas feitas pelo sistema especialista para obter informações sobre a área em estudo.

A influência do avaliador na determinação da capacidade de uso é muito grande, pois essa subjetividade leva a possibilidades de várias interpretações distintas (FOCHT, 1998). Esse fato influencia a validação de sistemas subjetivos como este.

Observando o Quadro 9, onde estão representados o resultado obtido com a aplicação do sistema especialista e os resultados dos especialistas, pode-se notar que mesmo entre os especialistas não há um consenso quanto ao resultado da classificação, o que vem reforçar o alto grau de subjetividade apresentado por esse processo de classificação de terras.

O SE foi mais rigoroso que os especialistas ao determinar as classes de capacidade de uso. Observando o Quadro 9 pode-se notar que a concordância entre o resultado obtido com o uso do sistema e os resultados dos especialistas diminui conforme a declividade aumenta.

Para os Latossolos observa-se que para a classe de declive C não houve concordância entre os resultados do sistema e os dos especialistas. Isso acontece porque as classes de capacidade de uso são determinadas pelo SE, considerando os graus de limitação ao uso apresentado pelos fatores limitantes em conjunto com a declividade.

Ainda, para os Latossolos, pode-se observar que as classes variam entre II e IV, que são terras cultiváveis e adequadas para todos os usos considerados pela classificação de terras utilizada neste trabalho. As diferenças entre estas classes

são relativas ao sistema de manejo que é mais complexo à medida que aumenta a classe de capacidade de uso.

QUADRO 9: Classes e subclasses de capacidade de uso obtidas pelos especialistas e com o uso do sistema especialista.

SOLOS	CD	SE	Especialistas						
			1	2	3	4	5	6	7
Latossolo Vermelho-Amarelo álico Camarguinho	A	II f	III f	II f	II f	II f	II	III f	II
	B	III f	III f	II f	II f	II f	II	III f	II
Latossolo Vermelho-Escuro álico Limeira	A	II f	III f	II f	II f	II f	II	III f	II
	B	III f	III f	II f	II f	II f	II	III f	II
	C	IV ef	III ef	II f	III ef	III f	III	III ef	III
Latossolo Roxo distrófico Barão Geraldo	A	II f	II f	I	II f	II f	I	III f	I
	B	III f	II ef	I	II f	II f	II	III f	II
	C	IV ef	III e	II	III f	III f	III	III ef	II
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico Mato Dentro	A	II f	III e	II	III f	III f	III	III ef	II
	B	III ef	III f	II f	II f	II f	II	III f	II
Associação de classe de solos LRd + LEa	A	II f	II f	II f	II f	II f	I	III f	I
	B	III f	II ef	II f	II f	II f	II	III f	II
	C	IV ef	III e	II f	III f	III f	III	III f	II
Podzólico Vermelho-Amarelo, Indiscriminado, relacionado a materiais do Complexo Cristalino	B	III ef	II ef	II f	III ef ³	II	III ef ³
	C	IV ef	III e	II ef	III ef	III e	III	III ef ³
	D	VI ef	IV e	III ef	IV ef	IV e	IV	IV e ³
Podzólico Vermelho-Amarelo, Eutrófico, não abrupto Textura média / argilosa	B	III ef	II ef	II e	III ef	II e	II	III e	II
	C	IV ef	III e	III e	III ef	III e	III	III e	III
	D	VI ef	IV e	IV e	IV ef	IV e	IV	IV e	IV
Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico, não abrupto Textura média / argilosa	B	III ef	III f	II ef	III ef	II e	II	III ef	II
	C	IV ef	III ef	III ef	III ef	III e	III	III ef	III
	D	VI ef	IV e	IV ef	IV ef	IV e	IV	IV e	IV

³ Estas situações não foram analisadas por esses especialistas

Ao observar o Quadro 9 pode-se notar que para os Podzólicos ocorreu o mesmo que para os Latossolos, isto é, para as classes de declive C e D, não houve concordância entre os resultados analisados. Essa classe de solo, mesmo em declives menores, apresenta maior risco de erosão por apresentar grau de limitação forte e muito forte devido à suscetibilidade à erosão. Por essa razão o SE é mais rigoroso no que diz respeito ao risco de erosão para esses solos.

As classes determinadas pelo sistema para os solos Podzólicos que ocorrem nas classes de declividade B e C, são III e IV, respectivamente. São terras cultiváveis adaptadas para todos os usos considerados e diferem por necessitarem de sistemas de manejo diferentes para a conservação desses solos.

Para os Podzólicos que ocorrem na classe de declividade D, não houve concordância entre os resultados, o SE classificou como classe VI e os especialistas como classe IV. Essa diferença se deve ao fato do sistema especialista ser mais rigoroso quanto ao risco de erosão para esses solos.

Os solos Podzólicos apresentam alto risco de erosão, que é mais fácil de ser controlada para declividades menores que 9% (classes de declividade: A, B e C). Por essa razão, o SE classificou essa classe de solo, quando ocorre na classe de declive D, como classe VI, que não requer sistemas de manejo complexos, pois o uso é para pastagem e/ou reflorestamento.

A classe IV compreende terras cultiváveis apenas ocasionalmente, com sérios problemas de conservação, exigindo um sistema de manejo complexo. Já,

as terras classificadas como classe VI, embora sejam impróprias para culturas intensivas, são adaptadas para pastagens, reflorestamento e preservação ambiental, com problemas simples de conservação exigindo, portanto, um sistema de manejo bem mais simples que o requerido pela classe IV.

Em relação às subclasses, pode-se observar no Quadro 9 que, para as classes de declividade C e D, não houve concordância entre os resultados analisados. Embora estes não sejam coincidentes, encontram-se bem próximas, quanto aos tipos de limitação.

Os especialistas 1 e 4 consideraram apenas o fator mais limitante para determinar a subclasse, enquanto o SE considera os fatores limitantes com grau maior ou igual a dois.

Quanto às limitações houve uma concordância maior entre o resultado do SE com o dos especialistas 3 e 6.

4.2 – CAPACIDADE DE USO DA TERRA DA MICROBACIA DO RIBEIRÃO DA CACHOEIRA

Utilizou-se o software IDRISI for Windows, versão 2.0, para sobrepor o mapa de solos ao, de classes de declive para obter todas as combinações possíveis de informações, isto é, para saber em quais classes de declividade ocorre cada solo da microbacia.

A imagem resultante da sobreposição do mapa de solos (Figura 4) com o de classes de declive (Figura 5), foi reclassificada de acordo com o resultado obtido com a aplicação do sistema especialista, para obter os mapas com as classes e subclasses de capacidade de uso (Figuras 9 e 10).

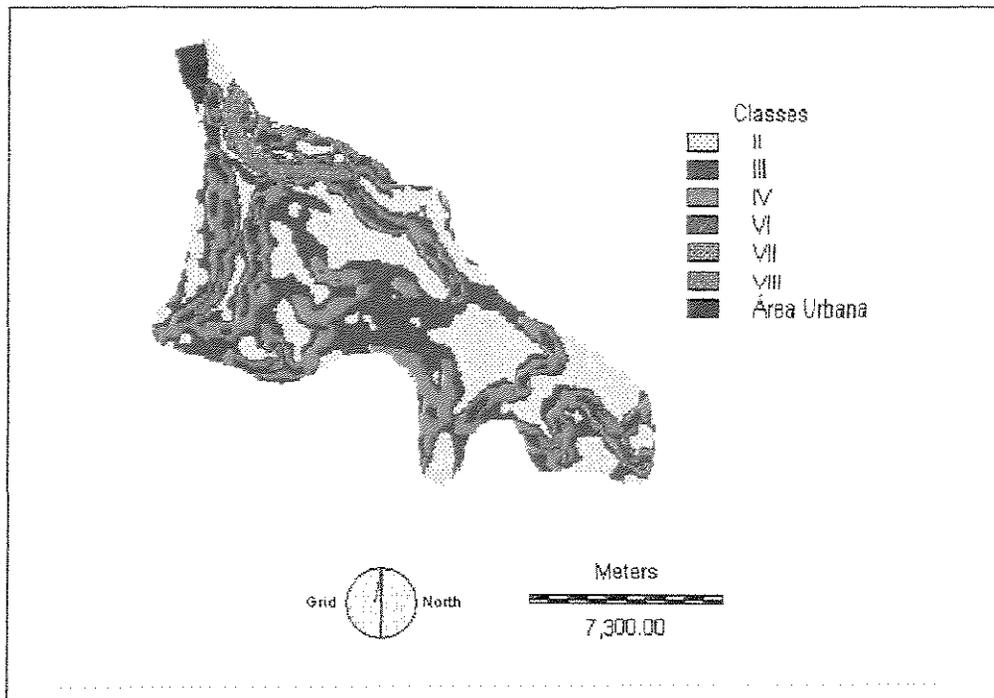


Figura 9: Mapa com as classes de capacidade de uso das terras da microbacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira.

Os Quadros 10 e 11 mostram as classes e subclasses de capacidade de uso encontradas, e suas respectivas áreas.

Observando a Quadro 10, nota-se que a microbacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira apresenta 1.605,69 ha, ou 84,96% da área total, descontada a área

urbana, de terras que podem ser utilizadas para culturas anuais ou perenes, pastagens, reflorestamento e preservação ambiental.

Dessa área, 617,67 ha são de classe III, terras cultiváveis com severas restrições ao uso, apresentando problemas complexos de conservação; 611,73 ha, de classe II, que são terras cultiváveis com ligeiras restrições ao uso, requerendo práticas de conservação de fácil execução; e 376,29 ha, de classe IV, terras cultiváveis apenas ocasionalmente ou em extensão limitada, apresentando sérios problemas de conservação.

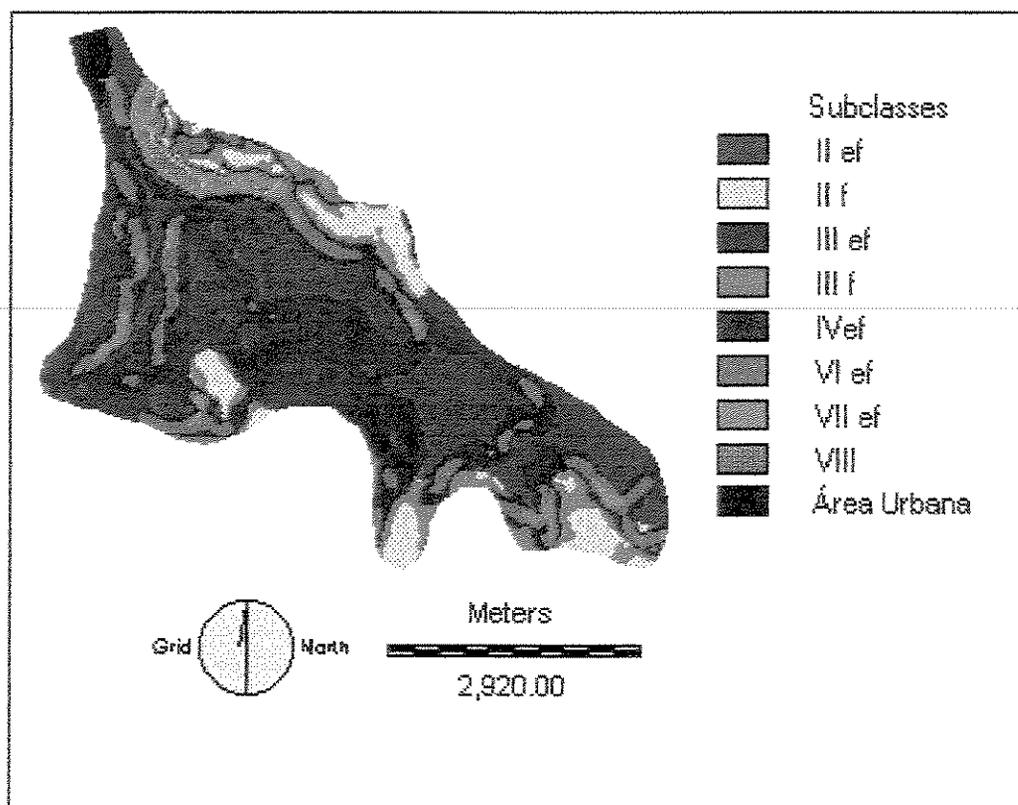


Figura 10: Mapa com as subclasses de capacidade de uso da microbacia do Ribeirão da Cachoeira.

QUADRO 10: Área das classes de capacidade de uso e porcentagem de ocorrência em relação à área total de terras, para microbacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira.

Classe de capacidade de uso	Área	Parcela na área total de terras
	(ha)	(%)
II	611,73	32,37
III	617,67	32,68
IV	376,29	19,91
VI	190,26	10,07
VII	71,73	3,79
VIII	22,32	1,18

QUADRO 11 : Área das subclasses de capacidade de uso e porcentagem de ocorrência em relação à área total de terras, para microbacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira.

Subclasse de capacidade de uso	Área	Parcela na área total de terras
	(ha)	(%)
II ef	476,46	25,21
II f	135,27	7,16
III ef	487,98	25,82
III f	129,69	6,86
IV ef	376,29	19,91
VI ef	190,26	10,07
VII ef	71,73	3,79
VIII	22,32	1,18

A microbacia apresenta uma área de 261,99 ou 13,86% de terras impróprias para culturas intensivas, mas adaptadas para pastagens, reflorestamento e preservação ambiental. Dessa área, 190,26 ha são de classe VI e 71,73 de classe VII.

QUADRO 12: Classificação obtida com a aplicação do sistema especialista para a área teste.

SOLOS	CD	Subclasse
1-Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico Mato Dentro	A	II f
	B	III ef
	C	IV ef
	D	VI ef
2-Associação de classe de solos LRd + LEa	A	II f
	B	III f
	C	IV ef
3-Latossolo Vermelho-Amarelo álico Camarguinho	A	II f
	B	III f
	C	IV ef
4-Solo Litólico Substrato basalto ou diabásio	D	VI ef
	E	VII ef
	F	VII ef
	G	VIII ef
5-Podzólico Vermelho-Amarelo, Indiscriminado, relacionado a materiais do Complexo Cristalino	A	II ef
	B	III ef
	C	IV ef
	D	VI ef
	E	VII ef

Ainda há uma área de 22,32 ha ou 1,18% da área total de terras, de classe VIII, terras próprias para proteção da fauna silvestre.

O Quadro 11 mostra que a principal restrição ao uso é devido a problemas de fertilidade e risco de erosão. Observa-se no Quadro 12 que o grau de limitação devido à fertilidade é forte ou muito forte para os Latossolos que ocorrem em maior extensão na microbacia do Ribeirão da Cachoeira e o risco de erosão varia de moderado a muito forte para o solo Podzólico, e forte e muito forte para o Solo Litólico.

V – CONCLUSÕES

Pelos resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que:

1. O sistema especialista desenvolvido é de fácil utilização, uma vez que o usuário não precisa ser um especialista no assunto, pois a entrada de dados é feita através de perguntas dirigidas que conduzem o usuário à resposta mais adequada e o resultado é apresentado em uma tabela com explicações sobre a classificação encontrada.
2. O SE não exige equipamentos sofisticados, podendo ser utilizado em qualquer microcomputador pessoal.
3. A subjetividade da classificação de terras influenciou o processo de validação do SE, pois a avaliação fica sujeita à experiência e ao conhecimento do avaliador.

4. Embora os resultados da validação do SE não tenham sido coincidentes, podem ser considerados próximos, pois as classes de capacidade de uso II, III e IV, encontradas pelo sistema, são apropriadas para o mesmo tipo de utilização.
5. A divergência encontrada para as classes de declividade C e D é devida ao fato do SE ser mais rigoroso quanto ao risco de erosão, determinando, assim, uma classe maior comparada aquelas determinadas pelos especialistas. Contudo a classificação obtida com a aplicação do SE desenvolvido não está incorreta no que diz respeito a declividades maiores, pois ao determinar uma classe maior o sistema dá uma margem de segurança no que diz respeito ao uso da terra.
6. As regras que determinam as classes de capacidade de uso devem ser revistas, pois houve um avanço da ciência do solo referente a aspectos morfológicos e de classificação.
7. O encadeamento para frente ou "forward chaining", utilizado para o desenvolvimento do sistema, mostrou ser adequado para este trabalho.
8. A técnica de sistemas especialistas mostrou ser eficaz para a classificação de terras segundo a sua capacidade de uso, facilitando a manipulação e o processamento das informações necessárias à determinação da capacidade

de uso da terra, contribuindo, dessa forma, para dar apoio e mais agilidade ao processo de tomada de decisão para o planejamento do uso da terra.

Em relação à área teste, a microbacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira, pode-se concluir que:

1. Foram identificadas seis classes de capacidade de uso, de II a VIII, exceto a classe V.
2. As terras classificadas como classe II e III aparecem como a de maior extensão, com 611,73 ha e 617,67 ha respectivamente, o que corresponde a 32,37% da área total de terras para a classe II e, 32,68% para a III. São terras que podem ser utilizadas para culturas anuais ou perenes, pastagens, reflorestamento e preservação ambiental.
3. As terras classificadas como classe IV, representam 19,91% da área total, sendo cultiváveis ocasionalmente apresentando sérios problemas de conservação.
4. As terras classificadas como classes VI e VII, apresentam área de 10,07 ha e 3,79 ha respectivamente. São terras impróprias para culturas intensivas, mas adaptadas para pastagens, reflorestamento e preservação ambiental.

5. As terras classificadas como classe VIII, apresentam área de 22,32 ha ou 1,18% da área total. São terras que servem apenas para preservação ambiental ou recreação.

6. A principal restrição ao uso encontrada na microbacia foi devido a problemas de fertilidade e risco de erosão. A primeira limitação é maior para os Latossolos e a segunda, para os Podzólicos e Solos Litólicos.

VI – RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Esse item tem como objetivo dar algumas sugestões a futuros trabalhos que possam ser feitos a partir do sistema especialista desenvolvido.

O desempenho do SE pode ser melhorado, se este for integrado a um sistema de informações geográficas para gerar automaticamente o mapa com a classificação de capacidade de uso e, também, a outro sistema especialista para fazer as recomendações de manejo.

Em relação à determinação da capacidade de uso o SE pode ser melhorado utilizando classes de declividade diferentes para os Latossolos e Podzólicos, devido às características próprias de cada um deles.

O alto grau de subjetividade da classificação de terras segundo a sua capacidade de uso, que deixa esse método sujeito à experiência e ao conhecimento do especialista, sugere o uso de lógica fuzzy para tentar

sistematizar de uma forma mais eficaz a experiência dos especialistas e dessa forma minimizar essa subjetividade.

A interface com o usuário pode ser melhorada utilizando o CLIPS em ambiente Windows e desenvolvendo um programa, utilizando Visual Basic ou DELPHI, para fazer a interface com o usuário, tornando o sistema mais "amigável".

VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo, SP: Ícone, 1990. 355p.

BOGGESS, W. G.; BLOKLAND, P. J. van; MOSS, S. D. FinARS: A Financial Analysis Review Expert System. **Agricultural Systems**, 31:19-34.1989.

BRAGA, J. L.; SOUSA, E. M. de; NASCIF, C.; PEREIRA, N. V. L. DELEITE: Diagnóstico inicial de problemas relacionados ao rebanho leiteiro. In: I CONGRESSO DA SBI-AGRO – AGROSOFT'97. **Anais...** Belo Horizonte, MG, 1997. s.p.

CAVALIERI, A. **Avaliação da aptidão agrícola das terras e estudo da degradação do solo da quadricula de Moji Mirim para fins de planejamento agro-ambiental**. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP. Campinas, SP, 1998. 112p.

- DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimada através de parâmetros físicos e químicos**. Tese de doutorado, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ, USP. Piracicaba, SP, 1990. 113p.
- DOLUSCHITZ, R.; SCHMISSEUR, W.E. Expert Systems: Applications to Agriculture and Farm Management. **Computers and Eletronics in Agriculture**, 2:173-182. 1988.
- DONZELLI, P. L.; MORAES, J. L. de; LOMBARDI NETO, F.; PRADO, H. do. **Relatório Técnico de atividades desenvolvidas para o projeto água limpa**. Parceria IAC/FUNDEP/CODASP. Campinas, SP, 1998. 45p.
- EMBRAPA/CNPS. **Sistema brasileiro de classificação de solos: 4ª aproximação**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro, RJ, 1997. 169p.
- FERNANDES, E. N. **Sistema inteligente de apoio ao processo de avaliação de impactos ambientais de atividades agropecuárias**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 1997. 122p.
- FERNANDES FILHO, E. I. **Desenvolvimento de um sistema especialista para determinação da aptidão agrícola das terras de duas bacias hidrográficas**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 1996. 71 p.

FOCHT, D. **Influência do avaliador no resultado da classificação de terras em capacidade de uso.** Dissertação de mestrado, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ, USP. Piracicaba, SP, 1998. 79 p.

GIARRATANO, J. C.; RILEY, G. **Expert Systems: principles and programming.** 2ª ed. Boston: PWS, 1993. 644p.

HARRISON, S. H. Validation of Agricultural Expert System. **Agricultural Systems**, 35:265-285. 1991.

HART, A. **Knowledge Acquisition for Expert Systems.** 2ª ed. London: Kogan Page, 1989. 196p.

HAYES-ROTH, F.; WATERMAN; D. A.; LENAT, D. B. **Building Expert Systems.** London: Addison Wesley, 1983. 444p.

JONES, P.H. Knowledge Aquisition. *In*: BARRET, J. R. and D. D. JONES. Knowledge Engineering in Agriculture. St. Joseph, USA, 1989. Monograph No. 8, ASAE.

JONES, P. H.; EVERETT, J. W.; BECK, H. Knowledge acquisition: A case history of an insect control expert system. **ASAE Tech. Paper No. 86-5041.** St Joseph, USA. 1986.

KLINGEBIEL, A.A.; MONTGOMERY, P. H. Land – capability classification. Washington, D. C. USDA, 1961. 21p. (Agriculture Handbook 210) apud LEPSCH, I. F.; BELLINAZI JR., R.; BERTOLINI, D.; ESPÍNDOLA, C. R. Manual para Levantamento Utilitário do Meio Físico e Classificação de Terras no Sistema de Capacidade de Uso. 4a Aproximação. 2ª edição. Campinas. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991. 175p.

LEPSCH, I. F.; BELLINAZI JR., R.; BERTOLINI, D.; ESPÍNDOLA, C. R. **Manual para Levantamento Utilitário do Meio Físico e Classificação de Terras no Sistema de Capacidade de Uso. 4a Aproximação.** 2ª edição. Campinas. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991.175p.

LOH, D. K.; HSIEH, Y. C.; CHOO, Y. K.; HOLTFRERICH, D. R. Integration of a rule-based expert system with GIS through a relational database management system for forest resource management. **Computers and Electronics in Agriculture**, 11: 215-228. 1994.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. **Erodibilidade de solos paulistas.** Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, SP, 1975. 12p. (Boletim técnico n.º 27)

MARQUES, J. Q. A.; BERTONI, J.; GROHMANN, F. **Levantamento conservacionista.** Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, SP, 1957. 33p. (Boletim 67).

MARQUES, J. Q. A. **Manual brasileiro para levantamentos conservacionistas: 2ª aproximação.** Escritório Técnico Brasil-Estados Unidos (ETA). Rio de Janeiro, RJ, 1958. 135p.

MARQUES, J. Q. A. **Manual para levantamento da capacidade de uso da terra: 3ª aproximação.** Escritório Brasil-Estados Unidos (ETA). Rio de Janeiro, RJ, 1971. 433p.

MONTAS, H.; MADRAMOOTOO, C. A. A Decision Support System for soil Conservation planning. **Computers and Eletronics in Agriculture**, 7: 87-202. 1992.

NORTON, E. A., Soil conservation survey handbook. . Washington, USDA, 1939, 40p. (Miscelaneous Publication, 532) apud BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. São Paulo, SP: Ícone, 1990. 355p.

OLIVEIRA, J. B.; BERG, M. van den. **Aptidão Agrícola das Terras do Estado de São Paulo:** quadrícula de Araras. II Memorial Descritivo. Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, SP,1985. 60p. (Boletim Técnico n.º 102).

OLIVEIRA, J. B.,. **Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo:** quadrícula de Mogi Mirim. São Paulo: IGC, 1992. esc. 1:100.000.

OLIVEIRA, J. B.; SOSA, S. M. **Sistema de Classificación de la Aptitude Agroecologica de la Tierra (S.C.A.A.T.) para la Region Oriental del Paraguay. 1ª aproximación.** Asunción, Paraguay: UNA.FCA.CIF.GTZ. 1995. 77p.

POZZA, E. A.; MAFFIA, L. A.; SILVA, C. A. B. da; BRAGA, J. L.; CERQUEIRA, F. G., 1997. TOMEX-UFV: Um sistema especialista para diagnose de doenças do tomateiro. In: I CONGRESSO DA SBA-AGRO – AGROSOFT'97. **Anais...** Belo Horizonte, MG. s.p.

PRADO, H. do. **Solos Tropicais: potencialidades, limitações manejo e capacidade de uso.** Piracicaba, SP, 1995. 166p.

SCHMISSEUR, E. **Validation of expert systems.** Advanced Computer Applications In Animal Agriculture. Dallas, Texas. USA , 1992.

SAWYER, B.; FOSTER, D. L. **Programming Expert Systems in Pascal.** New York: John Wiley & Sons,1986. 186p.

WATERMAN, D. **A Guide to Expert Systems.** USA: Addison - Wesley, 1986. 419p.

WEILL, M. de A. M. Metodologias de avaliação para fins agrícolas. **Revista bras. Geográfica.** Rio de Janeiro, RJ, 52:127-160. 1990.

ANEXOS

ANEXO A: Graus de limitação ao uso devido aos fatores limitantes.

QUADRO A1: Graus de limitação devido à pedregosidade em função da porcentagem de fragmentos grosseiros em relação à massa de solo.

Grau de limitação	Quantidade de fragmentos grosseiros em relação à massa do solo
	(%)
0: nulo	Sem fragmentos
1: ligeiro	< 15
2: moderado	15 a 50
3: forte	50 a 75
4: muito forte	> 75

Fonte: LEPSCH et al., 1991.

QUADRO A2: Graus de limitação devido à rochosidade em função da porcentagem de matacões e afloramentos rochosos em relação à massa do solo.

Grau de limitação	Quantidade de matacões e/ou afloramentos rochosos em relação à massa do solo
	(%)
0: nulo	Sem rochas.
1: ligeiro	< 1
2: moderado	1 a 10
3: forte	10 a 50
4: muito forte	> 50

Fonte: LEPSCH et al., 1991.

QUADRO A3: Graus de limitação devido ao risco de geada em função da posição no relevo.

Grau de limitação	Posição no relevo
0: nulo	Terço superior de encostas e de topo de serras com declives superiores a 6%
1: ligeiro	Terço superior de encostas e serras com declives superiores a 6%
2: moderado	Terço inferior das encostas com declives entre 3 e 6%
3: forte	Planícies aluviais com declives não superiores a 3%

Fonte: comunicação pessoal do Dr. Ângelo Paes de Camargo em 17/11/98 do Centro de Ecofisiologia e Biofísica do Instituto Agrônomo de Campinas- IAC.

QUADRO A4: Graus de limitação devido ao risco de inundação em função da duração e frequência da inundação.

Grau de limitação	Duração	Frequência
0: nulo	Curta	Ocasional
1: ligeiro	Média	Ocasional
	Curta	Frequente
2: moderado	Média	Frequente
	Curta	Muito Frequente
3: forte	Longa	Ocasional
	Média	Frequentes
4: muito forte	Longa	Muito frequentes

Fonte: LEPSCH et al. (1991) e OLIVEIRA & SOSA (1995)

Curta: 1 dia

Ocasional: a cada seis anos

Média: 2 a 30 dias

Frequente: 1 a 5 anos

Longa: mais de 30 dias

Muito frequente: todos os anos ou mais vezes ao ano

QUADRO A5: Graus de limitação devido à profundidade efetiva.

Grau de limitação	Classe de profundidade efetiva	Profundidade
0: nulo	Muito profundo	> 2,00m
1: ligeiro	Profundo	1,00 a 2,00m
2: moderado	Moderadamente profundo	0,50 a 1,00m
3: forte	Raso	0,25 a 0,50m
4: muito forte	Muito raso	< 0,25m

Fonte: LEPSCH et al., 1991

QUADRO A6: Graus de limitação devido à disponibilidade de água em função da textura e profundidade do solo e deficiência hídrica anual

Grau de limitação	Textura	Classe de profundidade *	Deficiência hídrica anual (mm)	Camada ou horizonte com baixa condutividade hidráulica ou lençol freático
0: nulo	Média, argilosa ou muito argilosa Qualquer	Profundo ou muito profundo Qualquer	< 50	Lençol freático elevado o ano todo
1: ligeiro	Média Argilosa ou muito argilosa Arenosa	Profundo Pouco profundo Qualquer	< 50	Horizonte com baixa condutividade hidráulica a menos de 50 cm de profundidade
2: moderado	Média Arenosa	Pouco profundo Pouco profundo	< 50	
3: forte	Arenosa Arenosa	Profundo Pouco profundo	< 50 > 50	
4: muito forte	Arenosa	Muito profundo	< 50	

Fonte: OLIVEIRA & SOSA, 1995.

* Classes de profundidade segundo EMBRAPA, 1997.

QUADRO A7: Graus de limitação devido à drenagem interna ou excesso de água.

Grau de limitação	Classe de drenagem *
0: nulo	Excessiva a boa
1: ligeiro	Moderada
2: moderado	Imperfeita
3: forte	Má
4: muito forte	Muito mal drenado

Fonte: OLIVEIRA & SOSA, 1995.

*Classe de drenagem segundo EMBRAPA, 1997.

QUADRO A8: Graus de limitação devido ao risco de erosão em função da erodibilidade e da classe de declividade.

Classe de declividade	Erodibilidade (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)				
	0**	1**	2**	3**	4**
A	0	1	1	2	3
B	1	1	2	3	4
C	1	2	3	4	4
D	2	3	3	4	4
E	3	4	4	4	4
F	4	4	4	4	4
G	4	4	4	4	4

Fonte: Comunicação pessoal do Dr. Francisco Lombardi Neto (1999)

**Grau de limitação devido à erodibilidade

0: nulo 2: moderado 4: muito forte

1: ligeiro 3: forte

QUADRO A9: Graus de limitação devido à mecanização em função da classe de declividade, risco de inundação e/ou pedregosidade.

Grau de limitação	Classe de declividade	Risco de inundação e/ou pedregosidade
0: nulo	A	Nulo
1: ligeiro	B	Ligeiro
2: moderado	C	Moderado
3: forte	D e E	Forte
4: muito forte	F e G	Muito forte

Fonte: Comunicação do Dr. Francisco Lombardi Neto, 1997.

QUADRO A10: Graus de limitação devido à disponibilidade de nutrientes em função da saturação de bases e da capacidade de troca de cátions (CTC).

CTC (e.mg/100Gt _f SA)	Faixas de saturação de bases (%)			
	50 - 100	25 - 50	10 - 25	0 - 10
> 5	0	1	3	4
3 - 5	1	2	3	4
2 - 3	2	2	4	4

Fonte: OLIVEIRA & BERG, 1985.

0: nulo 2: moderado 4: muito forte
1: ligeiro 3: forte

QUADRO A11: Graus de limitação devido à fixação de fósforo em função da textura superficial e da cor do solo.

Grau de limitação	Textura superficial	Cor
0: nulo	Arenosa Arenosa****	*** Vermelho-Escuro ou Vermelho-Amarelo
1: ligeiro	Média Argilosa ou muito argilosa	Vermelho-Escuro Vermelho-Amarelo
2: moderado	Argilosa Muito argilosa	Vermelho Vermelho-Escuro
3: forte	Argilosa ou muito argilosa	Roxo

Fonte: OLIVEIRA & SOSA, 1995.

***Areias Quartzosas e Regossolos

****Textura superficial arenosa e, subsuperficial média.

QUADRO A12: Graus de limitação devido à toxicidade por alumínio em função da capacidade de troca catiônica (CTC) e da saturação de alumínio.

CTC (e.mg/100GtfsA)	Faixas de saturação de alumínio (%)				
	0 - 10	10 - 30	30 - 50	50 - 70	70 - 100
5 - 10	0	1	2	3	4
1 - 5	0	1	1	2	3

Fonte: OLIVEIRA & BERG, 1985.

0: nulo

2: moderado

4: muito forte

1: ligeiro

3: forte

ANEXO B: Classificação de terras segundo a capacidade de uso da microbacia do Ribeirão da Cachoeira, obtida com a aplicação do sistema especialista.

QUADRO B1: Classificação obtida com a aplicação do sistema especialista.

SOLOS	CD	Fatores limitantes							Subclasse	
		p	w	d	v	f	a	er		m
1-Latossolo Vermelho- Amarelo distrófico Mato Dentro	A	0	1	0	4	1	3	1	0	II f
	B	0	1	0	4	1	3	2	1	III ef
	C	0	1	0	4	1	3	3	2	IV ef
	D	0	1	0	4	1	3	4	3	VI ef
2-Associação de classe de solos LRd + LEa	A	0	1	0	1	3	0	1	0	II f
	B	0	1	0	1	3	0	1	1	III f
	C	0	1	0	1	3	0	2	2	IV ef
3-Latossolo Vermelho- Amarelo álico Camarguinho	A	0	1	0	4	1	4	1	0	II f
	B	0	1	0	4	1	4	1	1	III f
	C	0	1	0	4	1	4	2	2	IV ef
4-Solo Litólico Substrato basalto ou diabásio	D	4	3	0	0	3	0	4	4	VI ef
	E	4	3	0	0	3	0	4	4	VII ef
	F	4	3	0	0	3	0	4	4	VII ef
	G	4	3	0	0	3	0	4	4	VIII
5-Podzólico Vermelho- Amarelo, Indiscriminado, relacionado a materiais do Complexo Cristalino	A	0	2	0	2	0	1	2	0	II ef
	B	0	2	0	2	0	1	3	1	III ef
	C	0	2	0	2	0	1	4	2	IV ef
	D	0	2	0	2	0	1	4	3	VI ef
	E	0	2	0	2	0	1	4	3	VII ef
	F	0	2	0	2	0	1	4	4	VII ef
	G	0	2	0	2	0	1	4	4	VIII ef

p: profundidade efetiva; w: disponibilidade de água; d: drenagem interna; v: disponibilidade de nutrientes; f: fixação de fósforo; a: toxicidade por alumínio; er: risco de erosão; m: mecanização.

0: nulo

3: forte

1: ligeiro

4: muito forte

2: moderado

Dúvidas e sugestões, entrar em contato com:

Monica: grando@supernet.com.br

Luiz Henrique: lique@agr.unicamp.br

