

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 15.6.2000
Ass.: *Cher*

**CARACTERIZAÇÃO GEOTECNICA DE SOLOS SUSCEPTIVEIS À EROSÃO
E SUA IDENTIFICAÇÃO UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMAÇÕES
GEOGRÁFICAS**



MARIO ROBERTO BARRAZA LARIOS

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental.

ORIENTADORA: Prof^ª Dra. Maria Lúcia Calijuri

São Carlos
2000

Class.	TESE-EESC
Cutt.	2969
Tombo	0126100

311 0000 8636

S/S 1084461

L323c

Larios, Mario Roberto Barraza

Caracterização geotécnica de solos susceptíveis à erosão e sua identificação utilizando sistemas de informações geográficas / Mario Roberto Barraza Larios. 98p São Carlos, 2000.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.

Área: Ciências da Engenharia Ambiental.

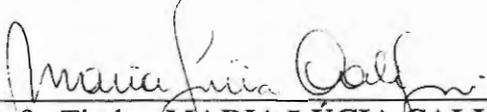
Orientador: Prof^a. Dr^a. Maria Lúcia Calijuri.

1. Solos. 2. Erosão. 3. Erodibilidade.
4. Caracterização. 5. Sistemas de Informações Geográficas. I. Título.

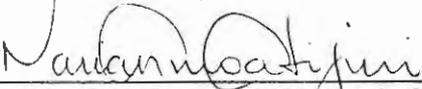
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **MARIO ROBERTO BARRAZA LARIOS**

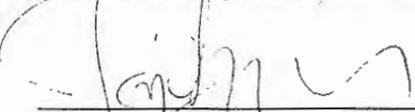
Tese defendida e aprovada em 17-04-2000
pela Comissão Julgadora:



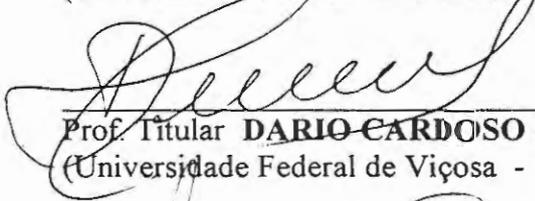
Profª. Titular **MARIA LÚCIA CALIJURI (Orientadora)**
(Universidade Federal de Viçosa - UFV)



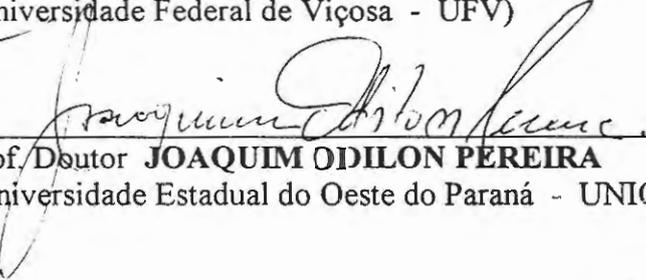
Profª. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **SERGIO ANTONIO RÖHM**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



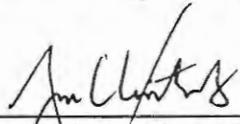
Prof. Titular **DARIO CARDOSO DE LIMA**
(Universidade Federal de Viçosa - UFV)



Prof. Doutor **JOAQUIM ODILON PEREIRA**
(Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE)



Prof. Doutor **IVALDO LUIS GAETA ESPINDOLA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Ciências da Engenharia Ambiental



JOSE CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Aos meus filhos Beatriz e Pedro,
Àqueles que alegam e impulsionam o dia a dia.

MEUS AGRADECIMENTOS

A DEUS, porque mesmo quando não merecemos, age para que tudo nas nossas vidas dê certo.

A meus Pais, pelo incentivo de sempre.

A professora Maria Lúcia Calijuri, mais do que uma orientadora, uma grande amiga, incentivadora e exemplo de luta e realizações.

A todos, que de uma ou de outra forma colaboraram com a realização do presente trabalho.

SUMÁRIO

	Página
Página de rosto.....	i
Folha de aprovação.....	ii
Dedicatória.....	iii
Agradecimentos.....	iv
Sumário.....	v
Lista de Tabelas.....	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Símbolos.....	xi
Resumo.....	xii
Abstract.....	xiii
1 Introdução.....	01
1.1 Objetivos.....	03
2 Revisão de Literatura.....	04
2.1 O solo.....	04
2.1.1 Características físicas do solo.....	05
2.1.2 Características dos solos residuais brasileiros.....	06
2.2 Erosão.....	09
2.2.1 Causas da erosão.....	10
2.2.1.1 Causas físicas.....	11
2.2.1.1.1 Ação do impacto das gotas de chuva.....	12
2.2.1.1.2 Causas mecânicas.....	13
2.2.1.1.2.1 Compactação dos solos.....	13
2.2.3 Tipos de erosão causadas pela água.....	14
2.2.4 Erosão causada pelo vento.....	17
2.2.5 Erosão acelerada.....	17
2.2.6 Fatores que influenciam a erosão.....	20
2.2.7 Problemas causados pela erosão.....	22
2.2.8 Resumo histórico da modelagem da erosão.....	25
2.2.8.1 Erodibilidade e Erosividade.....	27
2.3 Cartografia Geoambiental.....	31
2.4 Sistemas de Informações Geográficas.....	33

2.5 Agricultura de Precisão.....	36
3. Materiais e Métodos.....	38
3.1 Caracterização da área de estudo.....	38
3.1.1 Município de Resende Costa.....	38
3.1.2 Campus experimental do curso de Engenharia Agrícola da UNIOESTE - Campus de Cascavel.....	41
3.2 Escolha da área.....	41
3.3 Materiais.....	41
3.4 Métodos.....	42
3.4.1 Determinação das características do solo.....	42
3.4.2 Sistemas de Informações Geográficas.....	44
3.4.3 Caracterização da Erodibilidade do Solo através do Ensaio de Inderbitzen.....	44
3.4.4 Piezometria.....	48
4. Resultados e Discussão.....	51
4.1 Resultados das amostras do município de Resende Costa - MG.....	51
4.1.1 Ensaios de caracterização dos solos.....	51
4.1.1.1 Índices Físicos	51
4.1.1.2 Granulometria.....	52
4.1.1.3 Estados de Consistência	59
4.1.1.4 Permeabilidade e Expansibilidade.....	61
4.1.1.5 Ensaios Especiais.....	63
4.1.1.5.1 Ensaio triaxial.....	63
4.1.1.5.2 Ensaio de Inderbitzen.....	65
4.1.1.6 SIG na identificação das áreas susceptíveis à erosão na região de Resende Costa, MG.....	68
4.2 Resultados das amostras de solo do Campus Experimental de Engenharia Agrícola da UNIOESTE – Cascavel/PR.....	77
4.2.1 Granulometria e massa específica dos sólidos.....	77
4.2.2 Estados de consistência.....	78
4.2.3 Índices físicos	80
5. Conclusões.....	89
6. Sugestões.....	91
Bibliografia.....	92

LISTA DE TABELAS

	Página
1 Reservatórios com volume de armazenamento inferior a 2.000×10^6 m ³	23
2 Reservatórios no Brasil parcial ou totalmente assoreados.....	24
3 Classes de erosividade da chuva média anual.....	31
4 Resultados dos ensaios de caracterização dos solos do município de Resende Costa, MG.....	51
5 Resultados do ensaio de granulometria em amostras de solo do município de Resende Costa - MG.....	53
6 Erodibilidade do solo obtida a partir da fórmula apresentada por Bouyoucos, citado por BERTONI e LOMBARDI NETO (1985).....	54
7 Erodibilidade do Solo obtida a partir da fórmula apresentada pelo LNEC citado por FONSECA (1981).....	56
8 Resultados dos ensaios de consistência em solos (valores médios).....	59
9 Permeabilidade e expansibilidade dos solos (valores médios) da região de Resende Costa - MG.....	61
10 Resultados do ensaio triaxial.....	63
11 Resultados do ensaio de erodibilidade (Inderbitzen) para os solos da região de Resende Costa, MG.....	65
12 Tipos de Solos na Região de Resende Costa, MG e áreas calculadas com o emprego do IDRISI.....	69
13 Áreas em Km ² ocupadas pelas diferentes feições erosivas cartografadas, calculadas com o uso do Idrisi.....	71
14 Resultados da determinação da Massa Específica dos Sólidos (γ_s), e da granulometria para as duas áreas estudadas no município de Cascavel/PR.....	77

15	Erodibilidade do solo obtida a partir da fórmula apresentada por Bouyoucos, citado por BERTONI e LOMBARDI NETO (1985) para as amostras do Campus Experimental – Cascavel/PR.....	78
16	Erodibilidade do solo obtida a partir da fórmula apresentada pelo LNEC citado por FONSECA (1981) para as amostras do Campus Experimental da UNIOESTE – Cascavel/PR.....	78
17	Resultados de limites de liquidez, para as duas áreas do Campus Experimental da UNIOESTE – Cascavel/PR.....	79
18	Resultados de limites de plasticidade, para as duas áreas do Campus Experimental da UNIOESTE – Cascavel/PR.....	79
19	Resultados de índices de plasticidade, para as duas áreas do Campus Experimental da UNIOESTE – Cascavel/PR.....	79
20	Resultados dos ensaios de caracterização do Campus Experimental da UNIOESTE – Cascavel/PR, área de Semeadura Direta.....	80
21	Resultados dos ensaios de caracterização do Campus Experimental da UNIOESTE – Cascavel/PR, área de Semeadura Convencional.....	80

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Diagrama da erosão no Estado do Paraná.....	11
2 Esquema do mecanismo de escavação da voçoroca.....	20
3 Esquema das principais linhas metodológicas para elaboração de mapas geoambientais.....	32
4 Erosão em Sulcos na região de Resende Costa.....	39
5 Voçorocas na região de Resende Costa.....	40
6 Voçorocas na região de Resende Costa.....	40
7 Ensaio de Erodibilidade sendo executado no aparelho de Inderbitzen.....	45
8 Ensaio e coleta de material erodido no ensaio de Inderbitzen.....	46
9 Formulário de Inderbitzen.....	47
10 Perspectiva do aparelho de Inderbitzen.....	47
11 Ponteira padrão dos piezômetros confeccionados.....	49
12 Ponteira do Piezômetro.....	50
13 Amostra da rocha intemperizada - Resende Costa, MG.....	54
14 Influência da percentagem de silte e areia no cálculo do Índice de Erodibilidade calculado a partir da fórmula apresentada por Bouyoucos, citado por BERTONI e LOMBARDI NETO (1985).....	56
15 Influência da percentagem de finos no cálculo do Índice de Erodibilidade obtido a partir da fórmula apresentada pelo LNEC, citado por FONSECA (1981).....	57
16 Índice de erodibilidade (Bouyoucos) x porosidade.....	58
17 Influência do LL, LP e IP no cálculo do Índice de Erodibilidade.(LNEC).....	60
18 Influência da permeabilidade no cálculo do Índice de Erodibilidade.....	62

19	Influência da expansibilidade no cálculo do Índice de Erodibilidade.....	62
20	Influência do ângulo de atrito no cálculo do Índice de Erodibilidade.....	64
21	Influência da coesão no cálculo do Índice de Erodibilidade.....	64
22	Erodibilidade x vazão superficial determinada no ensaio de Inderbitzem.....	66
23	Erodibilidade x velocidade de erosão determinada no ensaio de Inderbitzem.....	66
24	Velocidade de erosão x vazão superficial determinada no ensaio de Inderbitzem.....	67
25	Carta de Solos no formato Vetor - Resende Costa, MG.....	69
26	Layer da Carta de Solos - Resende Costa, MG.....	71
27	Feições erosivas existentes na região de Resende Costa, MG.....	72
28	Distribuição dos tipos erosivos por tipo de solo na região de Resende Costa, MG.....	73
29	Layer de Hidrografia da Região de Resende Costa, MG.....	74
30	Carta de Declividades na região de Resende Costa, MG.....	75
31	Carta de Susceptibilidade à erosão na região de Resende Costa, MG.....	76
32	Distribuição do teor de umidade na área de semeadura direta.....	82
33	Distribuição do teor de umidade na área de semeadura convencional.....	82
34	Distribuição da macroporosidade na área de semeadura direta.....	83
35	Distribuição da microporosidade na área de semeadura direta.....	83
36	Distribuição da macroporosidade na área de semeadura convencional.....	84
37	Distribuição da microporosidade na área de semeadura convencional.....	84
38	Distribuição do Grau de Compactação na área de semeadura direta.....	85
39	Distribuição do Grau de Compactação na área de semeadura convencional.....	85
40	Faixa de variação do Grau de Compactação na área de semeadura direta.....	86
41	Faixa de variação do Grau de Compactação na área de semeadura convencional.....	86

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Ângulo de atrito do solo
γ_s	Massa Específica dos Sólidos
γ_d	Massa Específica Seca
LL	Limite de Líquidez
LP	Limite de Plasticidade
IP	Índice de Plasticidade
c	Coesão do solo
GC	Grau de Compactação do Solo
w	Teor de umidade ou teor de água do solo
n	Porosidade do solo

RESUMO

A grande diversidade de uso e ocupação do solo tem favorecido grandemente o aparecimento de diversos problemas relacionados com o meio ambiente e dentre eles, os decorrentes da erosão acelerada. O mapeamento geotécnico auxiliado por Sistemas de Informações Geográficas tem permitido conhecer a origem e evolução dos processos erosivos, principalmente os acelerados, bem como as formas de uso e ocupação urbana, frequentemente inadequadas. Além de obter estas informações, procura reuni-las e interpretá-las, constituindo-se assim uma base para a avaliação da susceptibilidade à erosão dos solos. Este trabalho apresenta a avaliação da susceptibilidade à erosão dos solos existente no município de Resende Costa, MG e o estudo dos solos da área do Campus Experimental de Engenharia Agrícola da UNIOESTE, Campus de Cascavel, PR; permitindo individualizar zonas com diferentes potenciais erosivos por meio da análise e interpretação dos principais componentes do meio físico. Com o auxílio desta metodologia foi possível a obtenção de cartas de susceptibilidade à erosão da região de Resende Costa, MG; e cartas de porosidade e compactação para a área do Campus Experimental, permitindo assim recomendar formas de tratamento e manejo para as mesmas. A caracterização geotécnica dos solos foi realizada, bem como sua correlação com índices de erodibilidade, de forma a se encontrar um método que fosse recomendável para a identificação da susceptibilidade dos solos à erosão. Os resultados forneceram faixas de variação da erodibilidade dos solos estudados, podendo esta ser empregada para classificá-los como susceptíveis ou não à erosão.

ABSTRACT

The great diversity of soil use and occupation has been developing several problems related with environment and among them, the accelerated soil erosion. The geotechnical mapping aided by Geographical Information Systems has been allowing to know the origin and evolution of the erosives processes, mainly the accelerated ones, as well as the inadequate forms of urban use and occupation. More than only get these informations, it tries to gather and interpret them, constituting a base for the soil erosion susceptibility evaluation. This work presents the soil erosion susceptibility evaluation of the municipal district of Resende Costa, MG and the soil study of the experimental agricultural engineering area of UNIOESTE, Cascavel, PR. Allowing to individualize zones with different erosive potential ambient. With the aid of this methodology it was possible the obtaining of erosion susceptibility layers of Resende Costa, MG and the compaction and porosity layers to the experimental area of Cascavel, allowing this way to recommend treatment forms and handling for them. The soil geotechnical characterization and its correlation with erodibility indexes were done to try to find a method that was advisable to identify the soil erosion susceptibility. The results supplied erodibility variation limits to the studied soils, being able to classify these soils as susceptibility or not susceptible to the erosion.

1 INTRODUÇÃO

Os solos sobre os quais os homens tentam continuar desenvolvendo suas atividades e expandindo suas cidades, estão cada vez mais escassos. Isto, em grande parte, é devido à sua própria ação, pois o uso indiscriminado do solo, sem a mínima preocupação com a conservação e manejo do mesmo, faz com que áreas nobres e produtivas se degradem a ponto de atingir estágios irreversíveis. Como exemplo, podemos citar as voçorocas extensas que ameaçam não só áreas rurais, mas também áreas urbanas, pondo em risco vidas humanas e causando sérios danos à economia das cidades e da população.

Na grande maioria dos estados brasileiros constata-se grandes perdas de solo, ocasionadas pela erosão, tornando-se este um dos principais problemas relacionados aos recursos naturais.

O convívio com tal problema significa aceitar o empobrecimento gradativo, a médio e longo prazo, da área cultivada, com crescentes prejuízos do setor agrícola.

Os solos de muitos estados do Brasil e mais particularmente de certas regiões do estado de Minas Gerais vêm sofrendo com o fenômeno das erosões severas. Este fenômeno gera, principalmente, o transporte dos sedimentos aos cursos dos rios, sendo por conseguinte responsáveis pelos assoreamentos dos rios e lagoas ocasionando enchentes.

No estudo e análise do processo erosivo é de fundamental importância a avaliação da erodibilidade do solo, a composição granulométrica do mesmo, as condições hídricas e a interferência do homem. Porém não existe, até o presente

momento, nenhum modelo que permita determinar com alto grau de confiabilidade a erodibilidade dos solos a partir de parâmetros físico-químicos e/ou geotécnicos.

Atualmente, com o incremento da consciência ecológica nos diversos setores da população, presencia-se um grande aumento de pesquisas nas diferentes áreas relativas ao assunto, inclusive aquela referente à erosão.

A busca de metodologias que visem reduzir os impactos ambientais negativos oriundos das atividades antrópicas é uma necessidade para a própria sobrevivência humana. Atualmente é impossível dissociar de um empreendimento a sua viabilidade ambiental. Neste sentido a questão erosão tem sido foco de vários debates que convergem na identificação do ser humano como um dos agentes principais na aceleração dos problemas do meio ambiente.

O grande problema enfrentado pelos pesquisadores no estudo de processos erosivos, é exatamente a falta de formulações que representem adequadamente o processo nos solos tropicais brasileiros, bem como a inexistência de uma metodologia recomendada de estudo que empregue parâmetros geotécnicos e os correlacione com a erodibilidade do solo e por consequência com a erosão, isto devido a maioria dos estudos feitos até o presente envolverem quase que exclusivamente trabalhos de planejamento em agricultura, produzindo resultados pouco convincentes quando o objetivo é determinar erosão em locais de Implantação de obras, conforme cita VILAR, 1987.

Estudos geológicos-geotécnicos são sempre fundamentais no planejamento do uso do solo, estabelecendo subsídios eficazes para o enfrentamento dos problemas oriundos da interação entre a urbanização, a exploração agrícola e o meio ambiente. Neste trabalho empregou-se ensaios de caracterização geotécnica e de resistência e tentou-se correlacionar os mesmos com a erodibilidade dos solos de forma a explicar o fenômeno erosivo.

Com base na problemática descrita anteriormente, este trabalho teve como uma das metas principais, utilizar um dos mais recomendados métodos de avaliação de impactos ambientais, os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), no conhecimento das condições ambientais e na caracterização da problemática da região de Resende Costa (MG), esperando-se que os trabalhos desenvolvidos na micro-bacia

beneficiem diretamente os pequenos proprietários e a Prefeitura Municipal de Resende Costa.

A redução das taxas de erosão provenientes de uma pequena bacia é pouco expressiva, mas o conhecimento adquirido, os dados coletados e o desenvolvimento de técnicas apropriadas para a recuperação de áreas degradadas é extremamente importante para a implementação de políticas e programas de conservação do solo.

1.1 Objetivos

Este trabalho teve por objetivos gerais:

a) implantar o Sistema de Informações Geográficas para a micro-bacia do Rio Santo Antonio no Município de Resende Costa - MG, pesquisando os fatores e processos de erosão acelerada da mesma;

b) estudar a influência das propriedades Geotécnicas dos Solos no processo de erosão, e elaboração de uma classificação Geotécnica dos maciços afetados.

c) estudar os parâmetros de erodibilidade da área do Campus a Unioeste, e determinar as áreas compactadas que devem ser objeto de manejo para evitar os problemas advindos da mesma.

Assim sendo, este trabalho pretende contribuir para a compreensão do fenômeno da erosão e minimização deste problema enfrentado pela população de modo geral.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Solo

O solo é constituído de camadas ou horizontes de compostos minerais e/ou orgânicos, com diferentes espessuras, que constituem o denominado perfil de intemperismo. Pode ser definido como um conglomerado de corpos naturais ocorrendo na superfície terrestre, contendo matéria viva e suportando ou sendo capaz de suportar vegetação. É, portanto, a camada superficial da crosta terrestre em que se sustenta e nutre a vegetação, e é formada por diversas partículas de rochas em diferentes estádios de decomposição, água e substâncias químicas dissolvidas, ar, organismos vivos e matéria orgânica.

Os fatores de formação do solo, comumente denominados de intemperismo, incluem as forças físicas que resultam na desintegração ou desagregação das rochas, as reações químicas que alteram a composição das mesmas, e as forças biológicas que intensificam a ação das duas anteriores (LEINS e AMARAL, 1989)

A camada superficial do solo, denominada horizonte A, em geral, tem um alto teor de matéria orgânica e é de coloração mais escura. A camada subsequente, normalmente o horizonte B, contém mais argila e é bastante diferente na coloração, em geral bem mais clara que a superficial. Abaixo desta vem o horizonte C, constituído do material original, e o horizonte R, que é a rocha.

Resumindo pode-se afirmar que o solo pode ser definido como um material poroso, composto pelas fases sólida, líquida e gasosa, e que se origina pela intemperização física e química de rochas, situadas em determinado relevo e sujeitas à ação do clima e dos organismos vivos (REICHARDT, 1985).

2.1.1 Características físicas do solo

A parametrização físico-hídrica (textura, massa específica do solo e de partículas, porosidade total, micro e macro porosidade, condutividade hidráulica saturada, infiltração) dos solos é um instrumento básico para prevenção de erosões, bem como para elaboração de planos de obras para o seu controle (AGENA et al, 1998).

Entre as características físicas tem-se:

a) Cor: geralmente, o solo tem a cor do material que o originou, mas esta propriedade é alterada pela presença de matéria orgânica, água e óxidos de ferro.

b) Textura: segundo VARGAS (1977), é o tamanho relativo das diferentes partículas que compõem o solo, e a sua quantificação é a granulometria. As partículas menores que 2 mm de diâmetro (areia, silte e argila), são as de maior importância, pois muitas das propriedades físicas e químicas da porção mineral do solo dependem das mesmas. Assim, usualmente se consideram apenas as três frações menores para caracterizar a textura. Para o estudo da textura é utilizado geralmente peneiras (para solos granulares) padronizadas nas quais uma porção de solo é separada nos diferentes tamanhos constituintes, no caso de solos silto-argilosos utiliza-se o procedimento do densímetro ou então o da pipetagem para a sua determinação.

c) Estrutura: Uma distinção deve ser feita entre os seguintes significados para o termo estrutura da argila (MEDINA, 1979):

i) estrutura da argila significando a distribuição espacial das partículas, considerada numa macroescala, correspondendo à textura (MITCHELL, 1976; 1993);

ii) estrutura da argila significando o arranjo de átomos para formar a estrutura cristalina de uma partícula individual, considerada numa microescala.

Outros termos de importância na definição da estrutura são:

Tecedura: corresponde ao vocábulo inglês “fabric”. Relaciona-se ao tamanho, forma, arranjo espacial, espaçamento das partículas sólidas e, também, à forma e distribuição dos poros. A textura é um elemento da techedura.

Estrutura: composta pelos elementos da techedura mais a composição mineralógica, as propriedades elétricas das partículas coloidais, e a natureza e

concentração de eletrólitos, na escala micro. Outros elementos referem-se a agregados de micropartículas e descontinuidades, discerníveis na escala macro.

Microestrutura: requer, para sua observação, pelo menos, um microscópio óptico (dimensão silte ou maior, inclusive agregados de argila) e aumento de 300X. Com o microscópio eletrônico de varredura até 100 A (0.01 μm), ou cerca de 10000X.

Macroestrutura: observável a olho nu ou com auxílio de lupa.

A estrutura determina a maior ou menor facilidade de trabalho dos solos, a sua permeabilidade, resistência à erosão e as condições ao desenvolvimento das raízes das plantas

d) Porosidade: refere-se à porção de espaços ocupados pelos líquidos e gases em relação ao espaço ocupado pela massa de solo (relação entre volume de vazios e volume total de uma amostra de solo), divide-se em micro e macro porosidade.

e) Permeabilidade: é a maior ou menor facilidade com que a percolação da água ocorre através de um solo. A permeabilidade é influenciada pelo tamanho e arranjo das partículas, o seu índice de vazios e é dependente da viscosidade e temperatura da água.

2.1.2 Características dos solos residuais Brasileiros

Os solos mais comuns no Brasil, suas características e seus problemas, devem ser conhecidos pelos profissionais que pretendem com eles trabalhar, assim poderão traçar a melhor forma de se lidar com suas deficiências e/ou tirar vantagem de suas características.

a) Latossolos: são os solos predominantes no Brasil e, em geral, apresentam relevo suave, grande profundidade, alta permeabilidade e baixa capacidade de troca catiônica.

Os óxidos de ferro e de alumínio e a caulinita, que é uma argila de baixa atividade, são predominantes na fração argila dos Latossolos.

Os Latossolos são classificados segundo sua coloração, a qual reflete maior ou menor riqueza em óxidos de ferro. Predominam no país, os seguintes Latossolos:

- Latossolo Roxo
- Latossolo Bruno
- Latossolo Vermelho-escuro
- Latossolo Vermelho amarelo
- Latossolo Amarelo

O teor de óxidos de ferro decresce do Latossolo Roxo para o Latossolo Amarelo. O Latossolo Roxo apresenta-se, em relação aos demais, com maior fertilidade, ocorrendo porém, em menor frequência.

A combinação de óxidos de ferro e de alumínio, caulinita e matéria orgânica é comum em Latossolos, conferindo a estes uma estrutura fina, muito estável que facilita o cultivo e oferece uma alta permeabilidade e uma elevada aeração. Em caso de compactação subsuperficial, a erodibilidade destes solos aumenta, exigindo cuidados redobrados no seu manejo.

b) Podzólicos: são solos profundos e menos intemperizados do que os Latossolos, podendo apresentar maior fertilidade natural e potencial.

Esses solos são desenvolvidos basicamente a partir de produtos da intemperização de arenitos, com seqüência de horizontes A, B e C bem diferenciados e com suas transições geralmente bem definidas. A principal característica deste solo é a diferença textural entre os horizontes A e B, qual seja: no horizonte B concentra-se teor mais elevado de argila do que no horizonte A, onde, entretanto, a atividade biológica apresenta-se intensa.

O acúmulo de argila no horizonte B torna os solos podzólicos menos permeáveis, portanto mais propensos à erosão hídrica.

c) Aluviais: pouco desenvolvidos, provenientes de sedimentos, geralmente de origem fluvial, apresentando grande heterogeneidade entre si, como também ao longo do seu perfil. Ocorrem em relevo plano, várzeas e em áreas próximas aos rios.

Suas maiores limitações de uso referem-se aos riscos de inundações periódicas e elevação do lençol freático.

Uma vez que esses solos apresentam horizonte A diretamente assentado sobre o horizonte C, todos os cuidados devem ser tomados nos trabalhos de sistematização para uso. Excessivos cortes podem expor o horizonte C, reduzindo a capacidade produtiva.

d) Hidromórficos: são desenvolvidos em condições de excesso d'água, ou seja, sob influência de lençol freático. Estes solos apresentam a cor cinza em virtude da presença de ferro reduzido, ou ausência de ferro trivalente. Logicamente, ocupam baixadas inundadas, ou frequentemente inundáveis.

Pelas condições onde se localizam, são solos difíceis de serem trabalhados. Existem dois tipos principais de solos hidromórficos: os orgânicos e os minerais.

e) Cambissolos: são solos pouco desenvolvidos em relação aos Latossolos e Podzólicos. Apresentam horizonte B em formação. São rasos e de elevada erodibilidade, podendo, em curto espaço de tempo, ocorrer exposição de subsolo. A fertilidade do horizonte A está condicionada ao tipo de rocha formadora inicial. Por serem muito susceptíveis à erosão, normalmente não permitem um uso intensivo, podendo, em condições naturais, ser observada a ocorrência de erosão laminar moderada, ou severa, bem como em sulcos e voçorocas.

f) Solos salinos ou halomórficos: caracterizam-se por uma concentração elevada de sais solúveis. São comuns nas partes baixas do relevo nas regiões áridas, semi-áridas e naquelas próximas do mar. São desprovidos de cobertura vegetal devido à elevada salinidade.

g) Litossolos: esta classe é constituída por solos pouco desenvolvidos, muito rasos, com o horizonte A assentado diretamente sobre a rocha. Situam-se nas áreas montanhosas. Os locais onde este tipo de solo ocorre, são normalmente, destinados às áreas de preservação permanente (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 1983).

2.2 Erosão

A erosão é um processo natural de desagregação, decomposição, transporte e deposição de materiais de rochas e solos que vem agindo sobre a superfície terrestre desde os seus princípios. Contudo, a ação humana sobre o meio ambiente contribui exageradamente para a aceleração do processo, trazendo como consequências, a perda de solos férteis, a poluição da água, o assoreamento dos cursos d'água e reservatórios e a degradação e redução da produtividade global dos ecossistemas terrestres e aquáticos.

Entende-se por erosão o processo de desagregação e remoção de partículas do solo ou fragmentos de rocha, pela ação combinada da gravidade com a água, vento, gelo ou organismos (IPT, 1986).

Os processos erosivos são condicionados basicamente por alterações do meio ambiente, provocadas pelo uso do solo nas suas várias formas, desde o desmatamento e a agricultura, até obras urbanas e viárias, que, de alguma forma, propiciam a concentração das águas de escoamento superficial.

Segundo OLIVEIRA (1994), este fenômeno de erosão vem acarretando, através da degradação dos solos e, por consequência, das águas, um pesado ônus à sociedade, pois além de danos ambientais irreversíveis, produz também prejuízos econômicos e sociais, diminuindo a produtividade agrícola, provocando a redução da produção de energia elétrica e do volume de água para abastecimento urbano devido ao assoreamento de reservatórios, além de uma série de transtornos aos demais setores produtivos da economia.

A quebra do equilíbrio natural entre o solo e o ambiente (remoção da vegetação), muitas vezes promovida e acelerada pelo homem conforme já exposto, expõe o solo a formas menos perceptíveis de erosão, que promovem a remoção da camada superficial deixando o subsolo (geralmente de menor resistência) sujeito à intensa remoção de partículas, o que culmina com o surgimento de voçorocas (SILVA, 1990).

Quando as voçorocas não são controladas ou estabilizadas, além de inutilizar áreas aptas à agricultura, podem ameaçar obras viárias, áreas urbanas, assorear rios,

lagos e reservatórios, comprometendo por exemplo o abastecimento das cidades, projetos de irrigação e até a geração de energia elétrica.

Torna-se, portanto, importante a identificação das áreas cujos solos sejam suscetíveis a esse tipo de erosão, sobretudo, em regiões onde não existem planos de conservação (PARZANESE, 1991), bem como o estudo dos fatores e processos que possam agravar este fenômeno, visando a obtenção de uma metodologia de controle do mesmo.

Atualmente existe uma corrida entre a explosão demográfica e o desgaste das terras, operando em sentido oposto, porém somando-se os efeitos, pois, como consequência da própria explosão demográfica, a pressão populacional sobre as áreas já ocupadas, conduzem-nas à deterioração cada vez mais rápida, devido ao seu uso indiscriminado.

Os processos erosivos se iniciam pela retirada da cobertura vegetal, seguido pela adução e concentração das águas pluviais na implantação de obras civis (saída de coletores de drenagem em estradas, arruamento urbano, barramento de águas pluviais pela construção de estradas forçando sua concentração nas linhas de drenagem), estradas vicinais, ferrovias, trilhas de gado, uso e manejo inadequado das áreas agrícolas.

A urbanização, forma mais drástica do uso do solo, impõe a adoção de estruturas pouco permeáveis, fazendo com que ocorra diminuição da infiltração e aumento da quantidade e da velocidade de escoamento das águas superficiais.

2.2.1 Causas da erosão

O mecanismo da erosão, ocorre da seguinte maneira: as gotas de chuva que golpeiam o solo, despreendem as partículas de solo no local que sofrem o seu impacto e transportam por salpicamento as partículas desprendidas, também, imprimem energia, em forma de turbulência, à água de superfície. A água que escorre na superfície do terreno, principalmente nos minutos iniciais, exerce a ação transportadora.

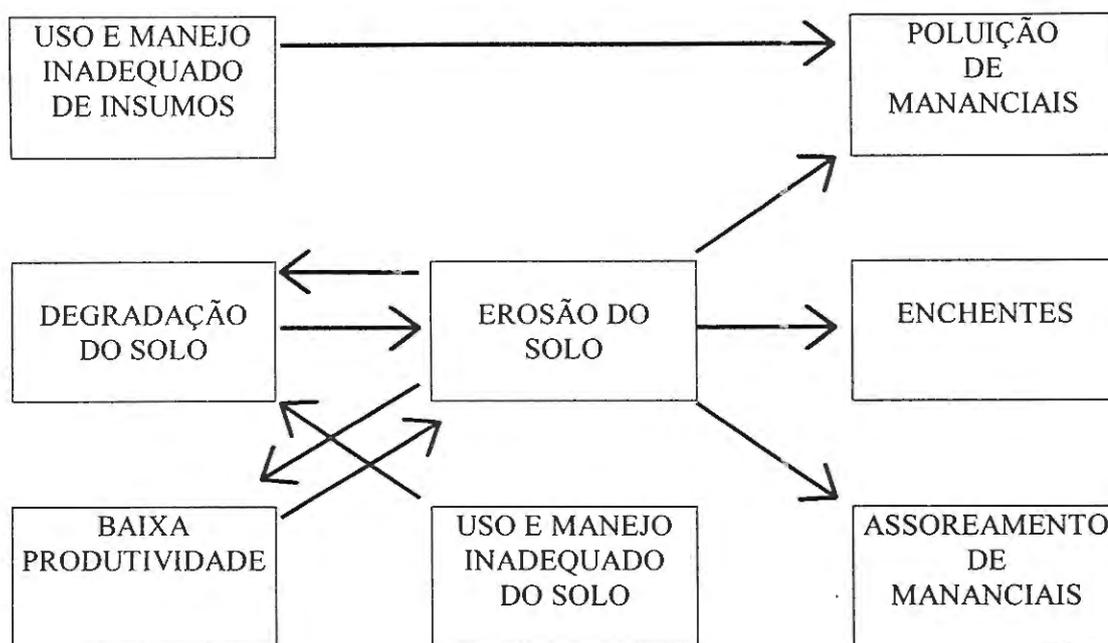


FIGURA 1 Diagrama da erosão no Estado do Paraná.
Fonte: BRAGAGNOLO (1994)

Segundo NOLLA (1982), podem ser distinguidos dois tipos de causas da erosão: causas físicas e causas mecânicas.

Uma destas causas, se agisse isoladamente, talvez não tivesse tanta ação negativa sobre o solo.

Entretanto, como estas agem em conjunto, fornecem uma ação final resultante do esforço conjunto aumentando desta forma, o seu potencial devastador. Pode-se observar a abrangência do assunto, na Figura 1, onde a erosão do solo aparece como um problema central do diagnóstico ambiental.

2.2.1.1 Causas físicas

São aquelas oriundas da natureza, que pela inexistência de proteção, agem sobre o solo, prejudicando-o. Dentre estas causas tem-se: ação dos raios solares, ação do impacto das gotas de chuva e queima de restos de culturas.

Os raios solares agindo sobre o solo desnudo trazem problemas para o mesmo. Quando existe uma camada que intercepte estes raios, tais como restos de cultura por exemplo, esta ação deixa de existir.

Os raios ultravioletas com seu poder biocida e os raios infravermelhos, com seu poder de aquecimento, e portanto, de evaporação de água, quando em excesso, podem dificultar as condições de vida do solo, provocar ciclos de ressecamento e umedecimento do solo, que provocará o aparecimento de fissuras, as quais facilitarão a ação erosiva, por outro lado o ressecamento leva à redução do teor de umidade e a uma estrutura muito apertada e por isso de grande resistência à erosão.

Como os raios solares, o fogo também age negativamente sobre o solo. O fogo sempre foi considerado uma forma rápida e ao mesmo tempo cruel de eliminar as coisas. Atua nos casos de queima de restos de cultura como biocida, deixando tudo limpo e bonito como é o conceito de muitos, porém os restos de cultura devem ficar no solo como fonte de vida dos organismos que ali vivem, dando, conseqüentemente, ao solo, uma boa estrutura e, além disso, servindo de obstáculo à ação direta das gotas de chuva e dos raios solares, dificultando ainda a ação horizontal das águas de chuva. Logo, é fácil observar a ação nociva desta prática. E daí a importância do manejo adequado dos solos do ponto de vista ecológico (NOLLA,1982).

2.2.1.1.1 Ação do impacto das gotas de chuva

As gotas de chuva têm uma grande importância no fenômeno erosivo, pois quando as mesmas caem sobre o solo descoberto, poderão compactá-lo e desagregá-lo aos poucos.

Segundo NOLLA (1982), a gota, devido a sua energia cinética, causa um impacto no solo compactando o mesmo, e ao mesmo tempo, faz saltar partículas do solo que se desagregaram. Estas partículas, ao voltarem à superfície do solo, encontram uma película de água, a qual começa a transportar as mesmas.

Estas gotas, cujo tamanho varia muito ao cair ao solo, têm, realmente, uma ação que atua como elemento de impacto.

Segundo MOLINA (1976), as gotas de uma chuva de 50mm, que caem em 1 hectare, quando somadas as suas energias de impacto, têm energia suficiente para levantar uma camada de 17,5 cm a uma altura de 90 cm, em toda a superfície de 1 hectare. Isto daria aproximadamente, a suspensão de 2000 toneladas a uma altura de 90 cm. Partindo, destas condições é fácil observar o poder compactador das gotas de chuva, principalmente se a mesma cai sobre solo descoberto, ou seja, sem vegetação viva ou morta que o esteja protegendo.

Além desta ação, a gota, ao cair, tem ainda a ação desagregadora (que é a que predomina), que faz saltar as partículas de solo. Estas partículas soltas são facilmente arrastadas pela lâmina de água que existe na superfície do solo. É fácil observar estas partículas que saltam por ocasião da chuva.

As partículas menores, provenientes desta desagregação, serão arrastadas posteriormente no escoamento superficial de uma pequena lâmina de água, seja horizontal ou verticalmente, originando então a erosão laminar ou a erosão vertical ou interna.

Assim, origina-se a erosão laminar a partir do impacto da gota de chuva, que participa em 95% do problema erosivo. Somente 5% deste problema são causados pela água corrente (NOLLA, 1982).

2.2.1.2 Causa mecânicas

São as causas, que se originam pela ação das máquinas e implementos agrícolas, comprimindo o solo ou mobilizando-o excessivamente.

2.2.1.2.1 Compactação dos solos

A compactação dos solos oriunda da ação das máquinas e implementos agrícolas é um problema que traz sérias conseqüências para a produtividade, estes equipamentos aplicam ao solo um baixo nível de compactação que não é suficiente para aumentar a sua resistência (ao cisalhamento) em nível tal que ele possa resistir ao

fenômeno erosivo, mas reduz sua permeabilidade aumentando dessa forma o escoamento superficial.

Esta compactação é principalmente exercida :

- a) através do rodado das máquinas que comprimem o solo e destroem a sua estrutura,
- b) pela ação compactadora dos discos e grades.

Este fenômeno de compactação contribui para a redução da permeabilidade do solo aumentando e/ou facilitando a erosão laminar, bem como podendo a camada de pó e partículas muito finas estarem ainda sujeitas à erosão eólica.

A erosão não ocorre simplesmente pelo fato de chover. A erosão não é uma causa que provoca tantos problemas, mas é consequência que se desencadeia devido à uma série de fatores que agem em conjunto e em interação.

As causas da existência da erosão são, portanto, a eliminação progressiva das condições naturais do solo, o que faz com que o equilíbrio do seu conteúdo, seja abalado. Se o equilíbrio natural do solo é quebrado, este apresentará diversos problemas e começará a se degradar. O solo começará a ficar compactado (com problemas de infiltração de água e ar), afetando ainda mais todas as reações químicas e biológicas normais que nele se processam e resultando em perda de produtividade e início de erosão.

2.2.3 Tipos de erosão causadas pela água

A erosão hídrica acelerada, processo de rápida desagregação e remoção do solo pela ação das águas das chuvas, constitui um importante problema geotécnico-ambiental. Na Região Metropolitana de Porto Alegre e no resto do país verificam-se muitos processos desta natureza envolvendo diferentes tipos de solos. (BASTOS et al, 1998).

A erosão causada pela água pode ser das seguintes formas: laminar, em sulcos e voçorocas. As três formas de erosão podem ocorrer simultaneamente no mesmo terreno.

A erosão acelerada (ação antrópica) pode ser laminar ou em lençol, quando causada por escoamento das águas das chuvas resultante na remoção progressiva dos horizontes superficiais do solo; e erosão linear, quando causada por concentração do fluxo das águas de escoamento superficial, resultando em incisões na superfície do terreno na forma de sulcos, ravinas e voçorocas (OLIVEIRA, 1994).

A voçoroca é a feição mais flagrante da erosão antrópica, podendo ser formada através de uma passagem gradual da erosão laminar para erosão em sulcos e ravinas cada vez mais profundas, ou então, diretamente a partir de um ponto de elevada concentração de águas pluviais (IPT, 1986).

No desenvolvimento da voçoroca atuam, além da erosão superficial como nas demais formas dos processos erosivos (laminar, sulco e ravina), outros processos, condicionados pelo fato desta forma erosiva atingir em profundidade o lençol freático ou nível d'água de subsuperfície. A presença do lençol freático, interceptado pela voçoroca, induz ao aparecimento de surgências d'água, acarretando o fenômeno conhecido como "piping" (erosão interna que provoca a remoção de partículas do interior do solo, formando "tubos" vazios que provocam colapsos e escorregamentos laterais do terreno, alargando a voçoroca, ou criando novos ramos). Além deste mecanismo, as surgências d'água nos pés dos taludes da voçoroca provocam sua instabilização e descalçamento.

As voçorocas formam-se geralmente em locais de concentração natural de escoamento pluvial, tais como cabeceiras de drenagem e embaciados de encostas. A importância do estudo dos fenômenos associados à formação de voçorocas é estabelecer medidas de prevenção e controle, como também o estabelecimento de técnicas compatíveis ao combate do problema.

O estabelecimento de qualquer processo erosivo requer, antes de tudo, um agente (água ou vento) e o material (solo), sobre o qual agirá, desprendendo e desagregando as partículas e transportando-as. A interação entre material e agente consiste na busca de um estado de maior equilíbrio, antes desfeito de forma natural ou devido a efeitos antropicos.

Os processos erosivos iniciam-se pelo impacto da massa aquosa com o terreno, desagregando suas partículas. Esta primeira ação do impacto é

complementada pela ação do escoamento superficial, a partir do acúmulo de água em volume suficiente para propiciar o arraste das partículas liberadas (IPT, 1991).

A erosão é o processo de despreendimento e arraste acelerado das partículas do solo causado pela água e pelo vento. A erosão do solo constitui, sem dúvida, a principal causa da degradação acelerada das terras. As enxurradas, provenientes das águas de chuva que não ficaram retidas sobre a superfície, ou não se infiltraram, transportam partículas de solo e nutrientes em suspensão. Outras vezes, esse transporte de partículas de solo se verifica, também por ação do vento.

O efeito do vento na erosão é ocasionado pela abrasão proporcionada pela areia e partículas mais finas em movimento. A água é o mais importante agente de erosão; chuva, córregos, rios, todos carregam solo, as ondas erodem as costas dos continentes e lagos, de fato, onde há água em movimento, ela está erodindo os seus limites.

a) Erosão laminar: a remoção de camadas delgadas de solo sobre toda uma área é a forma de erosão menos notada, e por isso a mais perigosa. Em dias de chuva as enxurradas tornam-se barrentas. Os solos, por sua ação, tomam coloração mais clara, e a produtividade vai diminuindo progressivamente. A erosão laminar arrasta primeiro as partículas mais leves do solo, e considerando que a parte mais ativa do solo de maior valor, é a integrada pelas menores partículas, pode-se julgar os seus efeitos sobre a fertilidade do solo.

b) Erosão em sulcos: resulta de pequenas irregularidades na declividade do terreno que faz com que a enxurrada, concentrando-se em alguns pontos do terreno, atinja volume e velocidade suficientes para formar sulcos mais ou menos profundos.

c) Voçorocas: é a forma mais avançada da erosão, ocasionada por grandes concentrações de enxurrada que passam, ano após ano, no mesmo sulco, que se vai ampliando, pelo deslocamento de grandes massas de solo, e formando grandes cavidades em extensão e em profundidade. Exemplos da literatura mundial são citados com voçorocas de mais de uma centena de metros de comprimento e atingindo dezenas de metros de profundidade. A voçoroca é a visão impressionante do efeito da enxurrada descontrolada sobre a terra. Aliado a isto temos a ação da erosão interna "piping" que provoca às vezes a ruptura das paredes das voçoroca.

2.2.4 Erosão causada pelo vento

A erosão eólica, ocorre em geral em regiões planas, de pouca chuva, onde a vegetação natural é escassa e sopram ventos fortes. Constitui problema sério quando a vegetação natural é removida ou reduzida; os animais e o próprio homem contribuem para essa remoção ou redução. As terras ficam sujeitas à erosão pelo vento quando deveriam estar com a vegetação natural e são colocadas em cultivo com um manejo inadequado (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990).

2.2.5 Erosão acelerada

Em geral, os estudos que contribuem para o conhecimento das voçorocas, tendem a tratar do assunto de maneira global, ou seja, buscando explicá-las através da interação de vários fatores, notadamente a ação das águas, o tipo de substrato, e a intervenção humana. Estudos mais recentes, porém, vêm tornando mais precisos alguns aspectos previamente abordados de modo genérico, destacando-se a realização de balanços hídricos e a caracterização geotécnica dos materiais das áreas afetadas (PONÇANO e PRANDINI, 1987).

O termo voçoroca aplica-se a profundos vales de erosão com geometrias e tamanhos variados, de onde foram removidos grandes volumes de terra, afetando rochas, solos e relevos diversos. O significado desta palavra provém do tupi-guarani e o seu significado é terra rasgada.

"As voçorocas representam um tipo de fenômeno erosivo amplamente disseminado no Brasil e em outras partes do mundo" (MOREIRA, 1992). Segundo este mesmo autor, entre suas conseqüências pode-se constatar: perdas de áreas de cultivo e pastoreio, assoreamento de rios e reservatórios, causando decréscimo das vazões dos mesmos e ocorrências de cheias muito problemáticas, com sérios prejuízos à economia local.

Segundo CARVALHO (1992), as voçorocas são feições de erosão que se instalam em terrenos de cobertura em distintos domínios lito-morfológicos. Estas

feições foram bem estudadas em áreas do sudeste do país, em especial no estado de São Paulo (PICHLER, 1953 ; PRANDINI, 1974; PONÇANO, 1987).

As voçorocas dos terrenos cristalinos do estado de Minas Gerais, embora apresentem mecanismos similares aos observados na bacia do Rio Paraná, apresentam peculiaridades próprias destes terrenos: tendem a ser menos extensas, instalam-se em vertentes em média mais íngremes e é freqüente apresentarem ramificações ou feições satélites, que conferem ao conjunto contornos por vezes caprichosos. Apresentam-se sob a forma de ravinas com seções transversais em “V” (estágio inicial) ou em “U” (estágio avançado).

Nos estágios iniciais ou intermediários, nenhuma vegetação permanente se observa. À medida que o fenômeno perde vigor, a vegetação começa a fixar-se no fundo e nas rampas de escombros não removidos, que arredondam a base do “U”. Mesmo após a aquietação total, paredes subverticais são mantidas indefinidamente sem vegetação, enquanto nas rampas de escombros e no fundo pode se desenvolver vegetação arbórea expressiva” (CARVALHO, 1992). Ainda segundo esse mesmo autor, a voçoroca típica do cristalino mineiro desenvolve-se mediante os seguintes mecanismos:

- a) erosão em sulco promovida pela enxurrada em mecanismo complexo;
- b) aprofundamento deste sulco até atingir o lençol freático com a conseqüente geração de elevado gradiente hidráulico na saída, que promove a erosão interna em horizontes ou camadas expostas menos coerentes;
- c) remoção do material proveniente dos mecanismos acima através do escoamento superficial;
- d) manutenção relativamente prolongada de paredes subverticais em solo coesivo, o que permite a instalação sazonal de gradientes de saída elevados para a retomada do processo de instabilização, insolação intensa das paredes, provocando fissuramento;
- e) formação de cavidades abobadadas ao pé das cabeceiras, pela influência combinada dos seguintes fenômenos: jateamento pela enxurrada em cascata, erosão interna e desarticulação estrutural do solo, promovidas pelo gradiente hidráulico de saída, ação complementar de tensões agindo na periferia das cavidades;

- f) colapso de porções destacadas pelo fissuramento das paredes;
- g) aquietação gradual do fenômeno pela diminuição progressiva do gradiente hidráulico de saída pela redução dos fenômenos anteriores.

PARZANESE (1992), estudando a gênese e desenvolvimento de voçorocas em solos originados de rochas granitóides, concluiu que os solos originados destes tipos de rocha possuem fertilidade extremamente baixa (Latosolos vermelho-amarelo), sustentando por conseqüência a vegetação pouco densa, permitindo com que a ação erosiva da chuva seja mais intensa, isto aliado à textura e estrutura do solo propicia a instalação do fenômeno.

Ainda segundo este mesmo autor, quando os solos apresentam escassez de agentes cimentantes, a coesão é muito baixa e estes, quando molhados, desmoronam e são arrastados com facilidade.

Este fenômeno de voçorocamento será tão mais pronunciado quanto mais significativos forem alguns fatores, dentre eles: reduzida espessura do solum A+B, restrita profundidade do horizonte C, pouca coesão entre as partículas do solo e reduzida cobertura vegetal. Aliados a isso tem-se os fatores climáticos que irão agir de forma constante para o estabelecimento do processo erosivo (FARIAS, 1992).

LIMA (1987) procurou relacionar erosão com o teor de ferro e parâmetros físicos e mineralógicos do solo. Verificou que o teor de óxidos de ferro, refletido na cor dos solos, influencia características e propriedades que governam, em última análise, o balanço da coesão entre agregados e permeabilidade, condicionador do comportamento do solo frente ao processo erosivo.

O fracasso na contenção de voçorocas, como foi observado por PRANDINI e IWASA (1980), MORGAN (1980), BIGARELLA e MAZUCHOWSKI (1985), é reconhecidamente proveniente da implantação de medidas apenas parciais (o que visa a redução de custos) e/ou porque medidas inadequadas foram adotadas, devido à identificação incorreta ou não reconhecimento dos mecanismos envolvidos no processo.

O alto grau de interação entre os processos da vertente e os do canal é uma característica das áreas afetadas por voçorocas. O suprimento de sedimentos para o

canal é proveniente basicamente dos movimentos de massa nas paredes, que por sua vez são ativados na medida em que o material é removido pelo canal.

A combinação desses dois aspectos fundamentais controla a estabilidade/instabilidade do sistema. Essas colocações evidenciam a complexidade do fenômeno e reforçam a necessidade da abordagem multidisciplinar, que envolve a análise de aspectos ligados aos estudos de solos, geomorfologia, geologia, geotecnia, meteorologia, hidrologia, hidrogeologia e uso da terra (MOREIRA,1992).

A erosão subterrânea é também o mecanismo de instabilização dos taludes laterais da voçoroca, provocando o seu deslizamento. Isto é pouco comum já que, em geral, o movimento de massas nas laterais das voçorocas é ocasionado pelo descalçamento da base dos taludes. A Figura 2 esquematiza este mecanismo.

A erosão subterrânea é causada pela percolação de água nos poros do solo, que arrasta as partículas finas e cria caminhos preferências que vão aumentando provocando dessa forma a instabilidade das massas e seu consequente desmoronamento.

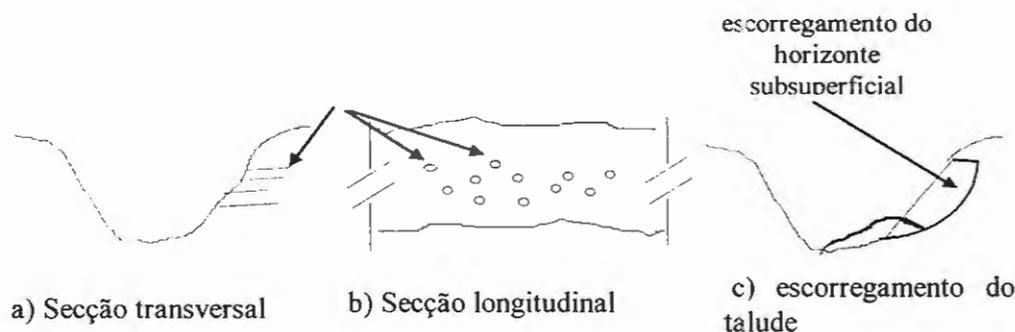


FIGURA 2 Esquema do mecanismo de escavação da voçoroca.
Fonte: BRAGAGNOLO (1994)

2.2.6 Fatores que influenciam a erosão

Em regiões tropicais, um dos principais efeitos do clima na degradação do meio ambiente parece estar aliado ao fenômeno da precipitação e sua capacidade de causar erosão. A ação da chuva no fenômeno de erosão depende da sua intensidade, duração

e frequência (BERTONI E LOMBARDI NETO, 1985). O potencial das chuvas em provocar erosão é denominado erosividade.

Diversos são os fatores que influenciam a erosão, dentre os principais pode-se citar:

a) Chuva: é um dos fatores climáticos de maior importância na erosão dos solos. O volume e a velocidade da enxurrada dependem da intensidade, duração e frequência da chuva, sendo a sua intensidade talvez o mais importante. Este fator é considerado através do índice de erosividade das chuvas.

b) Infiltração: é o movimento da água dentro da superfície do solo. Quanto maior sua velocidade, menor a intensidade de enxurrada na superfície e, conseqüentemente, a erosão.

c) Topografia do terreno: é representada pela declividade e pelo comprimento do declive, exerce acentuada influência sobre a erosão. O tamanho e a quantidade do material em suspensão arrastado pela água dependem da velocidade com que ela escorre, e essa velocidade é função do comprimento do declive e da inclinação do terreno.

d) Cobertura vegetal: é a defesa natural contra a erosão. Os efeitos da vegetação no fenômeno são:

d.1) proteção direta contra o impacto das gotas de chuva;

d.2) dispersão da água, interceptando-a e evaporando-a antes que atinja o solo;

d.3) decomposição das raízes das plantas que, formando canaliculos no solo, aumentam a infiltração da água;

d.4) melhor estruturação do solo pela adição de matéria orgânica, aumentando assim sua capacidade de retenção de água;

d.5) diminuição da velocidade de escoamento da enxurrada pelo aumento do atrito na superfície.

e) Natureza do solo: as propriedades físicas, principalmente estrutura, textura, permeabilidade e densidade, assim como as características químicas e biológicas do solo exercem diferentes influências na erosão. Suas condições físicas e químicas, ao conferir maior ou menor resistência à ação das águas, caracterizam o comportamento

de cada solo exposto a condições semelhantes de topografia, chuva e cobertura vegetal (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990).

2.2.7 Problemas causados pela erosão

Na grande maioria dos estados brasileiros constata-se grandes perdas de solo, ocasionadas pela erosão, tornando-se este um dos principais problemas relacionados aos recursos naturais (BRAUN, 1961; BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985).

O convívio com tal problema significa aceitar o empobrecimento gradativo, a médio e longo prazo, da área cultivada com crescentes prejuízos do setor agrícola.

As conseqüências destes desequilíbrios tem levado a redução da produtividade, aumento dos custos de produção (adubação, correção de solo, etc.), aumento dos custos dos alimentos, redução da demanda de mão de obra no meio rural, assoreamento dos rios e barragens, exodo rural, etc. Os solos de muitos estados do Brasil e mais particularmente de certas regiões do estado de Minas Gerais, vêm sofrendo com o fenômeno das erosões severas e aceleradas, as quais ameaçam não só áreas agrícolas mas também regiões muito próximas às cidades devido à ação predadora do homem. Este fenômeno gera, principalmente, o transporte dos sedimentos aos cursos dos rios, sendo por conseguinte responsáveis pelas enchentes. Esta problemática não pode deixar de preocupar pois, além dos problemas citados anteriormente pode colocar em risco vidas humanas (CETEC, 1989).

Um estudo do Banco Mundial (MAHMOOD, 1987) mostrou que a vida útil média dos reservatórios existentes no mundo decresceu para 22 anos, tendo sido avaliado em 6 bilhões de dólares o custo anual para promover a remoção dos volumes de sedimentos que vão sendo depositados.

A porcentagem de perda de volume por retenção de sedimentos nesses reservatórios é muito variável, estando relacionada ao projeto e à magnitude da carga sólida, principalmente. Segundo MAHMOOD (1987), a perda de capacidade anual do reservatório da barragem de Hoover (EUA), tem sido de 0,3%; a de Tarbela

(Paquistão), 1,5%, e a de Sanmexia (China), cerca de 1,7%, enquanto no reservatório de Warsak (Paquistão), essa perda chega a 18% anuais.

Um estudo realizado pelo IPH/UFRGS para a ELETROBRÁS (1991) apresentou valores médios de descarga sólida específica e de concentração de sedimentos nos principais cursos d'água do país. CARVALHO (1994) concluiu, pelo exame dos dados, que a concentração média da carga sólida total nos rios brasileiros pode ser atualmente de 250ppm, levando à dedução que a perda anual de volume dos reservatórios chega a 0,5%.

A soma das capacidades de todos os reservatórios do Brasil para geração de energia elétrica é superior a $400 \times 10^9 \text{ m}^3$. Comparando as conclusões do relatório do Banco Mundial e considerando que a carga de sedimentos seja somente a metade do valor médio no Mundo, isto é, provocando perda de capacidade de 0,5% ao ano, chega-se a um montante superior a $2,0 \times 10^9 \text{ m}^3$. Esse volume é maior do que a capacidade de muitos dos médios e pequenos reservatórios do país, como por exemplo, os da Tabela 1.

Por esses números comparativos, constata-se a necessidade de estudos sedimentológicos prévios à construção de qualquer barragem e formação de seu reservatório, sob o risco de que o aproveitamento venha a ter problemas em tempo inferior a sua vida útil sócio-econômica esperada. Nesta suposição está claro que a falta de estudos impede a constatação de um possível assoreamento, cuja solução de mitigação poderia ser adotada com o controle de sedimentos.

TABELA 1 Reservatórios com volume de armazenamento inferior a $2.000 \times 10^6 \text{ m}^3$

Reservatório	Capacidade (m^3)	Curso d'água	Potência
Estreito	1.400×10^6	Grande	1.050 MW
Jaguari	1.396×10^6	Jaguari	27,6 MW
Moxotó	1.200×10^6	São Francisco	-
Billings	1.229×10^6	Pinheiros	-
Salto Osório	1.250×10^6	Iguaçu	1.050 MW
Porto Colômbia	1.524×10^6	Grande	320 MW

Fonte: CARVALHO (1994)

O Brasil possui muitos reservatórios parcial ou totalmente assoreados. Um levantamento efetuado por CARVALHO (1994), apresentou um total de 38

reservatórios assoreados, sendo que a maior parte desses aproveitamentos continua em operação, mas com problemas diversos decorrentes do depósito de sedimentos. Essa lista não é completa, já tendo sido ampliada à medida que o autor recebeu informações de casos similares (ver Tabela 2). O autor acredita que há muitos outros casos, não sendo conhecidos por falta de levantamentos nesses reservatórios.

Ainda segundo CARVALHO (1994), muitos reservatórios estão parcialmente assoreados, mas sem apresentar problemas evidentes na sua operação. Pode-se citar: Tucuruí (Rio Tocantins), Três Marias (Rio São Francisco), Funil (Rio Paraíba do Sul), Barra Bonita (Rio Tietê) e Capivara (Rio Paranapanema) e outros, tendo a área de remanso já assoreada, provocando problemas de elevação do nível a montante em ocasião de enchentes. Um estudo adequado da perda de capacidade de geração de energia anual poderia conduzir a uma constatação do problema.

TABELA 2 - Reservatórios no Brasil parcial ou totalmente assoreados

Reservatório	Curso d'água	Proprietário	Finalidade
Bacia do São Francisco			
Rio de Pedras	Velhas	CEMIG	UHE, 10 MW
Paraúna	Paraúna	CEMIG	UHE, 30 MW
Pandeiros	Pandeiros	CEMIG	UHE, 4,2 MW
Pampulha	Pampulha	SUDECAP	Controle de cheias
Bacia do Paraná			
Caconde	Pardo	CESP	UHE, 80,4 MW
Euclides da Cunha	Pardo	CESP	UHE, 108,8 MW
Americana	Atibaia	CPFL	UHE, 34 MW
Jurumirim	Paranapanema	CESP	UHE, 22 MW
Piraju	Paranapanema	CPFL	UHE, 120 MW
Pres. Vargas	Tibaji	Klabin	UHE, 22,5 MW
São Gabriel	Coxim	ENERSUL	UHE, 7,5 MW
Rib. Das Pedras	Descoberto	CAESB	Abastec. d'água
São João	São João	ENERSUL	UHE. 3,2 MW

Fonte: CARVALHO (1994)

Segundo PEJON (1992) o fenômeno da erosão consiste na ação combinada de uma gama de fatores que provocam o destacamento e o transporte de materiais sobre a crosta terrestre. Os processos erosivos dependem de uma série de fatores naturais

(tais como clima, geomorfologia, geologia e cobertura vegetal) que podem ser alterados pela ação antrópica ocasionando sua intensificação.

Nos últimos anos a temática ambiental vem ganhando espaço na mídia e principalmente no meio científico. Quando da exploração do meio ambiente deve-se levar em conta seus mecanismos a fim de não comprometer sua conservação. Os estudos ambientais fundados na análise integrada do meio físico se destacam pela maior abrangência e complexidade da análise. O “sistema de erosão”, representado pela Equação Universal de Perda de Solos, é um desses estudos integrados que merece destaque.

2.2.8 Resumo histórico da modelagem da erosão

Entre 1890 e 1947, a ciência limitava-se ao entendimento e à descrição qualitativa dos principais fatores que afetam o processo erosivo. Exemplos desse período são os trabalhos de Cook, 1936; Laws, 1940 e Ellison, 1947. citados por CHAVES, 1995. Estes autores naquela época, já reconheciam, a complexidade do processo erosivo, sendo os primeiros a definir os fatores que intervêm no mecanismo tais como erodibilidade do solo, erosividade da chuva e da enxurrada, e da proteção da cobertura vegetal. Trabalhos experimentais realizados no Centro-Oeste dos EUA durante o período de 1940 a 1954 resultaram em equações de perda de solo que incluíam os efeitos do comprimento e da declividade da rampa, de práticas conservacionistas e, de fatores de solo e uso/manejo. Em 1946, um comite formado nos EUA produziu a primeira equação empírica de perda de solo, conhecida como equação de MUSGRAVE.

No período compreendido entre os anos de 1954 a 1965, um esforço de agências de pesquisa e extensão dos EUA, resultou na Equação Universal de Perda de Solo - USLE

A Equação Universal de Perdas do Solo prediz a perda média anual de um solo de um local qualquer, através do produto de suas variáveis, cujos valores podem ser expressos numericamente, sendo representada pela equação:

$$A = R.K.L.S.C.P$$

onde: A é a perda média anual de solo em t.ha-1.ano-1 ; R é o fator erosividade da chuva em MJ.mm.ha-1.h-1.ano-1 ; K é o fator erodibilidade do solo em t.ha.h.ha-1 .MJ-1 .mm-1; L é o fator comprimento do declive; S é o fator grau do declive; C é o fator uso e manejo, e P é o fator prática conservacionista. As variáveis L,S,C,P são adimensionais.

Para aperfeiçoar ou adaptar a formulação da USLE para outras finalidades, foram introduzidas modificações em alguns de seus fatores. Exemplos mais conhecidos destes são a MUSLE (WILLIAMS, 1975), desenvolvida para a predição do aporte de sedimentos, o modelo ONSTAD-FOSTER (1975), que separou o termo de erosividade em um fator de chuva e outro de enxurrada, o modelo EPIC (WILLIAMS et al., 1984), e a RUSLE (RENARD et al., 1991), uma atualização da USLE, modificando os fatores K, C e LS.

Apesar do esforço despendido na determinação dos fatores da USLE no Brasil, o banco de dados existente no país ainda é insuficiente para sua utilização generalizada. Entretanto, sua aplicação é possível para algumas regiões, onde os parâmetros são disponíveis.

Segundo CHAVES, 1995, no que diz respeito ao fator de erosividade (R), sua determinação já foi feita para vários estados (SP, PR, Nordeste, etc.), inclusive com a confecção de mapas de isoerodentes. O índice EI30 é geralmente considerado adequado para as condições brasileiras (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990).

No caso do fator de erodibilidade, a utilização direta do nomograma de WISCHMEIER & SMITH, 1978, para os solos do Brasil não é indicado, pois geralmente superestima os valores de K para solos tropicais (DANGLER et al., 1976; LO et al., 1985). Entretanto, há no país suficientes dados de parcelas padrão para uma estimativa pelo menos preliminar de K de vários tipos de solos. DENARDIN (1990) compilou dados de K medidos para diferentes solos em mais de 30 localidades, do nordeste ao sul do Brasil. Aquele autor também propôs equações para a obtenção de K em função de propriedades básicas de cada um daqueles solos, obtendo boas correlações.

A expressão proposta por DENARDIN (1990), foi:

$$K = 6,08 \times 10^{-3} (\text{PERM}) + 8,34 \times 10^{-3} (\text{OM}) - 1,16 \times 10^{-3} (\text{OAL}) - 3,78 \times 10^{-4} (\text{AR})$$

onde PERM é a permeabilidade do perfil, OM é o teor de matéria orgânica do solo, OAL é o teor de óxido de alumínio e AR é o teor de partículas com diâmetro entre 2 e 0,5mm.

Os dados existentes permitem o emprego da USLE em diferentes situações, porém sua utilização para a o planejamento conservacionista é ainda muito pequena no país. "A alegação de imprecisão ou dificuldade na estimativa dos fatores da USLE não justifica a pequena utilização da equação. Sua estrutura fatorial permite que superestimativas em alguns dos fatores sejam compensadas por subestimativas em outros, resultando em predições relativamente precisas".(CHAVES, 1995)

Com o surgimento de computadores mais eficientes e com o levantamento de novos dados que explicam melhor os processos, surgiram novos programas de modelagem, dentre os quais se destacam o WEPP (LANE & NEARING, 1989) e o CREAMS (USDA, 1980)

O modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project), representa a última geração de modelos baseados em processos, e incorpora os desenvolvimentos anteriores de MEYER & WISCHMEIER,1969; FOSTER & MEYER,1972; e MEYER et al.,1975.

O modelo CREAMS(Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) consiste de tres componentes principais: hidrologia, erosão/sedimentação e química. O componente de erosão/sedimentação utilizá um modelo semi-empírico de erosão em sulcos e entre-sulcos, derivado da USLE. O modelo inclui resultados de estimativas de concentrações de poluentes dissolvidos e adsorvidos (USDA, 1980).

2.2.8.1 Erodibilidade e Erosividade

A erodibilidade dos solos, propriedade que retrata a facilidade com que partículas são destacadas e transportadas, imprescinde de métodos adequados que a caracterizem. São ainda insuficientes os esforços no entendimento e na quantificação

do potencial a erosão através de propriedades do comportamento estabelecidas pela Mecânica dos Solos (BASTOS et al, 1998).

Os valores da erodibilidade dos solos, obtidos por métodos indiretos (FREIRE e PESSOTI, 1974; LNEC, citado por FONSECA et al, 1981; Bouyoucos, citado por BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985), nem sempre explicam, em face dos demais fatores determinantes das perdas de solo, o volume de sedimentos nas margens dos cursos d'água e os sinais de perda de material dos solos, em muitos locais.

Para fornecer dados seguros para o planejamento do uso do solo e do controle da erosão, é necessária a determinação da erodibilidade dos solos por métodos diretos, utilizando-se equipamentos em campo e/ou laboratório.

BASTOS et al (1998), afirmaram que o ensaio de Inderbitzen constitui um ensaio simples e promissor na avaliação geotécnica da erodibilidade. A perda de solo e o fator erodibilidade K retratam o potencial de erosão dos solos.

A erodibilidade em solos lateríticos é estimada como sendo de baixa a média, segundo NOGAMI e VILLIBOR (1995). Isto se deve ao endurecimento da camada superficial que dificulta o destacamento de partículas pelo impacto das gotas de chuva. Os mesmos autores, estudando a erosão em taludes de corte nas rodovias do estado de São Paulo, verificaram que a erodibilidade foi diferente em cada horizonte. Segundo estes autores é comum que se encontre taludes erodidos nas camadas inferiores (horizontes saprolíticos) estando ainda as camadas superficiais intactas.

CARVALHO e FÁCIO (1994) estudando os processos erosivos de solos do Distrito Federal determinaram a erodibilidade de diversos tipos de solos, todos associados a ocorrência de voçorocas. Verificaram que o grau de laterização dos solos é um fator interveniente na susceptibilidade à erosão e incluíram as relações sílica/sesquióxidos e sílica/óxido de alumínio como indicadores desta propriedade nos modelos matemáticos por eles propostos. Também associaram a formação de voçorocas no Distrito Federal com a ação antrópica.

O estudo geotécnico da erosão do solo deve necessariamente considerar a resistência ao cisalhamento do solo. O destacamento das partículas está relacionado à superação da resistência pelo impacto da gota de chuva ou pela força de escoamento das enxurradas. Nos solos lateríticos existe a cimentação (aumento da coesão) da

estrutura que aumenta a resistência ao cisalhamento. Isto explica por que os solos lateríticos são mais resistentes a erosão.

Por outro lado, estando o solo na condição não saturada, a resistência ao cisalhamento é acrescida da parcela de coesão devida à sucção. Estando os horizontes sub-superficiais menos cimentados, a sucção é a responsável pela variação na resistência ao cisalhamento destes solos.

BENDER (1985) observou que quanto menor o grau de saturação do solo maior é a erosão quando submetido às chuvas. Nestes casos a erosão é muito intensa nos instantes iniciais sofrendo uma redução gradativa ao longo do tempo, sendo este comportamento compatível com o que se observa em solos colapsíveis: quanto maior a sucção inicial maior o colapso quando do umedecimento. Portanto, é de se esperar que o horizonte sub-superficial onde o solo é colapsível, sofra maior erosão que aquele sobrejacente.

Considera-se o horizonte sub-superficial mais sujeito à erosão nos casos em que estes sejam saprolíticos. No entanto o verificado por BENDER (1985), foge a este padrão já que o horizonte mais erodível é um solo maduro, em fase de laterização, sem quaisquer sinais de estruturas da rocha mãe.

FONSECA e FERREIRA (1981), estudaram a erodibilidade em taludes de solos residuais de gnaiss, concluindo que os solos mais maduros são mais resistentes ao processo erosivo. Isto justificaria a maior erodibilidade dos horizontes sub-superficiais.

RODRIGUES (1982) estudando os parâmetros físicos de voçorocas no interior paulista, associaram a erodibilidade dos solos com sua compressibilidade. Citam que os solos estudados tinham comportamento colapsível. Como entretanto, tratava-se de um solo arenoso a propriedade que mais se destaca, neste caso, é a textura, a qual determina a susceptibilidade à erosão em solos granulares.

A erosividade da chuva é a sua habilidade potencial em causar erosão. Ocorre em função das características físicas das chuvas.

CARVALHO (1992) testou a eficiência do índice de erosividade EI30 para o Estado de São Paulo concluindo que tal índice atendeu de maneira satisfatória às

conveniências práticas e aos interesses do desenvolvimento da equação universal de perdas do solo para o local.

ALBUQUERQUE et al. (1994) recomendaram o índice de erosividade EI30 para estimar as perdas de solo de Caruaru (PE).

A erosividade da chuva do município de Campinas (SP) foi estudada por LOMBARDI NETO (1977) através do EI30. Foram utilizados dados de 22 anos de precipitação pluviométrica, obtendo-se um fator R de 6.667 MJ.mm.ha.⁻¹ h⁻¹.ano⁻¹.

CARVALHO et al. (1989) estudaram a erosividade da chuva do município de Mococa pelo índice EI30. Observaram que o fator R local foi de 7.747 MJ.mm.ha.⁻¹ h⁻¹.ano⁻¹.

BERTOL (1993) determinou o índice de erosividade através do EI30 para o município de Lages (SC), obtendo um valor médio anual de 5.694 MJ.mm.ha.⁻¹ h⁻¹.ano⁻¹.

BERTOL (1994) avaliou também a erosividade da chuva na localidade de Campos Novos (SC), no período de 1981 a 1990, através do índice EI30, obtendo um índice médio anual de 6.329 MJ.mm.ha.⁻¹ h⁻¹.ano⁻¹.

Numa tentativa de se obter uma estimativa precisa do EI30, uma vez que para muitos locais do Estado de São Paulo não existem pluviógrafos, LOMBARDI NETO (1977) correlacionou o índice de erosividade médio mensal de Campinas (SP) com um coeficiente de chuva, dado pela seguinte expressão:

$$R_c = P_m^2 / P_a$$

onde: R_c é o coeficiente de chuva em mm; P_m é a precipitação média mensal em mm, e P_a é a precipitação média anual em mm.

Da mesma forma, CARVALHO (1987) e CARVALHO et al. (1989), estudaram a correlação entre o índice de erosividade EI30 médio mensal e o coeficiente de chuva de Mococa (SP), para um período contínuo de análise de dados de 20 anos. A equação obtida foi a seguinte.

$$EI30 = 111,173.R_c^{0,691}$$

onde: EI30 é o índice de erosividade médio mensal em MJ.mm/ha.h,ano e R_c é o coeficiente de chuva em mm.

Para uma primeira aproximação na caracterização da erosividade da chuva na porção oriental do estado do Paraná. CARVALHO (1994) propôs uma hierarquização desses índices, conforme apresentado na Tabela 3.

TABELA 3 - Classes de erosividade da chuva média anual

Classes de erosividade	Valores de R (t.m.mm/ha.h.ano)
1 - Muito baixa	$R < 250$
2 - Baixa	$250 < R < 500$
3 - Média	$500 < R < 750$
4 - Alta	$750 < R < 1000$
5 - Muito Alta	$R > 1000$

Fonte: Adaptado de CARVALHO, (1994).

2.3 Cartografia Geoambiental

A cartografia geoambiental, um dos ramos da Geologia Ambiental que tem recebido crescente atenção nos últimos anos (CENDRERO, 1990), busca compreender a relação entre os componentes do meio físico, juntamente com a consideração de fatores biológicos e do uso e ocupação do solo atual e previsto.

CENDRERO (1990) citou ainda o enriquecimento, nos últimos anos, da cartografia geotécnica tradicional, que passa de uma abordagem essencialmente geotécnica a incorporar informações sobre riscos naturais: erosão, contaminação de águas subterrâneas, além da preocupação com a exaustão ou sub-aproveitamento de recursos minerais, etc.

SOBREIRA (1995) salientou que diversos nomes são encontrados na literatura para mapas desta natureza: Mapas de Ordenamento do Território, Mapas Geológico-Ambientais, Mapas Geocientíficos, Mapas Geoambientais ou ainda Mapas Geotécnicos ou de Engenharia para Ordenamento, os quais apresentam em comum a representação do território através de mapas de vários tipos, voltados a subsidiar avaliações e decisões futuras de organismos de planejamento. CERRI (1990), também chamou a atenção para a diversidade de terminologias encontradas na literatura para

designar instrumentos de caracterização do meio físico visando o planejamento e gerenciamento do uso e ocupação do solo.

Segundo ALONSO et. al (1990), o uso de mapas geocientíficos de vários tipos consiste numa base muito útil para a combinação de informações geológico-geotécnicas com outros dados ambientais, permitindo-se obter uma avaliação integrada da capacidade do terreno frente a diversos tipos de atividades.

Na Figura 3 pode-se observar os procedimentos empregados na elaboração de mapas geoambientais, sintetizados em dois grandes grupos por Cendrero e Diaz de Téran (1987) apud CENDRERO, (1990), baseados nas tendências internacionais das principais linhas metodológicas.

Nos últimos anos, ferramentas computacionais e sistemas de informação geográfica efetivaram-se no auxílio do melhor entendimento e representação dos modelos complexos de distribuição espacial dos atributos e propriedades dos solos (BURROUGH et al., 1997 e PETERSEN et al, 1995).

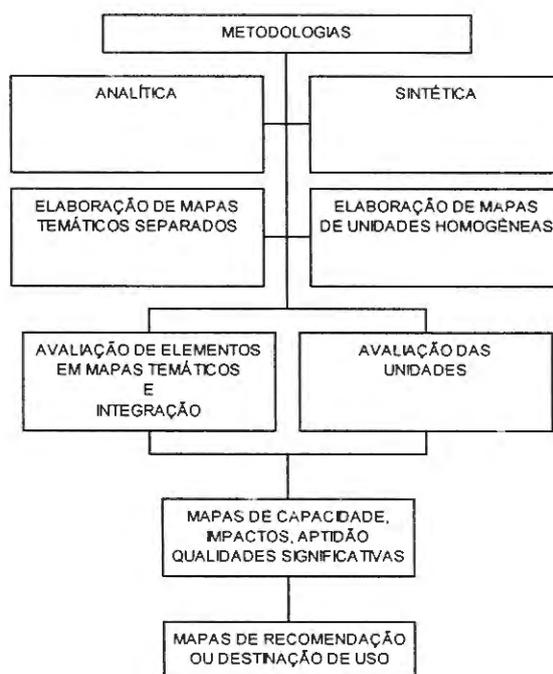


FIGURA 3 Esquema das principais linhas metodológicas para elaboração de mapas geoambientais

Fonte: Cendrero e Díaz de Terán, 1987 apud CENDRERO (1990).

2.4 Sistemas de Informações Geográficas

“Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), constituem tecnologia para a investigação de fenômenos diversos, relacionados com engenharia urbana, geologia, pedologia, vegetação, bacias hidrográficas, problemas ambientais, etc. Esses sistemas podem ser definidos como uma coleção organizada de hardware, software, dados geográficos e pessoal envolvido no trabalho, projetado para, eficientemente, capturar, armazenar, atualizar, manipular, analisar e apresentar todas as formas de informações referenciadas geograficamente” (CALIJURI e RÖHM, 1994).

“Os SIGs combinam os avanços da cartografia automatizada, dos sistemas de manipulação de banco de dados e do sensoriamento remoto, com o desenvolvimento metodológico em análise geográfica, para produzir um conjunto de procedimentos analíticos que auxiliam no gerenciamento e na atualização constante das informações disponíveis” (CALIJURI, 1994).

Os SIGs não são ferramentas para inventários de informações, simplesmente, mas, o são para modelagem, podendo ser utilizados para simular e testar modelos e/ou estimar situações ou acontecimentos (CALIJURI e RÖHM, 1994).

Um SIG deve conter os seguintes componentes:

- a) um subsistema de aquisição de dados, que colete ou processe dados espaciais derivados de mapas existentes, imagens de satélites, etc;
- b) um subsistema de armazenamento e recuperação que organize os dados espaciais de modo a permitir um rápido acesso pelo usuário para subsequente análise, bem como a atualização e correção do banco de dados espaciais;
- c) um subsistema de manipulação e análise de dados que realize uma variedade de tarefas, tais como produção de estimativas, modelos de simulação, etc;
- d) um subsistema de relatório de dados que seja capaz de apresentar todo o banco de dados original, ou parte dele, bem como os dados manipulados, fornecendo uma saída de modelos espaciais na forma de tabelas, mapas ou figuras (CALIJURI e ROHM, 1994).

Diversos são os autores que têm utilizado os Sistemas de Informações Geográficas para o estudo dos diferentes fenômenos que afetam o meio ambiente, e estes vem sendo utilizados nas mais diversas áreas do conhecimento.

Entre os trabalhos referentes à área de meio ambiente pode-se citar o realizado por SOUZA (1996), o qual estudou, a problemática relacionada com assoreamento de reservatórios utilizando o Sistema de Informações Geográficas, no qual as diferentes características foram convertidas à forma digital, armazenadas, atualizadas e manipuladas para obter as informações necessárias sobre o problema em questão, com isto procedeu-se à quantificação e mapeamento do assoreamento no interior do reservatório.

RAMALHO (1994), propôs uma metodologia para elaboração do mapeamento geotécnico da cidade de Viçosa-MG. utilizando Sistemas de Informações Geográficas. Utilizou cartas de topografia, pedologia, arruamentos, vegetação, hidrografia, e outros, os quais foram transformados para a forma digital, utilizando-se o SIG - IDRISI. A partir do modelo digital obtido e das cartas citadas acima, foram gerados mapas de declividades da cidade e através da caracterização geotécnica em termos de estabilidade de taludes das diferentes áreas, foram mapeadas as áreas de risco a escorregamentos.

Neste mesmo sentido, no Rio de Janeiro, foi desenvolvido um trabalho que aplicou SIG's ao gerenciamento de áreas de risco geológico, com a finalidade de monitorar e reduzir a ocorrência de fenômenos de escorregamentos. Foi elaborado um mapa indicativo de áreas sujeitas à ocorrência de escorregamentos nas encostas.

AMARAL et al (1993) fizeram uso de características que influem na referida problemática como geologia, distribuição de depósitos superficiais, declividade dos terrenos e uso do solo, os quais, quando armazenados e confrontados (cruzados) no SIG's identificam o grau de susceptibilidade a escorregamentos variando de muito baixo à alto.

O mapa resultante foi dividido em quatro classes:

- 1 - Áreas de risco muito baixo: áreas muito pouco sujeitas a ocorrências de escorregamentos. Praticamente nenhum escorregamento anterior ocorreu nestes locais. Em geral, envolvem áreas com declividade menor que 10%.

- 2 - Risco baixo: áreas pouco susceptíveis à ocorrência de escorregamentos. Um número muito reduzido de escorregamentos ocorreu nestes locais. No geral, envolvem áreas de encosta com cobertura vegetal ainda preservada.
- 3 - Risco moderado: áreas susceptíveis à ocorrência de escorregamentos. Um número razoável de escorregamentos anteriores ocorreram nestes locais. No geral envolvem áreas com declividades acima de 20% compostas de solo residual e rochas gnáissicas.
- 4 - Risco alto: áreas muito susceptíveis à ocorrência de escorregamentos. Correspondem às áreas críticas já conhecidas no Rio de Janeiro, seja pela frequência de acidentes, seja pela execução de obras de contenção nas encostas. Em geral envolvem as áreas com uso inadequado do solo, composta de talus, blocos rochosos e lascas instáveis.

Outro trabalho que mostrou a aplicabilidade dos SIG's foi o realizado por PRUSKI et al (1995), que utilizou as equações de chuvas intensas relativas a 29 localidades do Estado do Paraná, obtidas por Pinto citado por PRUSKI et al (1995), e as técnicas de interpolação do Sistema de Informações Geográficas - IDRISI 4.1. Para isto utilizou-se uma das principais formas de caracterização de chuvas intensas que relaciona intensidade, duração e frequência de precipitação. A partir dos mapas obtidos para cada um dos parâmetros da equação de chuvas intensas procedeu-se à análise da variação da intensidade de precipitação média relativa a diferentes períodos de retorno e durações de precipitação. Com esses mapas foi possível obter a intensidade de precipitação de qualquer localidade através da consulta direta ao mapa.

Assim sendo, os dados referentes ao problema, quando armazenados, atualizados e manipulados com o auxílio dos SIGs, conduzirão com maior precisão e velocidade, a resultados que irão auxiliar no diagnóstico, prognóstico, delineamento de medidas corretivas, e nos planos de controle e monitoramento das ações impactantes na região, bem como das ações de conservação necessárias para a minimização do problema.

2.5 Agricultura de Precisão

A coleta de informações sobre a distribuição geográfica de recursos minerais, propriedades, animais e plantas sempre foi uma parte importante das atividades das sociedades organizadas. Até recentemente, no entanto, isto era feito apenas em documentos e mapas em papel. Sendo assim, as informações eram geralmente de fácil acesso e manipulação, mas dificultavam uma análise que combinasse diversos mapas e dados (TOSI, 2000).

O desenvolvimento da tecnologia de computadores e de ferramentas matemáticas para análise espacial, que ocorreu na segunda metade do século XX, abriu possibilidades diversas, entre a habilidade de armazenar, recuperar e combinar os dados disponíveis sobre a superfície da terra.

Agricultura de Precisão é uma nova tecnologia de informação que possibilita o manejo da atividade agrícola levando-se em consideração as variações espaciais e temporais do solo e da cultura. Esta nova tecnologia faz uso intenso de Sistemas de Posicionamento por Satélite (GPS) e Sistemas de Informação Geo-referenciadas (GIS), permitindo o tratamento e análise de dados coletados no campo. A análise dos dados permite a otimização do uso de insumos agrícolas, possibilitando ganhos econômicos para o agricultor e reduzindo o impacto ambiental da atividade agrícola. Permite ainda a construção de um banco de dados espaciais e temporais de valor inestimável para o desenvolvimento de técnicas visando o uso racional da terra.

Segundo MOLIN (1997b), a agricultura de precisão surge como uma nova demanda de informática na agricultura pois implica na coleta e manipulação de uma grande quantidade de dados que só podem ser gerenciados por métodos computacionais. Todo o embasamento dessa nova tecnologia está na análise da variabilidade espacial dos fatores de produção, especialmente do solo. A partir dessa análise, as decisões devem ser tomadas para que se faça, então, a aplicação dos insumos de uma forma localizada e com dosagens precisas. A tecnologia deve ser, no entanto, validada com base em análises que provem as suas vantagens não apenas econômicas, mas também de benefícios ao meio ambiente por resultar em menor excedente de insumos.

Tradicionalmente os agricultores têm feito a amostragem do solo de uma dada área e uniformizam as subamostras em uma única que passa a representar as características daquela área, assumida como uniforme (MOLIN, 1997a). O problema é que com esta metodologia locais que necessitam de quantidades de insumo maior por exemplo estarão recebendo o tratamento inadequado, fazendo com que a produtividade e economia não seja otimizadas.

Com a coleta de dados visando esta otimização pode-se confeccionar mapas de distribuição de insumos na área plantada, ainda pode-se sugerir formas de tratamento diferenciadas para as regiões que necessitam de tratamento especial, levando dessa forma a uma economia e ganho de produtividade. No aspecto erosão poderiam ser confeccionadas cartas com índices que mostrem a compactação da área de forma a manejar a mesma de forma adequada para reduzir a probabilidade da erosão ocorrer.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

3.1.1 Município de Resende Costa

O município de Resende Costa localiza-se na Zona de Campos das Vertentes, fazendo parte da microrregião (Campos da Mantiqueira). Limita com os municípios de São Tiago, Passa Tempo, Desterro de Entre-Rios, Entre-Rios de Minas, Lagoa Dourada, Coronel Xavier Chaves e Ritópolis.

A sede do município a 1140m de altitude, tem a sua posição determinada pelas coordenadas geográficas de 20° 55' 19" S e 44° 14' 16" W.

O espaço onde se localiza Resende Costa corresponde a uma área de transição tanto do ponto de vista de relevo como de vegetação. As serras que cortam o município são importantes divisores entre as bacias do Rio Grande e São Francisco.

Com relação à vegetação, a região caracteriza-se pela presença de espécies tanto da floresta tropical como do cerrado, entre outras.

A área do município pertence ao Pré-Cambriano Arqueozóico. Ao norte da sede municipal, as rochas predominantes são as do embasamento granito-gnaissico Indiviso e ao sul tem predominância as do grupo Barbacena, com ocorrência no sentido geral SW-NE, de rochas da formação Lafaiete.

Topograficamente, o município de Resende Costa é constituído por um planalto, dissecado e ondulado, com níveis altimétricos quase sempre acima de 1000m.

No município de Resende Costa, os processos erosivos são bastante atuantes, o que pode ser observado pela extensão e quantidade de voçorocas ativas e de erosões laminares (Figuras 4 a 6).

Estas voçorocas ocupam os topos das colinas, ou seja, áreas com menor declividade e os solos apresentam coloração mais clara e a vegetação rasteira contribui para um processo mais ativo de lixiviação.

O clima predominante, de acordo com a classificação de Köppen, é o Cwb (clima tropical de altitude com estiagem no inverno e média do mês mais frio inferior a 18°C).

O total pluviométrico varia em torno de 1259 mm anuais.

Para o estudo de caso foi selecionada a bacia do Rio Santo Antônio, com 500 km², por apresentar os seguintes tipos de erosão: voçorocas, sulcos e laminar.

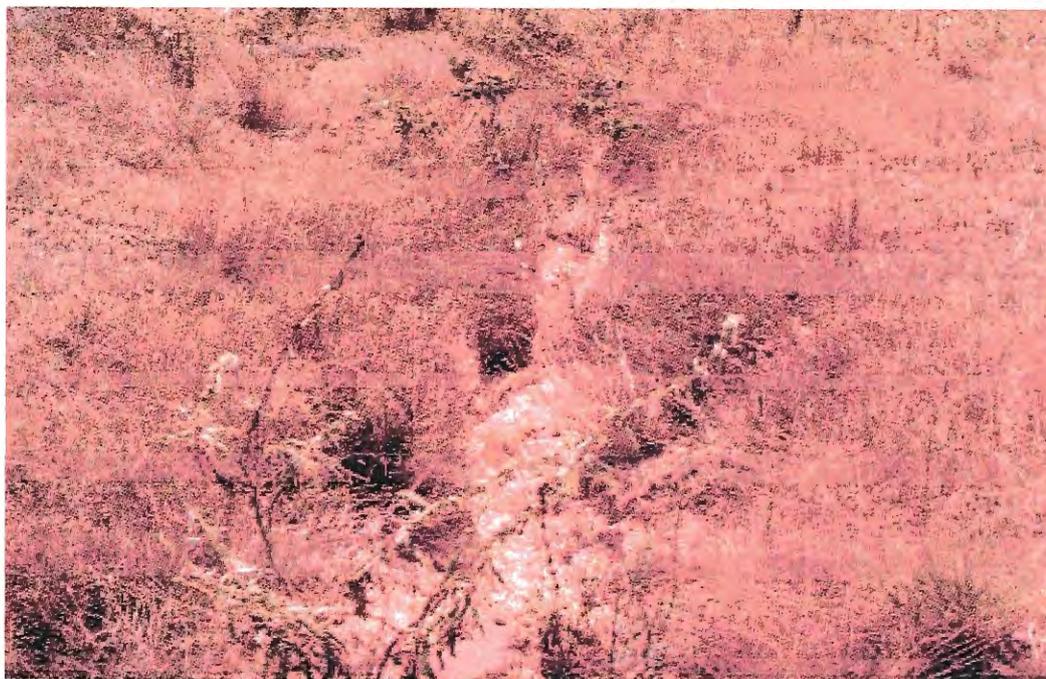


FIGURA 4 Erosão em Sulcos na região de Resende Costa



FIGURA 5 Voçorocas na região de Resende Costa

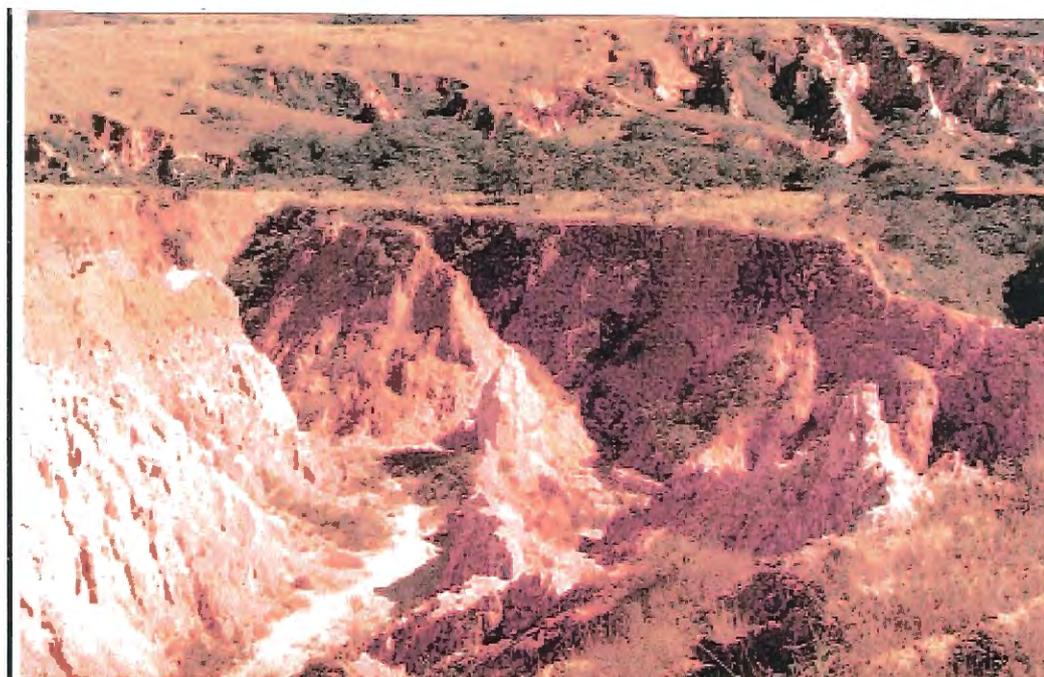


FIGURA 6 Voçorocas na Região de Resende Costa

3.1.2 Campus experimental do curso de Engenharia Agrícola da UNIOESTE - Campus de Cascavel

A segunda parte do trabalho foi executada em área do Campus Experimental de Engenharia Agrícola da UNIOESTE, localizada no município de Cascavel, na BR-369, km 101, na região Oeste do Paraná. O município de Cascavel possui uma área de 2016,305 km² com um perímetro urbano de 75 km², está a 24° e 58' de latitude Sul e 26° de longitude Oeste de GREENWICH, com uma altitude média de 800 metros. O clima é temperado mesotérmico e super úmido, com temperatura média anual de 21°C.

O solo do local é um Latossolo Roxo distrófico e com relevo levemente ondulado.

O sistema de conservação de solos existentes é o de terraços em nível, sendo observado ocorrência de erosão entre terraços com assoreamento do canal.

3.2 Escolha da área

A área escolhida vinha sendo conduzida sob semeadura direta com culturas de verão (soja - milho) há vários anos. Encontrava-se compactada e com problemas de erosão entre terraços, devido à má infiltração de água, o que levava ao mal desenvolvimento das plantas.

3.3 Materiais

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se os seguintes materiais:

- (i) cartas topográficas do IBGE na escala 1:50.000
- (ii) mapa pedológico da bacia do rio Santo Antônio - CETEC, escala 1:50.000
- (iii) mapas de solos e geomorfológico da bacia do rio Santo Antônio - CETEC

- (iv) software IDRISI for Windows 2.0, mesa digitalizadora, microcomputador e demais acessórios.
- (v) para a realização dos ensaios geotécnicos foi utilizado o Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa com infra-estrutura completa para o pleno desenvolvimento da pesquisa, e o Laboratório de Geotecnia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

3.4 Métodos

Neste item são apresentadas as metodologias seguidas nas diferentes fases da pesquisa.

3.4.1 Determinação das características do solo

Foram detalhadas as propriedades do solo que influenciam em sua erodibilidade, entre as quais estão:

- a) as que influenciam o movimento de água no solo
- b) as que resistem às forças de cisalhamento do escoamento superficial.

Entre estas estão a composição textural, a densidade, porosidade e conteúdo de água.

Para a determinação da textura do solo, foram realizados ensaios de granulometria conforme metodologia recomendada pela ABNT NBR 7181/82 - Solo - Análise granulométrica.

As determinações das massas específicas dos grãos do solo (densidade das partículas) foram feitas de acordo com a norma brasileira NBR 6508/80 - Determinação da massa específica dos grãos do solo.

Foram realizados ensaios de erodibilidade nos solos da região escolhida buscando relacioná-los com outros parâmetros como os geotécnicos por exemplo. Para isto utilizou-se a metodologia proposta por KHIEL,1979 para obtenção da

macroporosidade e microporosidade, e através da perda de solo durante a realização do ensaio, tentou-se a correlação com a erodibilidade dos solos.

Além da análise das variáveis pertinentes aos estudos de erosão dos solos tais como declividade, comprimento, e forma da vertente; foram definidas e cartografadas as formações superficiais para avaliação dos processos de erosão e assoreamento. Estas foram inseridas no Sistema de Informações Geográficas para sua avaliação e posterior modelagem.

A partir dos dados obtidos no mapeamento e nas observações efetuadas nos focos erosivos da área foi feito o planejamento das investigações geotécnicas de campo e laboratório.

Estas investigações foram iniciadas através da execução de sondagens a percussão, com ensaios de penetração padrão (SPT), segundo metodologia da norma NBR 6484/80 e NBR 7250/82, para avaliação da resistência, e de infiltração, para avaliação da permeabilidade dos solos.

Com os resultados obtidos das sondagens, do mapeamento e das observações de campo foi efetuada a setorização dos maciços, com os seus diferentes estratos. A partir desta setorização executou-se a abertura de poços de investigação e coleta de amostras para ensaios geotécnicos de laboratório.

Os ensaios executados visaram a caracterização, a determinação da resistência mecânica e a permeabilidade dos solos.

A metodologia utilizada para a obtenção das amostras e para a execução dos ensaios atendeu à normalização vigente (ABNT). Os procedimentos dos ensaios de caracterização realizados no laboratório verificaram os limites de consistência (Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade), de permeabilidade e de expansibilidade LNEC, para tal fim empregou-se a metodologia apresentada por ESTANCATI et al. (1981).

Os ensaios de compressão triaxial executados sobre as amostras coletadas seguiram a metodologia proposta por BISHOP and HENKEL (1962).

A integração dos resultados obtidos no laboratório com dados obtidos de bibliografia sobre o comportamento dos solos e observações dos fenômenos erosivos da área, permitiram a elaboração de uma classificação geotécnica dos maciços, ou seja, a divisão dos mesmos em classes com diferentes comportamentos erosivos.

3.4.2 Sistemas de Informações Geográficas

As diversas características determinadas conforme apresentadas nos itens anteriores foram introduzidos no Sistemas de Informações Geográficas e através de sua manipulação foi elaborada uma carta de riscos bem como se fez os cruzamentos de diversos mapas gerados para a obtenção das diferentes áreas com problemas de erosão e sua relação com diferentes parâmetros.

As diferentes cartas foram digitalizadas, utilizando-se mesa digitalizadora convertendo-se assim estes mapas à forma digital, sendo então geradas imagens de declividades, de solos, de tipos de erosão e outros, que permitiram quantificar por exemplo, a percentagem de voçorocas para um determinado tipo de solo.

Para a classificação das diferentes áreas de acordo com sua susceptibilidade à erosão será utilizada a metodologia recomendada por AMARAL et al (1993), bem como se implementaram as metodologias descritas em FARES et al (1994).

3.4.3 Caracterização da Erodibilidade do Solo através do Ensaio de Inderbitzen

Na tentativa de se correlacionar características geotécnicas com a erodibilidade dos solos, executou-se ensaios de erosão Inderbitzen, conforme relatado por FONSECA et al (1981).

Este aparelho foi construído para a execução da presente pesquisa. As Figuras 7 e 8 apresentam o aparelho construído e instalado no Laboratório de Getotecnia da Universidade Federal de Viçosa.

Os resultados obtidos destes ensaios permitiram, através de formulações estatísticas, o estudo das correlações entre ensaios laboratoriais clássicos e a erodibilidade dos solos.

Os equipamentos necessários para a execução dos ensaios, foram os seguintes:

Aparelho para ensaio de erodibilidade (inderbitzen)

2 conjuntos de peneiras # 30, #100, #200 e #380;

5 beckers de 1000 ml cada;

2 baldes (latas) de aproximadamente 22cm de altura e 22 cm de diâmetro;

estufa regulável;

plástico medindo aproximadamente 40 cm de largura e 70 cm de comprimento.



FIGURA 7 Ensaio de Erodibilidade sendo executado no aparelho de Inderbitzen

Inicialmente verificou-se as condições da amostra e anotou-se as suas características como: procedência e classificação visual. Em seguida pesou-se e anotou-se o anel e a base a serem usados no ensaio. Logo após executou-se as diversas etapas: moldou-se a amostra no anel, pesou-se e anotou-se o anel + amostra, tirou-se a umidade do material usado na moldagem, colocou-se o anel + amostra e base no aparelho do ensaio (Inderbitzen), cobriu-se a superfície do plano inclinado do aparelho e da amostra com plástico, colocou-se o jogo de peneiras na posição de forma que coleta-se o material erodido, encheu-se o reservatório até o

nível desejado e manteve-se o mesmo constante anotando-se a hora, para em seguida retirar o plástico da superfície e dar-se início ao ensaio de Erosão.



FIGURA 8 Ensaio e coleta de material erodido no ensaio de Inderbitzen

Uma vez começado o ensaio preparou-se o 2º. conjunto de peneiras, para substituir aquele que estava coletando o material erodido (Figura 8). Aos 5 minutos do início do ensaio fez-se a primeira troca das peneiras. O conjunto recolhido foi lavado no balde e preparado para a nova troca que se repetiu aos 15, 30, 60 e 120 minutos. À medida que as peneiras foram sendo lavadas no balde, esse material recolhido foi transferido com a água para os respectivos beakers. Após o término do ensaio, os beakers foram postos na estufa à 110°C até peso constante. Depois de seco, o conjunto becker e solo foi pesado e através da diferença entre esse peso e o do becker, obteve-se o peso do solo seco. Após duas horas de ensaio fechou-se a torneira que alimentava o reservatório, retirou-se o conjunto de peneiras e o ensaio foi dado por encerrado.

Retirou-se a amostra do equipamento, pesou-se o conjunto amostra e anel, anotando-se em seguida. Finalmente, determinou-se o teor de umidade da amostra de solo após o ensaio. O formulário para o Ensaio de Inderbitzen e perspectiva do equipamento apresentam-se nas Figuras 9 a 10.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV
Laboratório de Engenharia Civil
Ensaio Inderbitzen

Operador:

Tipo de solo	
Amostra	Natural
Anel	4

Altura da água no reservatório	1.72
ângulo de inclinação da rampa	44
Vazão	57
Temperatura da água no ensaio	28
Area do Anel	180.5

condições iniciais	
Peso da amostra + anel (g)	2023
Umidade do solo	20.4
Peso do anel (g)	821.15
Peso do solo seco (g)	983.43

Condições finais	
Peso da amostra +anel + base	3643
Peso do anel + base	2384
Umidade do solo	30.8
Peso do solo seco	962.53823

Tempo (min.)	Peso do solo	Peso do becker	Peso do solo	Peso do solo	Erodibilidade	Velocidade
	seco +becker (g)		seco parcial (g)	seco total (g)		
5	60.52	58.9	1.62	1.62	0.0090	0.1077
15	60.25	59.65	0.6	2.22	0.0123	0.0492
30	41.4	40.9	0.5	2.72	0.0151	0.0301
60	41.95	41.56	0.39	3.11	0.0172	0.0172
120	43.62	43.13	0.49	3.6	0.0199	0.0100

Observações: Amostra perto do poço de sondagem

FIGURA 9 Formulário de Inderbitzen

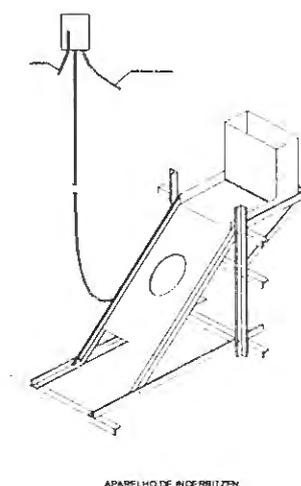


FIGURA 10 Perspectiva do aparelho de Inderbitzen

3.4.4 Piezometria

A água que percola no interior de um talude exerce, uma pressão sobre as partículas do solo, conhecida como pressão de percolação. Esta pressão atua na direção do fluxo e sua intensidade cresce proporcionalmente à velocidade de percolação.

As forças de percolação são quase sempre as responsáveis pela instabilidade de maciços terrosos, tais como cortes, taludes de aterros e de barragens de terra. O sentido dessas forças, em muitos casos, é no mesmo sentido do movimento do maciço, o que pode causar a sua ruptura.

As forças de percolação são muito altas no pé dos taludes, podendo provocar a movimentação de partículas de solo, causando um desequilíbrio na parte inferior do mesmo. Uma vez que a base do talude tenha entrado em colapso, a parte superior cederá por perda de apoio. Se o colapso do talude não for imediato, poderá se desenvolver, inclinando-se na base do talude, uma cavidade alongada de seção circular resultante do avanço do processo de erosão progressiva (voçoroca).

Como meio de quantificar e avaliar a ação da percolação da água no subsolo, utilizou-se aparelhos de piezômetros em torno das 3 voçorocas e sendo 15 piezômetros para cada uma delas.

O piezômetro de tubo aberto é um indicador de nível d'água que consiste em um filtro (ponteira), Figura 11, com a extremidade unida a uma tubulação a qual se comunica com a superfície. O filtro de baixa entrada de ar (manta de poliéster) tem poros de 60 microns e uma permeabilidade de 3×10^{-4} m/s.

Uma célula de areia é formada em torno da extremidade do filtro na ponta do furo executado. Um selo de bentonita é colocado sobre a areia para isolar a pressão da água no poro da extremidade. Como a pressão da água no poro cresce ou decresce, o nível da água dentro do cano-vertical aumenta ou abaixa.

Para a execução desta etapa os piezômetros foram confeccionados no Laboratório de geotecnia da UFV e instalados na região das voçorocas para estudo e monitoramento do lençol freático bem como a sua influência no processo erosivo.

As Figuras 11 e 12 mostram as ponteiros dos piezômetros executados, os mesmos possuem furos no corpo da ponteira que é de PVC e na sua extremidade colocou-se um tampão de 40 mm (terminal). A ponteira é revestida com uma manta de poliéster para atuar como filtro impedindo a colmatação dos furos executados.



FIGURA 11 Ponteira padrão dos piezômetros confeccionados

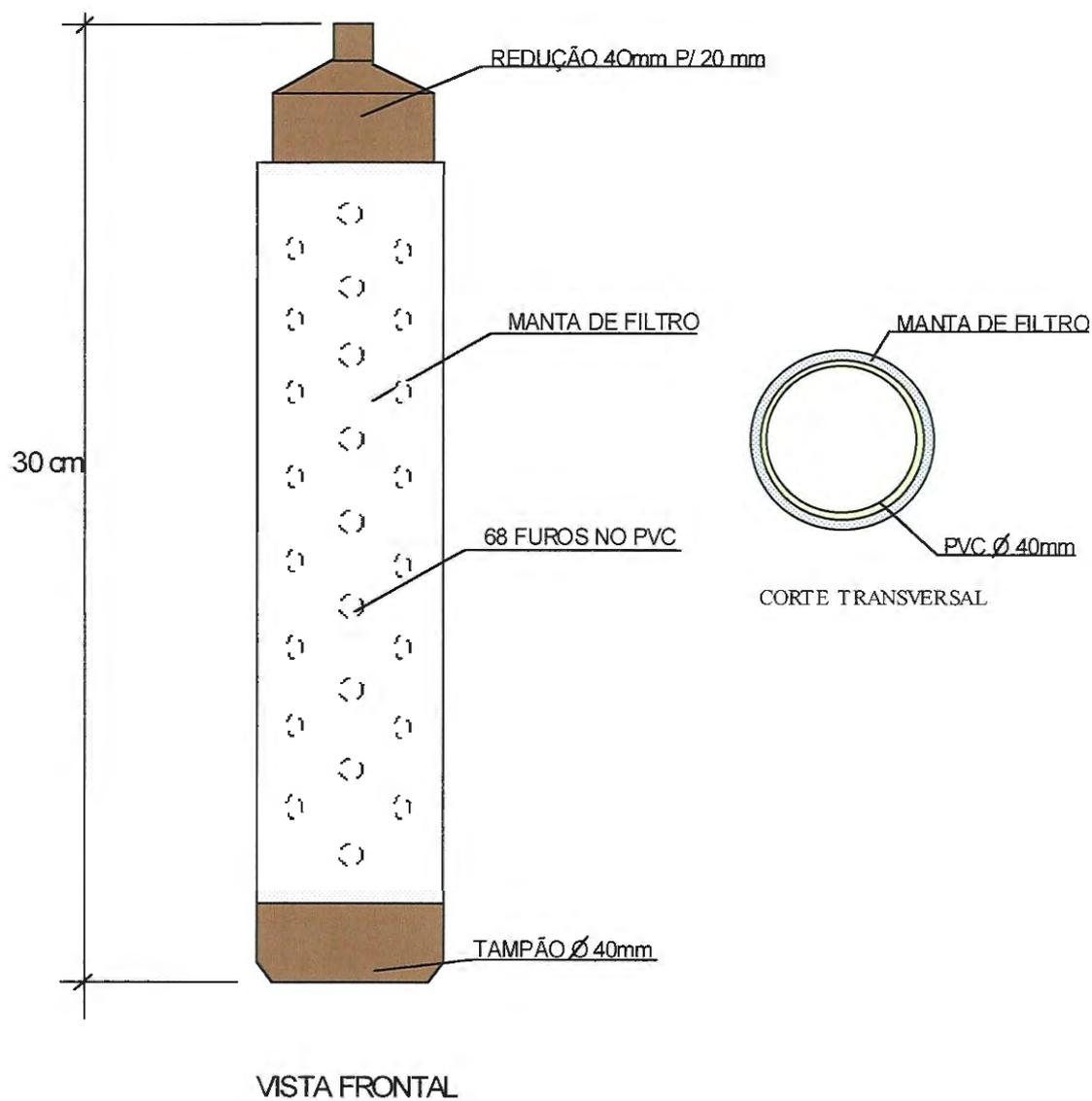


FIGURA 12 Ponteira do Piezômetro



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados das amostras do município de Resende Costa - MG.

4.1.1 Ensaios de caracterização dos solos

4.1.1.1 Índices Físicos

Os dados de massa específica dos sólidos (γ_s), massa específica seca (γ_d), porosidade (n) e teor de umidade (w), obtidos das amostras de solo de A até K, do município de Resende Costa - MG; são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4 Resultados dos ensaios de caracterização dos solos do município de Resende Costa, MG.

Solo	γ_s kN/m ³	γ_d kN/m ³	n %	w %
Amostra A	26,1	13,0	50,00	18,30
Amostra B	26,9	12,8	52,38	28,81
Amostra C	28,9	13,2	54,34	29,65
Amostra D	26,0	8,5	67,00	36,35
Amostra E	25,5	9,0	64,31	27,50
Amostra F	26,1	10,0	61,69	22,27
Amostra G	25,5	9,6	62,35	28,50
Amostra H	25,3	9,8	61,26	27,01
Amostra I	25,6	9,3	63,67	26,69
Amostra J	27,0	10,5	61,11	21,68
Amostra K	26,5	9,3	65,00	31,22

Pela Tabela 4, pode-se observar que a maioria das amostras de solos estudadas apresentaram faixa de variação de massa específica dos sólidos compatível com solos arenosos. Analisando-se os materiais vistos nas paredes das voçorocas, as quais apresentam materiais mais grosseiros, pode-se afirmar que os resultados representam os materiais existentes no campo. Para efeito de estudo do fluxo de água em solos, é interessante observar-se a porosidade destas amostras apresentadas na mesma Tabela 4.

Os valores de porosidade determinados apresentaram-se elevados, explicando a infiltração de água no solo e o seu surgimento nos pés dos taludes das voçorocas. Estes vazios permitem o fluxo de partículas menores e favorecem o aparecimento da erosão interna.

Os materiais mais superficiais apresentaram valores mais baixos de massa específica dos sólidos, apresentando valores de até $25,1 \text{ kN/m}^3$, isto pode ser explicado devido à presença de matéria orgânica (raízes) na superfície. A única amostra que apresentou valor elevado de γ_s ($28,9 \text{ kN/m}^3$) foi a amostra C.

4.1.1.2 Granulometria

Os resultados da análise granulométrica, obtidos das amostras de solo de A até K, do município de Resende Costa - MG; são apresentados na Tabela 5, onde pode-se observar que a maioria das amostras apresentaram maior quantidade de areia e a amostra A apresentou pedregulhos. No caso desta amostra, a mesma é superficial e localizada próximo à cabeceira da voçoroca, onde verificou-se trincas, *in situ*, as quais são locais preferenciais para a infiltração da água. Conforme apresentado na revisão de literatura, solos arenosos são mais susceptíveis à erosão, pois os mesmos não apresentam a coesão necessária para oferecer resistência à ação erosiva da água.

TABELA 5 Resultados do ensaio de granulometria em amostras de solo do município de Resende Costa - MG

Solo	%pedregulho	% areia	% silte	% argila
Amostra A	14	55	10	21
Amostra B	0	35	25	40
Amostra C	0	39	37	24
Amostra D	0	20	29	51
Amostra E	0	32	25	43
Amostra F	0	43	16	41
Amostra G	0	44	23	33
Amostra H	0	36	28	36
Amostra I	0	37	23	40
Amostra J	0	53	19	28
Amostra K	0	22	24	54

Geralmente, os ensaios de caracterização fornecem pouca informação em relação à erodibilidade dos solos e como visto no capítulo 2, a tentativa de determinação da erodibilidade dos solos não tem conseguido grandes avanços no país.

Segundo Bouyoucos, citado por BERTONI e LOMBARDI NETO (1985), a erodibilidade dos solos é obtida a partir da seguinte relação:

$$erodibilidade = \frac{\%areia + \%silte}{\%argila}$$

Esta é uma das relações que pode ser determinada a partir de ensaios de caracterização em solos, assim sendo, a partir dos resultados apresentados na Tabela 5, para as amostras estudadas, temos os valores de erodibilidade calculados por esta relação, os quais estão apresentados na Tabela 6.

Dos resultados da Tabela 6, observa-se que as amostras A, C, G e J apresentaram valores elevados de erodibilidade, o que indicaria um maior potencial de erosão dos solos representados. Particularmente, na amostra A, tem-se um material superficial que apresenta pedregulhos na sua composição, o que levaria a uma resistência menor à erosão; já na amostra J observa-se material de alteração no seu perfil, apresentando gnaisse intemperizado, como mostra a Figura 13, e cascalho anguloso de quartzo ao longo do perfil, o que se tornaria um caminho preferencial

para o escoamento subterrâneo. A influência da percentagem de silte e areia no cálculo do índice de erodibilidade do solo é apresentado na Figura 14.

TABELA 6 Erodibilidade do solo obtida a partir da fórmula apresentada por Bouyoucos, citado por BERTONI e LOMBARDI NETO (1985)

Solo	%silte + areia	% argila	Erodibilidade
Amostra A	65	21	3,10
Amostra B	60	40	1,50
Amostra C	76	24	3,17
Amostra D	49	51	0,96
Amostra E	57	43	1,33
Amostra F	59	41	1,44
Amostra G	67	33	2,03
Amostra H	64	36	1,78
Amostra I	60	40	1,50
Amostra J	72	28	2,57
Amostra K	46	54	0,85

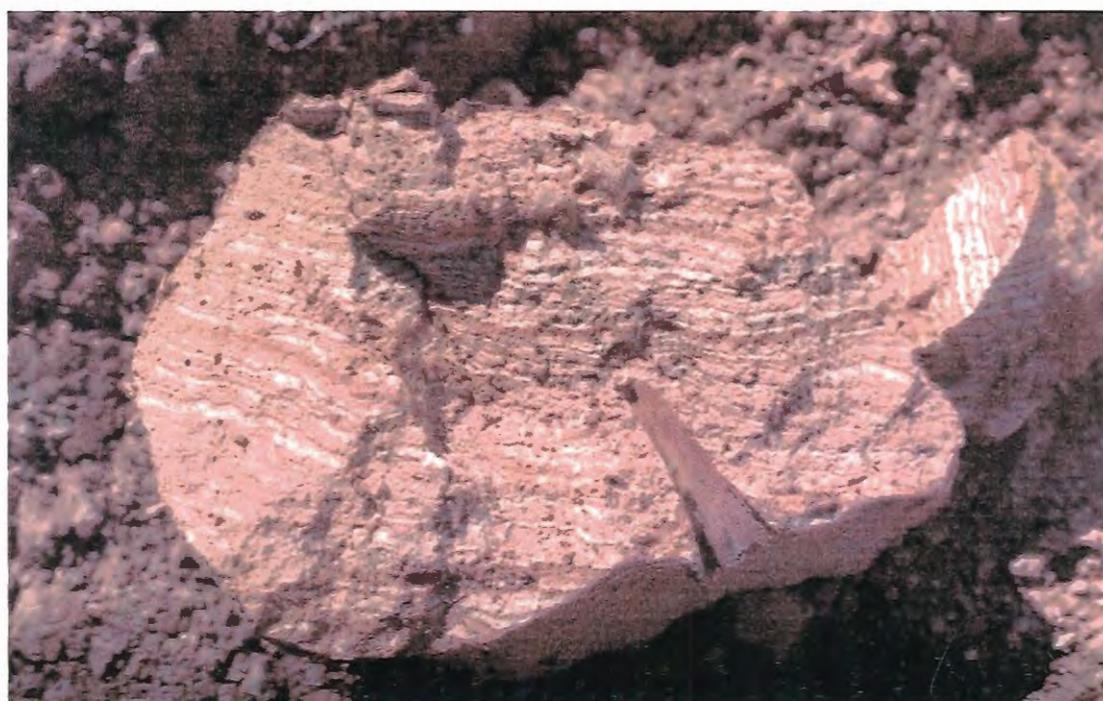


FIGURA 13 Amostra da rocha intemperizada - Resende Costa, MG.

Os índices da Tabela 6, não confirmam por exemplo, a erosão acelerada que ocorre na região da amostra I, pois a mesma obteve índice inferior que as amostras citadas anteriormente, e esta amostra, segundo a composição granulométrica, seria de um solo mais argiloso, pelo que esperava-se não houvesse erosão neste local, não condizendo com a observação in situ, fato que pode ser explicado pela estrutura do solo.

Como indicativo de solos susceptíveis a erosão, este índice deve ser apenas um dos que deveria entrar na análise, pois acredita-se que um teste isolado não possa confirmar a erodibilidade de um solo.

Na Figura 14, observa-se que o Índice de Erodibilidade mostrou-se crescente com a percentagem de areia e silte presente nas amostras, a correlação conseguida com estes resultados foi:

$$Y = 0,0789831X - 3,0076$$

Onde: Y representa o índice de erodibilidade e X representa a percentagem de areia e silte presentes na amostra.

Esta equação apresentou um coeficiente de correlação $R^2 = 0,79$.

Ainda baseado em resultados de caracterização, o LNEC, citado por FONSECA et al (1981), propôs o cálculo do índice de erodibilidade do solo, como sendo a relação de partículas finas dividido pelo número de peneiras empregadas no ensaio. Este cálculo forneceu os resultados apresentados na Tabela 7.

Os resultados apresentados na Tabela 7 mostram que a maioria das amostras classificaram-se como não resistentes à erosão. Com exceção das amostras A e J, que apresentaram valores dentro do intervalo proposto. Os solos bons ou regulares teriam, segundo este mesmo autor:

$$0,52 \leq \text{índice} \leq 0,92$$

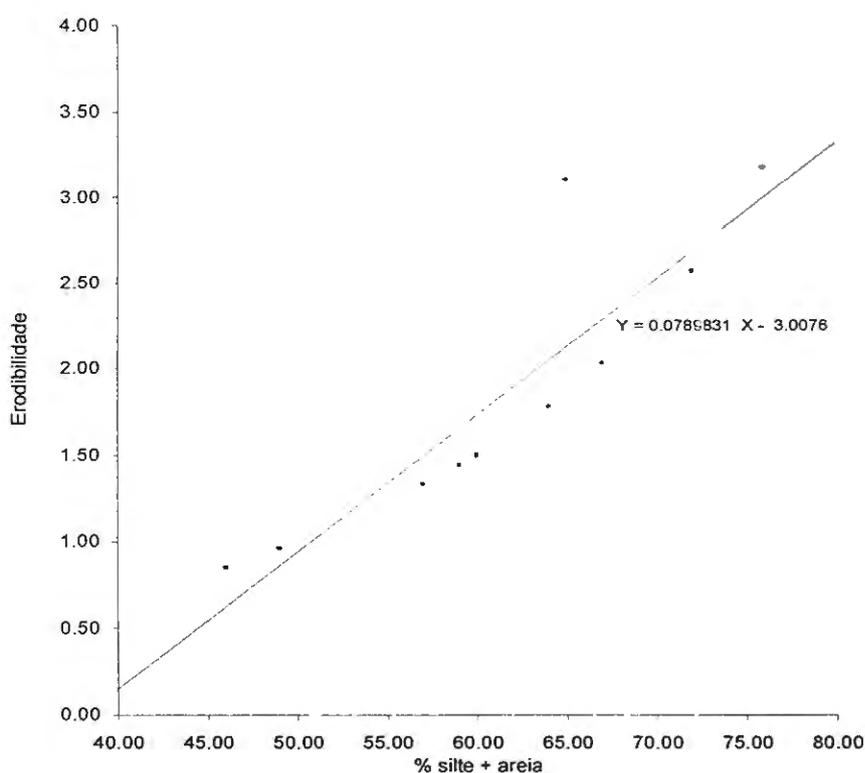


FIGURA 14 Influência da porcentagem de silte e areia no cálculo do Índice de Erodibilidade calculado a partir da fórmula apresentada por Bouyoucos, citado por BERTONI e LOMBARDI NETO (1985).

TABELA 7 Erodibilidade do Solo obtida a partir da fórmula apresentada pelo LNEC citado por FONSECA (1981)

Solo	% finos	erodibilidade
Amostra A	31	0,52
Amostra B	65	1,08
Amostra C	61	1,02
Amostra D	80	1,33
Amostra E	68	1,13
Amostra F	57	0,95
Amostra G	56	0,93
Amostra H	64	1,07
Amostra I	63	1,05
Amostra J	47	0,78
Amostra K	78	1,30

Quando comparadas essas amostras aos resultados do método anterior, não se conseguiu estabelecer correspondência entre os valores, mas em se tratando de uma

análise rápida do potencial erosivo, poderia se recomendar a utilização deste índice como o segundo a ser empregado nas análises de susceptibilidade à erosão e sua correspondente utilização na caracterização geotécnica destes solos.

Para melhor visualização da influência da percentagem de finos na erodibilidade calculada, segundo a formulação do LNEC, citado por FONSECA (1981), plotou-se o gráfico mostrado na Figura 15. Pode-se observar que a percentagem de finos (silte + argila) aumentou concomitantemente com o índice de erodibilidade. A correlação conseguida com estes resultados foi:

$$Y = 0,0165984X + 0,0035507$$

Onde: Y representa o índice de erodibilidade e X representa a percentagem de finos presentes na amostra.

O coeficiente de correlação apresentado pela equação acima, foi de $R^2 = 0,99$.

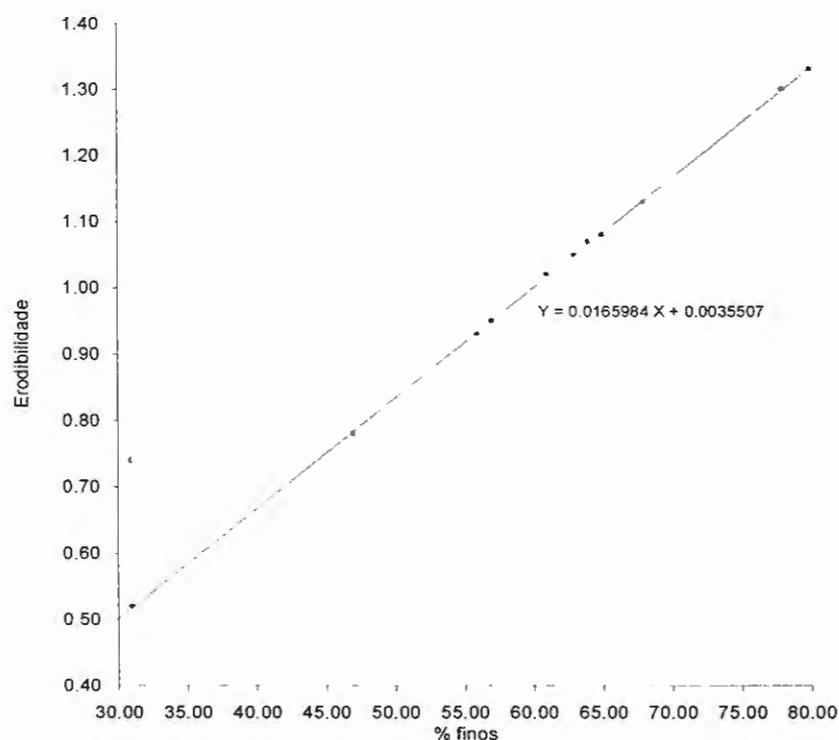


FIGURA 15 Influência da percentagem de finos no cálculo do Índice de Erodibilidade obtido a partir da fórmula apresentada pelo LNEC, citado por FONSECA (1981).

Para melhor visualização e análise da influência da porosidade na erodibilidade, plotou-se o gráfico apresentado na Figura 16, considerando-se a erodibilidade determinada pela equação de Bouyoucos.

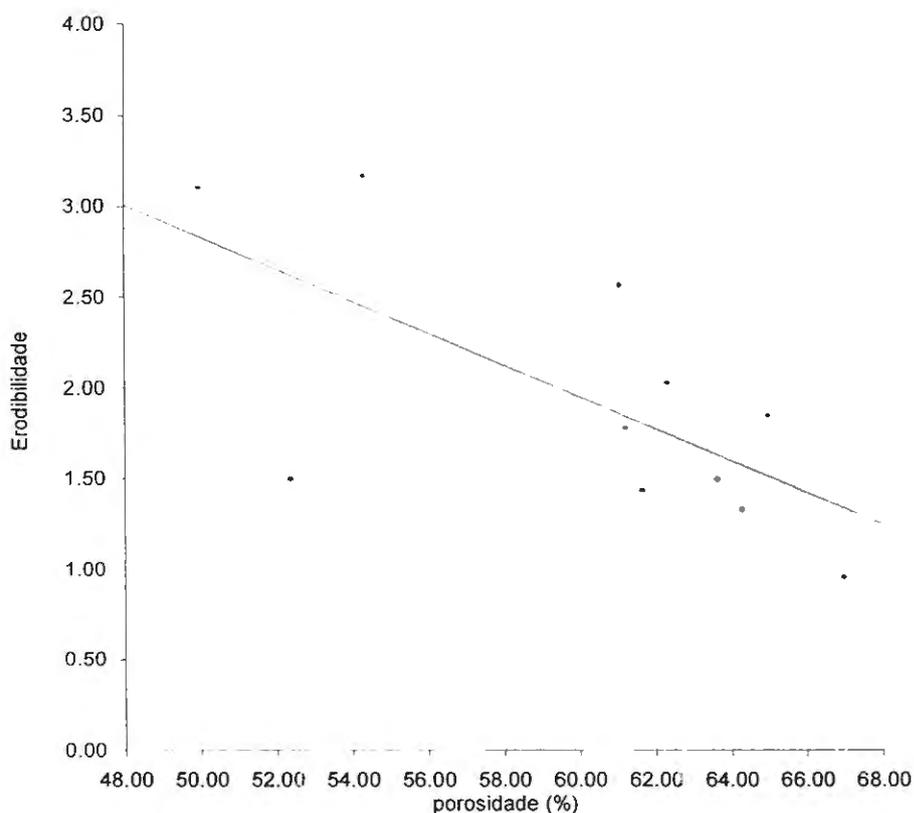


FIGURA 16 Índice de erodibilidade (Bouyoucos) x porosidade.

Na Figura 16, pode-se observar que o índice de erodibilidade diminuiu com o aumento da porosidade, o que parece estar correto no sentido de que, se o solo é mais poroso, há maior facilidade para a água infiltrar, logo, é de se esperar uma redução da erosão superficial, o que não implica em uma diminuição da erosão interna. Todas as paredes das voçorocas estudadas, apresentaram blocos de solo com canaliculos preenchidos por material mais fino, caracterizando a ocorrência de piping. A erodibilidade apresentou-se inversamente proporcional à porosidade do solo.

4.1.1.3 Estados de Consistência

Os resultados dos ensaios para determinação dos estados de consistência, Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP), das amostras de solos de A até K, do município de Resende Costa - MG; são apresentados na Tabela 8, onde pode-se observar que a maioria das amostras apresentaram valores de índice de plasticidade elevados. Para a execução destes ensaios foram escolhidas três amostras que representaram os tipos de solo que se encontram na região de estudo.

TABELA 8 Resultados dos ensaios de consistência em solos (valores médios)

Solo	LL	LP	IP
Amostra 1	49	32	17
Amostra 2	66	39	27
Amostra 3	63	33	30

Estes índices forneceram resultados que podem ser comparados com a faixa de variação proposta pelo LNEC, citado por FONSECA (1981), na qual os solos que apresentam boa a regular resistência à erosão devem apresentar:

$$LP \leq 32\%$$

$$IP \leq 17\%$$

Segundo Castro e Branco, citados por VILAR (1987), os solos resistentes à erosão devem apresentar as seguintes faixas de variação:

$$6\% \leq IP \leq 15\%$$

$$LL \leq 40\%$$

Pelos resultados apresentados na Tabela 8, observa-se que os solos mostraram valores superiores aos de referência, indicando solos com uma maior susceptibilidade à erosão. Apenas a amostra 1 apresentou valores dentro dos limites da sugestão apresentada pelo LNEC, porém, em campo, observou-se feições erosivas ocorrendo

nestes tipos de solos. No caso da sugestão de Costa e Branco, todos os solos são pouco resistentes à erosão.

O índice de plasticidade pode ser um indicativo de solos que podem vir a apresentar problemas de erosão, já que este pode indicar solos que sofrem maiores deformações quando trabalhados, e dependendo do uso do solo, os mesmos podem vir a sofrer o processo de compactação, fato prejudicial em termos de erosão, do ponto de vista agrícola. Estes resultados não trazem maiores esclarecimentos, e se o manejo é o fator a ser considerado, deve-se acompanhar uma área com diferentes sistemas de manejo para proceder-se a uma avaliação pontual e detalhada do mesmo.

A Figura 17, foi plotada como forma de visualizar melhor a relação entre os limites de consistência e o índice de erodibilidade dos solos, o gráfico apresentado pode ser empregado para definição do índice a partir dos valores de LL, LP ou IP, para a região de Resende Costa, MG.

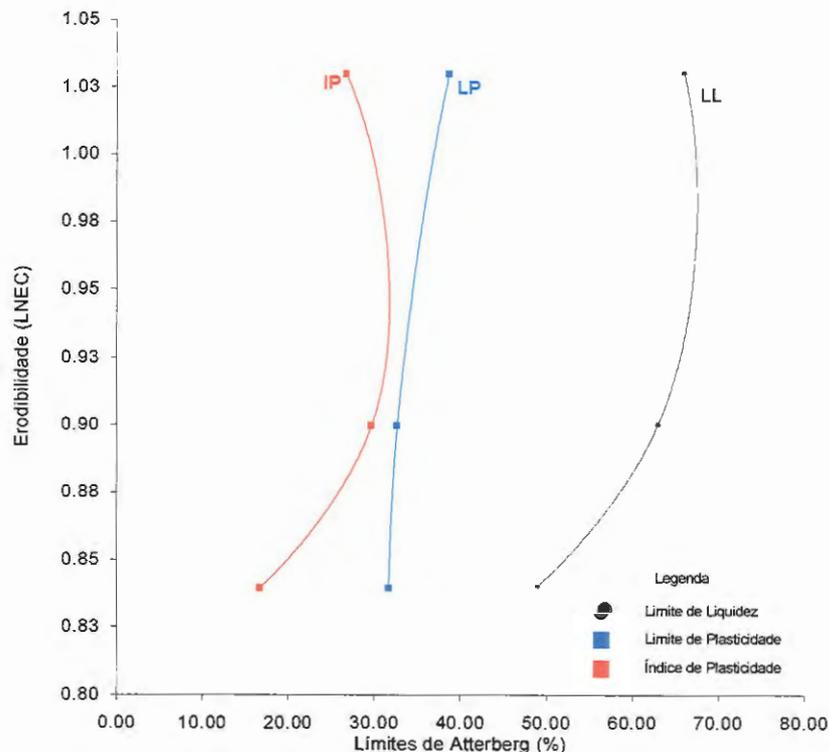


FIGURA 17 Influência do LL, LP e IP no cálculo do Índice de Erodibilidade (LNEC).

Verifica-se nesta Figura que o valor da erodibilidade possui a tendencia de aumentar junto com a percentagem dos índices, até um ponto acima do qual a erodibilidade diminui com o aumento dos índices de consistência.

4.1.1.4 Permeabilidade e Expansibilidade

Os resultados apresentados na Tabela 9, mostram a permeabilidade média e a expansão dos solos. Estes dados mostram valores de permeabilidade superiores aos esperados para estes solos, já que os resultados da granulometria mostraram que as amostras apresentam quantias de finos apreciáveis. Logo, a porosidade desses solos influencia na sua permeabilidade, aumentando o fluxo de água e por consequência, facilitando o processo de erosão interna, conforme verificado in situ.

No caso da expansão, pode-se utilizar a faixa de variação proposta pelo LNEC, na qual os solos de comportamento bom a regular apresentam:

$$\text{Expansão} \leq 11\%$$

Ou pode-se utilizar a faixa de variação proposta por Castro e Branco, citados por VILAR (1987), na qual os solos resistentes à erosão devem apresentar:

$$\text{Expansão} \leq 10\%$$

Nas amostras dos solos estudados, duas apresentaram expansão superior ao valor recomendado, e uma delas apresentou valor bem inferior, denotando um comportamento de solo bom, porém, como observado no item anterior, verificaram-se feições erosivas in situ.

TABELA 9 Permeabilidade e expansibilidade dos solos (valores médios) da região de Resende Costa - MG

Solo	Permeabilidade (cm/s)	Expansibilidade (%)
Amostra 1	$4,3 \times 10^{-6}$	6,0
Amostra 2	$1,4 \times 10^{-5}$	13,6
Amostra 3	$5,3 \times 10^{-7}$	21,7

Para melhor visualização do comportamento do índice de erodibilidade, apresentam-se as Figuras 18 e 19 onde observa-se que a erodibilidade apresenta uma tendência de aumento a medida que a permeabilidade decresce, enquanto que a erodibilidade apresentou a tendência de aumentar junto com a expansibilidade.

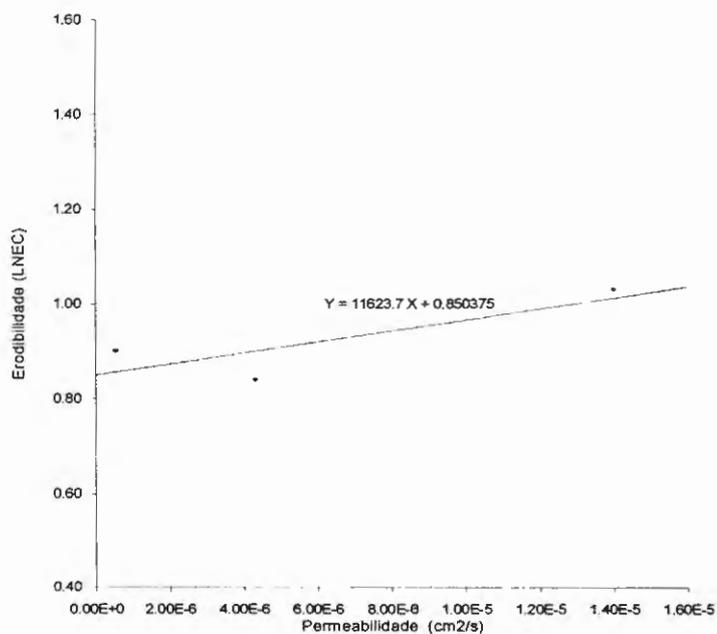


FIGURA 18 Influência da permeabilidade no cálculo do Índice de Erodibilidade

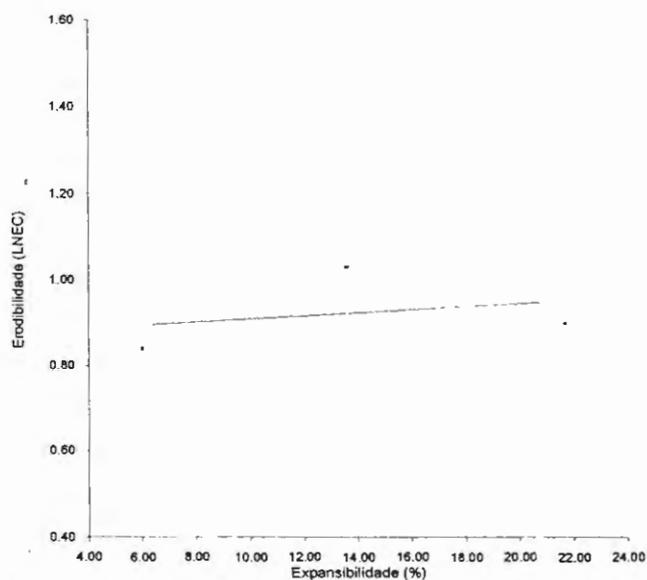


FIGURA 19 Influência da expansibilidade no cálculo do Índice de Erodibilidade.

4.1.1.5 Ensaios Especiais

4.1.1.5.1 Ensaio triaxial

Para determinação dos valores de resistência dos solos, foram executados ensaios triaxiais, com os quais foi possível determinar os valores de ângulo de atrito e coesão dos mesmos. Os resultados estão apresentados na Tabela 10.

TABELA 10 Resultados do ensaio triaxial

Solo	Ângulo de atrito	Coesão (kPa)
Amostra 1	38°	35
Amostra 2	31°	65
Amostra 3	28°	92

Os resultados dos ensaios forneceram valores bastante diferentes para os materiais estudados. O valor elevado de ângulo atrito da amostra 1 deve-se à presença de maior percentagem de material granular, o que eleva o valor do mesmo e diminui sua coesão conforme mostraram os resultados. Nos outros dois casos, tem-se valores de ângulos de atrito baixos, devido ao solo ser mais argilo-siltoso. Observa-se um aumento na coesão conforme esperado, porém este não foi muito elevado, fato que, quando confrontado com a literatura, confirma a facilidade de erosão dos solos devido à falta desta coesão, que seria a parcela que justamente se oporia ao fenômeno erosivo. No entanto, o estabelecimento de uma faixa de variação que enquadre os solos resistentes não foi possível.

Para visualizar o comportamento destes solos em função da coesão e do ângulo de atrito, plotou-se os gráficos apresentados nas Figuras 20 e 21. Nestas pode-se observar que o índice de erodibilidade diminuiu com o incremento do ângulo de atrito, isto faz sentido ao se pensar em termos de erodibilidade superficial.

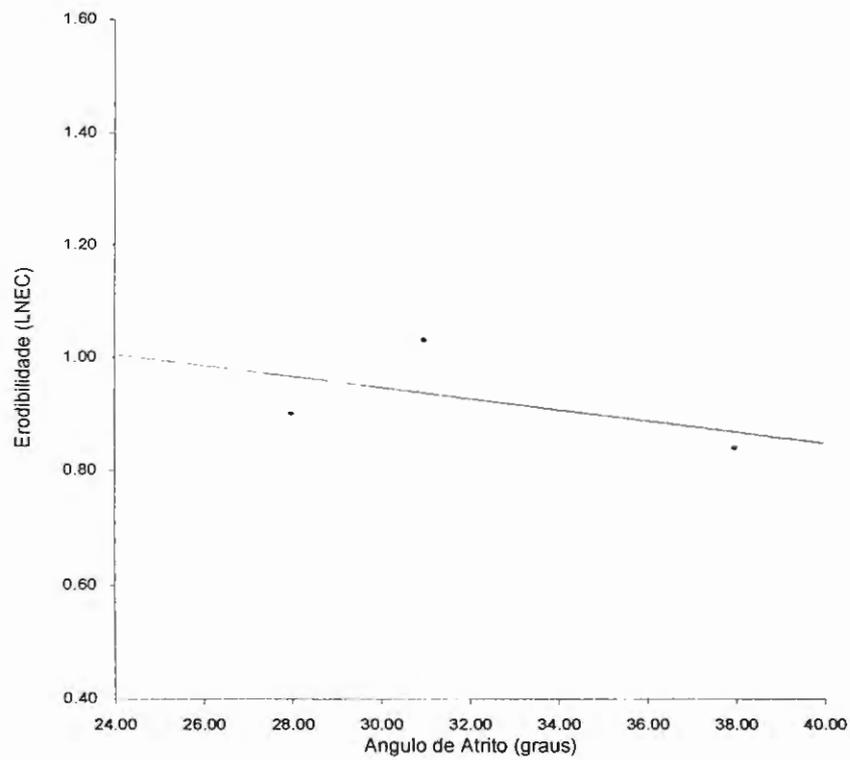


FIGURA 20 Influência do ângulo de atrito no cálculo do Índice de Erodibilidade.

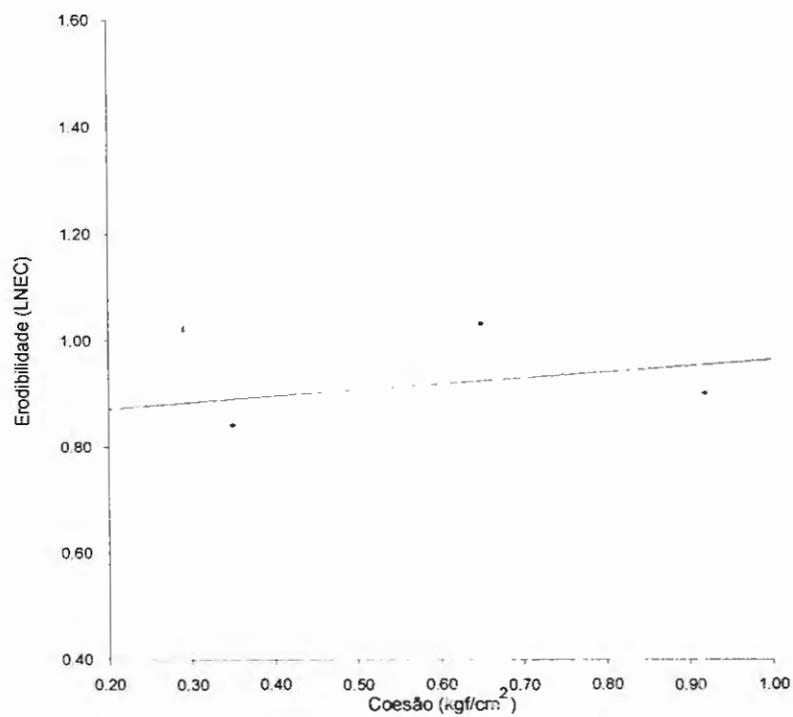


FIGURA 21 Influência da coesão no cálculo do Índice de Erodibilidade.

Conforme apresentado anteriormente, se os solos apresentam partículas maiores, há maior facilidade para a água infiltrar e menos erosão superficial ocorrerá.

Na Figura 21, observa-se que os valores do índice de erodibilidade em função da coesão, não apresentaram variação significativa, apenas um leve aumento do índice com o respectivo aumento da coesão, o que contraria as observações feitas até o presente de que um aumento de coesão contribuiria para um aumento da resistência dos solos à erosão.

4.1.5.2 Ensaio de Inderbitzen

Na Tabela 11 são apresentados os resultados de erodibilidade, vazão e velocidade de erosão, obtidos pelo método de Inderbitzen.

TABELA 11 Resultados do ensaio de erodibilidade (Inderbitzen) para os solos da região de Resende Costa, MG.

Amostra	Vazão (cm ³ /s)	Erodibilidade (g/cm ²)	Velocidade de Erosão(g/cm ² /h)
Amostra 1a	57	0,011	0,134
Amostra 2a	57	0,009	0,108
Amostra 1b	120	0,019	0,224
Amostra 2b	120	0,023	0,275
Amostra 1c	120	0,019	0,230
Amostra 2c	170	0,022	0,261

Na Tabela 11, temos os resultados dos ensaios de Inderbitzen, para as amostras 1 e 2, sendo que para a amostra 1 o solo é argilo-arenoso e para a amostra 2 o solo é areno-argiloso.

Para melhor visualização dos resultados plotou-se os gráficos das Figuras 22 a 24.

Nas Figuras de 22 a 24, observa-se que a amostra 2 apresentou maiores valores de erodibilidade no ensaio do que a amostra 1, e a erodibilidade em ambas as amostras apresentou tendência de aumento a medida do aumento da vazão e da velocidade de erosão.

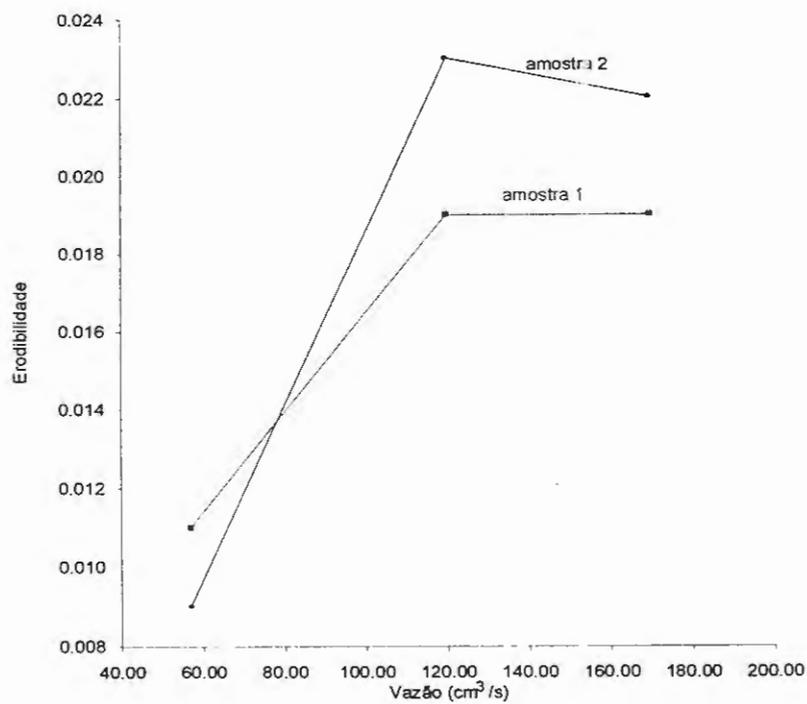


FIGURA 22 Erodibilidade x vazão superficial determinada no ensaio de Inderbitzem.

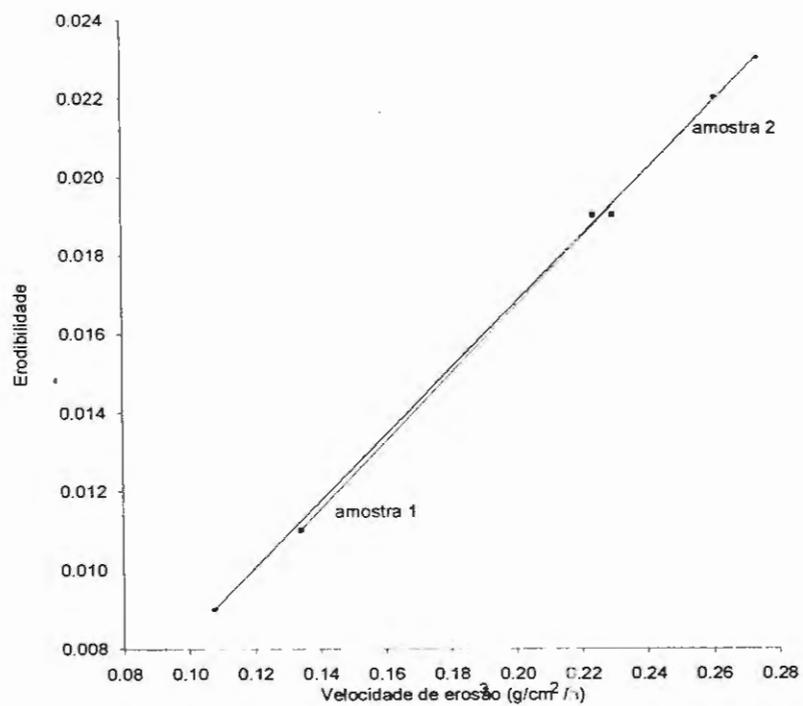


FIGURA 23 Erodibilidade x velocidade de erosão determinada no ensaio de Inderbitzem.

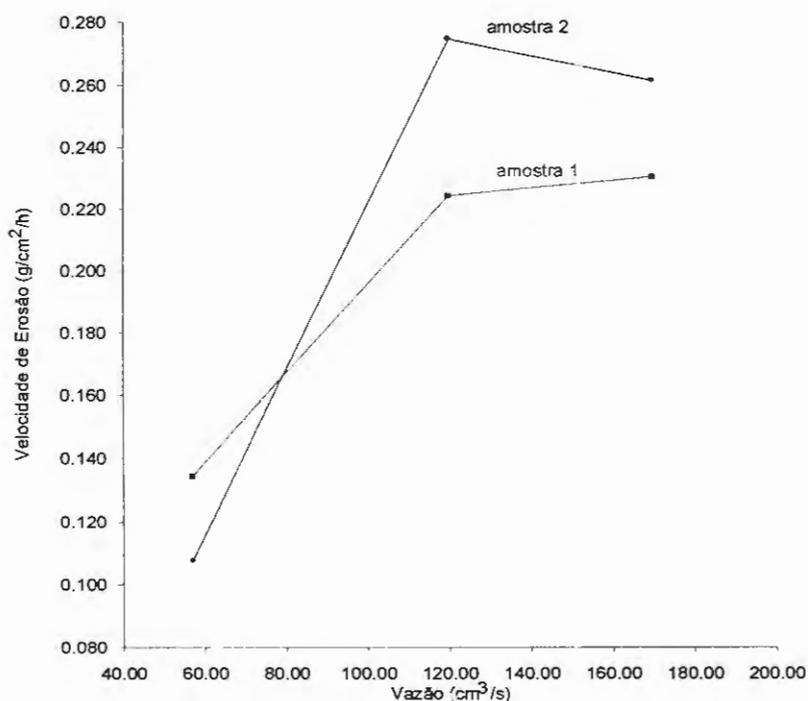


FIGURA 24 Velocidade de erosão x vazão superficial determinada no ensaio de Inderbitzem.

Na Figura 24, a velocidade de erosão apresentou uma tendência de aumento à medida que a vazão superficial aumentava, atingindo um máximo e depois decrescendo. Os valores de erodibilidade encontrados pelo ensaio de Inderbitzem, apresentam-se baixos, o que os classificaria como solos que apresentam resistência à erosão, estas observações convergem com as feitas por Lal (1981) citado por MOREIRA (1992), onde ele afirma que a erosão nos trópicos é muito mais uma consequência da extrema erosividade das chuvas do que da erodibilidade dos solos, tanto que, mesmo nos solos com baixas erodibilidades, os riscos à erosão são severos, conforme verificado na região. Com relação ao desenvolvimento das voçorocas os solos exercem um controle em microescala, através da estrutura e textura, opondo maior ou menor resistência à força de cisalhamento dos fluxos superficiais e consequentemente à iniciação dos sulcos que podem evoluir para voçorocas.

Segundo MOREIRA (1992), em áreas submetidas a chuvas torrenciais, associadas ou não ao uso predatório dos solos pelas atividades antrópicas, as características pedológicas podem retardar o processo, mas dificilmente podem detê-lo.

4.1.1.6 SIG na identificação das áreas susceptíveis à erosão na região de Resende Costa, MG.

O processo de digitalização começou após uma preparação inicial dos mapas. Esta constituiu-se basicamente da identificação, por meio de cores diferentes, dos diversos elementos a serem digitalizados, evitando-se desta forma, erros durante o processo de conversão digital dos dados. Assim sendo, no caso dos mapas altimétricos, cada curva de nível foi pintada com uma cor diferente. Este procedimento faz com que o percurso de digitalização fique claramente definido, permitindo um maior rendimento do trabalho executado.

Conforme recomendado por RAMALHO (1994), atribuíram-se cores idênticas para as mesmas características, em todas as pranchas, facilitando desta forma a identificação de características idênticas nas diferentes pranchas que compõe o mapa.

Após a digitalização dos mapas, procedeu-se à conversão dos vetores digitalizados para o formato Raster, permitindo desta forma que cada uma das diferentes características das diversas folhas dos mapas, possa ser visualizada na forma de imagem.

Um dos primeiros mapas a ser digitalizado foi o de solos, apresentado no formato vetor na Figura 25, e no formato Raster na Figura 26.

Nestes mapas podemos visualizar que no formato Vetor não existe nenhuma identificação dos polígonos que representam os diversos tipos de solos, já no formato Raster, podemos visualizar a imagem dos diferentes tipos de solos existentes na região identificados pelas diferentes cores no layer, bem como pela legenda que acompanha a figura.

Atráves dos comandos disponíveis no Idrisi, foi possível identificar as áreas para cada tipo de solo existente na região, esta informação esta disponibilizada na Tabela 12, bem como há um detalhamento dos solos apresentados no layer.

Nesta tabela pode-se observar que o tipo de solo Cd - B apresenta-se em maior quantidade seguido pelo Ca - A, e o que cobre uma menor área é o PVe - A.

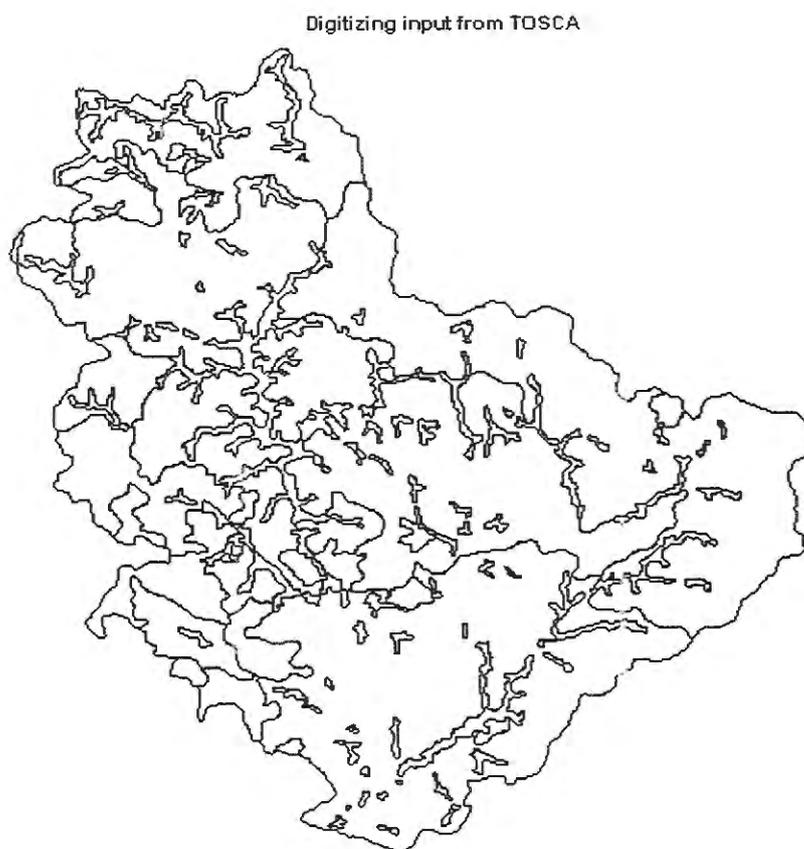


FIGURA 25 Carta de Solos no formato Vetor - Resende Costa, MG.

TABELA 12 Tipos de Solos na Região de Resende Costa, MG e áreas calculadas com o emprego do IDRISI.

Tipo de Solo	Área (km ²)	Porcentagem
PVe - A	5,45	1,06
PVe - B	12,04	2,34
PVe - C	16,87	3,28
PVe - D	98,94	19,25
Ca - A	117,63	22,88
Ca - B	6,06	1,18
Cd - A	35,43	6,89
Ca - B	163,49	31,81
Ca - C	8,09	1,57
Ad	50,01	9,74

A nomenclatura adotada para os solos existentes na região esta apresentada a seguir.

- PVe - A: Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico latossólico A moderado textura argilosa fase floresta tropical subperenifólia relevo ondulado e forte ondulado.
- PVe - B: Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico latossólico A moderado textura argilosa fase floresta tropical subperenifólia + Cambissolo Distrófico A fraco textura franco argilosa fase campo cerrado ambos relevo ondulado e forte ondulado.
- PVe - C: Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico latossólico A moderado textura argilosa fase floresta tropical subperenifólia + Cambissolo Distrófico A fraco textura franco argilosa fase campo cerrado ambos relevo forte ondulado.
- PVe - D: Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico latossólico A moderado textura argilosa + Cambissolo Eutrófico A moderado textura argilosa ambos fase floresta tropical subperenifólia relevo ondulado e forte ondulado.
- Ca - A: Cambissolo Álico A fraco textura franco argilosa fase campo relevo ondulado e forte ondulado.
- Ca - B: Cambissolo Álico A fraco textura franco argilosa + Solos Litólicos Álicos ambos fase campo relevo forte ondulado e montanhoso
- Cd - A: Cambissolo Distrófico A fraco textura franco argilosa fase campo cerrado relevo ondulado e forte ondulado.
- Cd - B: Cambissolo Distrófico A fraco textura franco argilosa fase campo cerrado + Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico A moderado textura argilosa fase floresta tropical subperenifólia ambos relevo ondulado e forte ondulado.
- Cd - C: Cambissolo Distrófico A fraco textura franco argilosa fase campo cerrado relevo ondulado + Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico A moderado textura argilosa fase floresta tropical subperenifólia relevo montanhoso.
- Ad : Solo Aluvial Distrófico A moderado textura indiscriminada fase floresta de várzea + Gley Pouco Húmico Distrófico A moderado textura indiscriminada faz campo higrófilo ambos relevo plano.

Para poder-se determinar através do SIG as áreas com susceptibilidade à erosão, foi necessário cartografar além dos tipos de solos, as diferentes feições

erosivas, as quais quando cruzadas com o layer de solos (Figura 26) forneceram as áreas mais afetadas pela erosão na região.

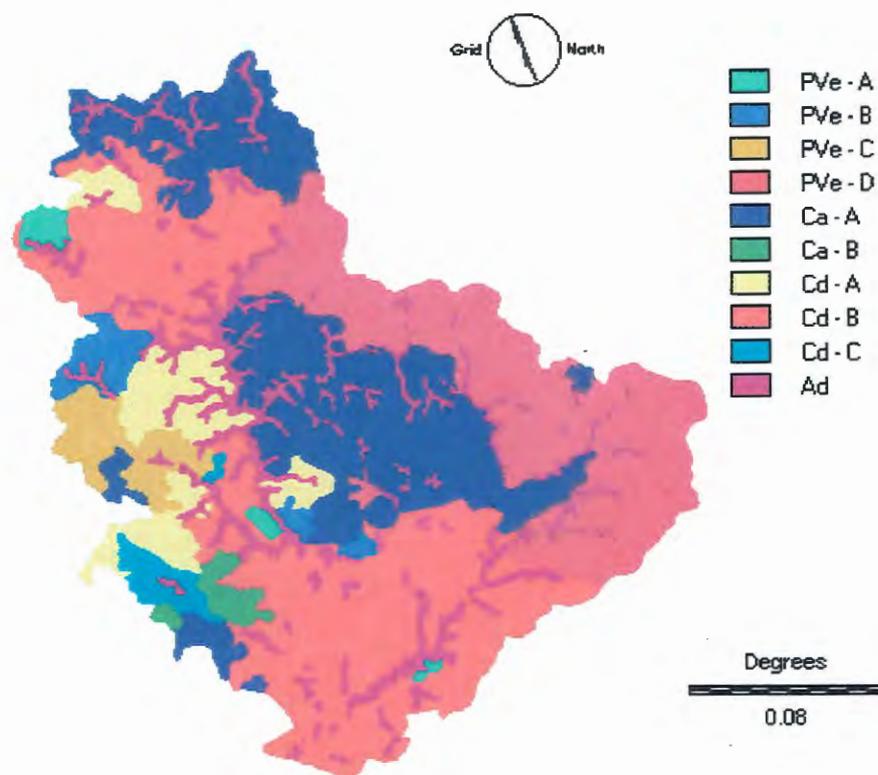


FIGURA 26 Layer da Carta de Solos - Resende Costa, MG.

Na Figura 27, apresentam-se as feições erosivas cartografadas na região, empregando-se este layer e com o auxílio do Idrisi, foi possível identificar a área abrangida por cada tipo erosivo encontrado, conforme mostrado na Tabela 13.

TABELA 13 Áreas em Km² ocupadas pelas diferentes feições erosivas cartografadas, calculadas com o uso do Idrisi.

Elemento	Área
Voçorocas ativas	0,919 km ²
Paleovoçorocas	0,881 km ²
Movimentos de Massa	8,653 km ²

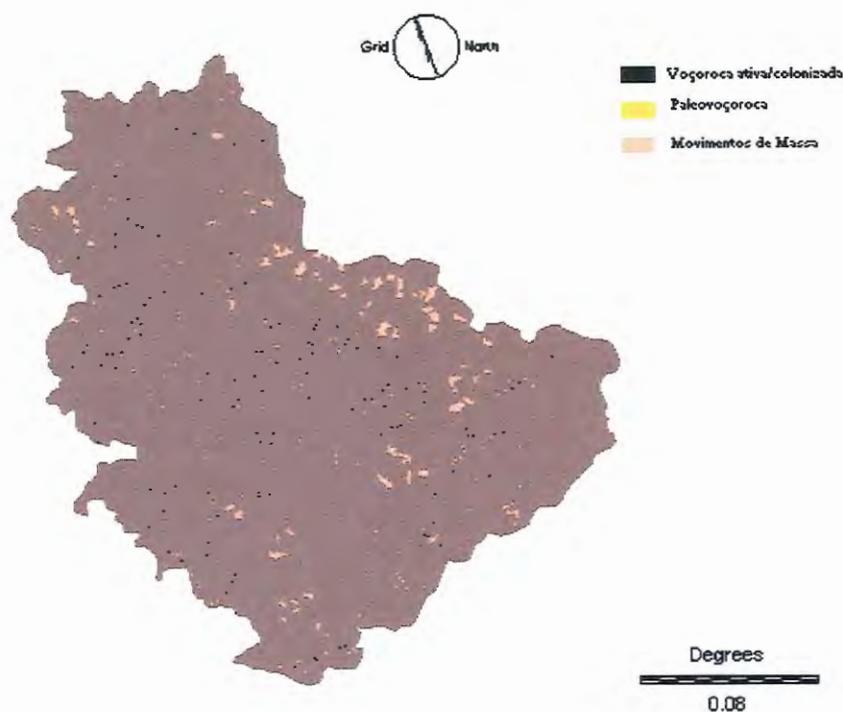


FIGURA 27 Feições erosivas existentes na região de Resende Costa, MG.

Da Tabela 13, podemos observar que os movimentos de massa predominam na região, e observamos uma grande distribuição por toda a região de voçorocas, tanto ativas quanto colonizadas, bem como as paleovoçorocas.

As voçorocas registradas na região perfazem um total de 364, sendo 32,20% voçorocas ativas (erosão superficial, subterrânea e movimentos de massa muito intensos não permitindo a instalação de vegetação), 43,68% mistas (comprende uma parte ativa e uma parte inativa com vegetação) e 23,63% voçorocas colonizadas (inteiramente revestidas pela vegetação), as quais podem vir a sofrer processo de ativamento devido a escorregamentos de massa ou à ocorrência de fluxo interno.

Durante o período de estudo, e durante as diferentes visitas realizadas à região constatou-se que a maioria das áreas são utilizadas para pastagem, apresentando pasto degradado, ou solo exposto, com grande número de trilhas, permitindo uma atuação mais eficiente do escoamento superficial e conseqüentemente a formação de

sulcos que podem evoluir até atingir o estágio de voçorocas, aumentando os números apresentados.

Para a análise da distribuição destas feições foi feito o cruzamento dos layers de solos e feições erosivas, obtendo-se a carta de distribuição de processos erosivos por tipo de solos apresentada na Figura 28.

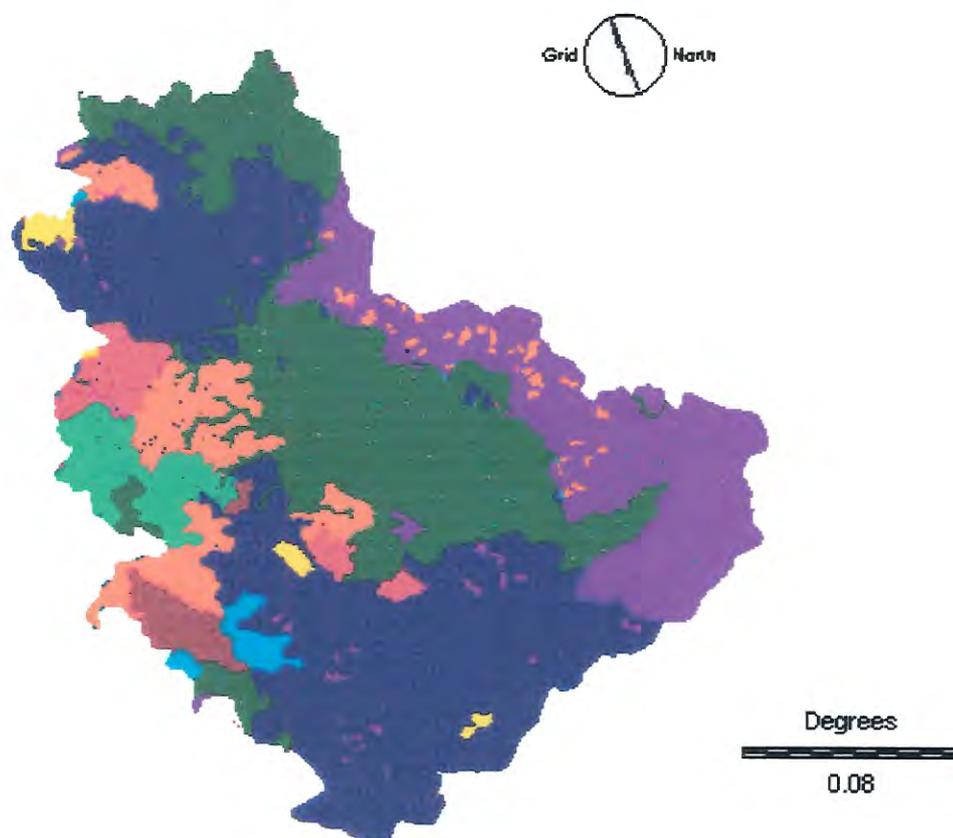


FIGURA 28 Distribuição dos tipos erosivos por tipo de solo na região de Resende Costa, MG.

Da Figura 28, observa-se que a maior incidência de movimentos de massa ocorreu no solo PVe - D, seguido do Cd - B, os quais para efeito de susceptibilidade receberam os maiores índices para o estudo, já no caso da distribuição das voçorocas ativas e paleovoçorocas, observa-se que os solos Ca - A e Cd - A, apresentam uma maior incidência deste tipo de processo erosivo.

A Hidrografia da região foi digitalizada e inserida no SIG, o layer representando a mesma esta mostrado na Figura 29.

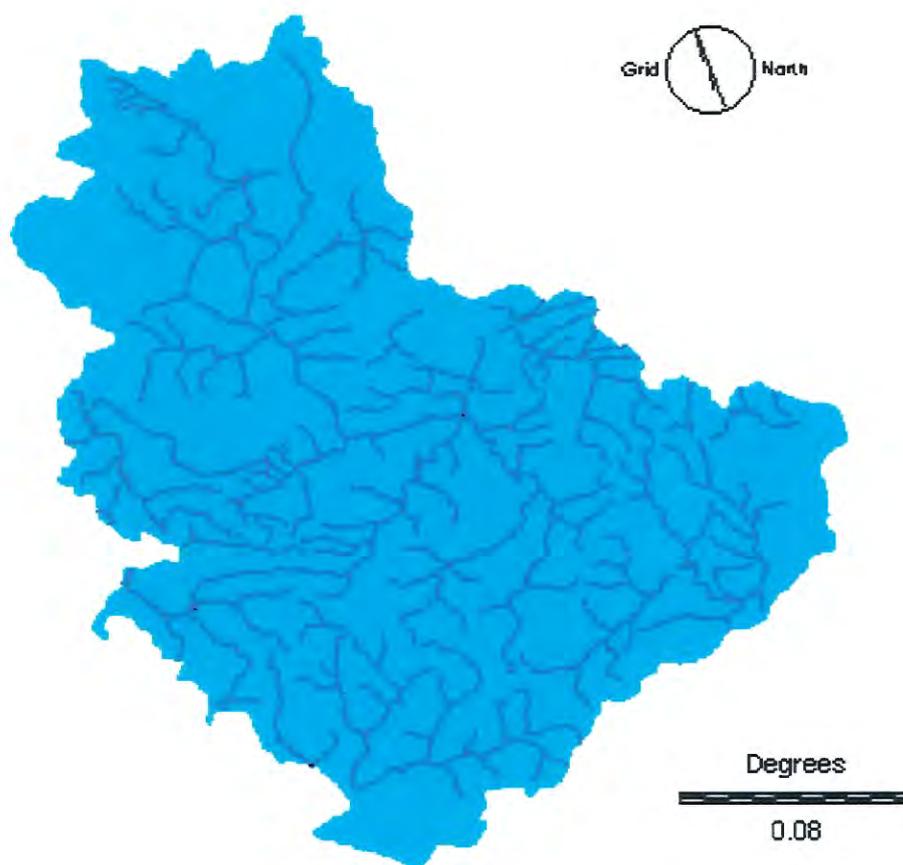


FIGURA 29 Layer de Hidrografia da Região de Resende Costa, MG.

Observando a hidrografia verifica-se inúmeros córregos que cortam a região e vários deles encontram-se assoreados, como consequência da erosão. Com o auxílio do SIG pode-se definir áreas de proteção próximas a estes córregos, principalmente, os localizados nos locais de risco.

Para a obtenção da carta de declividades, é necessária a conversão para a forma digital dos dados do mapa planialtimétrico, e em seguida utilizar-se o módulo surface.

De posse do mapa de declividades com todas as suas classes, foi preciso reclassificá-lo em classes de declividades cujos valores previamente indicam o risco ou susceptibilidade à erosão, conforme mostra a Figura 30.

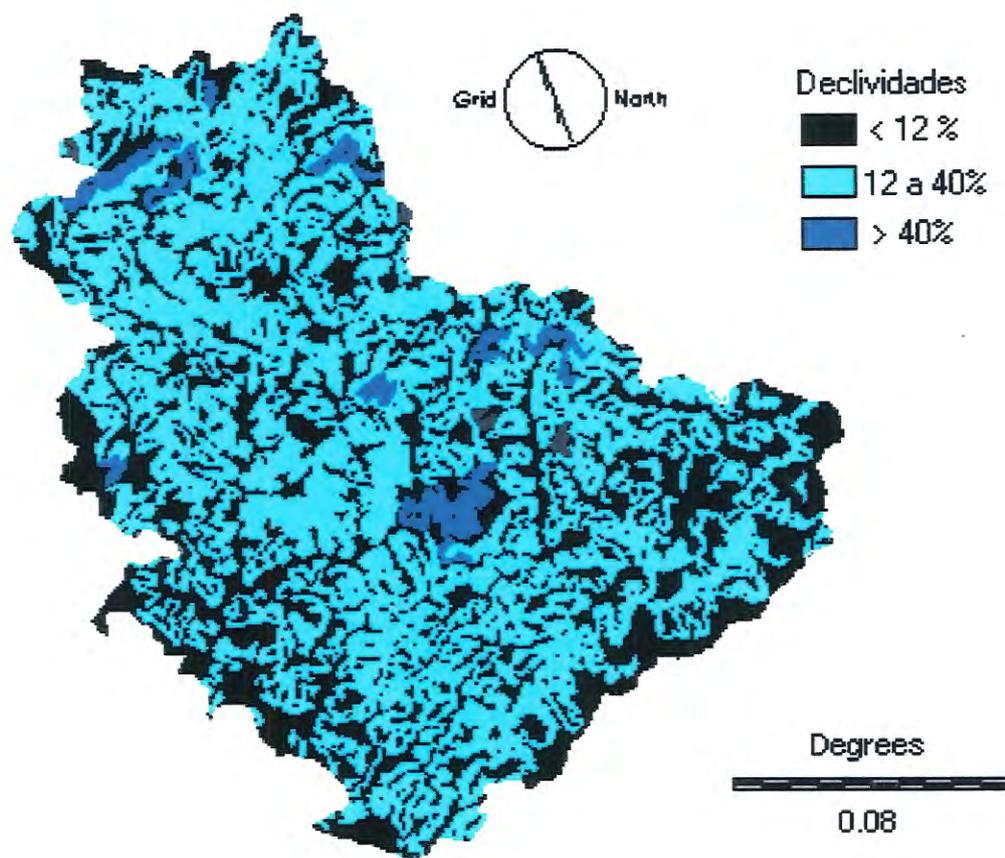


FIGURA 30 Carta de Declividades na região de Resende Costa, MG.

Na Figura 30, observa-se que as áreas com declividades superiores a 40% são menores, existindo no local uma percentagem maior de declividades referentes à classe entre 12 e 40%, na qual encontram-se a maioria das voçorocas existentes na região.

Em termos de distribuição espacial das voçorocas, verifica-se que 13,74% encontram-se em áreas com declividades de até 12%, enquanto que os 86,26% restantes encontram-se nas áreas com declividades entre 12 e 40%.

Em função da análise a ser abordada, as faixas de declividade a serem adotadas podem sofrer restrições mais acentuadas, no futuro com a incorporação de estudos posteriores, uma nova carta de declividades poderia ser gerada de forma a atender as mudanças temporais.

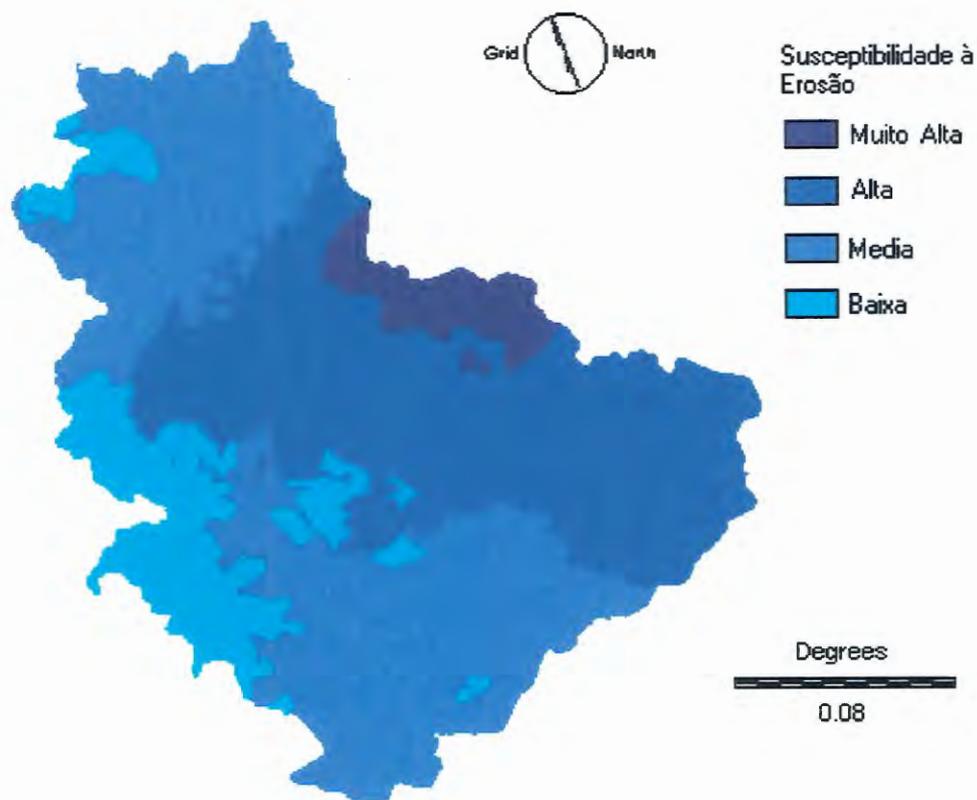


FIGURA 31 Carta de Susceptibilidade à erosão na região de Resende Costa, MG.

O objetivo era identificar as áreas com susceptibilidade a erosão, e para isto foi necessário o cruzamento de diferentes layers, dentre eles o de solos, feições erosivas, e carta de declividades, para obter no final o layer apresentado na Figura 31.

Nesta figura pode-se observar que os solos que apresentaram maior restrição, foi o Pve-D, o qual apresentou um alto índice de voçorocas e deslocamento de massas, logo em seguida aparecem os Cambissolos com alta susceptibilidade, com isto podemos recomendar, que as áreas com susceptibilidade muito alta e alta, recebam atenção quanto ao manejo, para desta forma evitar-se a progressão do fenômeno na região, pois conforme mencionado o uso destes solos para pastagem e muitas vezes com o solos sem proteção, são alvo fácil da ação erosiva das chuvas, deflagrando o processo.

4.2 Resultados das amostras de solo do Campus Experimental de Engenharia Agrícola da UNIOESTE – Cascavel/PR

4.2.1 Granulometria e massa específica dos sólidos

Na Tabela 14, são apresentados os resultados de densidade de partículas (γ_s) e da granulometria determinada para as duas áreas de estudo.

Os valores de densidade de partículas (γ_s) foram calculados para auxiliar na determinação da curva granulométrica (textura do solo) e dos índices físicos do solos. Normalmente os solos apresentam os valores de 26 - 27 kN/m³ para as areias e de 28 - 29 kN/m³ para as argilas (VARGAS, 1977). O solo estudado, foi classificado como de textura silto-argilosa, apresentando um valor de γ_s dentro das faixas estabelecidas. A diferença entre os solos da área de semeadura direta e convencional poderia ser explicada devido à presença de matéria orgânica, o que tende a reduzir o valor do γ_s .

TABELA 14 Resultados da determinação da Massa Específica dos Sólidos (γ_s), e da granulometria para as duas áreas estudadas no município de Cascavel/PR

Sistema de cultivo	γ_s (kN/m ³)	Granulometria		
		% areia	% silte	% argila
Semeadura Direta	29,9	9,00	50,00	41,00
Semeadura Convencional	27,7	8,00	48,00	44,00

Com os resultados da granulometria procedeu-se ao cálculo do índice de erodibilidade pelos métodos propostos por Bouyoucos, citado por BERTONI e LOMBARDI NETO (1985), e pelo método do LNEC, citado por FONSECA (1981), como já apresentados anteriormente. Estes resultados encontram-se nas Tabelas 15 e 16, respectivamente.

TABELA 15 Erodibilidade do solo obtida a partir da fórmula apresentada por Bouyoucos, citado por BERTONI e LOMBARDI NETO (1985) para as amostras do Campus Experimental – Cascavel/PR

Sistemas de Cultivo	%silte + areia	% argila	erodibilidade
Semeadura Direta	59	41	1,43
Semeadura Convencional	56	44	1,27

TABELA 16 Erodibilidade do solo obtida a partir da fórmula apresentada pelo LNEC citado por FONSECA (1981) para as amostras do Campus Experimental da UNIOESTE – Cascavel/PR

Sistema de cultivo	% finos	erodibilidade
Semeadura Direta	91	1,52
Semeadura Convencional	92	1,53

Observa-se, pelos valores apresentados nas Tabelas 15 e 16 que os índices de erodibilidade ficaram acima dos recomendados pelo LNEC, caracterizando solos que podem sofrer o processo de erosão. No entanto, os mesmos possuem alto teor de argila, o que lhes confere coesão para poder resistir à ação erosiva superficial inicial. Estes resultados ainda devem ser confrontados com os dados oriundos dos ensaios de consistência executados nas amostras.

4.2.2 Estados de consistência

Os resultados dos ensaios para determinação dos estados de consistência, Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP), das duas áreas do campus experimental da UNIOESTE, do município de Cascavel - PR são apresentados nas Tabelas 17, 18 e 19, nas quais pode-se observar que a maioria das amostras apresentaram valores de índice de plasticidade elevados, mas mesmo

assim, dentro dos valores aceitáveis para solos resistentes à erosão estabelecidos por Castro e Branco, citados por VILAR (1987).

TABELA 17 Resultados de limites de liquidez, para as duas áreas do Campus Experimental da UNIOESTE – Cascavel/PR

Sistema de cultivo	A	B	C	D	E	F	Médias
Sem. Direta	58,00	53,50	51,00	50,75	52,50	53,5	53,21
Sem. Convencional	52,25	52,25	49,25	51,25	51,25	51,75	51,33

TABELA 18 Resultados de limites de plasticidade, para as duas áreas do Campus Experimental da UNIOESTE – Cascavel/PR

Sistema de cultivo	A	B	C	D	E	F	Médias
Sem. Direta	46,50	42,50	40,50	35,50	36,50	41,50	41,17
Sem. Convencional	40,25	37,75	37,25	36,75	37,50	40,50	38,25

TABELA 19 Resultados de índices de plasticidade, para as duas áreas do Campus Experimental da UNIOESTE – Cascavel/PR

Sistemas de cultivo	A	B	C	D	E	F	Médias
Sem. Direta	11,50	11,00	10,50	15,25	16,00	12,00	12,70
Sem. Convencional	12,00	14,50	12,00	14,50	13,75	11,25	13,00

Em relação aos valores dos limites de liquidez (LL), pode-se observar que ficaram acima dos recomendados pelo LNEC, caracterizando solos com potencial erosivo, o que realmente se verifica com este tipo de solo na região. Os valores dos limites de plasticidade (LP) apresentaram-se elevados, ficando também acima dos recomendados por Castro e Branco, citados por VILAR (1987).

Estes resultados caracterizam na verdade uma certa facilidade destes solos sofrerem erosão, mesmo com o IP estando dentro da faixa de solos resistentes; na verdade estes solos quando saturados, são facilmente carregados devido ao fato de possuírem muitas partículas finas.

Como indicativo de susceptibilidade, acredita-se que a faixa de variação apresentada pode ser utilizada para identificar aqueles solos com potencialidade de sofrer erosão.

4.2.3 Índices físicos

Os dados de massa específica dos sólidos (γ_s), massa específica seca (γ_d), porosidade (n) e teor de umidade (w), obtidos das amostras de solo, do Campus Experimental da UNIOESTE, no município de Cascavel - PR; são apresentados na Tabela 20.

TABELA 20 Resultados dos ensaios de caracterização do Campus Experimental da UNIOESTE – Cascavel/PR, área de Semeadura Direta

Solo	γ_s kN/m ³	γ_d kN/m ³	n %	w %
Amostra A	29,9	12,9	56,86	22,75
Amostra B	29,9	12,8	57,19	24,23
Amostra C	29,9	12,5	58,19	20,52
Amostra D	29,9	13,6	54,51	17,43
Amostra E	29,9	13,8	53,84	18,93
Amostra F	29,9	11,9	60,20	24,16

TABELA 21 Resultados dos ensaios de caracterização do Campus Experimental da UNIOESTE – Cascavel/PR, área de Semeadura Convencional

Solo	γ_s kN/m ³	γ_d kN/m ³	n %	w %
Amostra A	27,7	13,7	50,54	24,74
Amostra B	27,7	12,8	53,79	23,75
Amostra C	27,7	13,0	53,07	26,02
Amostra D	27,7	13,1	52,71	23,34
Amostra E	27,7	13,7	50,54	23,76
Amostra F	27,7	12,6	54,51	26,20

Os resultados apresentados na Tabela 20 e 21, apresentam solos com porosidades relativamente altas, o que explica os problemas na área de construção

civil frequentemente encontrados na região, onde fundações superficiais muitas vezes apresentam problemas de recalque devido ao descalçamento de suas bases. Isto pode ser explicado pela porosidade e pela presença de partículas finas, como já evidenciado no item anterior, o que facilita a infiltração da água e arraste das partículas finas. Para efeito de erosão dos solos, este parâmetro pode ser um indicio de solos susceptíveis à erosão. A partir daí, pode-se propor então, a determinação da porosidade do solo para sua respectiva classificação.

Em relação aos valores de massa específica seca, pode-se observar que os valores apresentaram-se baixos, e este valor pode informar sobre o estado de compactação do solo. Pode-se verificar este grau de compactação rapidamente através de sua comparação com os resultados do ensaio de proctor normal, e se identificar as zonas que devem receber cuidados para se evitar a erosão.

Os resultados do ensaio de compactação forneceram para a região, $\gamma_{dm\acute{a}x} = 1,44 \text{ g/cm}^3$, no caso de semeadura convencional e $\gamma_{dm\acute{a}x} = 1,45 \text{ g/cm}^3$, no caso de semeadura direta. Com estes resultados e de posse dos valores da massa específica seca para cada parcela foi possível plotar o mapas de compactação, teor de úmidade e porosidades para a região de estudo apresentados nas Figuras 32 a 41.

O grande problema enfrentado nos estudos de solos, nas diferentes áreas, é a sua variabilidade espacial, com o surgimento dos SIG's diversos pesquisadores vem procurando estudar o comportamento dos solos e uma forma de representar cartograficamente o mesmo. Para estudar este efeito foram empregadas as duas áreas de plantio do campus experimental, uma convencional e outra com platino direto como mencionado até agora, de posse do mapa das áreas cultivadas, tentou-se confeccionar cartas da área com as diversas características geotécnicas para fins de manejo e conservação. As Figuras 32 a 41 apresentam os mapas confeccionados.

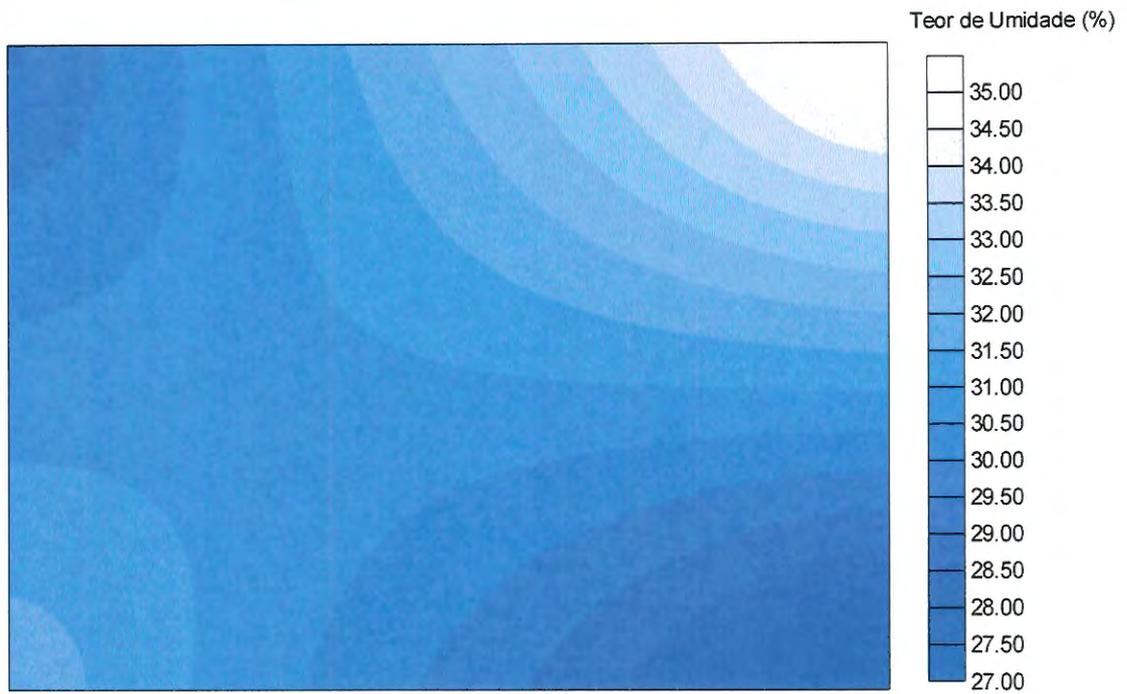


FIGURA 32 Distribuição do teor de umidade na área de semeadura direta

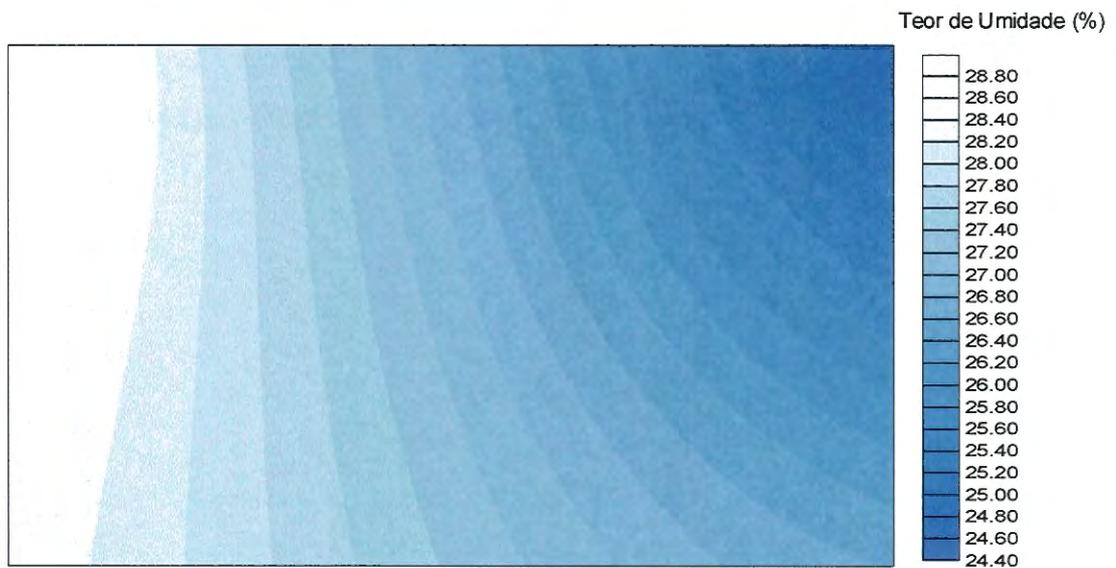


FIGURA 33 Distribuição do teor de umidade na área de semeadura convencional



FIGURA 34 Distribuição da macroporosidade na área de semeadura direta

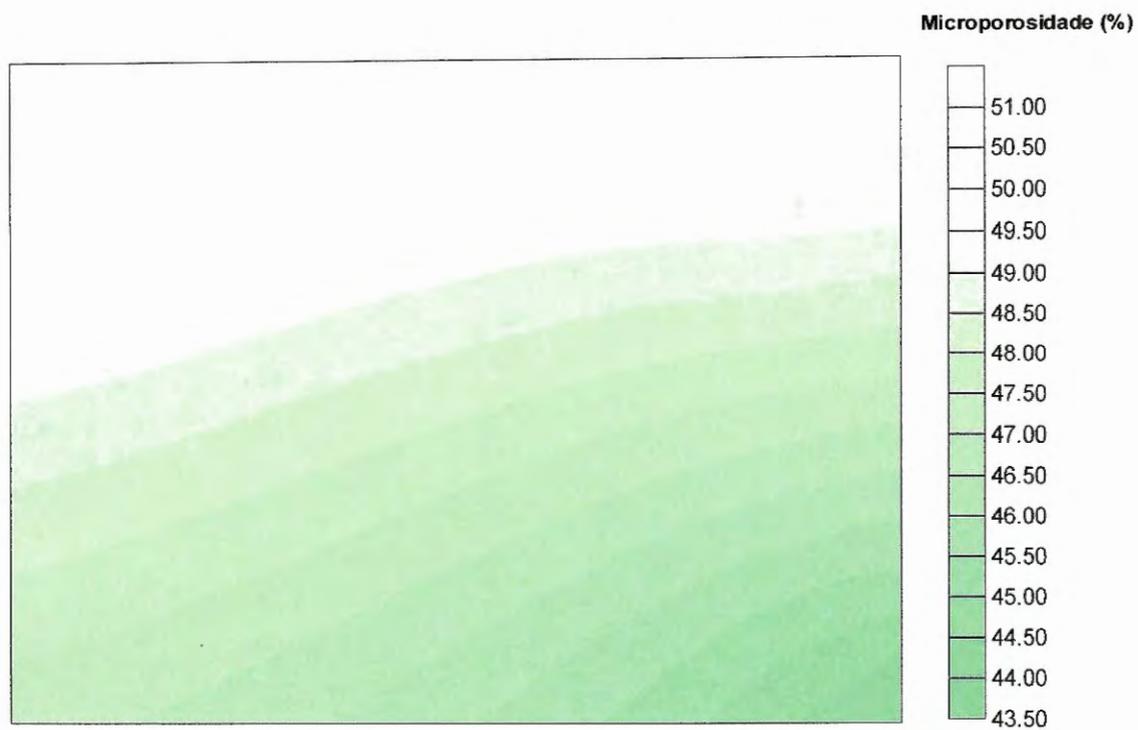


FIGURA 35 Distribuição da microporosidade na área de semeadura direta

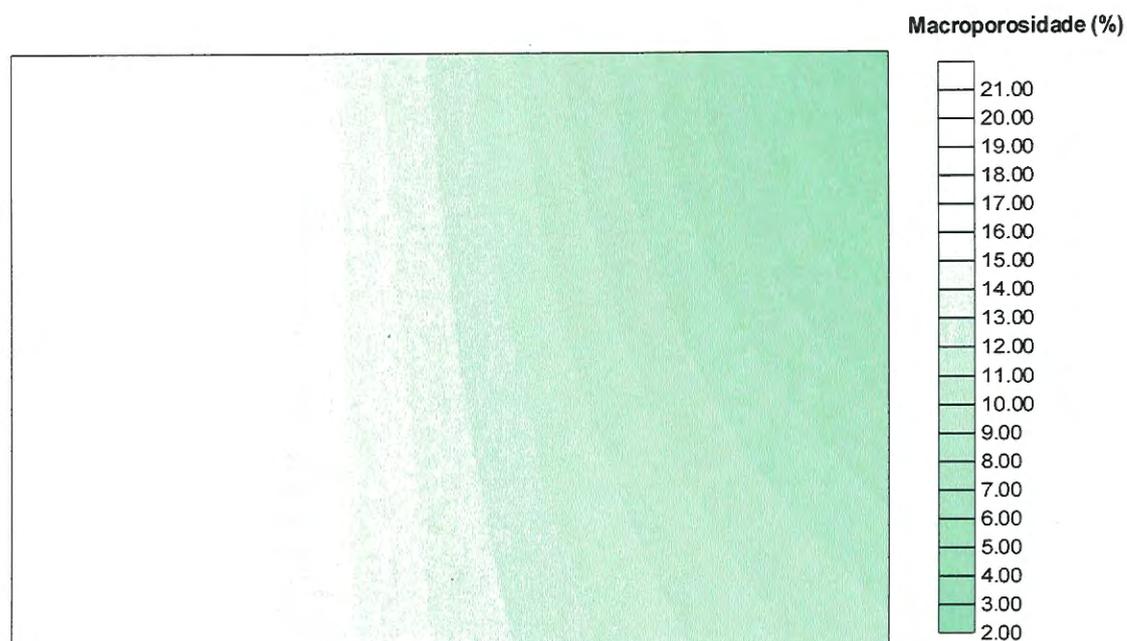


FIGURA 36 Distribuição da macroporosidade na área de semeadura convencional

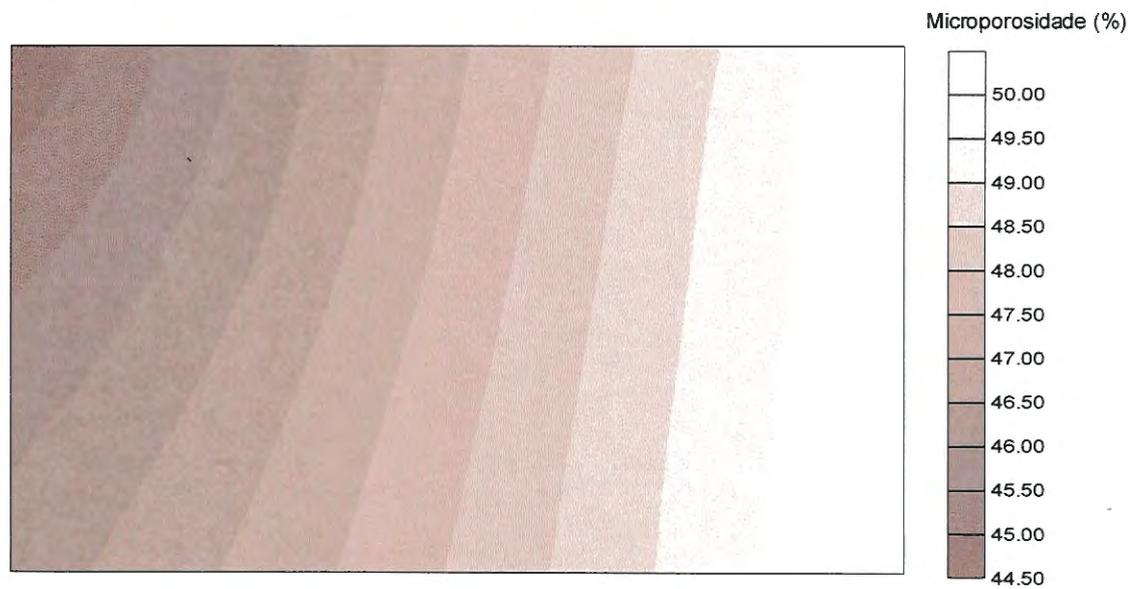


FIGURA 37 Distribuição da microporosidade na área de semeadura convencional



FIGURA 38 Distribuição do Grau de Compactação na área de semeadura direta

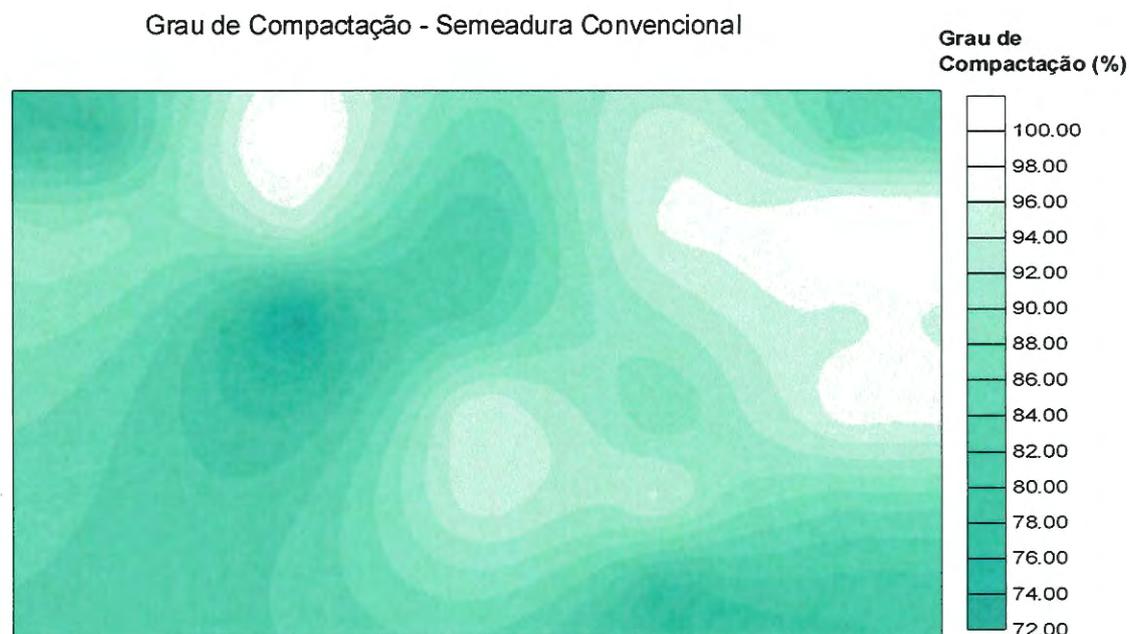


FIGURA 39 Distribuição do Grau de Compactação na área de semeadura convencional



FIGURA 40 Faixa de variação do Grau de Compactação na área de semeadura direta.



FIGURA 41 Faixa de variação do Grau de Compactação na área de semeadura convencional.

Para a confecção destas cartas, as áreas foram subdivididas em 48 parcelas, sendo 24 para cada tipo de semeadura, onde procedeu-se à determinação dos índices físicos em laboratório, realização do ensaio de compactação para definição da massa específica seca máxima e do teor de umidade ótimo.

O teor de água do solo é um fator determinante no processo de compactação, sendo assim, assume grande importância, principalmente para aspectos relacionados ao manejo. As Figuras 32 e 33 apresentam o layer de teor de umidade para as áreas de semeadura direta e convencional, neles observa-se a distribuição da umidade no solo, ao trabalhar-se teria-se o indicativo da necessidade de gradeamento da área por exemplo, para permitir que o solo fique num teor de umidade no qual o solo não sofra excessiva compactação, é bem sabido que do ponto de vista da engenharia civil, o interessante seria trabalhar na umidade ótima, porém ao trabalharmos esse solo com finalidade agrícola neste teor de umidade, o mesmo sofreria compactação elevada, de forma a prejudicar o desenvolvimento radicular das plantas assim sendo estipulou-se um grau de compactação de 80% como sendo o que ainda permite o trabalho na área sem afetar o desenvolvimento das plantas, com isto pode-se definir o teor de umidade de trabalho para as áreas em questão.

Os valores de teor de umidade que poderiam ser recomendados para as áreas estudadas, seria de 35% na área de semeadura direta e 27% na área de semeadura convencional.

Para iniciar no sistema de semeadura direta é preciso que a gleba não apresente problemas de compactação e superfície muito sulcada pela erosão. No caso de compactação, comum nos solos cultivados pelo sistema convencional, com muita movimentação de maquinaria, é preciso proceder antes à escarificação (até 30 cm), ou subsolagem (além de 30 cm de profundidade). Desta forma os layers de teor de umidade aliados aos mapas de massa específica dos sólidos e massa específica natural, permitem a obtenção das cartas de distribuição da compactação do solo (Figuras 38 e 39), que quando reclassificadas, e cruzadas com as cartas de porosidade (Figuras 34 a 37) por exemplo, permitem a obtenção de cartas de susceptibilidade, conforme as apresentadas nas Figuras 40 e 41.

Nestas Figuras, optou-se por apresentar as faixas de variação do grau de compactação, permitindo que locais que se apresentassem com valores muito elevados (acima de 90%) por exemplo, sofressem o tratamento adequado. Isto permite que as áreas mais compactas e, por tanto, mais sujeitas à ação erosiva das chuvas sejam manejadas de forma adequada para a redução ou minimização do problema.

Os estudos empregando os sistemas de informações geográficas em áreas de cultivo, vem ganhando muitos adeptos, e é a denominada agricultura de precisão, que como mostrado pelos resultados apresentados, pode muito bem ser empregada para diferentes finalidades.

5 CONCLUSÕES

Pelos resultados apresentados pode-se concluir:

A erodibilidade dos solos como já sabido influi na sua susceptibilidade à erosão, porém os métodos geotécnicos desenvolvidos até o presente, inclusive o ensaio de Inderbitzen, não conseguem determinar este parâmetro de forma simples e eficaz. As suas correlações com índices propostos pelos mais diferentes autores, trazem valores que sofrem grande variação, e ainda é preciso que os estudos sejam realizados por períodos de tempos bem mais longos e sobre inumeros tipos de solos de forma que os métodos possam ser recomendados para esse fim.

Dentre as correlações apresentadas, aquelas que utilizam os dados oriundos dos ensaios de granulometria, mostraram-se como sendo os que melhor representam a erodibilidade dos solos, sendo um primeiro índice a ser determinado, informações sobre o argilo mineral e água intersticial, podem informarnos mais e melhor sobre o aspecto erodibilidade.

A ação erosiva das chuvas, apresenta-se como fator importantíssimo na erosão do solo, e mesmo aqueles solos que se apresentam como sendo pouco erodíveis, que é o caso de Resende Costa, sofrem este fenômeno devido a intensidade das chuvas no país; o fato fica ainda mais grave quando observamos que rocha e solos de alteração estão próximos, facilitando a ação erosão interna.

Na região de Resende Costa, o problema fica ainda mais agravado com o uso indiscriminado do solo, o qual é feito sem os cuidados necessários com o manejo e conservação, a orientação neste sentido seria a de não permitir que fiquem os solos expostos, mantendo sempre uma cobertura vegetal de forma a proteger os mesmos

O Sistema de Informações Geográficas, mostrou-se ferramenta muito útil na identificação de áreas com problemas, conforme mostrado, e o mesmo será de grande utilidade para uso no estudo da variabilidade espacial das características dos solos.

O solo da área do Campus experimental da UNIOESTE, do Campus de Cascavel, foi classificado como silto-argiloso e apresentou densidade de partículas maior na área de semeadura direta. O teor de água máximo em que o solo deve ser trabalhado para que não provoque compactação é de 35% na área de semeadura direta e 27% na área de semeadura convencional; estes dados são importantíssimos para o manejo a ser adotado durante as fases subseqüentes de plantio e colheita.

Os mapas da área da UNIOESTE, forneceram subsídios para o manejo do solo, e com os mesmos pôde-se plotar cartas de todos os índices físicos dos solos, para identificação do estado dos mesmos.

A ferramenta SIG, aliada ao uso de estudos geotécnicos quando realizados sobre áreas de cultivo podem perfeitamente ser utilizadas e levar a uma produtividade e economia, que deve ser incentivada e aperfeiçoada. A isto denomina-se atualmente de agricultura de precisão, sendo que a mesma vem sendo alvo de inúmeras pesquisas, conforme mostrado no último GIS Brasil.

6 SUGESTÕES

Os estudos de erosão sempre são conduzidos em experimentos que demandam um tempo muito longo, como o caso da erosividade das chuvas, nos quais precisa-se dados de no mínimo 20 anos. Assim sendo qualquer estudo de erosão dos solos, deve ter uma continuidade. Recomendasse para isso o estudo do fenômeno por um período maior, para que se possa acompanhar inclusive os resultados advindos da implantação das atividades tomadas com base nas cartas oriundas do SIG.

Ensaio de caracterização geotécnica e de Inderbitzen, em diferentes solos do estado e país poderiam ser realizados para verificar a possibilidade de emprego destes para qualquer tipo de solo. Ainda poderia-se a partir destes dados criar uma carta de erodibilidade para o estado de Minas Gerais, Paraná e todo o Brasil.

O estudo do impacto da erosão na produção agrícola é dificultado devido à complexidade da resposta dos cultivares ao fenômeno. A erosão influencia no solo alterando suas propriedades físicas, químicas e biológicas as quais controlam a produtividade do mesmo, e estas mudanças dependem da vulnerabilidade do solo.

Estudos neste sentido devem ser realizados levando em consideração a distribuição espacial e empregando metodologias avançadas como os Sistemas de Informações Geográficas.

Os estudos em agricultura de precisão podem e devem incluir ensaios de caracterização geotécnica. Para este caso, a UNIOESTE deverá implementar os mesmos no projeto aprovado pelo Plano Sul de Pós Graduação e Pesquisa, que deverá ter início no presente ano, incluindo no mesmo o estudo de produtividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGENA, S.S.; RIDENTE JR, J.L.; NOVAES, M.C.J Parametrização físico-hídrica de Podzólico Vermelho-Amarelo da região de São José do Rio Preto, SP, para subsidiar o controle das erosões. SIMPÓSIO NACIONAL DE EROSÃO, VI, Presidente Prudente - SP- 5p. 1998. Cd Rom...
- ALBUQUERQUE et al. Características físicas das chuvas, correlacionadas com perdas de solo num regossolo eutrófico de Caruaru (PE). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Campinas. v.18, p. 279-283. 1994.
- ALONSO, C.V., NEIBLING, W.H., FOSTER, G.R. **Estimating sediment transport capacity in watershed modeling**. Trans, ASAE. 1981. Vol 24. P.1211-1226
- AMARAL, C.; BARROS, W.; ORSI, R.; AMARAL, F. SIG Alternativo aplicado ao gerenciamento de áreas de risco geológico no Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA E ENGENHARIA, *Anais...* v.2. Poços de Caldas, MG. 1993. p.55-62.
- BASTOS, C.A.B.; MILITITSKY, J.; DAVISON DIAS, R. Avaliação geotécnica da erodibilidade de solos residuais da região metropolitana de Porto Alegre. SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, VI. 6p, 1998. Cd Rom...
- BENDER, H. Erosion: Un Probleme de Resistence au Cisaillement en Fonction du Chemin des Contraintes Pendant L'infiltration, **Proc. First Int. Conf. Geomech. In Tropical Lateritic and Saprolitic Soils**, Vol. 2, p. 15 - 28. Brasilia. 1985
- BERTOL, I. Índice de erosividade (EI₃₀) para Lajes (SC). 1ª aproximação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, v.28, n.4, p.515-521. 1993.
- BERTOL, I. Avaliação da erosividade da chuva na localidade de Campos Novos (SC), no período de 1981 a 1990. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília. v. 29, p.1453-1458. 1994.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Livroceres, Piracicaba. 1985. 392p.

- BERTONI E LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. Ícone, São Paulo, 1990. 355p.
- BIGARELLA, J.J.; MAZUCHOWSKI, J.Z. Visão integrada da problemática da erosão. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DA EROSÃO, 3, ABGE, Maringá, PR, Brasil, 1985. **Anais...** 332p.
- BISHOP, A.W., HENKEL, D.J. **The measurement of soil properties in the triaxial test**. Edward Arnold, London. 1962
- BRAGAGNOLO, N. Uso de solos altamente susceptíveis à erosão. In: PEREIRA, V. de P.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. da (ed.) **Solos altamente susceptíveis à erosão**. UNESP – FCAV/SBCS, Jaboticabal. 1994. p.03-16.
- BRAUN, W.A.G. Contribuição ao estudo da erosão no Brasil e seu controle. **Rev. Brasileira de Geografia**. Rio de Janeiro. n.65, v.4, p.341-345, 1961.
- BURROUGH, P.A.; VAN GAANS, P.F.M.; HOOTSMANS, R. Continuous classification in soil survey: spatial correlation, confusion and boundaries. **Geoderma**, v. 77, p.115-135, 1997.
- CALIJURI, M.L. Sistemas de informações geográficas. v.2.. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. **Apostila...** 1994.
- CALIJURI, M.L.; RÖHM, S.A. Sistemas de informações geográficas. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. **Apostila...** 1994. 34p.
- CARVALHO, E.T. O mecanismo das voçorocas. In: SIMPÓSIO SITUAÇÃO AMBIENTAL E QUALIDADE DE VIDA NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE E MINAS GERAIS, II. **Anais..**, ABGE, 1992. p.71-73.
- CARVALHO, J.C; FÁCCIO, J.A. Estudo da erodibilidade de solos do Distrito Federal. COBRAMSEF, X. Foz do Iguaçu, **Anais...** v. 4, p 1245-1252. 1994.
- CARVALHO, M.P. **Erosividade da chuva: distribuição e correlação com as perdas de solo de Mococa - SP**. Piracicaba: USP, 104p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) ESALQ-USP, 1987.
- CARVALHO, M.P. **Fator erosividade da chuva-enxurrada para chuvas individuais do Estado de São Paulo**. Botucatu: UNESP, 96p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) FCA, UNESP, 1992.

- CARVALHO, M.P. et al. Índices de erosividade da chuva correlacionados com as perdas de um podzólico vermelho-amarelo eutrófico textura argilosa/muito argilosa de Mococa (SP): primeira aproximação do fator erodibilidade do solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Campinas, v.13, n.2, p.237-242, 1989a.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 143p.
- CENDRERO, A. Desarrollo y tendencias de la geología ambiental en Europa. In: SEMINARIO ANDINO DE GEOLOGIA AMBIENTAL, I. CONFERENCIA COLOMBIANA DE GEOLOGIA AMBIENTAL, I. Medellín, Memoria. AGID **Report n. 13**. p.65-88. 1990.
- CERRI, L.E.S. Carta geotécnica: contribuições para uma concepção voltada às necessidades brasileiras. In: CBGE/ IX COBREA, VI, Salvador, **Anais...** p.309-318. 1990.
- CETEC. **Caracterização ambiental da bacia do Rio das Mortes, MG**. Belo Horizonte, MG, Brasil. 1989.
- CHAVES, H. M. L. Método Estocástico para a estimativa da erosão em sulcos e voçorocas. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Campinas, v.18, p.235-294, 1995
- DANGLER, E.W., EL-SWAIFY, S.A , AHUJA, L.R., BARNETT, A.P **Erodibility of selected Hawaii soils by rainfall simulation**. ARS-w-35, USDA-ARS, Washington, 113p. 1976
- DENARDIN, J.E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. ESALQ - USP. Piracicaba. 1990. 81p. (Tese de Doutorado)
- ELETROBRÁS/IPH. **Diagnóstico das condições sedimentológicas dos principais rios brasileiros**. Rio de Janeiro. 1991.
- FARIAS, C.A. **Dinâmica da revegetação natural de voçorocas na região de Cachoeira do Campo, MG**. Universidade Federal de Viçosa, 1992. 63p. (Tese M.Sc.).
- FONSECA, A.M.M.C.C; FERREIRA, C.S.M. Metodologia para determinação de um índice de erodibilidade de solos. SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, Rio de Janeiro, **Anais...** p. 646-667. 1981.
- FOSTER, G.R., MEYER, L.D. A closed form soil erosion equation for upland areas. In **SHEN, H.W. (ed.): Sedimentation**, Fort Collins, 1972. p.12.1 - 12.9

- FREIRE, O.; PESSOTI, J.E.. Erodibilidade dos solos do Estado de São Paulo. **Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, v. XXXI, p.333 - 350. 1974.
- LO, A , EL-SWAIFY, S.A., DANGLER, E.W., SHINSHIRO, L. Effectiveness of EI30 as na erodibility index in Hawaii, in **Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do Solo**, 3, Recife. 1980
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo: Bacia do Peixe -Parapanema. São Paulo: 1986. 6v. (IPT. Relatório 24 739).
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Ocupação de encostas**. São Paulo, 1991. 216p.
- IWASA, O. J. Diagnóstico da origem e evolução de boçorocas: condição fundamental para prevenção e correção. In: Simpósio sobre controle de Erosão, 1980. Curitiba. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1980. V,2 p 5 - 34.
- LANE, L.J., NEARING, M.A. Eds. USDA - **Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile Model Documentation**. West Lafayette, 1989. 300p.
- LEINZ; V.; AMARAL, S.E. do **Geologia geral**. 11ed. Cia. Editora Nacional, São Paulo. 1989. 399p.
- LOMBARDI NETO, F. **Rainfall erosivity - its distribution and relationship wit soil loss as Campinas, Brasil**. West Lafayette, 1977. 53p.
- MAHMOOD, K. Reservoir sedimentation - Impact, extent, and mitigation. World Bank Technical, Washington. **Paper n. 71**, 1987.
- MEDINA, J. Físico-química das argilas e estabilização de solos, **Notas de aula mimeografadas**, Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. 1979
- MEYER, L.D., WISCHMEIER, W.H. **Mathematical simulation of the process of soil erosion by water**. Trans. ASAE, 12. (6) 1969. p.754-758.
- MEYER,G.J., SCHOENEGBERGER, P.J., HUDDLESTON, J.H. **Sediment yields from roadsides: an aplication of the universal soil loss equation**. J. Soil and water Cons. 30. 1975. p. 289-291.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, **Manejo e conservação do solo e da água: informações técnicas**. Brasília, Secretaria Nacional de Produção Agropecuária, Secretaria de Recursos Naturais, Coordenadoria de Conservação do Solo e Água, 1983. 66p.

- MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behavior**. New York, Wiley, 1976. 422 p.
- MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behavior**. 2 ed. New York, Wiley. 1993
- MOLIN, J.P. Agricultura de Precisão. Parte I: O que é e estado da arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola**. V.17. Nº 2. Jaboticabal. SBEA, 1997a. p.97-107
- MOLIN, J.P. Agricultura de Precisão. Parte II: Diagnóstico, Aplicação localizada e considerações econômicas. **Engenharia Agrícola, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola**. V.17. Nº 2. Jaboticabal. SBEA, 1997b. p.108-121
- MOREIRA, C.V.R. **Fatores condicionantes das voçorocas na sub-bacia do Rio Santo Antônio, bacia do Rio Grande, MG**. UFMG, Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado). 1992. 162p.
- MORGAN, R.P.C. Implications. In: KIRKBY, M.J., MORGAN, R.P.C. eds. **Soil Erosion**. New York. John Wiley, 1980. P. 252-301.
- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo**. São Paulo: Ed. Villibor. p. 172-183. 1995.
- NOLLA, D. **Erosão do solo: o grande desafio**. Secretaria da Agricultura, Porto Alegre. 1982.
- OLIVEIRA, A.M. do S. **Depósitos tecnogênicos e assoreamento de reservatórios: exemplo do reservatório de Capivara, Rio Paranapanema, SP/PR**. São Paulo. 1994. 2v. (Tese de doutorado apresentada ao Departamento de Geografia / FFLCH/USP).
- ONSTAD, C.A.; FOSTER, G.R. **Erosion modeling on a watershed**. Trans. ASE. Soc.Agric. Engrs. 18. 1975. P. 288-292
- PARZANESE, G.A.C. **Gênese e desenvolvimento de voçorocas em solos originados de rochas granitóides na região de Cachoeira do Campo, Minas Gerais**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. Brasil. 1991. 117p. (Tese M.Sc.).
- PEJON, O. J. **Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba-SP, escala 1:100000**: estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos (Tese de Doutorado), 1992. 2v., 224p, São Carlos/SP.
- PETERSEN, G.W., BELL, J.C., MCSWEENEY, K., NIELSEN, A.G., ROBERT, P.C. Geographic informations systems in agronomy. **Advances in Aagronomy**, v.55, p. 67-111, 1995.
- PICHLER, E. Boçorocas. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**. São Paulo. v.2, n.1. p.3-16, 1953.

- PONÇANO, W.L., E PRANDINI, F.L. Boçorocas no Estado de São Paulo: uma revisão. In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 4, Marília, 1987. Anais..., Marília, ABGE. 1987. P.149 - 177.
- PRANDINI, F.L. Ocurrence of voçorocas in southern Brazil. geological conditioning of enviromental degradation. In: International Congress of IAEG. **Proceedings...** São Paulo, SP. Brasil, 1974. v.1. p.III36.1 - III36.10.
- PRANDINI, F.L.; IWASA, O Y. Diagnóstico da origem e evolução de boçorocas: condição fundamental para prevenção e correção. In: Simpósio sobre controle de Erosão, 1980 Curitiba. **Anais...**, São Paulo, ABGE, 1980 V.2. p.5 - 34.
- PRUSKI, F.F.; CALIJURI, M.L.; BHERING, E.M.; SILVA, J.M.A. Obtenção de equações de chuvas intensas em qualquer localidade do Estado de Minas Gerais utilizando sistemas de informações geográficas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, XXV. **Anais...**, p.1988-1990. 1995.
- RAMALHO, G.G.C. **Mapeamento geotécnico de Viçosa com uso de sistemas de informações geográficas.** Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 1994 (Tese M.Sc.).
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** Campinas, Fundação Cargill. 1985. 445p.
- RENARD, K.G., FOSTER, G.R., WEESIES, G.A E MKCOOL, D.K. **Predicting soil erosion by water - a guide to conserntion planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE).** Washington: USDA-ARA, 1991.
- RODRIGUES, J. E. **Estudo de Fenômenos Erosivos Acelerados: Boçorocas.** Escola de engenharia de São Carlos. USP. São Carlos. 1982. 162p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, A.C. **Relação entre voçorocas e solos na região de Lavras (MG).** Escola Superior de Agricultura de Lavras. Lavras. 1990. (Tese M.Sc.).
- SOBREIRA, F.G. **Estudo geoambiental do Conselho de Sesimbra - Tese de Doutoramento,** Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1995. 347p.
- SOUSA, S.P. de. **Proposta metodológica para estimativa de assoreamento de reservatório: estudo de caso do Sistema Manso.** Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1996. (Tese MS.)
- STANCATI, G., NOGUEIRA, J.B., VILAR, O.M. **Ensaio de laboratório em Mecânica dos Solos.** EESC - USP. São Carlos. 1981. 204p

- TOSSI, F.A. Sistemas de Informação Geográfica na Agricultura. In: Circuito de Agricultura de Precisão. Ponta Grossa. 2000. **Internet.**
- USDA - SCS. **National engineering handbook: Hidrology.** Washington. 1980. 400p.
- VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos.** São Paulo, MC Graw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 1977. 509p.
- VILAR, O M. **Formulação de um modelo matemático para a erosão dos solos pela chuva.** EESC - USP. São Carlos. 1987. 196p. (Tese de Doutorado)
- WILLIAMS, J.R., JONES, C.A., DYKE, P.T. A modeling approach to determining the relationship between erosion na soil productivity. **Trans. of the ASAE.** St. Joseph. 1984. 27. p.129-144.
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** Washington: USDA, 1978. 58 p.