

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA E  
GEOCIÊNCIAS**

**EROSÃO NA MICROBACIA DO ARROIO SARANDI:  
VOÇOROCA DO BURACO FUNDO, SANTA  
MARIA/RS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Luciele Oliveira de Avila**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2009**

# **EROSÃO NA MICROBACIA DO ARROIO SARANDI: VOÇOROCA DO BURACO FUNDO, SANTA MARIA/RS**

**por**

**Luciele Oliveira de Avila**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências, Área de Concentração em Análise ambiental e dinâmica espacial, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Geografia**

**Orientador: Prof. Andréa Valli Nummer**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2009**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Naturais e Exatas  
Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação e  
Mestrado

**EROSÃO NA MICROBACIA DO ARROIO SARANDI: VOÇOROCA DO  
BURACO FUNDO, SANTA MARIA/RS**

elaborada por  
**Luciele Oliveira de Avila**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Geografia**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Prof. (Dr) Andréa Valli Nummer (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

**Prof. (Dr) Rinaldo José Barbosa Pinheiro (UFSM)**

**Prof. (Dr) Roberto Verdum (UFRGS)**

**Prof. (Dr) Luis Eduardo de Souza Robaina**  
(Suplente)

Santa Maria, dezembro de 2009.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus familiares, em especial aos meus amados pais Valter e Elenita, pelo amor, carinho, auxílio e compreensão durante toda a minha vida.

Ao Helvio Figueiredo Neves Filho, essa pessoa tão especial, que nunca mediu esforços para meu crescimento profissional, mas principalmente, para meu amadurecimento como pessoa, seu amor e atenção seguem por toda a minha vida.

À Prof. Andréa Valli Nummer pela orientação, paciência, carinho e amizade que sempre teve comigo.

Ao Prof. Rinaldo José Barbosa Pinheiro pela orientação, paciência e auxílio durante grande parte desta pesquisa.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pela estrutura e qualidade de ensino.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociência pelo apoio e incentivo.

Aos professores do curso de Mestrado em Geografia pelos ensinamentos, contribuições e incentivos.

Aos colegas do Laboratório de Geologia Ambiental (LAGEOLAM) pelo auxílio e carinho.

Aos colegas do laboratório LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil) pela dedicação na análise dos materiais.

Aos funcionários do Laboratório de Sedimentologia, em especial ao Rômulo, pela ajuda e atenção durante a realização deste trabalho.

Ao meu amigo Lucas que, mesmo à distância, tem para comigo um enorme carinho e me deu muita força durante boa parte desta caminhada.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“Nunca se vence uma guerra lutando sozinho,  
Você sabe que a gente precisa entrar em contato,  
Com toda essa força contida que vive guardada...  
Coragem, coragem se o que você quer é aquilo que pensa e faz,  
Coragem, coragem eu sei que você pode mais!”  
(Raul Seixas)

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências  
Universidade Federal de Santa Maria

### **EROSÃO NA MICROBACIA DO ARROIO SARANDI: VOÇOROCA DO BURACO FUNDO, SANTA MARIA/RS**

AUTORA: LUCIELE OLIVEIRA DE AVILA

ORIENTADORA: ANDRÉA VALLI NUMMER

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 17 de dezembro 2009.

A microbacia do Arroio Sarandi, nos municípios de Santa Maria e Dilermando de Aguiar/RS apresenta inúmeras erosões sendo a mais significativa uma voçoroca conhecida na região como “Buraco Fundo” escolhida para estudo de caso. O objetivo geral desta dissertação foi a caracterização geológico-geotécnica dos materiais da voçoroca, procurando compreender os parâmetros que influenciam no processo erosivo. Como objetivos específicos procurou-se avaliar as feições erosivas e as formas de relevo pseudo-cársticos bem como a erodibilidade dos materiais sugerindo ações para minimizar o seu avanço. Este trabalho envolveu etapa de escritório; de campo e de laboratório, onde foram executados os ensaios de caracterização geotécnica e avaliação direta e indireta da erodibilidade. A voçoroca do Buraco Fundo ocorre em rochas sedimentares segundo a direção N20°-35°E. A evolução se dá por escorregamentos rotacionais e pseudo-dolinas que evoluem para sulcos e ravinas. Foram ensaiados o horizonte superficial (A/B) e a camada de arenito localizados no anfiteatro da voçoroca. O horizonte A/B apresenta uma textura areno-argilosa, comportamento plástico e maior índice de vazios, enquanto o arenito não apresentou plasticidade. O coeficiente de sorção (s) foi maior no arenito do que no horizonte superficial e, portanto, pode-se prever que a saturação em eventos chuvosos, seja mais rápida no arenito, fazendo com que neste material, após a saturação, se estabeleça o escoamento superficial e ocorra, como consequência, o carreamento de materiais finos. Verificou-se uma relação direta entre os resultados do ensaio de desagregação e os de infiltrabilidade, onde o arenito mostrou alta desagregação e elevado coeficiente de infiltrabilidade. Os valores de  $Pi/s$  foram superiores a 50 para ambas as amostras, classificadas como erodíveis segundo Nogami e Villibor (1979). O coeficiente de erodibilidade (K) foi 10 vezes maior no arenito o que pode estar relacionado à perda da resistência devido à sucção e a aparente fragilidade do agente cimentante. O solo, por apresentar matéria orgânica, raízes e finos mostrou-se mais resistente. Os resultados apontam para a proteção das áreas em estágio erosivo inicial evitando que o processo atinja a rocha.

Palavras-chave: Erosão, Voçoroca, Pseudo-dolinas, Erodibilidade

## ABSTRACT

### **EROSION IN THE MICROBASIN OF THE SARANDI LITTLE STREAM: “BURACO FUNDO” GULLY, SANTA MARIA/RS**

AUTHOR: LUCIELE OLIVEIRA DE AVILA

ADVISOR: ANDRÉA VALLI NUMMER

Date and Place of Defence: Santa Maria, december 17, 2009.

The microbasin of the Sarandi little stream, that it crosses the cities of Saint Maria and Dilermando de Aguiar, situated in the State of Rio Grande do Sul, south region of Brazil, presents innumerable erosions; the most significant soil erosion on that region is well known as “Buraco Fundo” gully, which is also our case of study. The general goal of this dissertation was to delimitate and to characterize the geological and geotechnical materials of that soil erosion, in order to understand the parameters that influence that erosive process. As specific goals tries to evaluate the erosive marks and the pseudo-karstic relief, as well as the degree of erodibility of that materials, in order to minimize its advance. Nevertheless, this writing involved theoretical research, fieldwork and laboratory, where the assays of geotechnical characterization and direct and indirect evaluation of erodibility had been executed. The soil erosion of the Buraco Fundo gully occurs in sedimentary rocks according to direction N20°-35°E. It results of rotational slippings and pseudo-dolines that evaluates to ridges and ravines. It was assayed the superficial horizon (A/B) and the sandstone layer located in the amphitheater of that soil erosion. The horizon A/B presents an arenaceous and argillaceous texture, plastic behavior and the biggest quotient of emptiness, while the sandstone did not present plasticity. The coefficient of sorption(s) was bigger in the sandstone than in the superficial horizon. Therefore, it can be foreseen that the saturation in rainy events is faster in the sandstone than in the superficial horizon. The sandstone makes the material, after the saturation, establish the superficial draining. It occurs, as consequence, the carry of fine materials. It was verified a direct relationship between the results of the slaking test and the assays of infiltrability. The sandstone showed high desagregation and high coefficient of infiltrability. The values of  $P_i/s$  had been superior to 50, for both samples; they were classified as erodible according to Nogami and Villibor (1979). The coefficient of erodibility (k) was 10 times bigger in the sandstone, which can be related to the loss of resistance due to suction and the apparent fragility of the cementing agent. The soil revealed to be very resistant cause presents organic matter, roots and fines. The results indicate the necessity of protection of this area since the initial period of erosion, in order to avoid that process of erosion reaches the rock.

Key words: erosion, gully, pseudo-dolines, erodibility

# SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	vi
<b>ABSTRACT</b>	vii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xi
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
1.1 Erosão, conceitos e classificações.....	4
1.2 Fases/mecanismos dos processos erosivos.....	8
1.3 Fatores que condicionam os processos erosivos.....	10
1.4 Erodibilidade do solo.....	21
1.5 Ensaios geotécnicos para avaliação da erodibilidade	29
<b>2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	34
2.1 Etapa de gabinete.....	34
2.2 Etapa de campo.....	35
2.3 Etapa de laboratório.....	37
2.3.1 Ensaio de desagregação ou <i>slaking test</i> .....	39
2.3.2 Ensaio de Infiltrabilidade.....	41
2.3.3 Ensaio de perda de massa por imersão.....	43
2.3.4 Ensaio de Inderbitzen.....	45
<b>3 RESULTADOS</b> .....	50
3.1 Caracterização regional da microbacia do arroio Sarandi.....	50
3.2 Voçoroca do Buraco Fundo: Localização e características.....	61
3.3 Caracterização geológico-geotécnica dos materiais que compõem a voçoroca do Buraco Fundo.....	71
3.3.1 Avaliação da erodibilidade.....	79
3.3.1.1 Análise do ensaio de desagregação.....	79
3.3.1.2 Análise dos ensaios MCT: Infiltrabilidade e Perda de massa por imersão.....	82
3.3.1.3 Análise do ensaio de Inderbitzen.....	87
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	95
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	99



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Voçoroca conectada à rede hidrográfica. Subdivisão da encosta em elementos geométricos.....	7
Figura 2 -	Erosão por salpicamento ou <i>splash</i> - IPT, 1999.....	11
Figura 3 -	Influência da permeabilidade do solo no escoamento superficial.....	12
Figura 4 -	Fluxo concentrado de acordo com a declividade e rugosidade do terreno - IPT, 1999.....	15
Figura 5 -	Comportamento do escoamento superficial frente a diferentes formas de vertentes.....	17
Figura 6 -	Classificação granulométrica do solo, segundo ABNT.....	23
Figura 7 -	Ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT para a avaliação da erodibilidade. ....	31
Figura 8 -	Ensaio de erodibilidade específica da metodologia MCT para a avaliação da erodibilidade.....	31
Figura 9 -	Análise e coleta de materiais de diferentes pontos da voçoroca, buscando subsídios para compreender sua evolução.....	35
Figura 10 -	Material utilizado para coleta de amostras deformadas e indeformadas.....	36
Figura 11 -	Equipamento utilizado para a determinação dos limites de Atterbeg.....	38
Figura 12 -	Critério de erodibilidade MCT segundo Nogami e Villibor (1995).....	39
Figura 13 -	À esquerda esquema representando as etapas do ensaio de desagregação. ....	40
Figura 14 -	Equipamento usado para ensaio de Infiltrabilidade.....	41
Figura 15 -	Corpo de prova durante o ensaio de Infiltrabilidade.....	42
Figura 16 -	Figura 16- Curva típica do deslocamento do menisco x tempo para o ensaio de infiltrabilidade (metodologia MCT).....	43
Figura 17 -	Equipamento utilizado para o ensaio de perda de massa por imersão.....	44
Figura 18 -	Equipamento usado para ensaio Inderbitzen.....	46
Figura 19 -	Etapas da realização do ensaio de Inderbitzen.....	47
Figura 20 -	Curva típica da perda acumulada de solo por área de amostra <i>versus</i> tempo para o ensaio Inderbitzen.....	48
Figura 21 -	Ajustamento da reta onde são estimadas a taxa de erodibilidade (k) e a tensão cisalhante hidráulica crítica, $\tau_{h \text{ crit.}}$ ....	49
Figura 22 -	Localização geográfica da microbacia do Arroio Sarandi.....	51
Figura 23 -	Árvores nativas, localidade de Alto das Palmeiras.....	53
Figura 24 -	Presença de coxilhas suaves e alongadas.....	53
Figura 25 -	Pecuária extensiva em pequena propriedade rural.....	55
Figura 26 -	Representação de dolinas e uvalas.....	56
Figura 27 -	Localização de pseudo-dolinas e fraturas relacionadas.....	58
Figura 28 -	Focos de erosão na microbacia do arroio Sarandi.....	59
Figura 29 -	Localização da Voçoroca do Buraco Fundo na microbacia do Arroio Sarandi.....	62
Figura 30 -	Alinhamentos das direções de falhas na voçoroca do Buraco	

	Fundo.....	63
Figura 31 -	Presença de vegetação ao longo da área e no interior da voçoroca.....	64
Figura 32 -	Pseudo-dolinas próximas ao anfiteatro da voçoroca.....	66
Figura 33 -:	Escorregamentos rotacionais responsáveis pela evolução lateral da voçoroca.....	67
Figura 34 -	Feições erosivas encontradas no interior da voçoroca do Buraco Fundo.....	68
Figura 35 -	Camadas do Perfil I, cabeceira da voçoroca.....	72
Figura 36 -	Camadas do Perfil II, anfiteatro da voçoroca.....	73
Figura 37 -	Curva Granulométrica do Perfil I.....	77
Figura 38 -	Figura 38 - Curva Granulométrica do Perfil II.....	77
Figura 39 -	Ensaio de desagregação para o horizonte superficial do solo...	81
Figura 40 -	Ensaio de desagregação para o arenito.....	82
Figura 41 -	Deslocamento do menisco versus tempo, ensaio de infiltrabilidade.....	84
Figura 42 -	Classificação das camadas de acordo com critério de erodibilidade, Nogami e Villibor (1995) e Pejon (1992).....	87
Figura 43 -	Perda acumulada de solo para amostras em condições naturais de umidade e vazão de 3 litros, nas diferentes inclinações do aparelho Inderbitzen. As amostras correspondem ao horizonte superficial A/B.....	88
Figura 44 -	Perda acumulada de solo para amostras em condições naturais de umidade e vazão de 3 litros, nas diferentes inclinações do aparelho Inderbitzen. As amostras correspondem à rocha sedimentar do tipo arenito.....	88
Figura 45 -	Perda acumulada de solo para amostras em diferentes condições e umidade e vazão de 6 litros na inclinação de 26°, nas diferentes inclinações do aparelho Inderbitzen.....	90
Figura 46 -	Valores da perda de solo versus a tensão hidráulica para a camada do horizonte superficial do solo nas diferentes condições de umidade.....	92
Figura 47 -	Valores da perda de solo versus a tensão hidráulica para a camada de arenito nas diferentes condições de umidade.....	92
Figura 48 -	Perda de solo versus tensão hidráulica para o horizonte superficial e para a camada de arenito todas as condições de umidade.....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Velocidade terminal das gotas de chuva.....	14
Tabela 2 -	Relação entre comprimento de rampa e perdas de solo e água.....	17
Tabela 3 -	Efeito do comprimento de rampa nas perdas de solo por erosão.....	18
Tabela 4 -	Total de amostras coletadas para os diferentes ensaios de erodibilidade.....	37
Tabela 5 -	Valores de velocidade de escoamento ( $v$ ), altura da lâmina d'água ( $h$ ) e tensão cisalhante hidráulica ( $\tau_h$ ) para combinações de vazão ( $Q$ ) e inclinação de rampa ( $i$ ).....	49
Tabela 6 -	Características das unidades dos Perfis I e II.....	74
Tabela 7 -	Granulometria dos Perfis I e II.....	75
Tabela 8 -	Granulometria, limites de Atterberg e índices físicos das camadas estudadas - Perfil II.....	76
Tabela 9 -	Granulometria do horizonte A com e sem defloculante.....	78
Tabela 10 -	Comportamento das amostras no ensaio de desagregação.....	80
Tabela 11 -	Determinação do coeficiente de sorção e velocidade da frente de saturação.....	83
Tabela 12 -	Perda de massa por imersão PI (%) nas três condições de umidade.....	85
Tabela 13 -	Valores do coeficiente de sorção ( $s$ ) e perda de massa por imersão ( $P_i$ ).....	86
Tabela 14 -	Perda de material versus tempo no ensaio de Inderbitzen.....	90
Tabela 15 -	Valores da taxa de erodibilidade $k$ e tensão hidráulica crítica $\tau_h$ da camada do horizonte superficial e da camada de arenito no ensaio de Inderbitzen.....	93

## INTRODUÇÃO

A erosão dos solos tem várias origens e afeta a vida de muitas maneiras, daí ser um assunto multidisciplinar, envolvendo profissionais de várias áreas do conhecimento, por vezes, com visões distintas sobre o mesmo problema.

Entretanto, existe um consenso entre essas áreas de que os fenômenos que ocorrem desde a gênese até posterior evolução das voçorocas ainda não estão perfeitamente elucidados. No meio geotécnico, maior importância tem sido dada ao estudo da erodibilidade dos solos e ao diagnóstico e controle de voçorocas.

Os processos erosivos constituem-se numa forma natural de modelagem do relevo e atuam de modo conjugado aos processos pedogenéticos. De maneira geral, sob condições naturais, havendo equivalência entre a quantidade de solo erodida e a quantidade produzida.

Destaca-se, no entanto, que a dinâmica dos processos erosivos está intimamente ligada à própria dinâmica de variáveis causais como o uso do solo e o clima, sendo que, por exemplo, o fato da primeira, uso do solo, depender da segunda, clima, reflete a sua complexidade.

Geralmente, denomina-se este fenômeno de erosão natural ou erosão geológica. Quando se dá o rompimento deste equilíbrio devido à interferência do homem e não é permitida ao solo a recuperação natural, dá-se origem a erosão acelerada ou erosão antrópica.

Existe uma diferença entre a erosão geológica normal do solo (também designada natural) e a acelerada na qual a atividade antrópica subsequente desempenha um papel importante. A erosão geológica é aquela que atua normalmente sem interferência do homem. A erosão acelerada desenvolve-se com taxas muito incrementadas quando comparada àquelas da erosão normal. Inicia-se muitas vezes de forma muito lenta, passando a sofrer interferências posteriores que aceleram o processo.

Surge hoje como uma variante da ação antrópica, aquela oriunda das alterações climáticas propiciadas pelo homem em atividades não ligadas diretamente à ocupação e ao uso do solo. Destaca-se, no entanto, que a dinâmica dos processos erosivos está intimamente ligada à própria dinâmica de variáveis

causais como o clima e o uso do solo, sendo que, por exemplo, o fato da primeira, clima, depender da segunda, uso do solo, reflete a sua complexidade.

A erosão dos solos tem várias origens e afeta a vida de muitas maneiras, daí ser um assunto multidisciplinar, envolvendo profissionais de várias áreas do conhecimento como geógrafos, geólogos, engenheiros, por vezes, com visões distintas sobre o mesmo problema. Entretanto, existe um consenso entre essas áreas de que os fenômenos que ocorrem desde a gênese até posterior evolução das voçorocas ainda não estão perfeitamente elucidados.

O entendimento do mecanismo de desencadeamento e evolução dos processos erosivos não é simples, envolve o conhecimento de muitas variáveis e exige uma visão sistêmica do fenômeno. Dois são os elementos centrais responsáveis pelo desencadeamento do processo erosivo, a erosividade da água, elemento ativo, e a erodibilidade do solo, elemento passivo. Complementarmente, intervêm os fatores modulares, facilitando ou dificultando o processo erosivo.

Os fatores modulares atuam, na erosão geológica juntamente com a formação dos solos, permitindo certo equilíbrio do sistema. Com o uso do solo, a alteração de um ou mais desses fatores permite a atuação de outros em desequilíbrio.

Grande parte dos processos erosivos ocorre de modo direto e potencialmente previsível, como conseqüência da intervenção antrópica no meio ambiente. São exemplo dessa situação no meio rural, o plantio e manejo do solo inapropriado, como a não-observância de curvas de nível ou o desmatamento de matas ciliares.

Em meio urbano, têm-se práticas inadequadas como impermeabilização superficial excessiva com concentração do fluxo e lançamento inapropriado das drenagens de águas pluviais. Obras de engenharia como barragens, linhas de transmissão e rodovias, que não se enquadram nem como rural nem como urbana, são também a origem de vários problemas de erosão, sobretudo no que tange à falta ou ao lançamento inapropriado das drenagens e ao abandono das áreas de empréstimo exploradas sem os cuidados necessários.

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2006), o correto diagnóstico dos mecanismos de eclosão e evolução das erosões se dá por meio de análises das causas do problema e de estudos geológico-geotécnicos do fenômeno. Este correto diagnóstico contribui para a definição de medidas preventivas ou corretivas mais econômicas e eficientes.

A microbacia do Arroio Sarandi, localizada nos municípios de Santa Maria e Dilermando de Aguiar/RS apresenta inúmeros focos de erosão como sulcos, ravinas feições de pseudo-carste e voçorocas. A erosão mais significativa, por apresentar grandes dimensões e abranger uma grande área é uma voçoroca conhecida na região como Buraco Fundo que foi escolhida para um estudo de caso nesta dissertação. Desta forma, o objetivo geral deste trabalho é a caracterização geológico-geotécnica dos materiais que compõem a voçoroca do Buraco Fundo, procurando compreender alguns parâmetros que influenciam no processo erosivo.

Como objetivos específicos procurou-se avaliar as feições erosivas presentes na microbacia do arroio Sarandi; avaliar as formas de relevo pseudo-cárstico e suas relações com o processo erosivo; avaliar a erodibilidade dos materiais que compõem a voçoroca do Buraco Fundo e compreender como se estabelece o processo erosivo na região e como ele evolui.

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma: Capítulo 1 que refere-se à Revisão Bibliográfica e são abordados os seguintes temas: i) erosão: conceitos e classificações; ii) fases/mecanismos dos processos erosivos; iii) fatores que condicionam os processos erosivos; iv) erodibilidade do solo; e v) ensaios geotécnicos para avaliação da erodibilidade.

No Capítulo 2 são apresentados os Procedimentos Metodológicos que foram utilizados para realização da pesquisa. Os Resultados deste trabalho são apresentados no Capítulo 3, em três subítens: i) caracterização regional da microbacia do arroio Sarandi e inclui a localização, a caracterização física, uso e ocupação do solo, descrição e localização dos principais processos erosivos e a presença de feições de pseudo-carste; ii) voçoroca do Buraco Fundo que mostra a caracterização dos materiais que compõem a voçoroca, feições de pseudo-carste associadas, análise da forma da vertente onde a incisão está inserida, bem como feições erosivas encontradas em seu interior; e iii) avaliação geotécnica e de erodibilidade onde constam os resultados dos ensaios de laboratório.

O Capítulo 4 refere-se à Conclusão que apresenta, de forma sucinta, as relações entre os resultados obtidos e sugestões para a contenção do processo erosivo analisado.

# 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os seguintes temas: i) erosão: conceitos e classificações; ii) fases/mecanismos dos processos erosivos; iii) fatores que condicionam os processos erosivos; iv) erodibilidade do solo; e v) ensaios geotécnicos para avaliação da erodibilidade.

## 1.1 Erosão: conceitos e classificações

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1999), erosão significa um conjunto de ações, incluindo o desprendimento (desagregação), o arraste (transporte) e a deposição das partículas de solo causada por agentes como a água, gelo, vento ou gravidade.

O primeiro momento em que o tema erosão, suas causas e conseqüências foi abordado pela comunidade internacional foi na Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente realizado em Estocolmo em 1972. Deste período, até os dias de hoje, a erosão, juntamente com a erodibilidade, vem sendo estudada em diversas áreas de conhecimento como Agronomia, Geologia, Geografia e Engenharia Civil (Hidráulica e Geotecnia) por autores como Lacerda *et al.* (2001), Guerra (2002), Surtegaray (2003), Guerra e Mendonça (2004), Paiva e Beling (2006) entre outros.

Inúmeros são os critérios utilizados para a classificação dos processos erosivos como a natureza, agente e grau de intensidade. Quanto à natureza ou a escala de tempo em que as erosões ocorrem, a maioria dos autores classificam as erosões em dois grandes grupos: (a) erosão natural ou geológica e (b) erosão acelerada ou antrópica.

Para Bertoni e Lombardi Neto (1999), a erosão natural ou geológica ocorre de maneira lenta e gradual ao longo da escala de tempo, sendo considerada de ocorrência normal e benéfica, pois através dela, resultaram as inúmeras formas de relevo da superfície terrestre como colinas suaves, planícies extensas e vales férteis.

Segundo Bigarella (2003) a erosão acelerada ou antrópica ocorre quando tal equilíbrio é afetado bruscamente, numa escala de tempo relativamente curta, não

sendo capaz, por si só, de atingir a nova compensação de forças. Conforme o autor, o desequilíbrio é promovido pelas mudanças climáticas e intervenções antrópicas como, por exemplo, o mau uso do solo na agricultura e as obras de engenharia, que interferem no meio físico provocando assim, processos erosivos diretos e muitas vezes previsíveis.

Trabalhos como IPT (1991), Bertoni e Lombardi Neto (1999), Maciel Filho (1997) e Infanti Jr (1998), entre outros, classificam as erosões quanto ao grau de intensidade em: (a) superficial ou laminar; (b) sulcos e ravinas; e (c) voçorocas.

A erosão superficial ou laminar está relacionada com a distribuição do destacamento das partículas que ocorre de maneira uniforme e suave por toda a sua extensão. É considerada um dos tipos de erosões mais perigosa, pois muitas vezes é imperceptível, ainda mais no meio rural, tornando assim, os solos improdutivos.

Alguns autores como Camapum de Carvalho *et al* (2006), afirmam que a erosão superficial por escoamento laminar pode ou não propiciar o aparecimento de sulcos, mas quando gerados, poderão evoluir para ravinas e voçorocas.

A erosão é um processo complexo e, desta forma, torna quase que impossível a delimitação do término da erosão superficial e o início da erosão linear ou em sulcos. Para autores como Camapum de Carvalho *et al.* (2006) e Bigarella (2003), a erosão em sulcos é a primeira etapa de desenvolvimento de uma erosão dita linear e desenvolve-se rapidamente durante uma chuva intensa devido ao escoamento superficial que se torna concentrado.

Conforme Soares (2004), a erosão subsuperficial é causada principalmente pela água e animais que vivem no solo. A exportação de minerais dissolvidos se dá principalmente na água efluente, onde os ácidos fracos formados na chuva e na água em percolação provocam erosão subsuperficial em áreas de solos sedimentares, formando sumidouros e cursos d'água subterrâneos.

O termo *piping* pode ser considerado um fenômeno de erosão subterrânea no qual a percolação de água causa a remoção de partículas do interior do solo/rocha, formando cavidades de forma tubular que avançam para o interior do solo/rocha (CAMAPUM DE CARVALHO, 2006).

A presença de terrenos estratificados é um condicionante geológico geralmente favorável à ocorrência de *piping*, pois concentra o fluxo em uma determinada camada em função diferenciação textural e, aliada ao relevo ondulado, é um fator determinante para a erodibilidade do solo/rocha.



Segundo Camapum de Carvalho (2006) a erosão subterrânea pode ocorrer, principalmente, quando a força de percolação ultrapassa a resistência localizada do solo, gerando a ruptura hidráulica, o que leva ao arraste das partículas de solo, permitindo a abertura de pequenos dutos, nos quais o fluxo passa a se concentrar, criando assim pequenas cavidades.

Em relação ao assunto, as pesquisas de Augustin e Aranha (2006) caracterizam o fenômeno como dutos com colapso parcial, que não se desenvolveram em voçorocas e também não se encontram conectados a nenhuma delas.

Os autores explicam ainda que, esses canais, poderão iniciar um processo de expansão por colapso dos tetos, acompanhado de erosão superficial. Ocorrem, geralmente, em porções côncavas da vertente, fato este que sugere uma gênese associada ao acúmulo de água nas depressões, aumentando o escoamento superficial e, em decorrência, a infiltração ao longo de linhas preferenciais.

Para Vilar e Prandi (1993 *apud* CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006) a erosão em sulcos corresponde às erosões lineares e a erosão que ocorre na região intersulcos, corresponde à erosão laminar.

Os conceitos de sulcos e ravinas diferem com relação as dimensões da incisão, com a geometria da feição erosiva, com o afloramento do lençol freático na incisão ou com o tipo de fluxo do escoamento. Mesmo não havendo um consenso entre conceitos, as classificações mais utilizadas internacionalmente são aquelas relacionadas às dimensões das incisões erosivas.

Bigarella (2003) adota a seguinte terminologia de acordo com a profundidade: ranhura (até 5 cm); sulco (5 a 30 cm); vala (30 a 100 cm) e ravina (maior 100 cm). Este autor afirma que, com o aumento do tamanho dos sulcos, estes se transformam em valas de erosão (*gully*) e em ravinas de dimensões maiores.

Camapum de Carvalho (2006) considera (a) sulcos: pequenos canais de até 10 cm de profundidade, gerados pela concentração do escoamento superficial; e (b) ravinas: canais com profundidade entre 10 e 50 cm, onde começa a haver a instabilidade dos taludes.

Bertoni e Lombardi Neto (1985) e Bigarella (2003) afirmam que a erosão em sulcos é resultante das pequenas irregularidades na declividade do terreno que faz a enxurrada, concentrando-se em alguns pontos do terreno, atinja volume e velocidade suficientes para formar riscos mais ou menos profundos.

Para Guerra (2003) voçoroca é uma incisão com uma largura maior que 30 cm e profundidade maior que 60 cm. Essa classificação é seguida por vários autores, entre eles Camapum de Carvalho (2006).

Segundo Galetti (1985) voçorocas são sulcos profundos feitos no solo pelas águas, podendo ser produto de águas superficiais ou de águas profundas que, infiltram-se no solo até atingirem uma camada menos permeável ou impermeável onde se acumulam e se deslocam, no sentido horizontal, provocando arrastamento de partículas, deslizamentos e desmoronamentos.

Pesquisas realizadas por Guerra (2007) baseadas em modelos de Oliveira (1985) mostram que a evolução de voçorocas se dá através da interação sinérgica entre os diferentes mecanismos envolvidos na sua gênese. A pesquisa do autor identificou distintos tipos de evolução, sendo que os principais estão relacionados às incisões conectadas e desconectadas à rede hidrográfica (Figura 1).

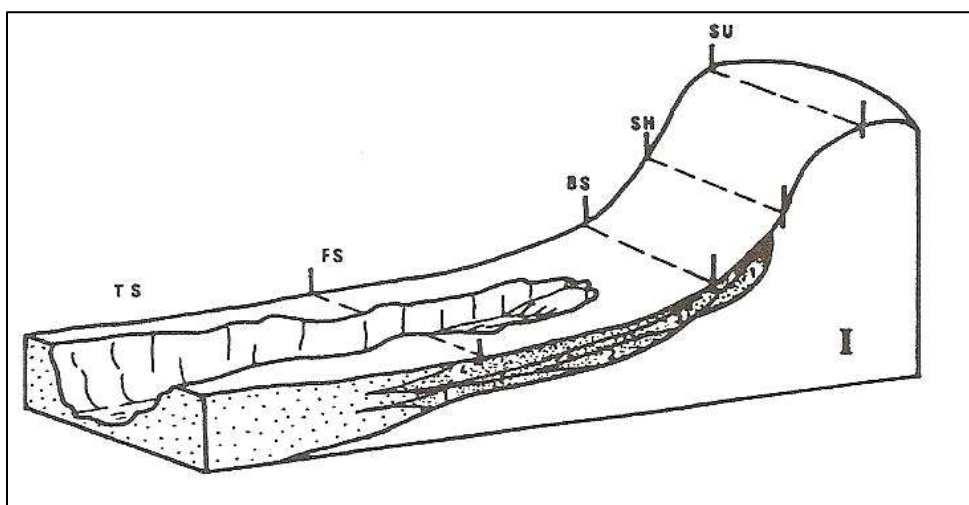


Figura 1 - Voçoroca conectada à rede hidrográfica. Subdivisão da encosta em elementos geométricos: TS - *toeslope*; FS - *footslope*; BS - *backslope*; SH - *shoulder*; SU - *summit*.

Sobre esse mecanismo que atua na evolução de voçorocas, Aires (1960), argumenta que este age quando há um grande fluxo superficial deslizando sobre um declive, cuja velocidade do escoamento é diretamente proporcional à declividade do terreno. Além disso, o solo encharcado perde estabilidade e, por ação da gravidade, as porções de solo e rocha tendem a descer talude abaixo.

As erosões por voçoroca constituem-se no estágio mais avançado da erosão, sendo caracterizadas pelo avanço em profundidade das ravinas até estas atingirem o lençol freático ou o nível d'água do terreno. Este conceito utilizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1991) é o mesmo adotado neste trabalho.

## **1.2 Fases/mecanismos dos processos erosivos**

Para que uma superfície seja atingida pela erosão, tanto em ravinas como em voçorocas, é necessário que uma gama de condições atue de forma conjunta em diferentes escalas temporais e espaciais. Para autores como Guerra (2007) e Bertoni (1999) esse conjunto de condições é denominado “mecanismos de erosão”, enquanto Galetti (1973) e Dal Conte (1982) preferem chamá-lo de “fases da erosão”.

Fases ou mecanismos, essas condições, dividem-se basicamente em três: desagregação, transporte e deposição de materiais. São acionados por fluxos de água da chuva agindo na superfície ou no subsolo. Sobre isso é importante mencionar:

O movimento do solo pela água é um processo complexo, influenciado pela quantidade, intensidade e duração da chuva, natureza do solo, cobertura vegetal, declividade da superfície do terreno. Em cada caso, a força erosiva da água é determinada pela interação ou balanço dos vários fatores, favorecendo alguns, o movimento do solo e, outros, opondo-se a ele. O material do solo deve ser primeiro deslocado da sua posição da superfície antes que possa ser transportado. Em seguida, é carregado na suspensão ao longo da superfície do terreno. O processo é o resultado do impacto da gota de chuva, da turbulência do movimento da água e do escoamento na superfície (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999, p.70).

Com isso, pode-se dizer que a erosão trata-se da realização de uma quantidade de trabalho no desprendimento de partículas de solo e rocha, bem como, o seu transporte. As duas primeiras etapas (desagregação e transporte) não são expressas em unidades, são percebidas e estudadas através da observação. Já a última etapa (deposição) é medida em peso/volume por unidade de área, de acordo

com Bertoni e Lombardi Neto (1999). Com a finalidade de melhor compreender e explicar a dinâmica da erosão, as principais fases/mecanismos são detalhadas a seguir.

A primeira etapa de um processo erosivo constitui-se da desagregação das partículas do solo ou de rochas. Pode-se considerar, segundo Galetti (1973), que se trata de uma fase de choque, de impacto independentemente da sua intensidade, desde que seja capaz de desprender alguma quantidade de material.

Esse impacto causa a compactação da superfície do terreno, remobilizando silte e areia nos espaços intergranulares, erodindo o solo através da projeção de partículas para fora da zona de impacto, fornecendo material a ser carregado pelo escoamento superficial. Bertoni e Lombardi Neto (1999, p.45) contribuem dizendo que “a natureza do solo (textura, cultivo, etc.) e a cobertura (quantidade e tipo) influem na intensidade da desagregação”, além das suas formas de uso e ocupação.

O transporte de material ocorre imediatamente após a sua desagregação. Vários fatores concorrem para a movimentação das porções de solo: o tamanho das partículas, a topografia do terreno, a presença de obstáculos (vegetação e rochas) e a força do agente (chuva).

Para Guerra (2007, p.61) o transporte pelo escoamento superficial pode ser compreendido como “sendo o resultado de tensões cisalhantes que superam a resistência estática das partículas individuais” e cita que a “rugosidade do terreno gera resistência de atrito ao escoamento superficial, que promove a turbulência do fluxo”. Turbulência esta, provocada pela chuva, pode transportar partículas e, além disso, o impacto da gota pode movê-las, parcialmente ou totalmente submersas pela água.

Sobre o transporte de materiais pelas águas, Galetti (1973) argumenta que as partículas menores, como argilas finas, são carregadas em solução; as partículas médias, como argilas médias e areia fina, são levadas em suspensão, pois não se dissolvem na água; e as partículas mais grossas, como areias grossas, cascalho, seixos e pedras, são empurradas/roladas pela enxurrada. Ao ser movimentado, o material mais grosso (e pesado) tende a desagregar outros materiais.

Verifica-se que, a energia do escoamento superficial concentra-se em terrenos com declive acentuado e longo comprimento de rampa, fazendo com que a enxurrada, já com materiais em suspensão, produza sulcos e ravinas e cause maiores perdas de solo em relação às áreas menos inclinadas.

No que diz respeito à deposição dos materiais, os estudos de Bertoni e Neto (1999) mostram que o movimento das águas causa a separação das partículas do solo de acordo com o seu tamanho e peso. Inicialmente, sedimentam aquelas de baixa transportabilidade e, por último, os materiais mais leves, geralmente depositados em lugares distantes da desagregação, em terrenos mais baixos e planos.

A deposição ou assentamento do material é a última etapa do processo erosivo, ou seja, é a parada do material, finalizando o transporte. Em relação a esta fase/mecanismo, o seguinte trecho faz-se importante:

Isto se verifica quando o agente perde a sua força (diminui a velocidade ou o volume) ou então porque encontra um obstáculo que o faça mudar, ao menos parcialmente, de direção, ou que lhe divida o volume (caso da água), ou que lhe diminua a velocidade, ou ainda, que se coloque à frente do material transportado retardando o seu movimento ou mesmo forçando a sua parada (GALETI, 1973, p.47).

A deposição de materiais é um grave problema quando se trata de erosão, pois, na maioria das vezes, grande quantidade de solo é sedimentada dentro de rios, lagos e reservatórios de água, causando o seu assoreamento. E, como consequência disso, verifica-se a diminuição da profundidade dos corpos d'água, enchentes e mudança no curso dos rios.

### **1.3 Fatores que condicionam os processos erosivos**

É possível afirmar que o comportamento pluviométrico é o principal fator que inicia e condiciona o avanço dos processos erosivos. O ataque da água da chuva ao solo ocorre superficialmente e em profundidade. No primeiro caso, as partículas de solo são transportadas através da lâmina de água que se forma na superfície. No segundo caso, as porções de solo são arrastadas massivamente formando feições erosivas mais profundas (Ayres, 1960).

A erosão pode ser considerada, em parte, como a função da quantidade e da intensidade da enxurrada em relação às características físicas e químicas inerentes

do solo. As propriedades físicas do solo determinam a resistência à desagregação das partículas quando o terreno encontra-se desprovido de vegetação e exposto às chuvas torrenciais.

São vários os fatores que influenciam no comportamento do escoamento superficial das águas da chuva. Para Ayres (1960), a topografia é um dos principais condicionantes, pois a declividade do terreno e o comprimento de rampa são determinantes na direção e na velocidade do escoamento. A cobertura vegetal tem um papel fundamental, pois atua no sentido de diminuir a velocidade e facilitar a infiltração da água. O terceiro fator considerado importante pelo autor diz respeito à permeabilidade/impermeabilidade do solo e das camadas adjacentes.

O impacto das gotas de chuva é responsável pelo início dos processos erosivos, pois atua na desagregação das partículas do solo. As gotas quando caem através da atmosfera sofrem deformações no seu tamanho e volume, diminuindo ou aumentando conforme evaporação ou condensação (De Llano e Criado, 1968).

Ao cair pela ação da gravidade, as gotas perdem velocidade devido à resistência imposta pelo ar, mas, mesmo assim, com a ausência de obstáculos atinge o solo com uma força capaz de desprender porções do solo e lançá-las para o ar (Figura 2). Esse processo é conhecido como erosão por salpicamento ou *splash* (Guerra, 2007).

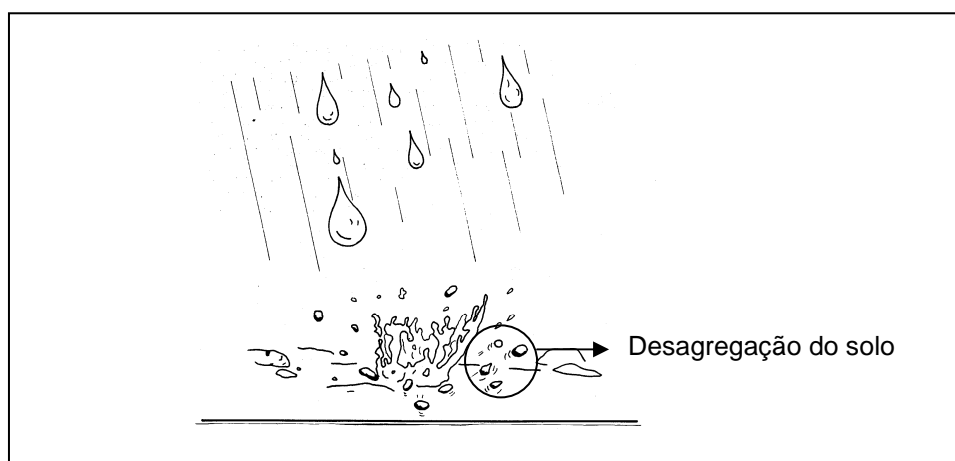


Figura 2 - Erosão por salpicamento ou splash - IPT, 1999

Conforme o mesmo autor, a erosão por *splash* pode ser considerada como sendo uma “preparação” para o transporte das partículas pelo escoamento superficial. Isso se dá tanto pela ruptura dos agregados que são quebrados em tamanhos menores, quanto pela ação transportadora que o salpicamento provoca nas partículas. As pequenas porções de solo, ao serem desprendidas e lançadas, preenchem os espaços vazios da superfície, provocando a selagem e a diminuição da porosidade, o que provoca o aumento da velocidade e volume do escoamento superficial.

Quando a precipitação chega à superfície comporta-se de duas maneiras: evapora ou infiltra. Desconsiderando a parcela que sofre evaporação e volta para a atmosfera, a permeabilidade regula a quantidade de água que penetra no solo (Figura 3), e o restante que não sofreu infiltração compõem as águas do escoamento superficial.

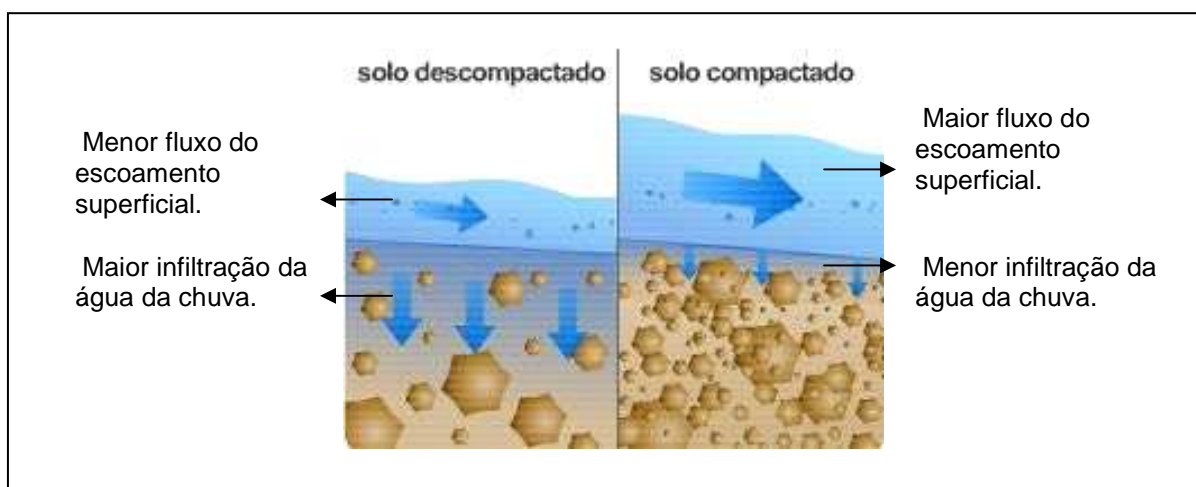


Figura 3 - Influência da permeabilidade do solo no escoamento superficial

A formação do escoamento superficial depende do regime das precipitações e das características do solo. Caso essas características permitam uma infiltração maior ou igual à quantidade de chuva que cai num determinado período, não se produzirá nenhum escoamento superficial. Caso contrário formar-se-á na superfície uma lâmina de água que, conforme sua velocidade e intensidade tende a carregar

consigo porções de solo e rocha que encontrar pelo caminho (De Llano e Criado, 1968).

Para tais autores, a ação do escoamento superficial nos processos erosivos se manifesta sobre dois aspectos: desagrega os elementos terrosos e, ao mesmo tempo, arrasta e deposita em outras áreas aquelas partículas que, por seu tamanho e forma, são suscetíveis ao transporte.

O primeiro caso baseia-se na fricção e choque das gotas de água com os elementos terrosos da superfície do solo, contribuindo notavelmente para incrementar o fluxo de partículas sólidas transportadas pelo escoamento superficial. A ação de retirada e arraste de material pelo escoamento, juntamente com o impacto das gotas de chuva, constitui a primeira fase da erosão.

Este processo ocorre devido ao atrito da corrente de água com a superfície rugosa do terreno que origina tensões superiores à resistência do solo, despreendendo grãos de terra e lançando-os para o alto. Além disso, esta tensão ocasiona a formação de uma corrente turbulenta com velocidade ascensional, pondo em suspensão todas aquelas partículas suscetíveis ao transporte (Guerra, 2007).

Além da resistência do solo ao impacto das gotas de chuva, a energia cinética dessas gotas também é de fundamental importância para a erosão em salpicamento ou *splash*, pois, dependendo da energia que for impactada sobre o solo, vai ocorrer a ruptura dos agregados, com maior ou menor facilidade.

Vários autores em Guerra *et al* (2007) acreditam que a energia cinética relaciona-se com a intensidade da chuva, e que esta é a energia total das gotas existentes num dado evento de precipitação. Numa precipitação com intensidade entre 50 e 100 mm/h e que grande parte das gotas são maiores que 4,0mm, a energia cinética é bastante elevada. Ao levar em conta que a energia cinética está relacionada com a intensidade da chuva pode-se dizer, então, que ela é uma função da sua duração, diâmetro, massa e velocidade da gota.

No entanto, parte dessa energia se perde durante o percurso até o solo. Isso se dá em função da vegetação que diminui a velocidade das gotas antes de chegarem à superfície; das formações rochosas expostas no terreno que servem como barreira para a chuva, impedindo que as gotas atinjam diretamente o solo; e do vento que, conforme a sua duração e intensidade, muda a direção do fluxo fazendo com que a chuva não impacte diretamente a terra.



Além disso, para Bertoni e Neto (1999), o atrito do ar e a pressão também determinam a redução da velocidade das gotas de chuva, assim, na queda, alcançam uma velocidade máxima ou velocidade terminal. Ao atingirem a velocidade máxima, as gotas adquirem um movimento uniforme, ocorrendo quando a resistência oposta à queda é igual ao peso do corpo (gotas de chuva) menos o empuxo para cima.

A velocidade terminal da chuva foi estudada por Bertoni e Lombardi Neto (1999) que, através do método fotográfico não obteve êxito no cálculo do valor exato da velocidade máxima. No entanto, conseguiu determinar com precisão, a altura de que as gotas de diferentes tamanhos necessitam para obter 95% dessa velocidade (Tabela 1).

Tabela 1 - Velocidade terminal das gotas de chuva

Diâmetro da gota de chuva, (mm)	Velocidade terminal, (m/s)	Altura da queda com a qual a gota de chuva adquire 95% da sua velocidade terminal (m)
1	4,0	2,2
2	6,5	5,0
3	8,1	7,2
4	8,8	7,8
5	9,1	7,6
6	9,3	7,2

Fonte: Adaptado de Bertoni e Neto, 1999

Conforme estudos de De Llano e Criado (1968) em relação aos efeitos da energia cinética da chuva sobre o solo e a conseqüente erosão por ela provocada, é possível elencar algumas considerações: a) a capacidade erosiva do fluxo superficial, representada pela energia cinética, varia com o quadrado da sua velocidade; b) a quantidade de terra erodida é de, aproximadamente, cinco vezes a velocidade do fluxo; e c) o tamanho das partículas que podem ser transportadas por rotação ou deslizamento varia em torno de seis vezes a potência da sua velocidade.

Ao cair na superfície e atingir o solo, a água da chuva forma o escoamento superficial que transporta consigo partículas de solo e rocha, cujos tamanhos variam de acordo com a intensidade e a velocidade deste fluxo. Segundo Casseti (1983), distinguem-se tipos diferentes de escoamento superficial, definidos conforme fatores

intrínsecos, como declividade do terreno, uso e ocupação do solo, e dos fatores extrínsecos, como intensidade e duração das chuvas.

Seguindo os estudos do autor, o fluxo difuso quase sempre se encontra associado à rugosidade do terreno que gera resistência de atrito ao escoamento superficial pela presença da cobertura vegetal. O fluxo laminar é a forma mais lenta e insidiosa de erosão, pois, ao contrário da erosão em sulcos ou da erosão que origina boçorocas, esse tipo não é perceptível a curto e médio prazo e ocasiona prejuízos incalculáveis ao agricultor. E o fluxo concentrado resulta da convergência do escoamento superficial em função de micro depressões no terreno, ou ainda da própria geometria da vertente (Figura 4) formando, na maioria das vezes, ravinas ou micro-ravinas.

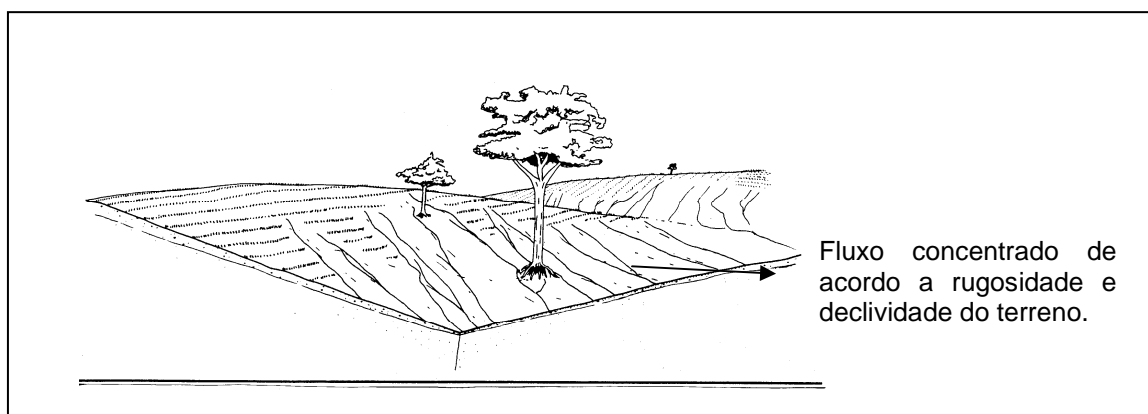


Figura 4 - Fluxo concentrado de acordo com a declividade e rugosidade do terreno - IPT, 1999

A capacidade que a chuva possui de causar erosão é definida como erosividade, sendo determinada pela energia cinética; e a erodibilidade é a resistência ou fragilidade do solo em ser erodido, conforme Guerra (2007). O autor ainda ressalta que existem vários parâmetros para definir a erosividade da chuva e a erodibilidade do solo, no entanto, devido à variabilidade espacial dos ambientes, os fenômenos erosivos ocorrem de diferentes maneiras.

Ao falar sobre erosão, é indispensável citar a influência do modelado do relevo nesta dinâmica. A declividade (ou grau de inclinação do terreno) influi na concentração, a dispersão e a velocidade da água da chuva e, também, na

intensidade de partículas carregadas pelo escoamento superficial. Sobre o assunto, destaca-se:

Nos terrenos planos, ou apenas levemente inclinados, a água escoar com pequena velocidade e, além de possuir menos energia, tem mais tempo para infiltrar-se, ao passo que, nos terrenos mais inclinados, a resistência ao escoamento das águas é menor e, por isso, elas atingem maiores velocidades. As regiões montanhosas são, portanto, as mais suscetíveis à erosão (LEPSCH, 2002, p.158).

Em relação à essa temática Galetti (1973) argumenta que o grau de declive tem o poder de influenciar tanto na velocidade como no volume de água escoada. O autor exemplifica dizendo que num terreno com declive de 1%, a velocidade de escoamento é bastante reduzida, enquanto num terreno que apresenta uma declividade de 20%, a água desce com maior velocidade. Portanto, quanto maior o grau de declive, maior é a velocidade e mais volumosa é a enxurrada, conseqüentemente, maior é a força erosiva.

No que diz respeito ao grau de declividade é importante mencionar que: a) quando o declive é quatro vezes maior, a velocidade da enxurrada duplica; b) quando a enxurrada dobra de velocidade, a sua capacidade erosiva é multiplicada por quatro; c) quando a velocidade da enxurrada dobra, sua capacidade de desagregação de partículas é aumentada em 32 vezes; d) quando a velocidade da enxurrada dobra, é capaz de desagregar e transportar partículas 64 vezes maiores (Galetti, 1973).

Sobre a importância da declividade e do comprimento de rampa nos processos erosivos, De Llano e Criado (1968), explicam que cada zona de uma vertente está submetida ao escoamento proveniente das áreas mais altas, e que a altura do fluxo superficial em cada ponto é maior à medida que a distância (comprimento de rampa) e a declividade também são maiores. Ou seja, quanto mais longa for rampa e mais inclinado for o terreno, mais velocidade o escoamento superficial adquire ao longo deste percurso e, ao chegar à base da vertente a erosão é intensificada.

Além da declividade, para o efeito erosivo, também é relevante a forma das vertentes (Figura 5). A exemplo disso verifica-se que numa vertente côncava, a água do escoamento superficial tende a acumular-se no seu interior, formando um fluxo

linear concentrado que favorece a erosão. Enquanto que numa vertente convexa, o fluxo escoar difusamente, menos propício à formação de sulcos.

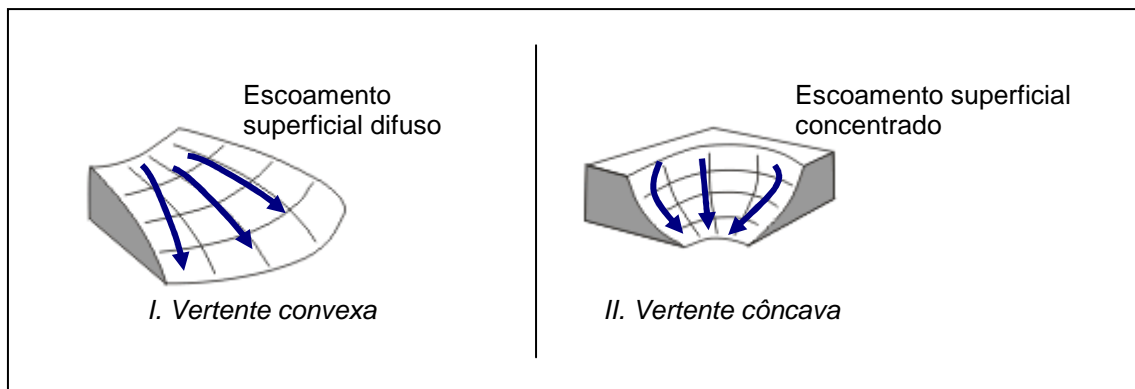


Figura 5 - Comportamento do escoamento superficial frente a diferentes formas de vertentes. Fonte: Adaptado de Cassetti (1983)

O comprimento de rampa também é um elemento da topografia cuja influência é decisiva para a deflagração da erosão (Tabela 2). No entanto, geralmente, costuma-se associar à erosão unicamente a inclinação do terreno, quando, na verdade, à distância percorrida pela água do topo até a base da vertente é fundamental para a intensidade das enxurradas.

A tabela acima representa estudos realizados sobre as relações existentes entre o comprimento de rampa e a erosão do solo. Verifica-se um significativo aumento da perda do solo (erosão) na medida em que aumenta também o comprimento da rampa.

Tabela 2 - Relação entre comprimento de rampa e perdas de solo e água. Médias baseadas entre 1.300 mm de chuva e declives de 6,5 e 7,5%

Comprimento de rampa	Perdas de	
	Solo em ton/ha	Água da chuva, em %
25 m	13,9	13,6
50 m	19,9	10,7
100 m	32,5	2,6

Fonte: Adaptado de Bertoni e Neto (1999)

À medida que cresce o comprimento do caminho percorrido, maior será o acúmulo de água encosta abaixo, maior o ganho de velocidade e grande será a capacidade de transporte de materiais como solo, rocha, vegetação, etc. Sobre esses números:

Quadruplicando-se o comprimento de rampa, quase que triplicam as perdas de solo por unidade de área, diminuindo mais da metade as perdas de água também por unidade de área. Para os comprimentos de 25, 50 e 100 metros de rampa, verifica-se uma proporção de 1:1, 4:2, 3 em perdas de solo, e de 1:0, 7:0, 2 em perdas de água, por unidade de área (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999, p.58).

Portanto, o comprimento da rampa tem forte ligação com o aumento ou não da erosão (Tabela 3). Na medida em que aumenta o comprimento da rampa, maior será o volume de água, aumentando também a velocidade de escoamento. Em casos pouco freqüentes, o comprimento da rampa diminui o efeito erosivo, considerando-se que a capacidade de infiltração e a permeabilidade do solo reduzem este efeito.

Compreende-se que uma rampa de 100 metros perderá 13,9 ton/ha de solo nos primeiros 25 metros de seu comprimento; nos segundos 25 metros essa perda chega a 25,9 ton/ha; já nos terceiros 25 metros o solo perdido atinge 38,8 ton/ha; enquanto que 51,4 ton/ha são perdidos nos últimos 25 metros de comprimento da rampa. Ou seja, na medida em que dobra esse comprimento, praticamente dobram também as perdas de solo.

Tabela 3 - Efeito do comprimento de rampa nas perdas de solo por erosão

Comprimento de rampa (m)	Primeiros 25 metros (ton/ha)	Segundos 25 metros (ton/ha)	Terceiros 25 metros (ton/ha)	Quartos 25 metros (ton/ha)	Média (ton/ha)
25	13,9	-	-	-	13,9
50	13,9	25,9	-	-	19,9
75	13,9	25,9	38,8	-	26,2
100	13,9	25,9	38,8	51,4	32,5

Fonte: Adaptado de Galetti (1973)

Em vista disso, quando se trata de processos erosivos e conservação do solo, o conhecimento dessas informações faz-se imprescindível, pois grande parte das práticas de controle à erosão está fundamentada no princípio de se dividir a extensão das vertentes, a fim de diminuir o volume da enxurrada e evitar que ela ganhe velocidade, atenuando os efeitos erosivos da água da chuva.

A cobertura vegetal, bem como o manejo do solo, são condições fundamentais na temática da erosão. A forma como a terra é manejada e se está ou não coberta por vegetação condiciona maior ou menor mobilidade aos solos, ou seja, solos completamente vegetados (ou cobertos por restos vegetais) têm maiores chances em resistir às forças erosivas. Isso devido à proteção da superfície contra as gotas de chuva, ao aumento da absorção da água e, além disso, as raízes tendem segurar o solo, evitando que seja transportado.

Para Galetti (1973) a cobertura vegetal funciona como uma proteção do solo, pois diminui o impacto da gota de chuva e conseqüentemente impede ou minimiza a ocorrência da desagregação. Isso acontece devido à perda de energia potencial da chuva ao passar por diferentes estratos vegetais. Solos que possuem cobertura vegetal com estratos variados contam com uma menor taxa de erosão do que aqueles que possuem um único estrato.

Além desse efeito dispersante de energia, a cobertura vegetal também ajuda na taxa de infiltração, retardando o escoamento superficial devido à abertura de poros no solo pelas raízes. Outra influência da cobertura vegetal é a incorporação de matéria orgânica ao solo.

Conforme Galetti (1973), no que se refere à vegetação como fator de influência na erosão, é possível elencar algumas considerações:

1. Quanto mais coberto ou vegetado estiver o solo menor será a erosão;
2. A planta tem a capacidade de proteger o solo em três níveis: da copada, através das folhas e ramos; da superfície do solo, através de troncos, raízes e serapilheira; e do interior do solo, através das raízes;
3. A vegetação acrescenta matéria orgânica ao solo, facilitando a penetração e conservação da água;
4. As raízes subterrâneas deixam galerias no interior do solo que facilita a infiltração da água da chuva;
5. As plantas fornecem sombra, diminuindo a evaporação e a queima da matéria orgânica.

Do exposto se conclui que a vegetação, de modo geral, protege o solo ao diminuir a força cinética da chuva. As gotas, ao caírem encontram uma barreira composta pela vegetação e perdem força antes de chegar ao solo, o que também diminui a velocidade de escoamento superficial, fator determinante na ocorrência de erosão hídrica. Sem contar que as raízes das plantas agem como uma rede agregando o solo e absorvendo parte da água que cai nele, evitando a saturação e, conseqüentemente, deslizamentos que podem agravar o processo erosivo.

No entanto, a vegetação só protege o solo contra a energia cinética da chuva, quando as árvores não são muito altas, caso contrário, as gotas acumuladas nas copas de grande altura, ao desprenderem-se e alcançar o chão, já adquiriram novamente energia suficiente para agredir o solo.

A partir do momento da retirada da cobertura vegetal, o solo fica exposto às intempéries, sobretudo à água das chuvas, que anteriormente infiltrava lentamente no solo, que passa então a escoar superficialmente, dependendo da intensidade da chuva. Em vista disso, as fases de desagregação e transporte das partículas de solo e rocha variam conforme o sistema de cultivo adotado em uma determinada área, tornando o solo mais suscetível à erosão que outra.

Estudos realizados por Pires (2006) mostram que a porcentagem de cobertura do solo proporcionada também por restos de culturas é fundamental na redução das perdas de solo por erosão hídrica, eficácia verificada com aproximadamente 30% de cobertura. Mas, para a autora, a persistência dessa proteção na superfície do solo irá depender do grau de incorporação dos resíduos culturais, bem como do método de preparo do solo.

Solos cobertos com culturas anuais, como milho, algodão e soja estão mais suscetíveis à erosão do que aqueles com plantas perenes, como seringueiras, laranjeiras e cafeeiros e, ainda semiperenes como a cana de açúcar. Galetti (1973) compara os diferentes tipos de culturas e explica porque umas protegem mais o solo do que outras, pois:

1. Nas culturas anuais: o preparo da área a ser cultivada desagrega o solo; o solo fica mais tempo exposto, sem cobertura; a pouca cobertura oferecida por certas culturas favorece a destruição da matéria orgânica; a retirada de minerais através das colheitas; pode haver a queima de restos da cultura.
2. Nas culturas permanentes: há maior proteção do solo devido à presença das copas; não há necessidade de arações e gradagens, portanto a

desagregação é menor; há maior sombreamento e, como consequência, maior preservação da matéria orgânica.

3. Nas pastagens: há melhor cobertura do solo do que nas duas culturas citadas anteriormente; há um retorno parcial de elementos minerais pelos dejetos animais; não há frequência de arações e gradagens; não há capinas, portanto o solo permanece maior parte do tempo coberto.
4. Nas matas: não há preparo do solo para plantio; não há colheitas anuais; há renovação quase total dos nutrientes quando não se retira a madeira; cobertura permanente e quase total devida à copada, serrapilheira e ao sistema radicular.

A cobertura vegetal exerce um papel protetor do solo, fazendo com que a remoção de solo seja lenta, sendo compensada pelos processos de formação do solo. Além disso, os vegetais correspondem aos elementos naturais de estabilização de encostas, promovida principalmente pela ação das raízes.

Solos expostos, onde se efetuou a remoção total da cobertura vegetal, são ambientes de grande geração de fluxos superficiais, uma vez que não são encontrados os elementos e mecanismos que definem a condição de infiltração da água para a subsuperfície, de acordo com Mendes (2006).

#### **1.4 Erodibilidade do solo**

A erodibilidade, fator imprescindível ao se falar de erosão, pode ser compreendida como sendo a resistência/fragilidade do solo à erosão. Para Santos e Merschmann (2001), este fenômeno está diretamente ligado à capacidade de desagregação e transporte das partículas, sendo que a maior ou menor capacidade de desagregação depende, quase que exclusivamente, das propriedades físicas e químicas do solo. E ainda:

Conhecer a capacidade de um dado tipo de solo em resistir à erosão pela água constitui uma informação útil no estabelecimento de práticas agrícolas adequadas às suas características, tanto em nível de propriedade rural, como em nível de um planejamento conservacionista mais abrangente (DAL CONTE, 1982, p.1).



A erosividade da chuva e a erodibilidade do solo são dois importantes fatores físicos que afetam a magnitude da erosão do solo. Como visto, a erosão dos solos depende de vários fatores. Mesmo que a chuva, a declividade do terreno e a cobertura vegetal sejam as mesmas, alguns solos são mais susceptíveis ao destacamento e ao transporte de partículas pelos agentes de erosão que outros. Essa diferença, devido às propriedades do solo, é conhecida como erodibilidade do solo.

A erodibilidade de um solo é definida como a sua falta de capacidade de resistir aos processos erosivos e depende não só das características intrínsecas do solo, mas também de fatores subsidiários como ciclos de umedecimento e secagem, além da composição química da água presente, segundo Vilar e Prandi (1993 *apud* CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006). Desta maneira, a forma mais comum de se analisar a erodibilidade dos solos tem sido por meio de suas características físicas e químicas e de alguns condicionantes externos.

Para conhecer a erodibilidade de um determinado tipo de solo, portanto, é preciso identificar sua granulometria, plasticidade, teor de matéria orgânica, estrutura, permeabilidade e porosidade. Sendo assim, a classificação dos solos quanto à erodibilidade, na maioria das vezes, é realizada através de mútuas relações entre essas propriedades.

Porém, essas características do solo são propriedades dinâmicas, pois podem ser alteradas a todo tempo e sob diferentes usos da terra, manejo superficial do solo, e sistemas de agricultura e, assim, conseqüentemente, sua erodibilidade também muda ao longo do tempo.

Segundo a EMBRAPA (2002), o termo “matéria orgânica” pode ser entendido como sendo “os constituintes orgânicos do solo, incluindo resíduos de plantas e animais, seus produtos em vários estágios de decomposição química, física e microbiológica, e de organismos vivos”. Portanto, matéria orgânica é uma das principais propriedades do solo, pois reduz o risco de erosão pelos seguintes fatos (Montenegro, 1976):

- a) A densidade do solo decresce consideravelmente com o aumento do teor de matéria orgânica, ocasionando maior estabilidade dos agregados;

- b) A presença dos compostos orgânicos aumenta a agregação e melhora a estrutura do solo;
- c) A existência da matéria orgânica se reflete na velocidade de infiltração da água no solo e no volume do escoamento superficial.

A matéria orgânica é um complexo de substâncias resultantes da decomposição da flora e fauna do solo. A todo instante ocorre incorporação e decomposição de material orgânico no solo, por isso, a matéria orgânica é tida como uma das frações mais dinâmicas e de difícil caracterização nos solos.

Apesar da dificuldade de quantificar o efeito positivo da matéria orgânica no solo, vários são os benefícios que ela proporciona no que se refere ao processo erosivo. Ela é fonte direta, ou indireta da ação microbiana e de agentes cimentantes importantes na agregação dos solos.

Quando a matéria orgânica se encontra cobrindo o solo, ela o protege contra o impacto da gota de chuva e, conseqüentemente, da erosão. Além disso, ela favorece ainda a penetração de água no solo propiciando maior disponibilidade para as plantas, reduz o endurecimento excessivo do solo por manter mais uniforme a temperatura e a umidade e é de suma importância na retenção de água no solo (a matéria orgânica consegue reter até 6 vezes o seu peso em água).

A textura ou granulometria refere-se à proporção de argila, silte e areia do solo (Figura 6). Para Montenegro (1976), a variação do tamanho das partículas é a característica física mais estável do solo e, ainda, as porções menores e mais finas determinam o seu comportamento físico, influenciando a maioria dos fenômenos pedológicos.

<b>Classificação</b>	<b>Diâmetro dos grãos</b>
Argila	menor que 0,002 mm
Silte	entre 0,06 e 0,002 mm
Areia	entre 2,0 e 0,06 mm
Pedregulho	entre 60,0 e 2,0 mm

Figura 6 - Classificação granulométrica do solo, segundo ABNT

Propriedades texturais e estruturais também influenciam a interação com a chuva e, conseqüentemente, sua capacidade de infiltração. A taxa de equilíbrio de infiltração é uma função da porosidade total, a proporção relativa de macroporos, e a estabilidade e continuidade de macroporos, além do que, os canais criados por raízes deterioradas e pela fauna do solo têm maiores efeitos na capacidade de infiltração.

Portanto, é possível ressaltar a textura do solo como um fator importante que influencia a erodibilidade por afetar os processos de desagregação e transporte, uma vez que, enquanto grandes partículas de areia resistem ao transporte, solos de textura fina (argilosos) também resistem à desagregação, sendo a areia fina e o silte as texturas mais suscetíveis à desagregação e ao transporte. Assim, solos derivados de materiais originados de transporte eólico, por exemplo, são muito susceptíveis à erosão.

As argilas apresentam diâmetros inferiores a 0,002 mm, sendo visíveis apenas ao microscópio. Sua principal característica é a plasticidade e, expandindo-se com a umidade e contraindo-se com em ambiente seco. São constituídas basicamente por silicatos de alumínio, ferro, potássio, sódio, magnésio, entre outros.

As areias são classificadas em grossas e finas com diâmetros de 2 a 0,2 mm e 0,2 a 0,02 mm, respectivamente. São compostas por partículas minerais, onde predomina o quartzo em grãos ou fragmentos, cuja forma pode ser arredondada ou irregular sem apresentar nenhuma plasticidade.

Os solos arenosos apresentam poros relativamente grandes e, apesar de pouco porosos, são muito permeáveis, favorecendo seu arraste pela água de infiltração. Portanto, a distribuição percentual do tamanho das partículas está intimamente ligada à erodibilidade, pois implica na velocidade de infiltração da água e na estabilidade do solo frente ao impacto das gotas de chuva e ao transporte de material pelo escoamento superficial (MONTENEGRO, 1976).

A densidade e a estrutura do solo são decisivas nos processos erosivos. É uma propriedade variável e depende da sua estrutura e compactação, incluindo as partículas sólidas e os espaços vazios existentes numa porção de solo.

Portanto, o aumento da densidade do solo, por efeito da compactação, resulta na diminuição dos macroporos; em função disso, o solo torna-se mais erodível. As propriedades químicas, biológicas e mineralógicas do solo influem no estado de

agregação entre as partículas, aumentando ou diminuindo a resistência do solo à erosão.

A estrutura do solo corresponde ao modo como as partículas estão arranjadas no solo, influenciando diretamente na capacidade de infiltração e absorção da água da chuva, bem como na capacidade de arraste de partículas. Para Galetti (1973), a estrutura depende do tamanho e da disposição das partículas que formam os agregados de solo.

Para o autor, as principais formas adquiridas pelos agregados são: laminar, prismática, em blocos e granular. A forma laminar caracteriza-se por apresentar estruturas orientadas pelo seu eixo horizontal, o que dificulta o fluxo de água. A estrutura prismática ocorre quando os agregados formam colunas mais altas que largas. Uma estrutura em blocos mostra cantos arredondados e, por haver um maior contato entre as superfícies, reduz o fluxo de água no terreno. Nas estruturas granulares o formato das unidades estruturais aproxima-se da esfera.

Em vista disso, uma boa estrutura tende a proporcionar um bom arejamento do solo, facilitando a movimentação da água. Porém, a estrutura é uma característica que pode ser modificada e, quando excessivamente adensada e compactada (em solos argilosos, por exemplo) dificultada a infiltração aumento o escoamento superficial.

A porosidade corresponde à quantidade de poros existentes numa porção de solo. Esses espaços podem estar preenchidos por água ou ar e, normalmente, representa a metade do volume do solo. Basicamente, o espaço poroso do solo refere-se aos vazios entre os agregados chamados de macroporos e aos vazios dentro dos próprios agregados chamados de microporos.

Nos poros maiores, tanto a água como o ar têm maior facilidade de movimentação. Nos microporos há predominância de água, como, por exemplo, nos solos argilosos que são muito porosos e pouco permeáveis, encharcam com facilidade e demoram mais a secar, tornando-se firmes e empedrados. Enquanto, nos macroporos o ar é encontrado em maior quantidade, no caso dos solos arenosos que são pouco porosos e muito permeáveis.

Entende-se permeabilidade como sendo a maior ou menor capacidade de infiltração da água no solo, estando diretamente relacionada com a porosidade. Bertoni e Lombardi Neto (1999, p.44), dizem que, em termos de movimento de água,

a porosidade é a “condutividade hidráulica do solo saturado, usualmente medida, em termos de infiltração, em milímetros por hora”.

Portanto, a erodibilidade está diretamente ligada à porosidade e a permeabilidade do solo. Guerra (2007, p. 234) explica que “os solos mais porosos permitem rápida infiltração das águas da chuva, dificultando o escoamento superficial”. Então, materiais arenosos são menos porosos, mas permeáveis, e apresentam alta suscetibilidade à erosão. Já os materiais argilosos, embora possam apresentar boa porosidade, são praticamente impermeáveis e se mostram maior resistência à 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 conseqüências, 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.

Para Hernandez (2000), no quadro de equilíbrio na natureza, existe uma equivalência entre os processos de formação e remoção dos solos. Entretanto, este equilíbrio pode ser rompido pela intensificação da erosão. Nesta situação, os processos de formação do solo não conseguem superar os processos de degradação, e a erosão é considerada erosão acelerada.

Se ela for desencadeada por alterações das condições geológicas ou climáticas, geralmente, ocorre ao longo de milhares de anos. No entanto, a erosão acelerada provocada pelo homem pode ocorrer em poucos anos, sendo extremamente prejudicial ao meio ambiente.

Os processos erosivos podem iniciar 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.

As causas da erosão acelerada são funções de fatores antrópicos e catástrofes naturais. Segundo Hernandez (2000), como fatores antrópicos têm-se o uso e ocupação irracional do solo: desmatamentos, cultivos inadequados, estradas

mal planejadas, expansão urbana desordenada. Sobre este cenário resultante das atividades humanas, atuarão os fatores naturais chuva, relevo, solos, rocha e vegetação, que controlarão a intensidade do processo erosivo.

Grande parte dos processos erosivos ocorre de modo direto e previsível, como consequência da intervenção antrópica no meio ambiente. São exemplos dessa situação no meio rural, o plantio e manejo do solo de modo inapropriado, como a não observância de curvas de nível ou o desmatamento de matas ciliares. Em meio urbano, tem-se a impermeabilização de superfícies com concentração de fluxo superficial e lançamento inapropriado de drenagens de águas pluviais (CARVALHO, 2006).

Entre as principais atividades humanas que intensificam os processos erosivos podemos citar o desmatamento que deixa o solo exposto à ação erosiva da chuva; as construções em encostas, que aumentam a tensão sobre o terreno, propiciando deslizamentos; as técnicas agrícolas inadequadas, quando se promovem desmatamentos extensivos e deixam o solo por muito tempo exposto aos mecanismos erosivos; a criação de animais em locais suscetíveis à erosão, que, através do pisoteio, provocam sulcos no terreno; a destruição da mata ciliar que protege as margens dos rios contra a erosão.

Além disso, a impermeabilização do solo impede a infiltração das águas pluviais e aumentando, com isso, a potencialidade do transporte de materiais, devido ao escoamento superficial. A desestabilização de terrenos através do corte de taludes para a construção de estradas e a compactação dos solos oriunda da ação das máquinas e implementos agrícolas também contribuem para a aceleração da erosão.

Sobre a interferência do homem nos processos erosivos, Bertoni e Lombardi Neto (1999) fazem as seguintes considerações em relação às atividades rurais como agente acelerador de tais fenômenos:

O homem, ao explorar o solo, destrói a vegetação protetora, rompe com o arado a superfície do terreno para semear as espécies vegetais úteis às suas necessidades de alimentação e abrigo, e submete a terra à aração periódica com ferramentas de preparo do solo; então, o processo erosivo adquire velocidade e intensidade. A natureza, porém, continua transformando a rocha em solo com a mesma lentidão, enquanto o desgaste de solo pelo mau uso se acelera progressivamente; para avaliar

esse desequilíbrio, basta ter em conta que são necessários vários séculos para formar um centímetro de solo e que um terreno em declive mal protegido bastam poucos anos para arrastar uma camada dessa espessura (p.73).

Os autores acima citados mencionam a aração como uma atividade aceleradora de perda de solo por erosão. No entanto, com o aumento do uso de maquinário pesado na agricultura, percebe-se que a utilização constante desses implementos agrícolas causa danos muito maiores ao solo do que o simples uso do arado com tração animal. Isso porque, o peso das máquinas compacta o solo, impermeabilizando-o e, como consequência, maior será a intensidade e a velocidade do escoamento superficial.

Para Guerra (2007), a erosão do solo afeta tanto as terras agrícolas quanto aquelas dedicadas a outros usos em áreas rurais ou urbanas. E, apesar de ser um processo quase imperceptível na sua fase inicial, seu caráter de irreversibilidade em etapas posteriores (quando muito acentuadas) reduz-se a impossibilidade de sustentabilidade do sistema e a manutenção da fauna e da flora em muitas áreas afetadas por tal processo.

É possível verificar nos estudos de Souto e Lacerda (2004), a influência das atividades humanas nos processos erosivos, detectando a presença de erosão acelerada em área urbana da região de Anápolis/Goiás. As ravinas e voçorocas por eles verificadas, localizam-se geralmente em duas situações com relação ao uso da terra: ao longo dos limites entre áreas parceladas e não parceladas; nos limites entre duas classes de solo parcelado com diferentes índices de ocupação, representando etapas diferentes de parcelamento do solo e onde a área à montante tem maior índice de ocupação. Em ambos os casos ocorre aumento do escoamento superficial à montante e seu lançamento nos limites das classes de uso da terra, explicando a localização das erosões.

Segundo os autores, estas observações mostram com clareza o papel do uso da terra no desenvolvimento das erosões. No caso analisado trata-se de um processo de urbanização feito sem levar em conta a prevenção dos processos erosivos, com existência de ruas sem drenagem de águas pluviais ou inadequados; com lançamento das águas em cabeceiras de drenagem e na meia encosta; com

traçado viário com ruas segundo a declividade da encosta favorecendo o aumento da velocidade e poder erosivo do escoamento superficial.

Portanto, a pressão exercida pela ocupação em determinadas regiões, principalmente por atividades agropecuárias intensivas, aliada a despreocupação quanto á adoção de práticas conservacionistas, tem propiciado uma perda considerável do potencial produtivo das terras, a qual tem como causa principal a erosão acelerada.

### **1.5 Ensaios geotécnicos para avaliação da erodibilidade**

Os ensaios de quantificação da erosão não são totalmente difundidos no meio geotécnico, sendo de suma importância para o entendimento do processo erosivo.

A erodibilidade de um solo pode ser avaliada de maneira direta e indireta. Alguns ensaios como os realizados para a caracterização física; perda de massa por imersão e infiltrabilidade da metodologia MCT (Nogami e Villibor, 1979) e o ensaio de desagregação; são considerados ensaios de avaliação indireta da erodibilidade.

Bastos (1999) apresentou uma nova proposta metodológica com uma abordagem geotécnica para avaliação da erodibilidade de solos residuais. Tal proposta possui como base o estudo da erodibilidade, em perfis de solos residuais não saturados, realizado pelo autor em sua Tese de Doutorado.

A proposta consiste em uma avaliação indireta e uma avaliação direta da erodibilidade. A avaliação indireta é realizada em campo, com base em diferentes critérios estabelecidos na literatura técnica como a Estimativa do fator erodibilidade  $K_{USLE}$  da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) entre outros. A avaliação direta se dá por meio dos ensaios de Inderbitzen em laboratório, complementada com os ensaios de resistência ao cisalhamento direto com controle de sucção.

Os ensaios de caracterização física são considerados primordiais na análise, não só da erodibilidade, como também em qualquer outro tipo de análise. De acordo com Fácio (1991), a erodibilidade dos solos tende a ser inversamente proporcional ao grau de saturação sem, no entanto, mostrar qualquer tendência com os demais parâmetros geotécnicos estudados isoladamente.



Cabe lembrar ainda, que a caracterização química, mineralógica e microestrutural são de suma importância, para a avaliação da erodibilidade, por ser uma propriedade do solo de grande complexidade devido aos inúmeros fatores intervenientes.

A metodologia MCT envolve um conjunto de ensaios em solos tropicais e subtropicais, que foi desenvolvido para o uso em rodovias e estradas vicinais, substituindo métodos de estudo de solo desenvolvidos em países de climas frios e temperados.

Esta avaliação para estudo da erodibilidade é fundamentada em dois parâmetros: o coeficiente de sorção ( $s$ ) obtido no ensaio de infiltrabilidade, e o coeficiente ( $P_i$ ) obtido pelo ensaio de perda de massa por imersão modificado (ensaio de erodibilidade específica), ensaio este, similar àquele estabelecido pela metodologia MCT.

O ensaio de Infiltrabilidade consiste na medição da quantidade de água que infiltra em corpos de prova de 5 cm de diâmetro, pela sua base, em função da raiz quadrada do tempo.

Através da divisão do parâmetro  $p_i$  por  $s$ , é possível a classificação dos solos em relação ao grau de erodibilidade, sendo considerados solos erodíveis quando esta relação for superior ao valor 52. O mesmo critério de classificação foi proposto de maneira gráfica por Nogami e Villibor (1995), sendo baseado em um número maior de ensaios. Para Pejon (1992 *apud* VILAR E PRANDI, 1993) a relação entre " $P_i$ " e " $s$ " deve ser superior ao valor 40, para que os solos sejam classificados como erodíveis, em diferentes condições de umidade.

O processo de infiltrabilidade está associado ao fluxo de água que ascende pela amostra, sendo possível assim, medir o deslocamento da água através de uma régua graduada junto ao tubo capilar, nos tempos que seguem uma relação quadrática (1, 2, 4, 9, 16, 25, 36 min) até o deslocamento do menisco cessar. São plotados os deslocamentos do menisco (cm) pelo tempo, em uma relação quadrática, ( $\text{min}^{1/2}$ ), onde se observe uma tendência retilínea dos pontos, inicialmente, onde será retirado o coeficiente de sorção ( $s$ ) (Figura 7).

O ensaio de perda de massa por imersão modificado, também chamado de ensaio de erodibilidade específica, consiste, segundo Nogami e Villibor (1979), em submergir em água, durante 20 h, amostras indeformadas de solo, confinadas pelo anel.

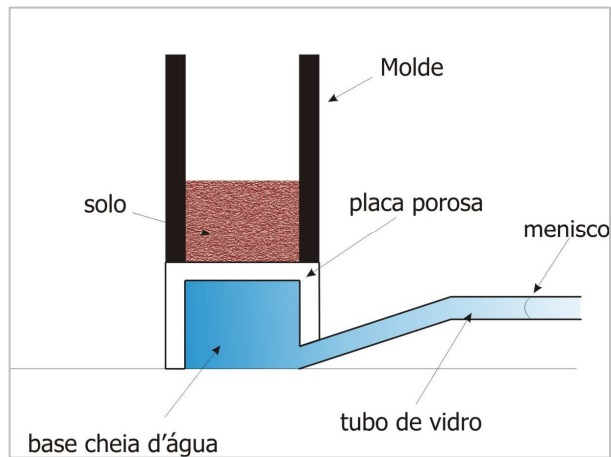


Figura 7 - Ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT para a avaliação da erodibilidade. Fonte: adaptado de Nogami *et al.* (1987)

Recolhe-se o solo desprendido do anel e determina-se a sua massa seca. A perda de massa por imersão  $\pi$  (%) é calculada através da relação entre o peso do solo seco desagregado e o peso do solo seco total da amostra. (Figura 8).

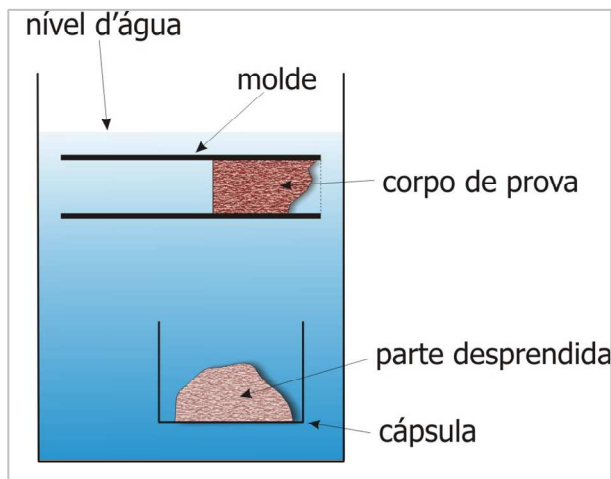


Figura 8 - Ensaio de erodibilidade específica da metodologia MCT para a avaliação da erodibilidade. Fonte: adaptado de Nogami *et al.* (1987)

O ensaio de desagregação também chamado de “*slaking test*”, evoluiu do chamado “*crumb test*”, ensaio preconizado para identificação de solos dispersivos

através da imersão gradual de uma amostra de solo em água com a descrição qualitativa dos fenômenos observados.

O objetivo deste ensaio é a verificação da instabilidade à desagregação de uma amostra de solo cúbica ou cilíndrica, quando submersa em água destilada, sendo considerada como uma avaliação indireta, visual e qualitativa da estabilidade, não sendo normatizado.

Bastos *et al* (1999) indica o ensaio de desagregação como critério preliminar na avaliação qualitativa da erodibilidade devido ao fato de ser um ensaio considerado simples e de resultar bons resultados, auxiliando no direcionamento de outros ensaios de erosão.

Em se tratando da descrição qualitativa da amostra são observadas as seguintes dinâmicas na amostra: (i) abatimento (*slumping*); (ii) fraturamento no topo; (iii) rupturas nas bordas; (iv) velocidade de desagregação; (v) grau de dispersão das partículas de solo; (vi) velocidade de ascensão capilar; e (vii) inchamento.

O ensaio de Inderbitzen também chamado de “erosômetro”, é o ensaio mais utilizado dentre os ensaios em canais hidráulicos no meio geotécnico, sendo aplicado por pesquisadores como Bastos (1999), Freire (2001) e Fácio (1991). É considerado um ensaio de simples execução, baseado em métodos empíricos, não sendo normatizado, mesmo assim, apresentando resultados satisfatórios.

De acordo com o ensaio original desenvolvido por Inderbitzen (1961) em sua publicação “*An erosion test for soils*”, a perda de solo pode ser medida em amostras cujo plano de sua superfície coincide com o plano variável da rampa, pela qual flui o escoamento com uma vazão controlada.

Este ensaio tem como objetivo a simulação aproximada, do efeito do escoamento superficial sobre o solo, permitindo analisar diferentes resultados conforme a mudança da vazão do fluxo, seu tempo de atuação, declividade da rampa e propriedades do solo, como sua densidade e umidade, porém, não simula o fenômeno da desagregação de partículas provocado pelo impacto da água em uma precipitação.

O uso do ensaio de Inderbitzen foi introduzido no Brasil e proposto como ensaio geotécnico para avaliação da erodibilidade dos solos na pesquisa “Estabilidade de Taludes” (IPR/COPPE/TRAFECOM), desenvolvida no período de 1975 a 1978. Depois da experiência do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), o uso do ensaio de Inderbitzen só ressurgiu na década de 90.

Bastos (1999) ao realizar o ensaio de Inderbitzen em solos residuais na região de Porto Alegre, construiu um novo equipamento, com uma rampa de 0,25 m de largura e 0,60 m de comprimento, dotada de um orifício central, onde é acoplada amostras de solo confinadas em anéis de PVC com diâmetro de 9,76 cm e altura de 5 cm. As amostras foram ensaiadas nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida. A rampa permitiu inclinações de 10°, 26°, 45° e 54°, uma vazão de 3 l/min e 6 l/min em um tempo de 20 minutos de ensaio.

Neste Capítulo foi possível verificar a existência de vários conceitos e explicações sobre a temática erosão. Apesar de não existir um consenso entre os autores sobre um único conceito sobre o tema, fica ao critério de cada pesquisador seguir as idéias de um determinado autor que mais se adapte à realidade de seus estudos. Neste trabalho, segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas, entende-se por voçoroca uma incisão erosiva de grandes proporções, cuja característica principal é o afloramento do lençol freático no seu interior.

Esta revisão bibliográfica proporcionou um embasamento teórico para esta pesquisa, possibilitando conhecer as fases ou mecanismos do processo erosivo; relacionar os principais fatores que o condicionam; discutir a dinâmica envolvida na erodibilidade do solo; e elencar alguns ensaios geotécnicos para a avaliação direta e indireta da erodibilidade de materiais que compõem a voçoroca do Buraco Fundo.

Nota-se a importância e eficácia dos ensaios geotécnicos para a avaliação da erodibilidade do solo/rocha. Além disso, através deles é possível verificar vários parâmetros que influenciam nos processos erosivos como umidade, declividade, intensidade do escoamento superficial, propriedades físicas do solo/rocha, entre outros.

Portanto, buscou-se neste Capítulo abordar os principais temas relacionados à erosão, cuja introdução de ensaios de laboratório comprova (ou não) a influência dos inúmeros fatores teoricamente envolvidos neste processo. Nos Capítulos seguintes são apresentados, em detalhes, os ensaios utilizados e os resultados deles obtidos.

## **2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

A pesquisa é classificada segundo os seus objetivos como sendo uma pesquisa descritiva, pois descreve a área estudada; segundo os procedimentos é determinada como estudo de caso porque visa uma análise mais detalhada da área escolhida; conforme a fonte de informação é classificada como sendo uma pesquisa de campo e laboratório, onde informações significativas foram levantadas durante visitas locais e amostras foram avaliadas em laboratório.

O desenvolvimento deste trabalho se deu em três etapas: i) Etapa de gabinete, a qual configura a base da pesquisa, pois nesta etapa foram levantados dados bibliográficos sobre a área estuda e elaboradas bases cartográficas para o desenvolvimento da pesquisa. Através de materiais cartográficos e bibliográficos; ii) Etapa de campo, quando foram realizadas as observações em relação aos processos erosivos, havendo coleta de materiais, como rochas e solos, para ensaios de laboratório; iii) Etapa de laboratório, onde foram realizados os ensaios de caracterização e os ensaios de avaliação direta e indireta da erodibilidade.

### **2.1 Etapa de gabinete**

Inicialmente, foi realizado um levantamento dos materiais cartográficos disponíveis sobre a área de estudo como mapas geológicos e cartas topográficas, fotografias aéreas e imagens de satélites. O trabalho segue com uma revisão bibliográfica de temas relacionados aos processos erosivos, geologia regional, uso de técnicas de geoprocessamento, ensaios de laboratório para caracterização geotécnica e avaliação da erodibilidade.

Nesta etapa foram elaboradas, utilizando o software SPRING 4.0, as bases cartográficas da microbacia do arreo Sarandi. Para a delimitação da microbacia foram utilizadas as cartas topográficas de Catuçaba, São Pedro do Sul e Sanga da Laranjeira na escala 1:25.000.

## 2.2 Etapa de campo

No levantamento de campo identificou-se a geologia, geomorfologia e o solo da microbacia do Arroio Sarandi procurando relacionar estes fatores ao desenvolvimento da erosão linear e feições erosivas encontradas na área. Nesta etapa também foram observadas e analisadas as formas de uso e ocupação do solo que ocorrem na microbacia.

Após uma análise geral da microbacia foram cartografadas erosões do tipo ravinhas e voçorocas e feições de pseudo-carste como pseudo-dolinas e pseudo-ovalas. Com base nos processos erosivos encontrados na área analisada, escolheu-se para estudo de caso uma voçoroca conhecida na região como “Buraco Fundo”, pelo fato de apresentar grande dimensão e profundidade, estar estabelecida em materiais com características diferentes e apresentar feições de pseudo-carste associadas (Figura 9).



Figura 9 - Análise e coleta de materiais de diferentes pontos da voçoroca, buscando subsídios para compreender sua evolução

Nos trabalhos de campo seguintes, passou-se a detalhar a área da voçoroca do “Buraco Fundo” e seu entorno, avaliando os solos e rochas cortados pela incisão erosiva, características da vertente na qual ela se estabeleceu bem como as feições

de pseudo-dolinas localizadas próximas à incisão, procurando compreender a relação entre a presença delas e a evolução do processo erosivo.

Os materiais (solos e rochas) que compõem a voçoroca foram descritos, caracterizados e avaliados em função de sua erodibilidade. Para isto coletou-se amostras deformadas e indeformada para a realização dos ensaios de caracterização e erodibilidade respectivamente, conforme a norma ABNT 6457/86 (Amostra de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização).

As amostras deformadas utilizadas para os ensaios de caracterização foram coletadas em sacos plásticos de 1kg, as amostras indeformadas, utilizadas para os ensaios de avaliação da erodibilidade foram coletadas em anéis de 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro, já para os ensaios de perda de massa por imersão e infiltrabilidade, utilizou-se anéis de 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro (Figura 10).



Figura 10 - Material utilizado para coleta de amostras deformadas e indeformadas. Fonte: Tatto, 2007

Para a caracterização granulométrica de rochas e solo, utilizou-se amostras deformadas, para diferentes camadas de solo/rocha. Os resultados destes ensaios serviram para compreender a evolução do processo erosivo naquele local.

A cabeceira da voçoroca, por apresentar melhor exposição de solos e rocha, foi utilizada para a descrição dos materiais, de sua espessura e coleta de amostras deformadas.

As amostras indeformadas foram coletadas nos mesmos materiais onde foram coletadas as amostras deformadas, porém, na porção média da voçoroca mais a oeste, por ser uma região de mais fácil acesso. A Tabela 4 mostra o número total de amostras utilizadas para os ensaios de erodibilidade.

Tabela 4 - Total de amostras coletadas para os diferentes ensaios de erodibilidade

DIMENSÃO DOS ANÉIS (cm) ( $\Phi$ = diâmetro , h = altura)	ENSAIO	Nº AMOSTRAS POR CAMADA	Nº AMOSTRAS TOTAL
$\Phi = 10$ h = 5	Inderbitzen	24	48
	Desagregação	2	6
$\Phi = 5$ h = 5	Infiltrabilidade	9	18
	Perda de massa por imersão	9	18

### 2.3 Etapa de laboratório

Os ensaios de laboratório foram fundamentais neste trabalho, pois auxiliaram na caracterização dos materiais e na compreensão do processo.

Nesta etapa foram realizados os ensaios de caracterização geotécnica e os ensaios para a avaliação direta (ensaio de Inderbitzen) e indireta de erodibilidade (perda de massa por imersão, infiltrabilidade, desagregação) dos materiais coletados. Estes ensaios já foram realizados com sucesso por autores como Bastos (1999), Totto (2007), Camapum de Carvalho *et al* (2006).

Para a realização da caracterização geotécnica dos materiais amostrados, foram realizados os seguintes ensaios: análise granulométrica, limites de consistência, determinação dos índices físicos como umidade, peso específico natural, peso específico seco, peso específico real dos grãos, índice de vazios, grau de saturação e porosidade, segundo Pinheiro *et al* (2009).

A análise granulométrica dos solos é o processo que visa definir, para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho de grãos, a percentagem em peso que cada fração possui em relação a massa total da amostra em análise. A análise granulométrica por peneiramento e sedimentação foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 6502/95.



O peso específico real dos grãos foi realizado com base na norma ABNT NBR 6508/84 (Grãos de solo que passam pela peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica) através do método do picnômetro.

O ensaio de limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade) (Figura 11) foram realizados de acordo com as normas ABNT NBR 6459/84 (Determinação do limite de liquidez) e norma NBR 7108/84 (Determinação do limite de plasticidade).

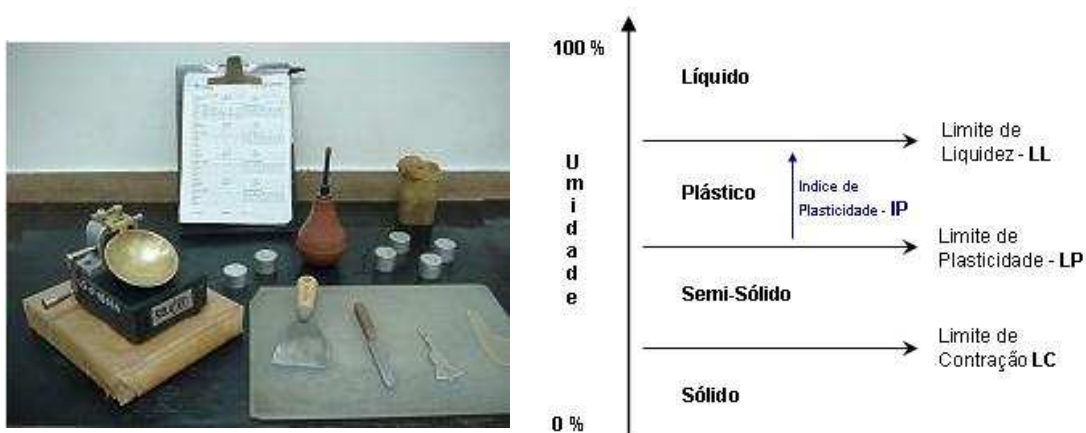


Figura 11 - Equipamento utilizado para a determinação dos limites de Atterberg

O limite de liquidez é definido como a umidade abaixo da qual o solo se comporta como material plástico (umidade de transição entre os estados líquido e plástico do solo). Para que um material seja considerado plástico, é possível moldar com ele um cilindro de 10 cm de comprimento por 3 mm de diâmetro, por rolagem sobre uma placa de vidro.

Para a avaliação indireta da erodibilidade dos materiais utilizou-se os ensaios de desagregação ou *slaking test*, perda de massa por imersão e infiltrabilidade. Para a avaliação direta da erodibilidade foi utilizado o ensaio de Inderbitzen.

Através da metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) é possível entender e prever o comportamento dos solos frente à erosão. Essa metodologia teve origem com Nogami e Villibor (1979) a partir das limitações tradicionais para solos tropicais.

Esta metodologia é fundamentada em dois parâmetros principais: o coeficiente de sorção ( $s$ ), obtido no ensaio de infiltrabilidade, e a perda de massa por imersão ( $\pi$ ), obtido no ensaio de erodibilidade específica. Através da divisão do parâmetro “ $\pi$ ” por “ $s$ ”, é possível a classificar os solos em relação ao seu grau de erodibilidade. Segundo Nogami e Villibor (1995), os solos são considerados erodíveis quando a relação for superior ao valor 52 (Figura 12).

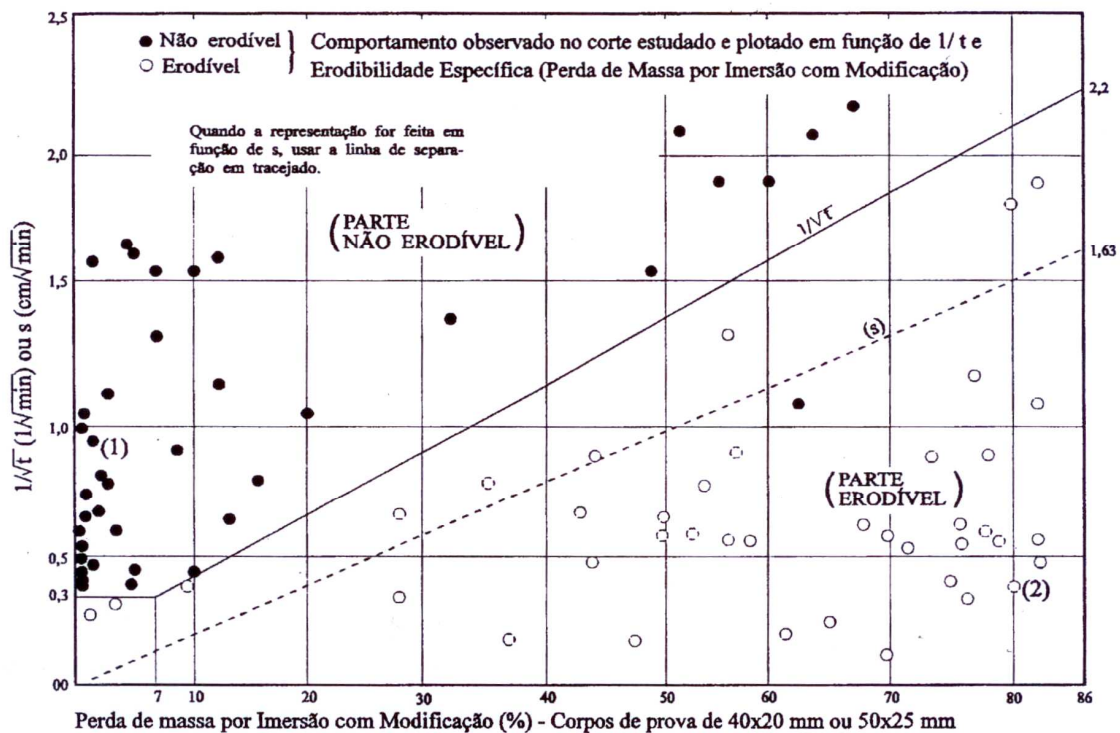


Figura 12: Critério de erodibilidade MCT segundo Nogami e Villibor (1995)

### 2.3.1 Ensaio de desagregação ou *slaking test*

Segundo Jachinto *et al* (2006), este ensaio foi utilizado na primeira vez no Brasil em 1958 pela engenheira Anna Margarida Fonseca quando estudava solos para o fim de fundação durante a construção de Brasília.

O objetivo principal deste ensaio é a avaliação qualitativa da desagregação de uma amostra de solo através da observação visual quando da imersão em água

destilada independente da dispersão do material. O método de preparo consiste em amostras indeformadas de solo em anéis cilíndricos de PVC com 10cm de diâmetro e 5cm de altura. Para a realização do ensaio as amostras são retiradas e colocadas sobre um filtro de papel e este de uma pedra porosa (Figura 13), permanecendo assim sobre quatro condições de submersão:

1. Com nível de água na base da amostra, por 30 minutos;
2. Com nível de água a 1/3 da amostra, por 15 minutos;
3. Com nível de água a 2/3 da amostra, por 15 minutos;
4. Com a amostra totalmente submersa, por 24 horas.

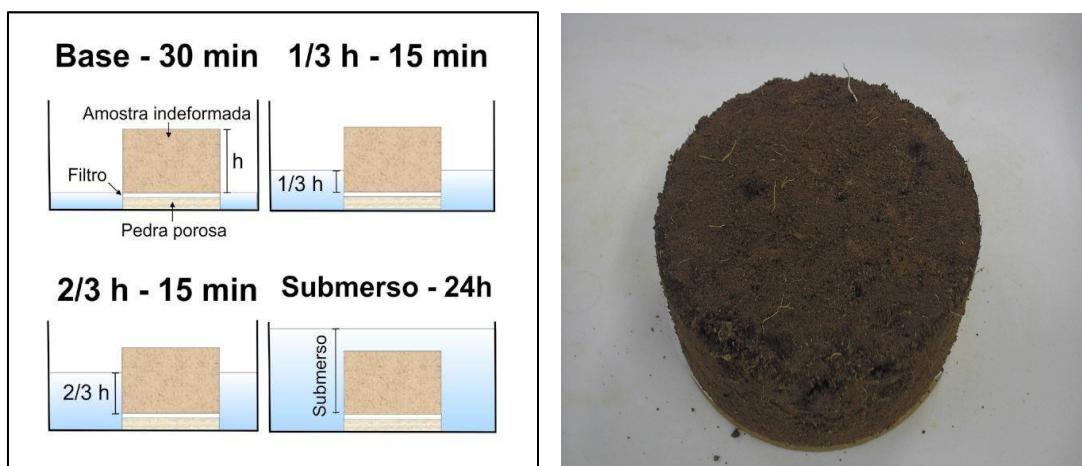


Figura 13 – À esquerda esquema representando as etapas do ensaio de desagregação. À direita, amostra pronta para o ensaio

A desagregação (ou *slaking*) pode ser compreendida como sendo o processo de ruína de uma porção de solo (ou rocha) não confinada imersa em água. Os solos erodíveis tendem a desagregar em água. A desagregação em água está associada a fenômenos de dispersão e de desaeração de solos não saturados.

O resultado do ensaio é qualitativo, em cada etapa é registrado o comportamento da amostra com fotografias e descrição da sua condição. Para isso, leva-se em consideração o abatimento ou inchamento da amostra, o raio de dispersão das partículas, a velocidade de desagregação das mesmas, a formação de fissuras no topo da amostra e as possíveis rupturas nas suas bordas.

O resultado desse ensaio é puramente qualitativo, sendo qual a relação entre o potencial de desagregação e a erodibilidade é evidente. Segundo Bastos (1999), os solos considerados altamente erodíveis desagregam totalmente em água, porém não se verifica uma relação direta entre o potencial de desagregação e os níveis intermediários e baixos de erodibilidade.

### 2.3.2 Ensaio de Infiltrabilidade

Este ensaio tem como objetivo a quantificação da velocidade da ascensão capilar em amostras de solo e rocha sedimentar. Para isso, foram utilizadas amostras indeformadas do horizonte superficial do solo e de rocha sedimentar (arenito) coletadas no interior da voçoroca em estudo.

No total foram ensaiadas 18 (dezoito) amostras, 9 (nove) para cada material amostrado, sendo 3 (três) amostras para cada condição: natural, seca ao ar (por 72 horas) e pré-úmida (durante 24 horas). O material utilizado foi confinado em cilindros de PVC com 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro.

O equipamento para este ensaio é constituído por um plano de madeira, estando acoplada à ele uma régua graduada e um tubo capilar de vidro (com diâmetro de 6 mm). Em uma de suas extremidades está ligado um reservatório (pedra porosa de granulação aberta) com o topo livre (Figuras 14).

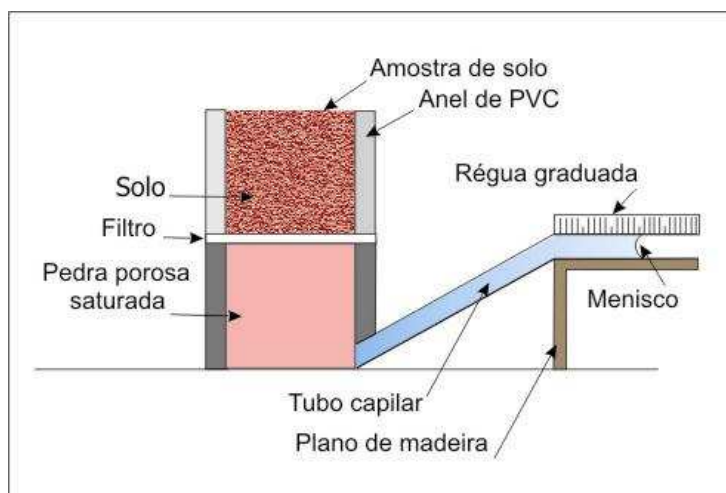


Figura 14 - Equipamento usado para ensaio de Infiltrabilidade (Tatto, 2007)

Para o ensaio, o tubo capilar é preenchido com água até que a mesma extravase no topo do reservatório da pedra porosa. Logo em seguida, é depositada, no topo da pedra porosa, a amostra com papel filtro na sua base (Figura 15).

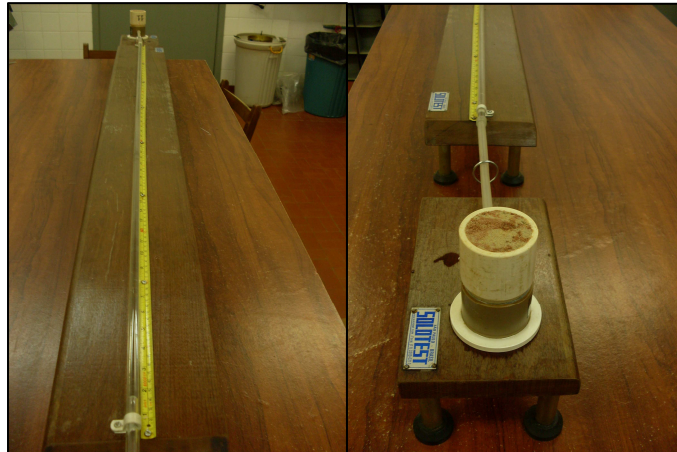


Figura 15 – Corpo de prova durante o ensaio de Infiltrabilidade

A partir daí, inicia-se a verificação da ascensão capilar em função do tempo. As medidas são realizadas através do deslocamento do menisco (cm) dentro do tubo capilar em uma relação de tempo quadrática (1, 2, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121 e 144 minutos) sendo a última medição efetuada após 24 horas do início do ensaio, tempo necessário para a saturação da amostra, cessando a ascensão capilar da água.

Com os dados referentes ao deslocamento do menisco (cm) e o tempo ( $\text{min}^{1/2}$ ), elabora-se um gráfico (Figura 16) de uma curva típica onde seu trecho inicial retilíneo forneceu o coeficiente de sorção “s” ( $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$ ), determinado através da relação:

$$s = \frac{(L_2 - L_1)S}{10(t_2 - t_1)A} \quad (1)$$

onde: S = área da seção do tubo capilar e A = área da seção da amostra.

As curvas  $L \times t^{1/2}$  possuem dois trechos distintos. O primeiro trecho apresenta-se íngreme, indicando a velocidade de ascensão capilar da água no solo. Quando

esta curva muda de inclinação, a velocidade de ascensão é mais lenta, indicando que a frente de saturação está próxima ao topo do corpo de prova. O coeficiente de sorção ( $s$ ) está relacionado à declividade do trecho inicial Pinheiro *et al* (2009).

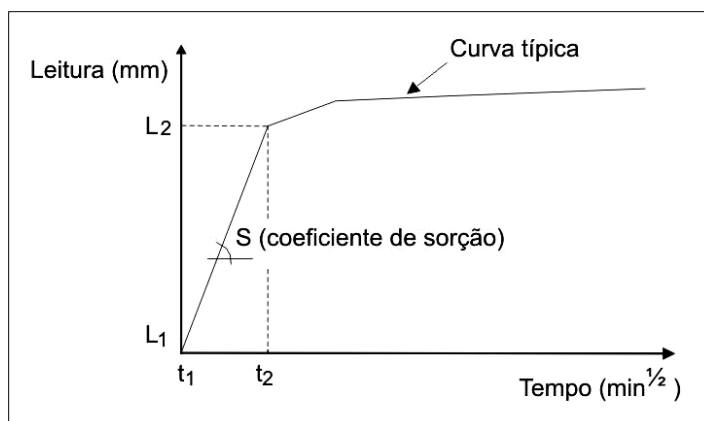


Figura 16- Curva típica do deslocamento do menisco x tempo para o ensaio de infiltrabilidade (metodologia MCT). Fonte: Bastos (1999)

### 2.3.3 Ensaio de perda de massa por imersão

Perda de massa por imersão ( $P_i$ ) é a porcentagem da massa seca da porção que se desprende do corpo-de-prova, quando o mesmo é preparado e imerso em água, sob condições padronizadas, em relação à massa seca de 10 mm de comprimento do referido corpo-de-prova (Figura 17).

Este método tem como principal objetivo a avaliação quantitativa do potencial de desagregação de amostras indeformadas de solo submersas em água. As amostras são confinadas em anéis cilíndricos de PVC com diâmetro e altura de 5 cm.

Para a realização do ensaio, rasam-se as amostras até restar 2,5 cm de solo no anel. Com o auxílio de um berço metálico como suporte, o anel é posicionado horizontalmente e, logo abaixo, coloca-se uma cápsula para recolher o material desprendido do anel. Todo esse procedimento é realizado dentro de um recipiente

com altura suficiente para cobrir o berço e o anel com água durante um período de 20 horas.

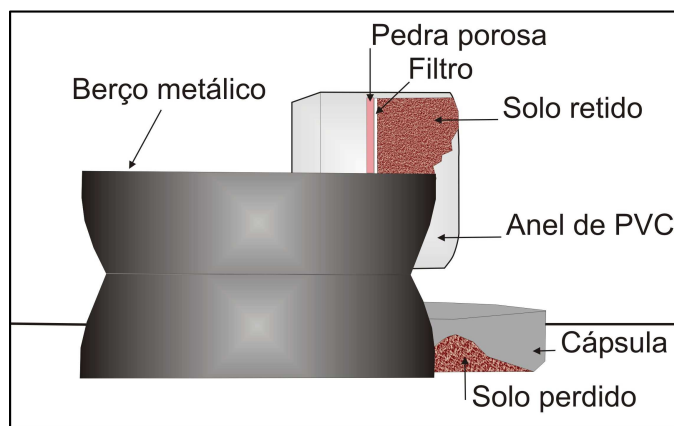


Figura 17 - Equipamento utilizado para o ensaio de perda de massa por imersão (Tatto, 2007)

Observa-se, nos primeiros minutos, o comportamento do corpo-de-prova, anotando eventuais peculiaridades (desagregação, desprendimento de bolhas, inchamento e trincamento). Após pelo menos 20 horas, esvaziar o recipiente de imersão; remover o molde mantendo-o na posição horizontal, a fim de evitar derramamento de solo; examinar e anotar a forma da amostra que permaneceu dentro do molde.

Em seguida, o material desprendido e o material restante dentro do anel são recolhidos, secados e pesados. O parâmetro de desagregação é obtido através da relação entre o peso seco desagregado e o peso seco total da amostra.

Para o cálculo da perda de massa por imersão ( $P_i$ ) utiliza-se a seguinte fórmula:

$$p_i = \frac{p_{seco}d}{p_{seco}t} \quad (2)$$

onde:  $p_{seco}d$  = peso de solo seco desagregado e  $p_{seco}t$  = peso de solo seco total da amostra.

O critério de erodibilidade baseia-se na relação entre perda de massa por imersão e o coeficiente de sorção (PI/s, determinado pela infiltrabilidade), onde valores correspondentes acima de 52 são considerados erodíveis.

#### 2.3.4 Ensaio de Inderbitzen

Segundo Bastos (1999), este tipo de ensaio tem como objetivo a avaliação direta de erodibilidade do solo, sendo apresentado por Inderbitzen em 1961. Conforme Jacintho *et al* (2006), o pioneiro na utilização desse ensaio para estudo da erosão superficial no Brasil foi Rego (1978) em taludes de solo residual de gnaiss no Rio de Janeiro.

Baseia-se num aparelho que consiste em uma rampa metálica, com inclinação variável, onde é fixado um anel metálico contendo a amostra de solo (Figura 18). A simulação do escoamento superficial é feita sobre essa rampa, permitindo observar e comparar o processo erosivo em uma amostra de solo (Lemos, 2007).

As amostras são confinadas em anéis de PVC com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, sendo colocadas em uma rampa metálica com graduação de inclinações simulando diferentes declividades e um rotâmetro para controle de vazões.

O equipamento consiste em uma estrutura metálica, composta de uma rampa articulada de 25 cm de largura e 60 cm de comprimento, com inclinações variáveis de 0° a 54°, sendo suportada por uma barra metálica fixa na estrutura principal (Figura 18).





Figura 18 - Equipamento usado para ensaio Inderbitzen (Tatto, 2007)

Esta rampa é dotada de uma abertura circular central de 10 cm de diâmetro, onde é acoplado um anel contendo a amostra de solo/rocha indeformada, de tal maneira, que seu nível superior coincida com o nível da rampa, para que o escoamento laminar entre em contato com o topo da amostra.

As amostras são manipuladas em três condições: natural, seca ao ar e úmida. Na condição natural, as amostras utilizadas apresentam as mesmas características de umidade da data de coleta, pois foram armazenadas sob parafina e proteção plástica.

Para a condição seca, as amostras são retiradas da sua proteção e secam durante aproximadamente 72 horas ao ar antes de serem utilizadas. Na condição pré-umedecida, as amostras de solo são retiradas da proteção e repousam sob uma lâmina de água também por 72 horas.

A Figura 19 mostra etapas do ensaio que consiste na colocação da amostra na rampa que é regulada com uma determinada inclinação e recebe vazão de água especificada. Neste trabalho foram realizados ensaios com inclinações de rampa de 10, 26, 45 e 54° e vazões de 3 e 6 litros.



Figura 19 - Etapas da realização do ensaio de Inderbitzen

Em seguida, recolhe-se o material desagregado pela amostra em recipientes em diferentes períodos: 1, 5, 10 e 20 minutos. O material recolhido dos recipientes é passado em peneiras de 0,42mm e 0,074mm.

Também é recolhida uma porção de água (300 ml) do recipiente que contém o material em suspensão não retido na peneira de 0,074 mm. Logo após esse processo, o material é secado e pesado, onde os resultados são plotados em uma planilha que indica a relação entre a perda de solo por unidade de amostra em função do tempo total do ensaio.

Os resultados obtidos são plotados em um gráfico que representa a relação entre a perda de solo acumulado por unidade de área da amostra ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) e o tempo total de ensaio em minutos (Figura 20).

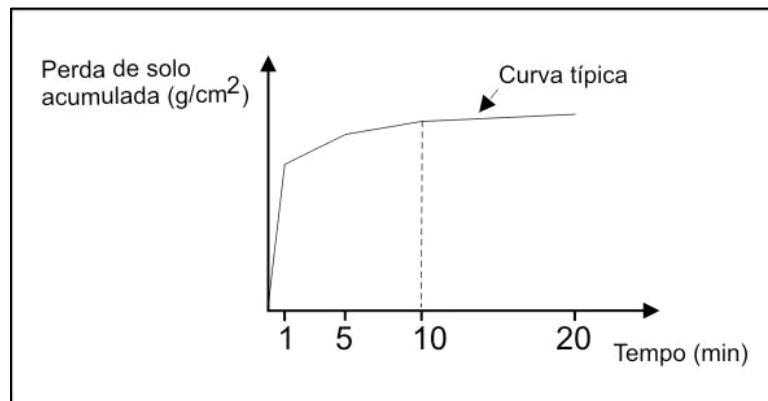


Figura 20 - Curva típica da perda acumulada de solo por área de amostra *versus* tempo para o ensaio Inderbitzen. Fonte: Bastos (1999)

Os dados da perda de solo ( $\text{g/cm}^2/\text{min}$ ) de cada ensaio são plotados junto com a tensão hidráulica atuante no ensaio,  $\tau_h$  (Pa), sendo esta estimada por Bastos (1999a) através da relação:

$$\tau_h = \gamma \cdot h \cdot d \quad (3)$$

onde:  $\gamma$  = peso específico da água ( $\text{N/cm}^3$ ),  $h$  = altura da lâmina d'água de fluxo (cm) e  $d$  = declividade da rampa.

A altura da lâmina d'água ( $h$ ) foi estimada a partir dos valores da velocidade de escoamento (medida pela técnica do corante), da vazão e da largura da rampa através da relação:

$$h = \frac{Q}{v \cdot L} \quad (4)$$

onde:  $Q$  = vazão do fluxo ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ),  $v$  = velocidade do escoamento ( $\text{cm/s}$ ) e  $L$  = largura da rampa (cm).

Os valores da velocidade de escoamento ( $v$ ), altura da lâmina d'água ( $h$ ) e tensão cisalhante hidráulica ( $\tau_h$ ) para combinações de vazão ( $Q$ ) e inclinação de rampa ( $i$ ) são apresentados na Tabela 5, conforme Bastos (1999).

Tabela 5 - Valores de velocidade de escoamento ( $v$ ), altura da lâmina d'água ( $h$ ) e tensão cisalhante hidráulica ( $\tau_h$ ) para combinações de vazão ( $Q$ ) e inclinação de rampa ( $i$ )

$i$	10°		26°		45°		54°	
<b>Q (l/min)</b>	3	6	3	6	3	6	3	6
<b>v (cm/s)</b>	31,05	50,64	57,05	96,65	77,36	145,86	83,50	169,97
<b>h (cm)</b>	0,064	0,079	0,035	0,041	0,026	0,027	0,024	0,024
<b><math>\tau_h</math> (Pa)</b>	1,136	1,393	1,710	2,018	2,585	2,742	3,297	0,239

Fonte: Bastos (1999)

O gráfico apresentado na Figura 21 é formado com os dados da  $\tau_h$  versus perda de solo ( $\text{g/cm}^2/\text{min}$ ) resultou no ajustamento de uma reta onde foram estimados parâmetros de erodibilidade.

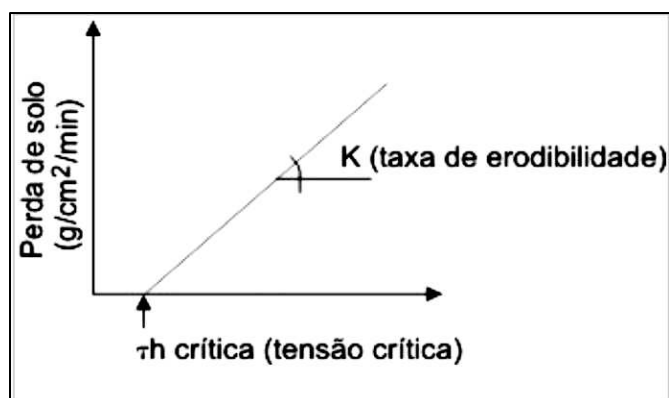


Figura 21 - Ajustamento da reta onde são estimadas a taxa de erodibilidade ( $k$ ) e a tensão cisalhante hidráulica crítica,  $\tau_{h \text{ crit}}$ . Fonte: Bastos (1999)

Esses parâmetros são a taxa de erodibilidade,  $k$  ( $\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ ), representa pelo gradiente da perda de solo em relação as tensões hidráulicas aplicadas, e a tensão cisalhante hidráulica crítica,  $\tau_{h \text{ crit}}$  (Pa), representando a mínima tensão hidráulica causada pela lâmina d'água sobre o solo, que resulta na perda de solo inicial.

### **3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Os resultados deste trabalho são apresentados em três subítens: i) caracterização regional da microbacia do arroio Sarandi e inclui a localização, a caracterização física, uso e ocupação do solo, descrição e localização dos principais processos erosivos e a presença de feições de pseudo-carste; ii) voçoroca do Buraco Fundo que mostra a caracterização dos materiais que compõem a voçoroca, feições de pseudo-carste associadas, análise da forma da vertente onde a incisão está inserida, bem como feições erosivas encontradas em seu interior; e iii) avaliação geotécnica e de erodibilidade onde consta os resultados dos ensaios de laboratório.

#### **3.1 Caracterização regional da microbacia do arroio Sarandi**

A microbacia do Arroio Sarandi está localizada na região central do Rio Grande do Sul, na província geomorfológica denominada Depressão Central. Abrange uma área de aproximadamente 22 Km<sup>2</sup> nos municípios de Santa Maria e Dilermando de Aguiar, entre as coordenadas 54<sup>o</sup> 7' 35"; 53<sup>o</sup> 57' 24.50" de longitude oeste e 29<sup>o</sup> 50' 58"; 29<sup>o</sup> 43' 27" de latitude sul (Figura 22). Fazem parte desta bacia as localidades de Alto das Palmeiras, Laranjeira, Sarandi, Picada o Gama, Sobradinho e São José da Porteirinha.

O Arroio Sarandi apresenta uma extensão em torno de 17 Km, sendo seus principais afluentes a Sanga do Sobradinho e a Sanga da Laranjeira, além de outros pequenos cursos fluviais que não apresentam nomenclatura. Nasce no município de Dilermando de Aguiar numa altitude aproximada de 180 m, unindo-se com o Arroio Raimundo na localidade de Alto das Palmeiras, já no município de Santa de Maria, e juntos deságuam no Arroio Arenal, contribuindo para a formação da Bacia Hidrográfica do rio Vacacaí.

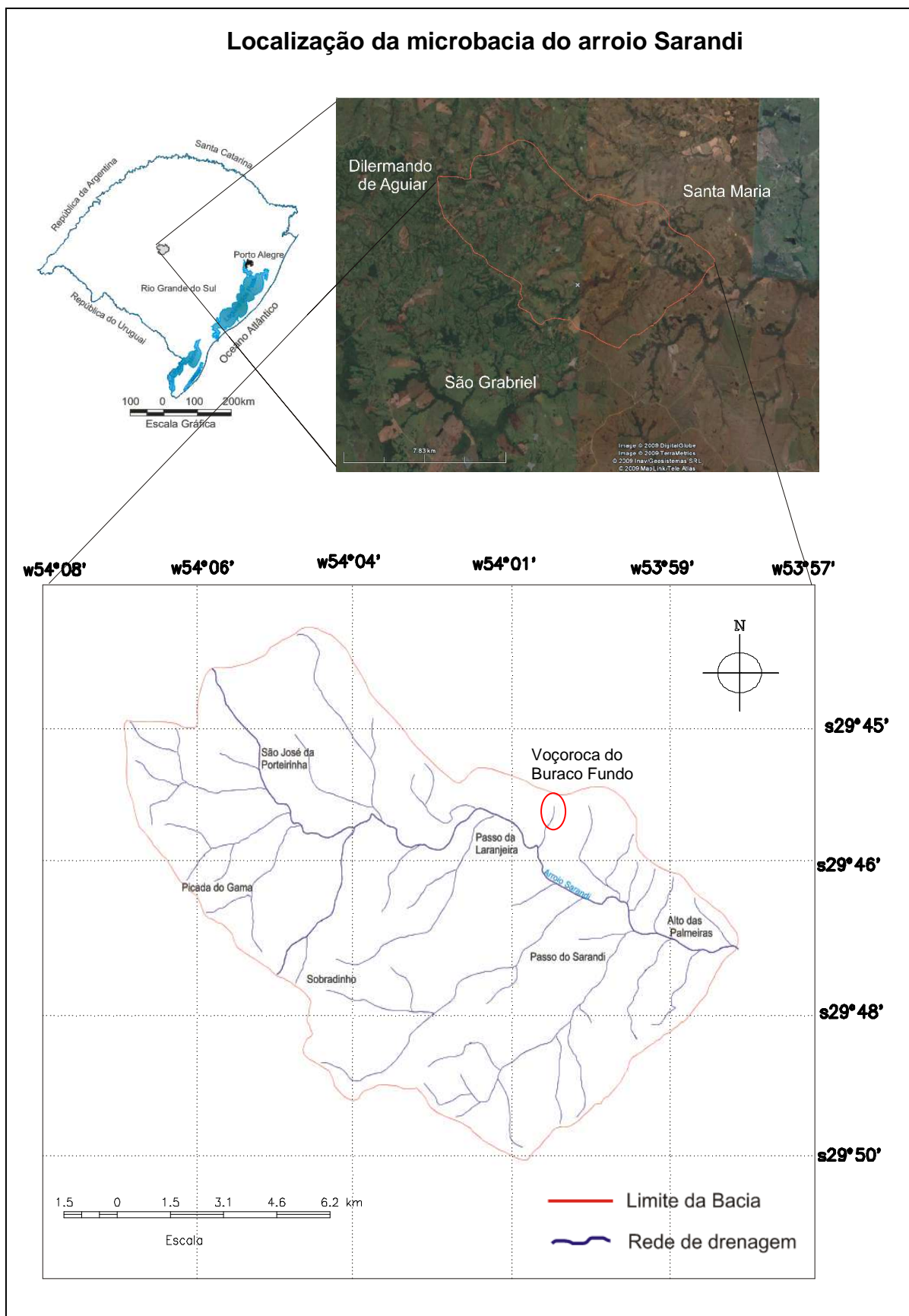


Figura 22 - Localização geográfica da microbacia do Arroio Sarandi. A imagem de satélite pertence ao software Google Earth (versão 5.0/2009). O mapa de localização foi elaborado a partir do software Spring (4.0)

Os cursos d'água são em sua maioria perenes, apesar de seu volume de água diminuir razoavelmente durante as estações mais secas do ano. Parte dos cursos d'água são classificados como consequentes, pois suas direções são determinadas pela declividade do terreno, em geral coincidindo com a direção da inclinação principal das camadas litológicas, tais cursos formam cursos de lineamento reto de direções variando entre NW e EW seguindo o padrão tectônico da região, compondo uma drenagem paralela em direção às baixadas compondo uma drenagem paralela.

A microbacia do Arroio Sarandi classifica-se como uma microbacia endorreica, cujos canais são de primeira, segunda e terceira ordens. Os canais fluviais apresentam convergências em ângulos retos que constituem diferentes formas atribuídas aos fenômenos tectônicos. Seu padrão dendrítico apresenta tributários paralelos e unindo-se ao curso d'água principal em ângulos agudos.

Essa região apresenta um clima Subtropical, onde as temperaturas médias anuais são em torno de 22°C, ocorrendo grandes oscilações térmicas ao longo do ano, pela presença de estações. Os índices pluviométricos variam entre 1500 mm e 1900mm. Conforme Köppen, esse tipo de clima é classificado como mesotérmico brando (Cfa).

A microbacia em estudo possui uma vegetação caracterizada pela presença de mata ciliar na margem da maioria dos cursos de água devido à maior concentração da umidade nos vales e planícies aluviais. Pode-se encontrar também, pequenas matas fechadas constituídas por árvores nativas (Figura 23).

Apresenta ainda, uma vegetação de herbáceas e arbustos, a exemplo dos campos dos pampas gaúchos, que cobrem quase que totalmente os campos e coxilhas da região. A retirada desta vegetação para o plantio, para a criação de animais e para o comércio de madeira, tem contribuído significativamente para o aumento da erosão nesta região.

A geologia local corresponde à Formação Santa Maria, Membro Passo das Tropas (MACIEL FILHO, 1990). Sua litologia caracteriza-se pela presença de arenitos que variam desde de finos até conglomerático, moderadamente selecionados, organizados em sets com estratificações cruzadas acanaladas e planares de pequeno a médio porte. De forma subordinada ocorrem siltitos e pelitos, avermelhados, dispostos em camadas lenticulares com uma restrita extensão lateral, segundo Scherer (1998) *apud* Holz (2000).



Figura 23 - Árvores nativas, localidade de Alto das Palmeiras

A microbacia do Arroio Sarandi, localiza-se na Depressão Periférica Sul-riograndense. Segundo Werlang (2004), os sedimentos recentes do Quaternário são provenientes do rebordo do Planalto e, ao depositar-se ao longo dos cursos d'água, constituem as planícies aluviais. As formas de relevo predominante são coxilhas suaves e alongadas (Figura 24), aparecendo tanto em conjunto como isoladamente.



Figura 24 - Presença de coxilhas suaves e alongadas no primeiro plano. No segundo, uma vertente com declive mais acentuado



A Depressão Periférica Sul-riograndense possui, como característica geral, a presença de formas de topos convexos, convexos-côncavos, côncavos-convexos ou planos. Em determinadas áreas aparecem colinas e encostas, onde podem ocorrer processos erosivos de ordem natural ou acelerada (Werlang, 2004).

Ao longo da maior parte da extensão do Arroio Sarandi, as altitudes ficam em torno dos 80 m. Próximo à cabeceira, as altitudes variam entre 100 e 200 m, onde o ponto mais elevado ultrapassa os 210 m nas proximidades do Cerro da Porteirinha, na localidade de São José da Porteirinha/Dilermando de Aguiar, extremo oeste da área da estudada.

Na área estudada predominam argissolos, caracterizados pela ocorrência de um horizonte A seguido por um horizonte E ou B. O horizonte B, chamado de horizonte B textural (Bt), recebe esse nome devido ao teor de argila tornando a textura desse horizonte mais argilosa do que a do horizonte imediatamente acima.

Por apresentarem uma porcentagem alta de fração argila, esses solos geralmente são considerados solos com drenagem moderada até baixa. Quando a drenagem é fortemente impedida devido a esse processo, geralmente forma-se o horizonte E devido ao acúmulo de água no topo do B. Na superfície do solo o teor de argila é baixo, mas em subsuperfície é médio/alto o que caracteriza um aumento do teor de argila com a profundidade.

Esses solos são, geralmente, resistentes à erosão em consequência da matéria orgânica, da presença de raízes e de minerais como óxido de Fe. No entanto, devido à presença de argila nas camadas inferiores, a velocidade de infiltração da água é muito rápida na superfície e lenta em subsuperfície, podendo ser suscetíveis a processos erosivos.

A ocupação predominante entre os habitantes desta área é a agricultura de subsistência, cujos principais produtos cultivados são o milho, a mandioca, a cana-de-açúcar, a batata-doce e o feijão.

A pecuária também se destaca pelos rebanhos bovinos, suínos, eqüinos e ovinos. Apesar da maioria das propriedades serem de pequena e média extensão, predomina a pecuária extensiva para a subsistência (Figura 25) e, principalmente para fins comerciais.



Figura 25 - Pecuária extensiva em pequena propriedade rural

Grande parte das propriedades localizada na região da microbacia do Arroio Sarandi pertence aos seus moradores, apesar de não serem muito extensas, aproximadamente entre 15 e 100 ha, apenas uma pequena parcela da população possui além dos 100 hectares. Há também latifúndios, porém em menor número, em sua maioria produtivos, destinados à criação de gado e ao cultivo da soja.

Na microbacia foi possível observar vários focos de erosão correspondentes à ravinas, voçoroca e pseudo-carste. Depressões do tipo dolinas e uvalas na meia encosta em superfícies quase horizontalizadas. As dolinas e uvalas são feições típicas de relevos cársticos onde ocorrem espessos pacotes de rochas calcárias (Figura 26).

A área de estudo, porém, não é formada por terrenos calcários, e desta forma optou-se por chamar tais depressões de pseudo-dolinas e pseudo-uvalas. Halliday (2004) utiliza o termo pseudo-carste para definir relevos tipo cárstico presentes em rochas não carbonáticas, que apresentam elevada solubilidade tanto pelas águas meteóricas quanto as subterrâneas.

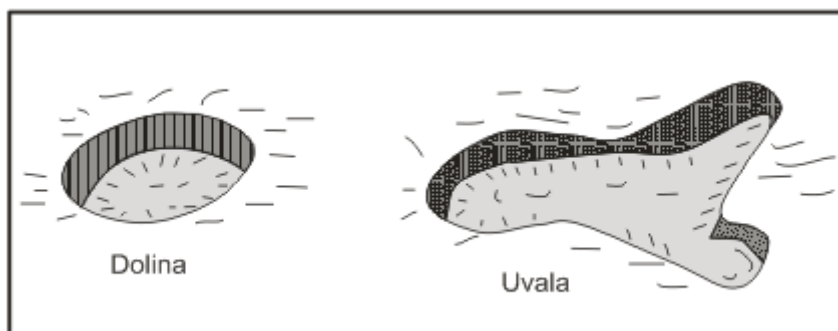


Figura 26 - Representação de dolinas e uvalas. Fonte: Bigarella (2003).

No Rio Grande do Sul, algumas destas feições como pseudo-dolinas, pseudo-uvalas e pseudo-poljés foram detectadas na Depressão Central, e no Planalto Vulcânico, sendo relacionadas à terminologia pseudocárstica.

Ambientes com presença de pseudo-carste são frágeis devido à solubilidade da rocha, apresentando susceptibilidade a processos erosivos, bem como vulnerabilidade a contaminação dos aquíferos. As depressões do tipo pseudo-dolina ou pseudo-uvala auxiliam na alimentação dos aquíferos subterrâneos.

Pseudo-dolinas podem ser descritas como depressões arredondadas ou alongadas. A coalescência de duas ou mais dolinas gera uma uvala. Estas, portanto, cobrem uma área maior e permitem ver as formas arredondadas das dolinas coalescentes.

A água acumulada nessas depressões pode evaporar, fluir pelos desaguadouros quando do transbordamento ou infiltrar. A infiltração é lenta e por isso é comum ocorrer o transbordamento em épocas de chuva, fato este que acelera a erosão nestes locais.

A forma circular das pseudo-dolinas permite, em períodos de chuva intensa, que estas sejam preenchidas por água. É uma prática comum na região, nas porções mais baixas da pseudo-dolina, a construção de um barramento (comumente chamado de taipa) para armazenamento de água para dessedentação de animais. Estes barramentos não possuem vertedouro o que em períodos de chuva podem romper e acelerar o processo erosivo.

Próximos as pseudo-dolinas, ocorrem os chamados desaguadouros, onde a água subterrânea aflora na superfície com um volume muito baixo em períodos de

pouca chuva. As depressões comprovam que há ou houve um afundamento do terreno, isto é uma subsidência. A ocorrência dessas subsidências pode ser explicada pela existência de uma camada superficial arenosa, que permite grande infiltração de água.

O subsolo tem uma camada argilosa, que permite uma baixa infiltração de água. A água que penetra o horizonte superficial escoar sobre a superfície da camada pouco permeável, criando uma espécie de duto pelo solapamento da camada arenosa, já que a a camada argilosa é mais resistente à desagregação.

O solapamento da parte superior arenosa vai ocorrendo até que, a parte superior cede, formando as pseudo-dolinas. Em muitos destes locais, é possível ver a água escoando, como se fosse um rio subterrâneo. O solapamento pode evoluir para uma voçoroca.

A Figura 27 mostra, em imagens do Google Earth Pró na escala 1:25.000, a localização das feições descritas em campo e a localização da voçoroca do Buraco Fundo. Pode-se perceber que há uma concentração de feições de pseudo-carste a NE, W e SE da microbacia e, na maioria das vezes, estão associadas a fraturas, mostrando-se alinhadas segundo direção NE, predominantemente.

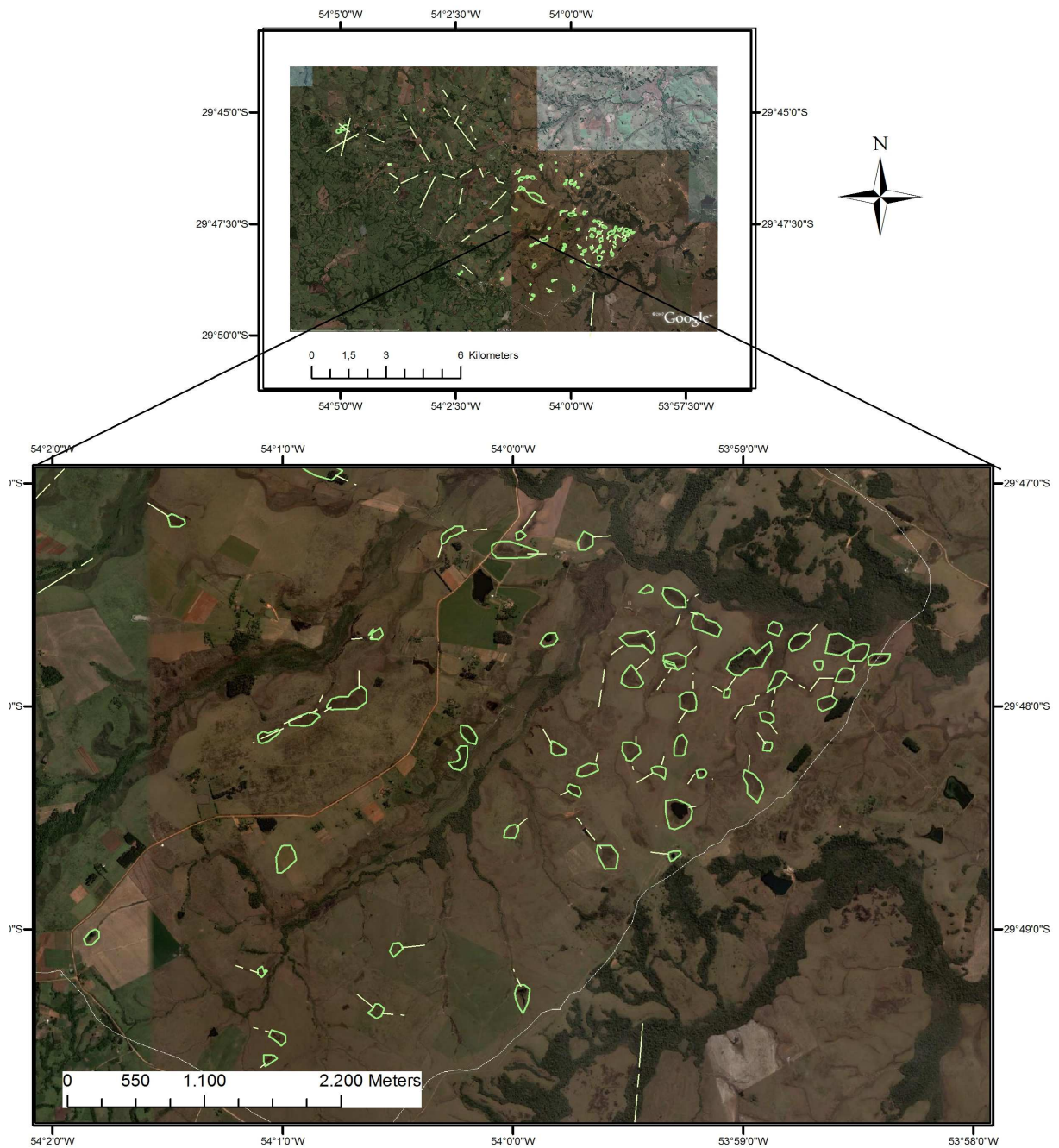


Figura 27 - Localização de pseudo-dolinas e fraturas relacionadas em imagem do Google Earth-Pró.

A Figura 28 mostra a ocorrência de pseudo-dolinas, com características semelhantes entre si, porém em estágios diferentes de evolução, na localidade de Alto das Palmeiras.

## Pseudo-carste na microbacia do arroio Sarandi



Focos de erosão: **a)** e **b)** Pseudo-dolinas em forma circular e orifício central mais profundo; **c)** Indícios da junção de duas pseudo-dolinas formando uma pseudo-uvula, a seta indica o local de intersecção; **d)** Pseudo-dolina com diferentes degraus de abatimento indicados pelas setas; **e)** Pseudodolina com água represada, a direita é possível verificar o caminho deixado pelos animais; **f)** Voçoroca originada pela erosão superficial de pseudo-dolinas; **g)** Erosão em sulcos e ravinas

Figura 28 - Focos de erosão (pseudo-carste) na microbacia do arroio Sarandi

Na Figura 28a aparece uma pseudo-dolina de pequenas dimensões, com aproximadamente 1 m de diâmetro e 0,7 m de profundidade. É possível verificar que após o abatimento da sua base, as camadas superficiais do solo ficaram expostas, o que ocasionará aumento rápido das suas medidas. Trata-se de uma erosão ainda recente em função do seu tamanho e da inexistência de vegetação no seu interior.

Na Figura 28b, observa-se as mesmas características da figura anterior, porém num estágio mais avançado de desenvolvimento, percebido através das suas dimensões que já alcançam 1,5 m de diâmetro e aproximadamente 1 m de profundidade. Além disso, a vegetação de gramíneas já toma conta do seu interior, indicando a presença de água e um período maior de existência.

Na Figura 28c duas pseudo-dolinas com indícios de conexão entre elas, prestes a tornarem-se uma pseudo-uvala elíptica e de maiores dimensões. Na formação localizada na parte superior da imagem, as camadas superiores do solo estão visíveis e expostas aos agentes erosivos superficiais, por isso já possui 2 m de diâmetro e mais de 1,5 m de profundidade.

Já a formação localizada na parte inferior da imagem 28c tem sofrido menos a ação erosiva, pois encontra-se totalmente vegetada, sem a exposição de solo. Apresenta uma profundidade em torno de 0,7m e diâmetro de 1,5x2 m.

Uma formação de maiores proporções com aproximadamente 4 a 5 m de circunferência e quase 3 m de profundidade pode ser vista na Figura 28d. A sua rápida evolução se deve à exposição das camadas superficiais e subsuperficiais do solo. Seu avanço se dá por uma seqüência de abatimentos que estão em diferentes níveis ou degraus do terreno.

Na Figura 28e a erosão bastante acelerada apresenta 7 a 8 m de diâmetro e 3 m de profundidade. Devido ao afloramento do lençol freático no seu interior, houve um barramento da sua parte inferior formando assim, um pequeno açude para a dessedentação animal. Por isso é possível verificar na presença de vários caminhos ao redor da formação, fato esse que tende a aumentar o diâmetro da incisão.

Na Figura 26f, nota-se uma incisão com 10 m comprimento e 6 m de largura, de pouca profundidade (em torno de 1,7 m). Neste local a água do escoamento superficial está atuante, pois é possível verificar desabamentos recentes e intensos na cabeceira da incisão. No seu interior o nível d'água subterrâneo está aflorante. Pode-se dizer que uma pseudo-dolina sofreu erosão superficial e originou uma

voçoroca de pequenas dimensões, pois é possível verificar o afloramento do lençol freático no seu interior.

A Figura 28g mostra erosão em sulcos e ravinas provocadas, quase que exclusivamente, pelo pisoteio do gado. Associados a isso, estão a declividade do terreno e a fragilidade do solo arenoso e da rocha sedimentar.

### **3.2 Voçoroca do Buraco Fundo: Localização e características**

Para o estudo mais detalhado do processo erosivo, foi escolhida a voçoroca do Buraco Fundo pelo seu estágio relativamente avançado de desenvolvimento e apresentar, durante os últimos 30 anos, um avanço de 40 m, segundo moradores da região.

A Voçoroca do Buraco Fundo está localizada na comunidade de Alto das Palmeiras/Santa Maria. Encontra-se encaixada na rede de drenagem (Figura 29) entre as coordenadas  $29^{\circ} 45' 57''$  e  $29^{\circ} 46' 02''$  de latitude sul;  $54^{\circ} 00' 35''$  e  $54^{\circ} 00' 27''$  de longitude oeste, na margem direita do arroio Sarandi. Apresenta aproximadamente 300 m de extensão, 180 m de largura e 10 m de profundidade junto à sua cabeceira.

A região de entorno da voçoroca apresenta um relevo suave, porém verifica-se declividade mais acentuada ao longo de sua extensão. A cota de altitude de sua cabeceira fica em torno de 142 m em uma declividade de aproximadamente  $15^{\circ}$ .

A forma da vertente onde está a voçoroca é convexo-côncava onde sua cabeceira está localizada na parte convexa e sua porção intermediária na parte côncava.

Na porção convexa, o avanço do processo erosivo se dá por escorregamentos circulares. Já na porção côncava, a evolução se dá pela concentração das linhas de fluxo subterrâneo e superficial, onde ocorrem pseudo-dolinas e pseudo-uvalas.

A voçoroca desenvolveu-se segundo uma direção preferencial relacionada à linhas de falha cuja orientação é  $N20-30^{\circ}E$  correspondente às principais atitudes das falhas encontradas na região, nas quais estão encaixadas a maioria dos cursos d'água.



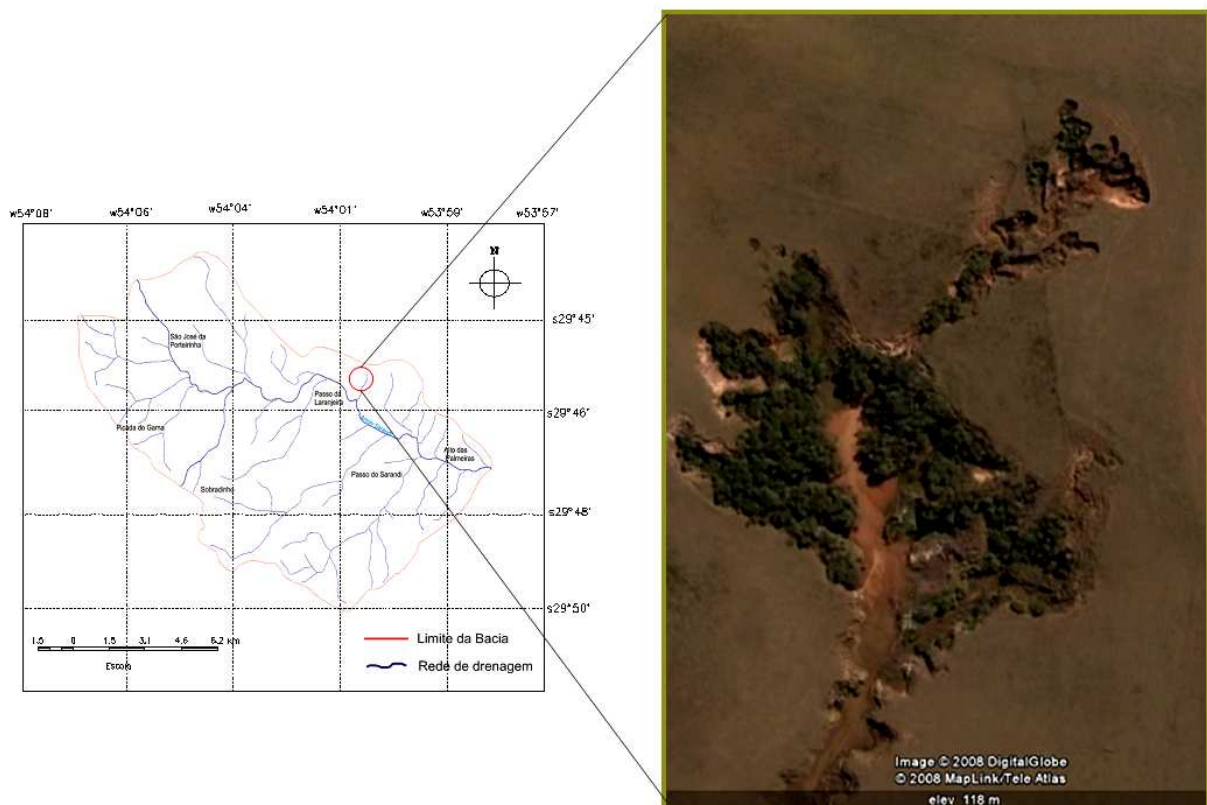


Figura 29 - Localização da Voçoroca do Buraco Fundo na microbacia do Arroio Sarandi. Imagem Google Earth (versão 5.0/2009)

Seu desenvolvimento, isto é, suas ramificações também mostram alinhamento condizente com o padrão estrutural encontrado na microbacia do arroio Sarandi. Desta forma, suas ramificações que representam o avanço do processo erosivo, mostram-se alinhadas segundo N35-50°W preferencialmente e WS (variando em torno de 10°) subordinadamente.

A Figura 30 pode-se observar que as pseudo-dolinas (já em avanço para se tornarem pseudo-ovalas), mostram um alinhamento segundo a direção NW relacionado à presença de falhas. Um indício destas falhas é o alinhamento dos pináculos que se encontram no interior da voçoroca.

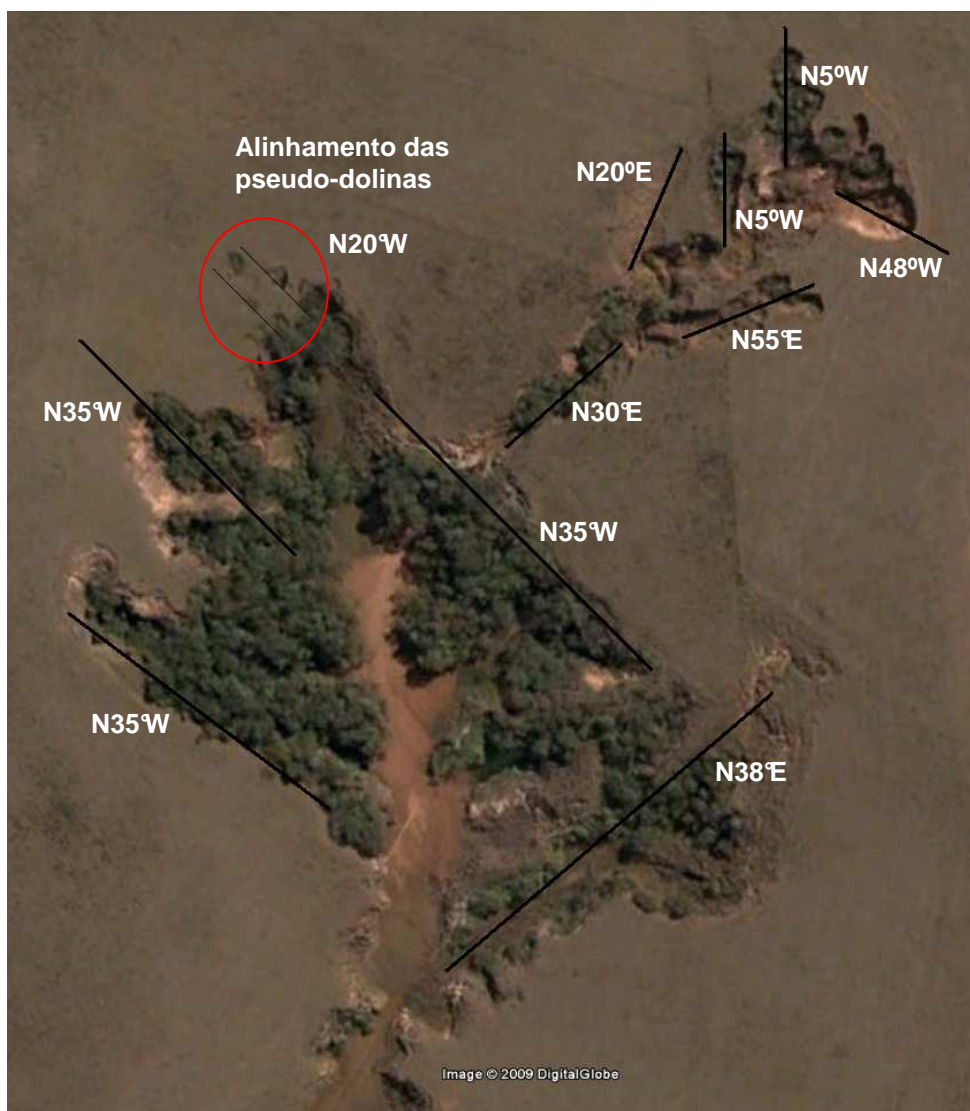


Figura 30 - Alinhamentos das direções de falhas na voçoroca do Buraco Fundo

A voçoroca do Buraco Fundo está conectada à rede hidrográfica (afluente de 1<sup>o</sup> ordem do arroio Sarandi), evoluindo a montante por escorregamento circulares. O processo de aprofundamento da incisão está praticamente estacionado, pois a erosão já atingiu o lençol freático. A voçoroca atinge as subdivisões *footslope*, *backslope* e *shoulder*. Ainda não atingiu as subdivisões *toeslope* (área mais plana do terreno, que corresponde à várzea do rio) e *summit* (área mais elevada do terreno, que corresponde ao topo da vertente), pois trata-se de um processo erosivo intensamente ativo.

A incisão se estabelece em um pacote de rochas sedimentares pertencentes a Formação Passo das Tropas, intercalando camadas de areias finas e mais

grossas com lentes siltoargilosas (MACIEL FILHO, 1990). Os solos são do tipo argissolo de espessura variável.

Na área mais ao sul da voçoroca, observa-se ainda um fenômeno, relacionado á composição do solo, conhecido como greta de contração. Este fenômeno ocorre devido à presença argilominerais expansivos que se expandem quando o solo está úmido e se contraem quando a água evapora.

Em decorrência deste movimento de contração e expansão, originam-se “trincas” que dividem o solo em pequenos blocos facilmente erodíveis. É possível perceber a presença de diferentes formações vegetais ao longo de quase toda a extensão da voçoroca (Figura 31). Essa vegetação é constituída por árvores de médio e grande porte à jusante e, nas demais áreas, vegetação herbácea.



Figura 31 - Presença de vegetação ao longo da área e no interior da voçoroca

Em parte, a ocorrência da vegetação é explicada pelo fato de que o horizonte A (mais fértil e rico em matéria orgânica) ao ser levado, por escorregamento, para o interior da voçoroca leva consigo parte da vegetação que se regenera na base do talude com o passar do tempo.

É possível afirmar que no local, a cobertura vegetal exerce um importante papel para o controle da erosão, pois diminui o impacto das gotas de chuva no solo promovendo também o ancoramento de grandes massas de solo. No entanto,

mesmo ocorrendo uma transferência de tensões de cisalhamento do solo para as raízes, os demais fatores que condicionam o processo erosivo, nesta voçoroca, se sobressaem em relação à cobertura vegetal favorecendo, então, a evolução da voçoroca.

O avanço da voçoroca está relacionado à presença de pseudo-dolinas e escorregamentos rotacionais. Na porção sudoeste da voçoroca, é possível perceber a formação de pseudo-dolinas próximas ao anfiteatro da incisão (Figura 32). Essas formas são decorrentes de abatimentos gerados pelo fluxo subterrâneo que erodiu parte da camada de arenito da base, deixando o material superficial sem sustentação o que originou o seu colapso.

Neste local, porção sudoeste da voçoroca, desenvolveu-se uma ramificação segundo esta mesma direção relacionada à presença de três pseudo-dolinas que encontram-se muito próximas. É possível perceber que a erosão superficial está carregando material terroso que separa essas feições, fazendo com haja a sua união, formando uma ravina e aumentando a incisão erosiva.

Em algumas delas verifica-se, a presença de canais subsuperficiais formados pela água subterrânea com contribuição das águas superficiais em períodos de chuvas intensas.

As pseudo-dolinas ocorrem em vertente côncava, com inclinação de aproximadamente  $5^{\circ}$ , onde o fluxo de água tanto superficial quanto subterrâneo se concentram em sua base, deixando o material superficial exposto aos agentes erosivos. É possível verificar a existência de vegetação no interior das formações circulares, devido à presença de água no seu interior.

# Pseudo-dolinas na voçoroca do Buraco Fundo

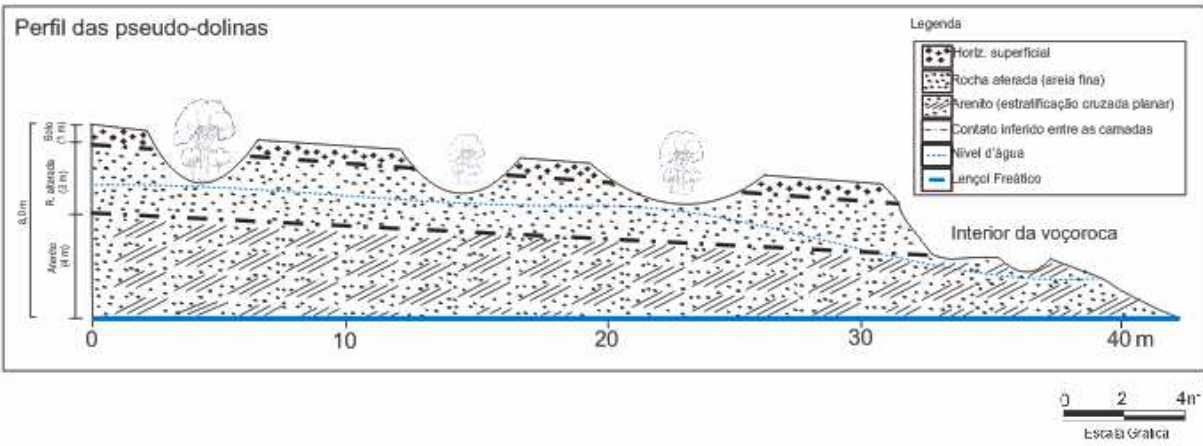


Figura 32 – Pseudo-dolinas próximas ao anfiteatro da voçoroca

Os movimentos rotacionais (Figura 33) são, na voçoroca do Buraco Fundo, os mecanismos responsáveis pelo avanço da incisão erosiva tanto para montante como em largura. Estes ocorrem pela saturação do solo em períodos chuvosos, pela erosão interna das camadas da base dos taludes fazendo com que estes percam sua sustentação e também pela carga exercida pelo pisoteio do gado no entorno da incisão.

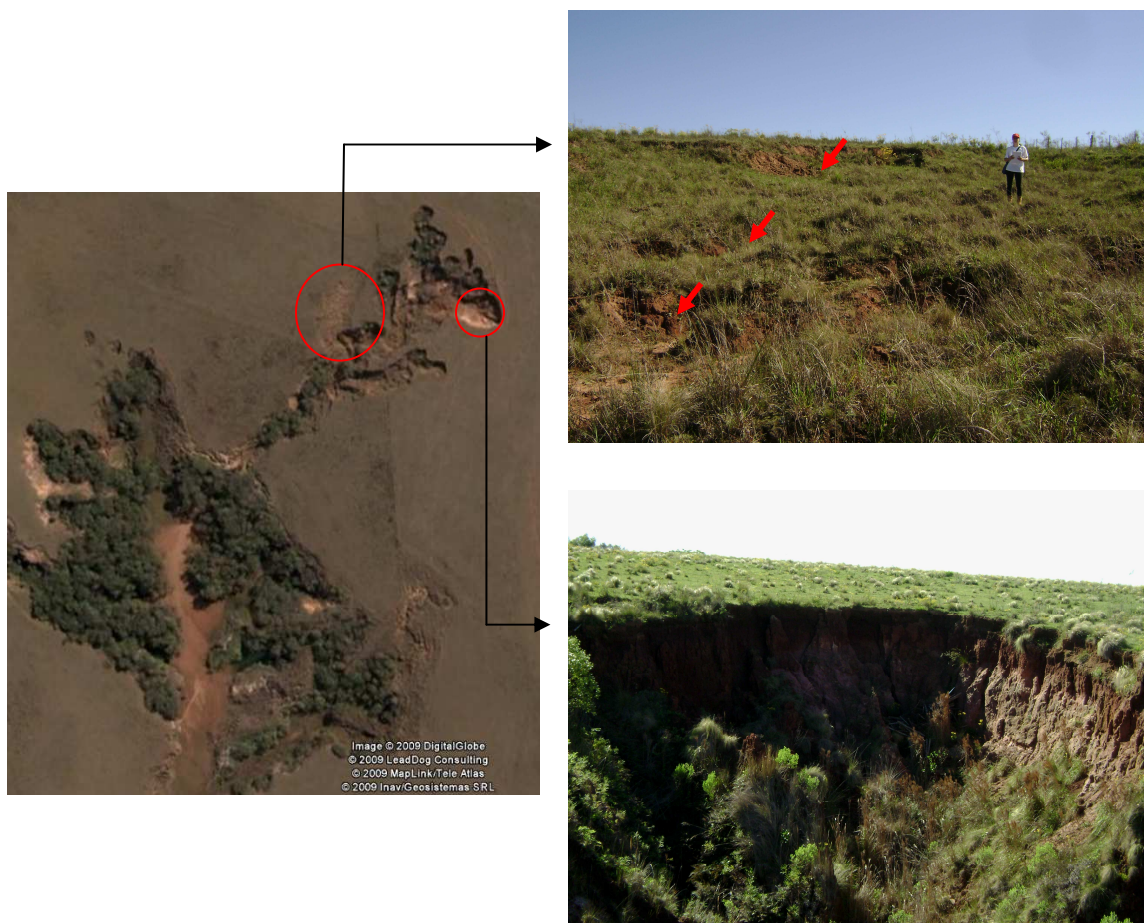


Figura 33- Escorregamentos rotacionais responsáveis pela evolução lateral da voçoroca, as setas indicam os diferentes níveis de escorregamento

No interior da voçoroca do Buraco Fundo, foram encontradas diversas feições erosivas (Figura 34) elaboradas ao longo do tempo e que resultam dos mecanismos que atuam no processo erosivo. Estas feições têm formas e dimensões variadas dependendo da natureza do solo ou rocha onde foram desenvolvidas; da origem da água atuante (superficial ou subterrânea), bem como a intensidade do escoamento ou percolação da mesma.

## Feições erosivas

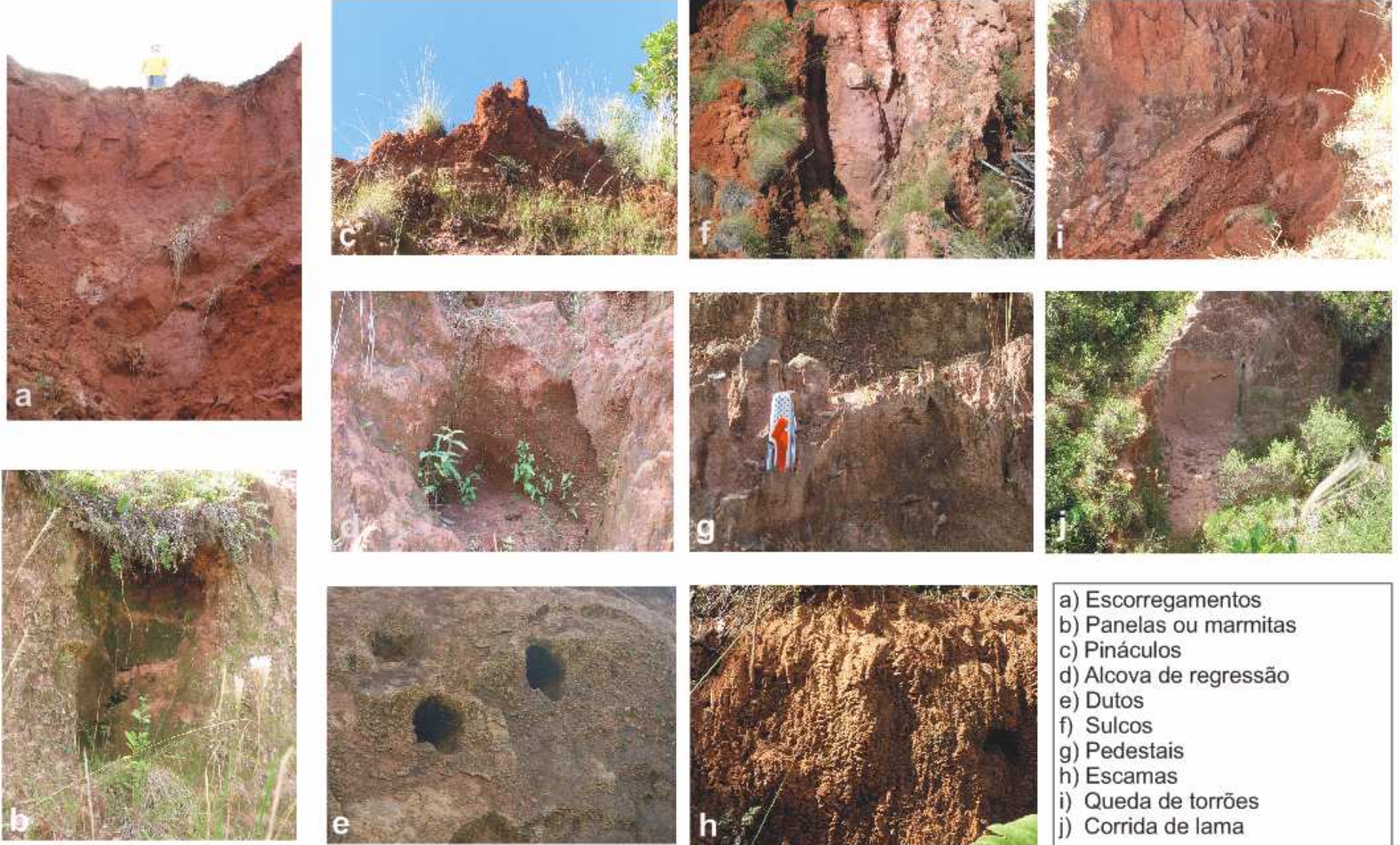


Figura 34 - Feições erosivas encontradas no interior da voçoroca do Buraco Fundo

a) Escorregamentos: São movimentos de massa que originam rupturas circulares nas laterais do talude, resultado do processo de escoamento superficial e/ou percolação da água subterrânea. Os escorregamentos podem ocorrer também em menores proporções localizados nas paredes da voçoroca (Figura 34a) e, dependendo das características do material escorregado, recebem denominações diferentes.

b) Marmitas ou panelas (*plunging pool*): São feições esculpidas a partir de quedas d'água na base das paredes ou degraus no interior da voçoroca. Podem ser originadas pelo processo de escoamento superficial, produzido pela concavidade (cabeceira de drenagem) ou pelo escoamento subsuperficial, resultante do afloramento da zona de saturação de profundidade nas paredes da incisão.

Essas feições apresentam, geralmente, uma aparência circular produzidas pelas águas turbilhonares, cuja profundidade vai depender da intensidade do fluxo formado pela enxurrada, e da capacidade de resistência apresentada pelo solo ou rocha atingida.

Durante a pesquisa no interior da voçoroca do Buraco Fundo, averiguou-se a ocorrência de algumas feições erosivas do tipo marmita ou panelas (Figura 34b). Caracteriza-se pela presença de vegetação arbustiva tanto na parte superior, responsável pela dispersão do fluxo de água, quanto na parte inferior, que confere maior resistência ao solo.

Pode-se dizer que a feição observada na Figura 34d é associação entre uma alcova de regressão e uma erosão em panela, pois consiste na retirada da camada mais erodível nas paredes internas da voçoroca, originando uma pequena “caverna” e, há também, a formação de concavidade pela queda de água, caracterizando a feição de marmita.

c) Pináculos: São feições mais elevadas encontradas no interior da voçoroca, essas formas estão associadas com diferenças de erodibilidade de solo e/ou rocha.

Próximo à cabeceira da voçoroca foram encontrados pináculos orientados segundo a direção NW, de forma alongada associados à porções de rocha mais resistente à erosão (Figura 34c). Nota-se que não há presença de nenhuma proteção sobre o pináculo. Permanece na posição vertical enquanto as porções adjacentes e superiores foram erodidas e transportadas. A irregularidade do topo demonstra a variabilidade do solo quanto à resistência aos mecanismos erosivos.



d) Alcovas de regressão: São cavidades que se assemelham à pequenas cavernas que se formam logo abaixo das camadas mais resistentes do solo ou rochas no interior da voçoroca. A água desce ao longo das paredes da incisão, se camadas superiores são menos erodíveis e as inferiores mais suscetíveis à erosão, estas últimas terão material retirado pelo escoamento e no local surgem alcovas de regressão.

Na voçoroca as alcovas de regressão não apresentam grandes dimensões (Figura 34d), o desprendimento de material das suas bordas indica atividade erosiva ativa, devido ao direcionamento e concentração de água de chuvas naquele local.

e) Dutos (*pipe ou pipping*): Este tipo de feição é identificado pela formação de túneis contínuos ou canais subterrâneos formados pelo movimento da água no interior do solo, que arrasta partículas do solo, aflorando nas paredes da voçoroca. O encontro desses espaços vazios deixados pela retirada de material pela água, pode ocasionar o solapamento da área originando formas circulares de erosão.

É possível perceber um conjunto de dutos (Figura 34e), formados pela percolação da água subterrânea, aflorando em um pináculo no interior da voçoroca. Pela aparência dos canais, acredita-se que se trata de feições antigas, pois não há mais a presença de material retirado do seu interior. E, outra característica denuncia a estabilidade dos dutos, o fato de, apesar da sua proximidade, não haver o solapamento do local.

f) Sulcos e ravinas: São incisões menores que ocorrem na parte interna ou nas adjacências da voçoroca, provocadas pelas enxurradas e indicam as rotas seguidas pelo escoamento superficial concentrado.

Verifica-se a presença de sulcos provocados pelo escoamento superficial concentrado nas paredes laterais da voçoroca (Figura 34f). Na camada de solo, as feições são menos profundas devido, provavelmente, pela presença de matéria orgânica e raízes que configuram maior resistência à erosão. Os sulcos adquirem maior profundidade, passando a ravinas, atingindo a rocha sedimentar mais vulnerável aos processos erosivos.

g) Pedestais (*demoiselles*): Esse tipo de feição acontece quando um solo ou rocha com propensão à erosão é protegido por uma barreira superior, que pode ser um seixo ou uma camada de óxido de ferro, resistindo à erosão e formando um pedestal isolado. Essas feições são comuns no interior de voçorocas sendo

possível, de acordo com a sua altura, observar o quanto de solo que foi transportado pelo escoamento superficial.

Verificou-se a presença de *demoiselles* de diferentes tamanhos (Figura 34g), originadas devida à presença, no seu topo, de materiais como óxido de ferro e seixos de quartzo. Estas feições foram esculpidas na rocha sedimentar pela ação da chuva (salpicamento) e do escoamento superficial no interior da incisão.

As escamas (figura 34h) são feições oriundas da acumulação de solo mais fino sobre as paredes laterais da voçoroca ou em colunas no seu interior. O tombamento de porções de solo e rocha de maiores dimensões, saturados ou não, é chamado de queda de torrões (Figura 34i) e, quando o material é muito fino, saturado pela água e apresenta grande velocidade na queda, recebe o nome de corrida de lama (Figura 34j).

### **3.3 Caracterização geológico-geotécnica dos materiais que compõem a voçoroca do Buraco Fundo**

O mapeamento de detalhe dos materiais que compõem a voçoroca foi realizado na cabeceira da incisão, onde identificou-se 5 unidades distintas denominadas de Perfil I: rocha do tipo arenito na base; rocha alterada logo acima; colúvio; horizonte B e horizonte A, apresentadas na Figura 35. Abaixo da camada de arenito, a aproximadamente 7 m de profundidade, ocorre uma nova camada de siltito com lentes de material argiloso.

O Perfil I apresenta 7 m de espessura, correspondente a profundidade da voçoroca neste local, e tem na sua base um arenito rosado com estratificação plano paralela de espessura média de 4 m, mostrando boa cimentação, pois forma pináculos no interior da voçoroca.

Abaixo desta camada encontra-se uma camada de siltito de cor avermelhada que apresenta lentes de argila conhecidas como *clay balls*. Acima da camada de arenito, verifica-se um nível rocha alterada de textura anero-argilosa com aproximadamente 1 m de espessura que preserva vestígios de estratificação.

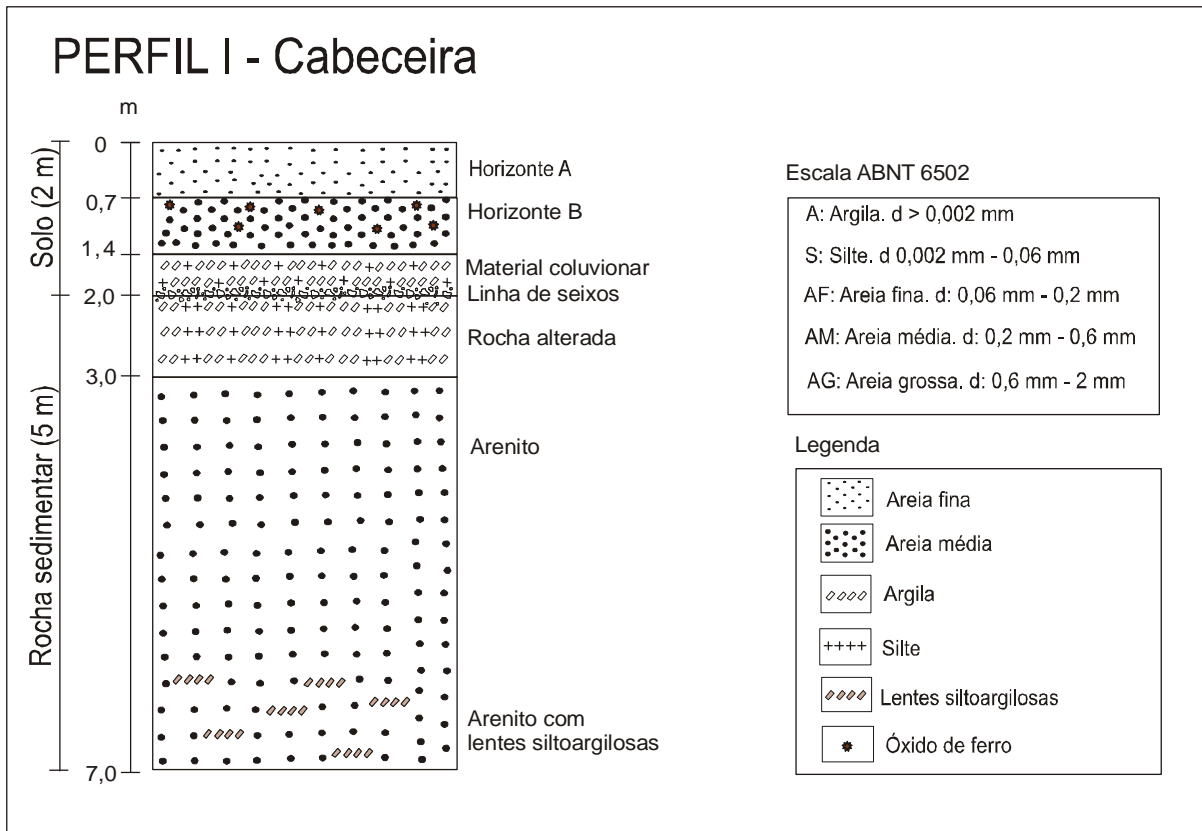


Figura 35 - Camadas do Perfil I, cabeceira da voçoroca

Sobre a camada de rocha alterada, ocorre um horizonte de transição entre a rocha e o solo, com 0,6 m de espessura. Este horizonte pode ser classificado como material coluvionar por apresentar, na sua base, uma linha de seixos de quartzo. Acima do colúvio, ocorrem os horizontes de solo de cor marrom, provavelmente originados da pedogênese do próprio colúvio, com espessura média de 1,4 m.

Verifica-se ao longo da voçoroca que existe uma variação tanto lateral quanto em profundidade dos materiais, isto é, as camadas de rochas mais arenosas contém lentes ou níveis de materiais mais finos silto-argilosos. Isto se percebe pela variação granulométrica e também pela variação na coloração da rocha de rosada para avermelhada ou esbranquiçada.

Essa variação na composição é responsável pela evolução diferenciada do processo erosivo ao longo da voçoroca, pois estas camadas apresentam diferentes resistências à erosão.

Como a área onde foi descrito o Perfil I é de difícil acesso, procurou-se outro local ao longo da voçoroca que apresentasse os mesmos materiais e as

amostragens pudessem ser realizadas. Desta forma, escolheu-se próximo ao anfiteatro da voçoroca, um novo perfil estratigráfico denominado Perfil II, com materiais semelhantes aos do Perfil I.

A Figura 36 mostra o Perfil II no qual foram identificadas 3 unidades: arenito na base, acima deste rocha alterada e logo acima o horizonte pedológico A/B.

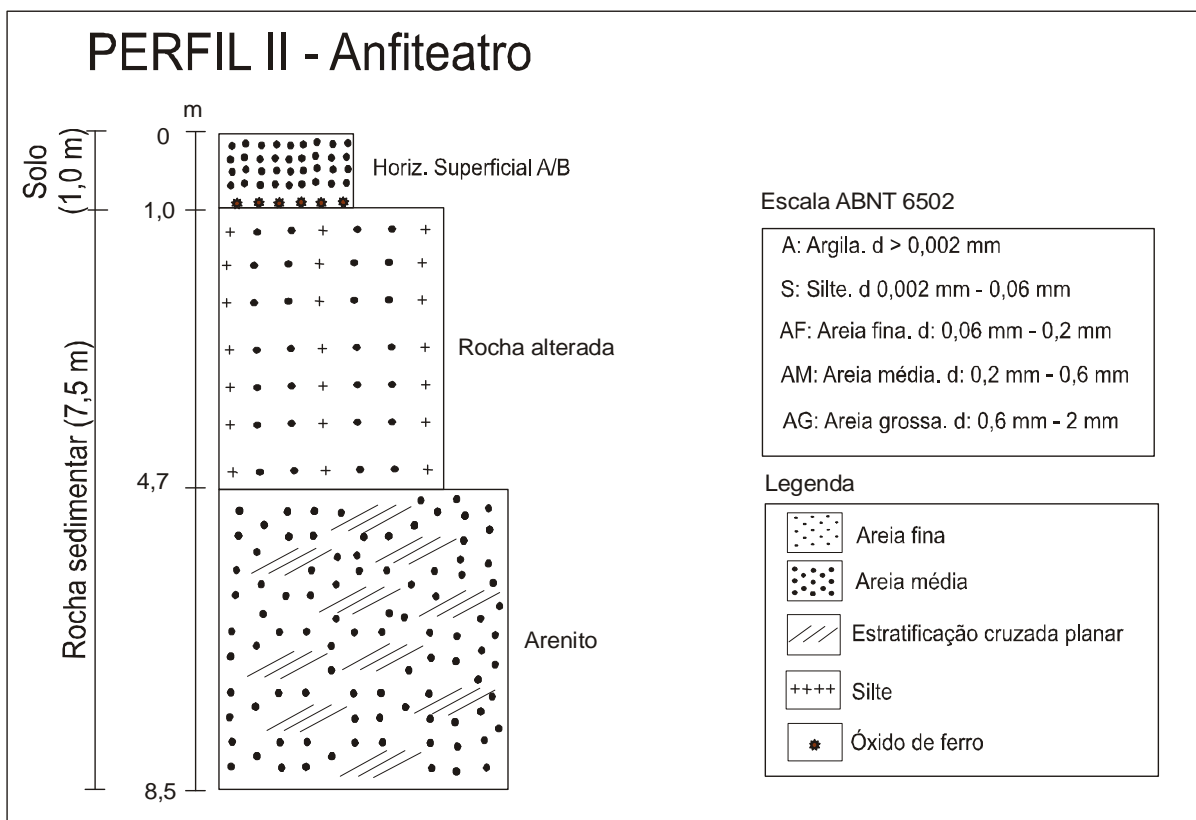


Figura 36 - Camadas do Perfil II, anfiteatro da voçoroca

O Perfil II mede aproximadamente 8,5 m de espessura. A camada de arenito é caracterizada por uma parede vertical que mede em torno de 3,80 m de espessura. Apresenta uma cor rosada, variando entre tons mais escuros e camadas mais claras de cor amarelada, com estratificação cruzada planar que, em escala de campo, pode variar de milimétrica a centimétrica com diferentes graus de cimentação.

A rocha alterada localizada sob a camada de arenito apresenta também uma cor rosada, alternando tonalidades mais avermelhadas. Sobre esta camada é

possível verificar escorregamentos dos horizontes superficiais, com material depositado no degrau inferior. Sua espessura é em média de 3,7 m.

A camada superficial ou horizonte pedológico é constituído de um horizonte A superficial com espessura de aproximadamente 1 m e um horizonte B com variação de espessura entre 10 e 15 cm ou as vezes inexistentes. Apresenta uma coloração marrom escura e contém, em profundidade, óxido de ferro, raízes e matéria orgânica.

As principais características das unidades encontradas nos Perfis I e II podem ser vistas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características das unidades dos Perfis I e II

	<b>Nome</b>	<b>Esp. (m)</b>	<b>Características</b>	<b>Feições erosivas</b>
<b>Perfil I</b>	Horiz. A	0,7	- argissolo - areia siltosa - marrom escuro - raízes e matéria orgânica	- escorregamentos  - dutos
	Horizonte B	0,7	- B textural - areia argilosa - marrom escuro - óxido de Fe e raízes	- pináculos
	Material coluvionar	0,6	- argilo-siltoso - cor rosada - linha de seixos	- pedestais
	Rocha alterada	1,0	- argilo-siltosa com frações de areia fina - cor rosada/avermelhada - areia mal graduada	- sulcos
	Siltito	5,0	- lentes silto-argilosas - cor avermelhada	- corridas de lama
<b>Perfil II</b>	Hor. Superficial A/B	1,0	- apresenta óxido de Fe - areia argilosa (A) e argila muito plástica (B) - cor marrom escura	- queda de torrões
	Rocha alterada	3,7	- cor rosada/avermelhada - arenito médio siltoso	- escamas
	Arenito	3,8	- arenito médio a fino; - cor rosada/amarelada - estrat. cruzada planar - parede verticalizada	- gretas de contração  - ravinas

No Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geociências foram realizados os ensaios de granulometria e de erodibilidade para as amostras dos Perfis I e II, onde os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Granulometria dos Perfis I e II

		Granulometria (ABNT)						
	NOME	AG	AM	AF	TA	S	FA	SUCS
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Perfil I (cabeceira)	Horiz. A	16	32	12	<b>60</b>	20	9	SM
	Horiz. B	6	17	15	<b>38</b>	11	51	SC
	Material coluvionar	4	7	7	<b>18</b>	25	57	CH
	Rocha alterada	1	3	8	<b>12</b>	34	54	CL
	Arenito	18	44	15	<b>77</b>	15	8	SP
	<i>Clay ball</i>	1	1	8	<b>10</b>	54	36	CL
Perfil II (anfiteatro)	Horiz. Superf. A/B	8	14	35	<b>57</b>	29	14	SM
	Rocha alterada	13	36	15	<b>64</b>	20	16	SM
	Arenito	1	39	26	<b>66</b>	24	10	SP

Obs.: AG = areia grossa; AM = areia média; AF = areia fina; S = silte; FA = fração argila; SM = areia siltosa; SC = areia argilosa; SP = areia mal graduada; CH = argila muito plástica; CL = argila pouco plástica

No Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro de Tecnologia foram realizados os ensaios de caracterização geotécnica para as amostras do Perfil II. Os valores referentes à granulometria (Escala ABNT) do Perfil II, aos limites de Atterberg, à classificação geotécnica pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e aos índices físicos das camadas do Perfil II são apresentadas na Tabela 8.

Analisando estes dados pode-se dizer que o arenito do Perfil I mostra maior teor de areia grossa que o arenito do Perfil II, bem como uma melhor distribuição granulométrica, em porções mais ou menos semelhante nos diferentes intervalos de

tamanhos. Sendo assim, é considerado geologicamente como mal classificado e geotecnicamente como bem graduado.

Tabela 8 - Granulometria, limites de Atterberg e índices físicos das camadas estudadas – Perfil II

CAMADAS		Horiz. A/B	Rocha alterada	Arenito
	AG (%)	8	13	1
	AM (%)	14	36	39
Granulometria (Escala ABNT)	AF (%)	35	15	26
	S (%)	29	20	24
	FA (%)	14	16	10
Limites Atterberg	wl (%)	32	31	N.P.
	wp (%)	23	18	N.P.
	w (%)	12,93	23,84	17,21
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,67	16,78	18,59
Índices Físicos	$\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	13,90	13,50	15,90
	$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	29,46	26,98	26,50
	e	1,119	0,999	0,667
	S (%)	34,04	64,38	68,36
	$\eta$ (%)	52,80	49,97	40,01

Obs.: AG = areia grossa; AM = areia média; AF = areia fina; S = silte; FA = fração argila; wl = limite de liquidez; wp = limite de plasticidade; w = teor de umidade;  $\gamma$  = peso específico aparente natural;  $\gamma_d$  = peso específico aparente seco;  $\gamma_s$  = peso específico real dos grãos; e = índice de vazios; S = grau de saturação;  $\eta$  = porosidade; N.P = não plástico.

Tanto o arenito do Perfil I quanto do Perfil II apresenta uma porcentagem razoável de grãos tamanho silte, sendo o arenito do Perfil II classificado como arenito siltoso. Já o arenito do Perfil I pode ser classificado como arenito grosso a médio.

As granulometrias dos materiais do Perfil I não revelam grandes diferenças entre o arenito e o horizonte superficial quando comparados com o Perfil II. A diferença mais notável está na granulometria da rocha alterada que no Perfil I apresenta maior quantidade de finos (silte e argila) e no Perfil II é mais arenosa. Isto demonstra a grande variabilidade tanto lateral quanto em profundidade da

granulometria destes materiais. As curvas granulométricas dos materiais dos Perfis I e II podem ser vistas nas Figuras 37 e 38 respectivamente.

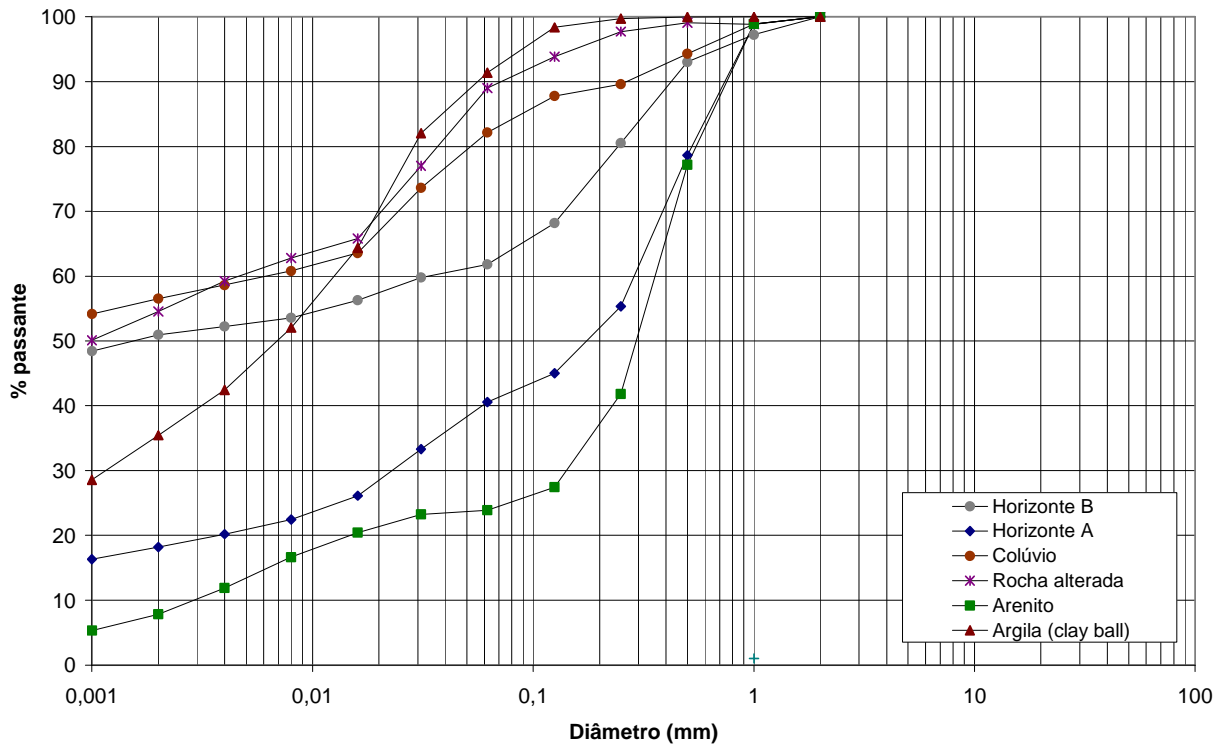


Figura 37 - Curva Granulométrica do Perfil I

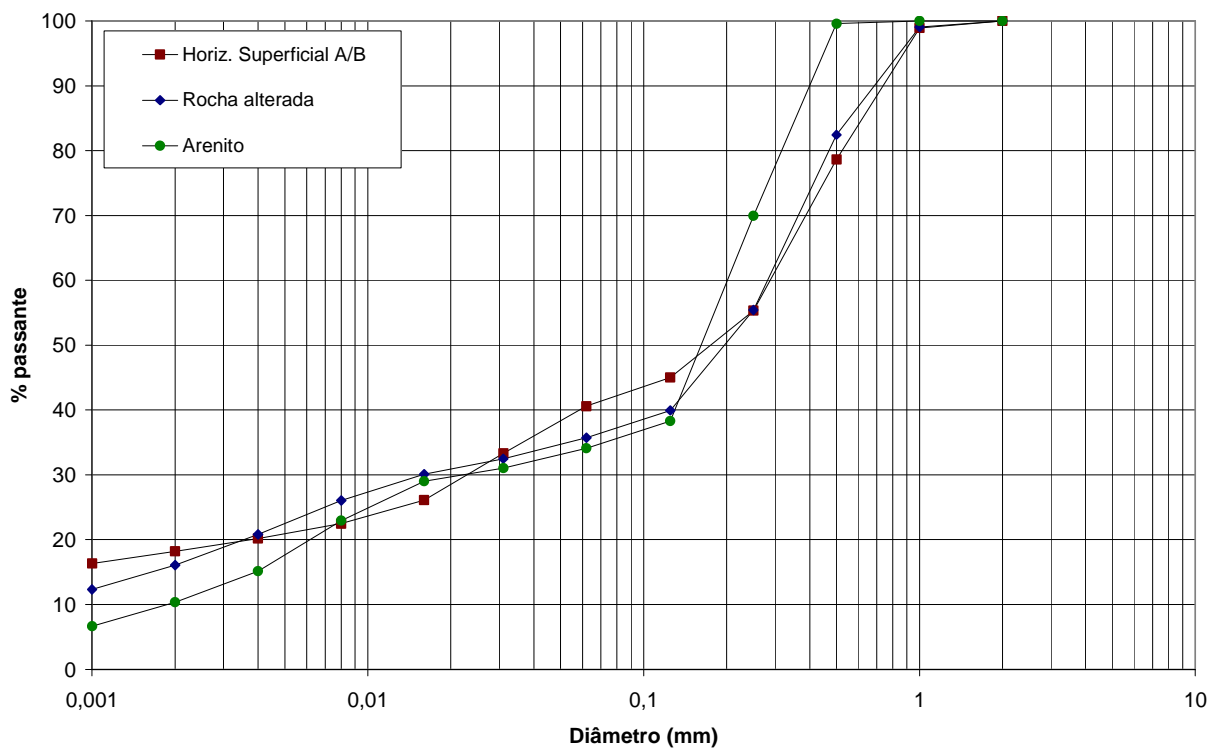


Figura 38 - Curva Granulométrica do Perfil II



Na geotecnia, as rochas sedimentares são conhecidas como rochas “brandas” por terem um comportamento muito semelhante ao dos solos. Por isso neste trabalho, a rocha sedimentar foi classificada segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

Conforme o SUCS o horizonte A e a rocha alterada que compõem o Perfil II, são classificados como areia argilosa e o horizonte B como uma argila muito plástica, pois, além do elevado percentual da fração argila na sua composição, apresenta um limite de plasticidade elevado de 33%. A rocha sedimentar do tipo arenito é classificada como sendo uma areia bem graduada.

Os índices físicos como o teor de umidade ( $w$ ), peso específico aparente natural ( $\gamma$ ), peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), índice de vazios ( $e$ ), grau de saturação ( $S$ ) e a porosidade ( $\eta$ ), representam uma média dos valores obtidos para as amostras indeformadas utilizadas no ensaio Inderbitzen, com exceção do peso específico real dos grãos ( $\gamma_s$ ), determinada com uma amostra deformada.

Os limites de consistência resultaram em valores nulos, para o arenito, pois a percentagem de material granular (areias) nesta rocha é superior aos finos (siltes e argilas) não apresentando plasticidades. Já as amostras dos horizontes A/B e rocha alterada mostraram comportamento plástico.

Os índices de vazios variam de 1,1 para o horizonte A, 0,99 para a rocha alterada e 0,66 para o arenito. O valor mais elevado do índice de vazios do solo pode estar relacionado à presença de agregados, pois a determinação foi realizada em amostras indeformadas. Os valores encontrados na granulometria para o horizonte A/B com e sem o uso de defloculante são apresentados na Tabela 9 e corroboram a explicação dada acima.

Tabela 9: Granulometria do horizonte A com e sem defloculante

	AG (%)	AM (%)	AF (%)	S (%)	FA (%)
Com defloc.	8	14	35	29	14
Sem defloc.	14	29	35	20	2

O arenito obteve um grau de saturação (percentual do teor de umidade da amostra em relação à absorção máxima) maior do que as demais amostras do Perfil

II, em torno e 68,4%, enquanto o horizonte superficial A/B obteve 34,4% e a rocha alterada 64,38%. A porosidade para a camada de arenito foi de aproximadamente 40%; para a camada do horizonte superficial o percentual foi de 52%.

### 3.3.1 Avaliação da erodibilidade

A avaliação da erodibilidade foi realizada por meio de ensaios da metodologia MCT, ensaio de desagregação e ensaio de Inderbitzen com as amostras do Perfil II correspondentes ao arenito e ao horizonte superficial A/B.

#### 3.3.1.1 Análise do ensaio de desagregação

As características do solo que influenciam na sua erodibilidade foram abordadas no Capítulo 1. Para a avaliação qualitativa da erodibilidade do solo, utilizaram-se amostras indeformadas do horizonte superficial do solo e do arenito, encontrada na base da voçoroca sob as condições de umidade natural e seca ao ar por no mínimo 72 horas.

A avaliação do comportamento das amostras ocorreu de maneira visual, analisando o comportamento da amostra frente à ascensão capilar, como: a) o abatimento e inchamento da amostra; b) velocidade de desagregação; c) formação de fissuras no topo e d) rupturas nas bordas da amostra.

A Tabela 10 apresenta a descrição do comportamento das amostras nas duas condições de umidade.

Tabela 10 - Comportamento das amostras no ensaio de desagregação

CAMADA	CONDIÇÃO	COMPORTEAMENTO
Horiz. Superficial A/B	<i>Umidade natural</i>	Ascensão capilar completa aos 16 minutos do início do ensaio, praticamente não houve desagregação e abatimento; sem inchamento e sem rupturas nas bordas nem fissuração no topo, permanecendo nestas condições até o término do ensaio (24 h).
	<i>Seca ao ar</i>	Rápida ascensão capilar, porém mais lenta em relação à condição de umidade natural, somente após decorrida uma hora do ensaio, a ascensão atingiu o topo da amostra, não havendo desagregação ou abatimento, permanecendo nestas condições até o término do ensaio (24 h).
Arenito	<i>Umidade natural</i>	Rápida ascensão capilar, desagregação rápida devido à liquefação do material. Formação de rachaduras e fissuras no topo. Não houve inchamento da amostra. Amostra encontrou-se parcialmente desestruturada ao término do ensaio (24 h).
	<i>Seca ao ar</i>	Ascensão capilar pouco mais lenta em relação à amostra em condição natural de umidade. Alta velocidade de desagregação, devido à liquefação do material. Formação de trincas, rupturas nas bordas e fissuras no topo. Nenhum inchamento. Amostra encontrou-se totalmente desestruturada ao término do ensaio (24 h).

O horizonte superficial do solo, independente da sua condição de umidade, mostrou praticamente intacto ao final do ensaio, mostrando-se muito resistente frente à inundação (Figura 39). É possível justificar tal comportamento pela presença de matéria orgânica, raízes e óxido de ferro que tendem a estabilizar os agregados.

Apesar da textura arenosa, a presença de matéria orgânica, raízes, e óxido de ferro e uma porcentagem significativa de argila foram decisivas para que as amostras não sofressem desagregação.

A matéria orgânica é agente importantíssimo na formação e estabilização dos agregados, base essencial, juntamente com os poros, na formação da estrutura do solo, enquanto as raízes ajudam a agregar o solo, dando-lhe sustentação mecânica.

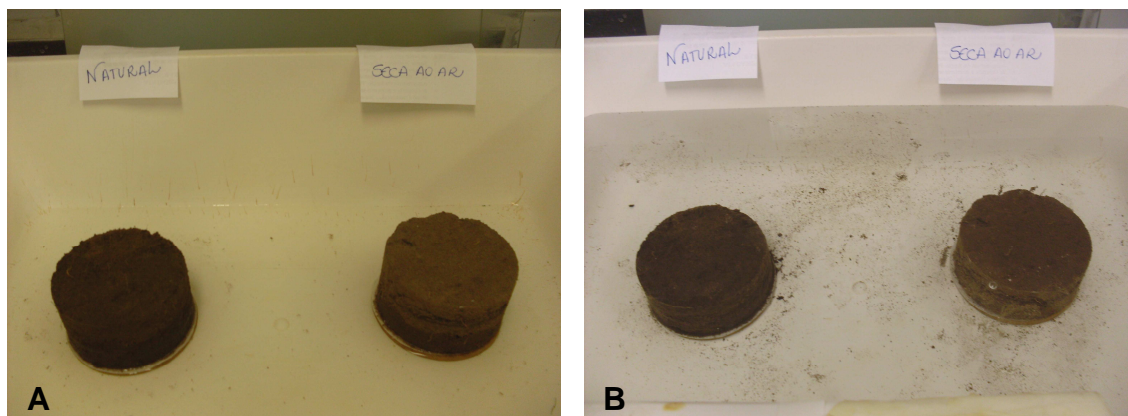


Figura 39 - Ensaio de desagregação para o horizonte superficial do solo. Em A, a fase inicial do ensaio com água na base das amostras. Em B, as amostras intactas ao final do ensaio, após 24 de imersão

Quanto à presença de concreções ferruginosas, estudos verificaram que o teor de óxidos de ferro, refletido na cor dos solos, influencia características e propriedades que governam o balanço da coesão entre agregados e permeabilidade, condicionador do comportamento do solo frente ao processo erosivo.

No entanto, o mesmo comportamento não é verificado para o arenito. As amostras demonstraram intenso processo de desagregação, onde as partículas foram sendo desprendidas facilmente já nos primeiros estágios do ensaio, tendo sua estrutura totalmente desagregada sob ação da inundação completa, após 24 horas imersão (figura 40).

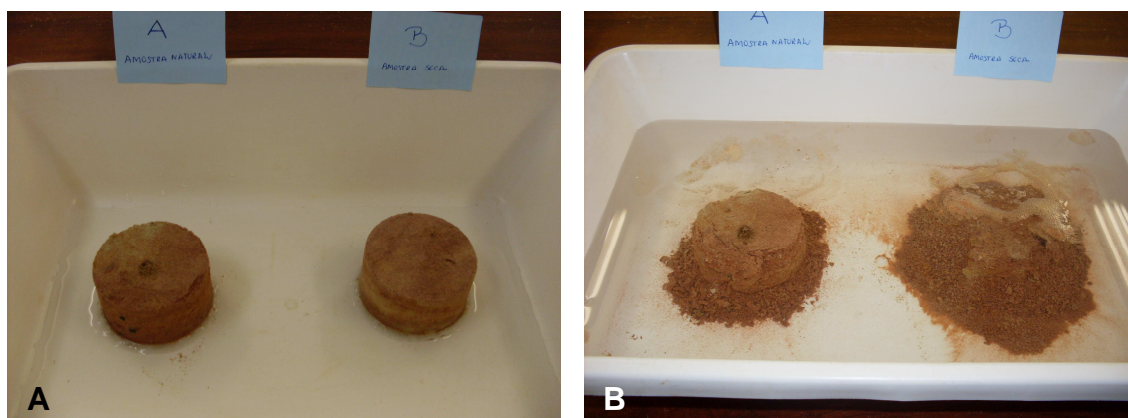


Figura 40 - Ensaio de desagregação para o arenito. Em A, a fase inicial do ensaio com água na base das amostras. Em B, as amostras desagregadas ao final do ensaio, após 24 de imersão

Constatou-se que as condições de umidade exerceram certa influência na desagregação do material amostrado. É possível verificar que a amostra sob a condição de umidade natural permaneceu parcialmente estruturada, enquanto que a amostra seca ao ar (durante 72 horas) sofreu desagregação total. Esse comportamento pode ser explicado através do fenômeno da sucção.

A força sucção atua em solos não saturados (umidade natural das amostras), onde os meniscos de água tendem a aproximar as partículas, aumentando a sua coesão aparente, portanto, a amostra em condição natural de umidade manteve parte da sua forma inicial. Enquanto isso, a amostra seca ao ar desprovida de umidade, desagregou-se com maior facilidade.

Além disso, o processo de ruína das amostras de arenito pode estar associado à frente de avanço capilar que expulsa o ar preso nos poros, causando a desestruturação do material, ou seja, a desagregação da amostra pode ser atribuída aos mecanismos de hidratação e desaeração que geram poropressões positivas capazes de desprender individualmente suas partículas.

Por apresentar baixa cimentação, o arenito não mantém suas partículas agrupadas sob a ação do nível de água ascendente, ocorrendo sua desagregação. Esse comportamento pode ser verificado em campo: o material saturado seja pelas fortes chuvas ou pela subida do lençol freático, tende a desagregar-se. Os materiais desagregáveis em água possuem maior facilidade de serem carregados pelo escoamento superficial uma vez que suas partículas estão individualizadas.

### 3.3.1.2 Análise dos ensaios MCT: Infiltrabilidade e Perda de massa por imersão

Os ensaios da metodologia MCT, propostos por Nogami e Villibor (1979), para a avaliação indireta da erodibilidade dos solos tropicais forma descritos no Capítulo 2. Para ambos os ensaios foram utilizadas amostras do horizonte superficial do solo e de arenito sob três condições de umidade: natural, seca ao ar e pré-umedecida.

Com o ensaio de infiltrabilidade, buscou-se avaliar a velocidade de ascensão da água no solo/rocha. Foi possível observar resultados diferentes para a mesma amostra de solo devido às diferentes condições de umidade às quais foram submetidas, bem como resultados diferentes para as amostras de solo e rocha.

A Tabela 11 mostra os resultados referentes ao coeficiente de sorção (S) e a velocidade da frente de saturação das camadas amostradas nas três condições de umidade.

Tabela 11 - Determinação do coeficiente de sorção e velocidade da frente de saturação

Camada	Coeficiente de sorção (cm/min <sup>1/2</sup> )			Velocidade da frente de saturação (mm/min <sup>1/2</sup> )		
	Natural	Seca ao ar	Pré- umedecida	Natural	Seca ao ar	Pré- umedecida
Horiz. superficial	0,029	0,031	0,002	1,6	1	3,5
Arenito	0,007	0,006	0,001	3,55	1,67	5,0

O coeficiente de sorção (S), obtido através do gráfico de deslocamento do menisco (cm) e o tempo (min<sup>1/2</sup>), foi maior para o horizonte superficial na condição de umidade seca ao ar. Esse fato está relacionado com a própria condição da amostra, pois quanto mais seca estiver, maior será o fenômeno de adsorção e absorção de água.

O contrário pode ser observado nas amostras em condição pré-umedecida que obtiveram o menor coeficiente de sorção. No entanto, apresentaram maior velocidade da frente de saturação, enquanto que no material seco ao ar por 72 horas, a velocidade da frente de saturação foi menor.

Isso pode ser explicado da seguinte forma: amostras pré-umedecidas adquirem uma velocidade da frente de saturação maior por encontrarem-se saturadas ou semi-saturadas, enquanto que nas amostras em condições naturais ou secas ao ar a quantidade de poros vazios é muito maior, o que torna mais lenta a frente de saturação.

O volume de água infiltrado diferiu significativamente nas camadas amostradas e nas três condições de umidade à que foram submetidas. O volume infiltrado nas amostras pré-umedecidas foi muito menor quando comparado com o volume infiltrado nas outras duas condições de umidade, para todas as camadas ensaiadas. Por encontrarem-se já úmidas, a quantidade de água necessária para a saturação da amostra foi bastante reduzida, ficando em torno de 40 cm<sup>3</sup> no horizonte superficial e 30 cm<sup>3</sup> na camada de arenito.

O momento da estabilização da curva representa o momento em que a água atingiu o topo da amostra. Já o trecho retilíneo fornece o coeficiente de sorção “s” ( $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$ ). As leituras de deslocamento do menisco e o tempo em que foram realizadas foram plotados em gráfico apresentando na Figura 41.

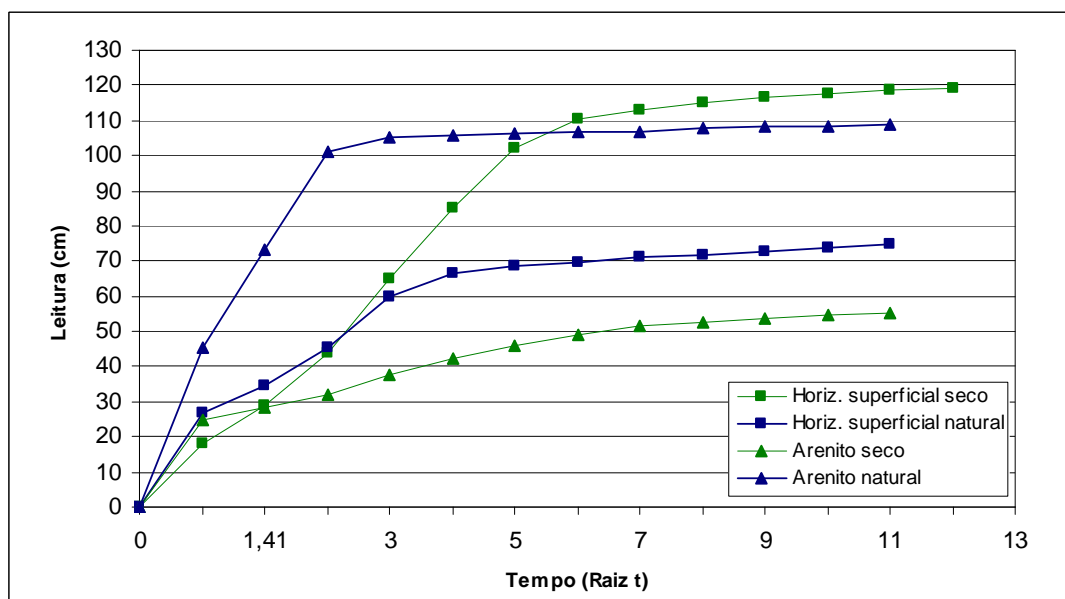


Figura 41 - Deslocamento do menisco versus tempo, ensaio de infiltrabilidade

Para a condição de umidade seca ao ar, verifica-se que a umidade atingiu o topo do corpo de prova da camada do horizonte superficial em aproximadamente  $4,5 \text{ min}^{1/2}$ . Já na amostra de arenito, isso ocorreu em torno de  $1 \text{ min}^{1/2}$ .

Para o horizonte superficial o tempo de deslocamento do menisco de água foi muito menor na amostra em condição natural que seca ao ar. Já no arenito o tempo de deslocamento do menisco em condição natural foi muito mais rápida que para o arenito em condição seca ao ar. Isso demonstra um coeficiente de infiltrabilidade mais elevado para o arenito quando comprado ao horizonte superficial em condição de umidade natural.

Pode concluir, portanto que a saturação é mais rápida no arenito, fazendo com que neste material se estabeleça o escoamento superficial e ocorra, como consequência, o carreamento de materiais finos.

É possível afirmar que neste caso, há uma relação direta entre os resultados do ensaio de desagregação e os resultados do ensaio de infiltrabilidade, pois as amostras de arenito mostraram alta desagregação frente à inundação e valores de coeficiente de infiltrabilidade mais elevados.

A perda de massa por imersão ( $P_i$ ) é a porcentagem da massa seca da porção que se desprende do corpo-de-prova, quando o mesmo é preparado e imerso em água, sob condições padronizadas.

No número de amostras ensaiadas é insuficiente para uma conclusão definitiva, porém, numa análise preliminar (Tabela 12) pode-se dizer que a perda de massa foi mais elevada na camada de arenito em relação à camada de solo superficial. Isto pode ser explicado pela presença de matéria orgânica, raízes e óxido de Fe no horizonte superficial.

Tabela 12 - Perda de massa por imersão  $P_i$  (%) nas três condições de umidade

CAMADA	Horizonte Superficial	Arenito
	Perda ( $P_i$ %)	Perda ( $P_i$ %)
Natural	0,6	5,8
Pré-umedecida	28,6	4,3
Seca ao ar	8,1	60,0

Para a camada superficial, o menor desprendimento das partículas na condição de umidade natural e o maior na condição pré-umedecida. Isso pode ser explicado pelo efeito da sucção na amostra em condição de umidade natural e a ausência dela na condição pré-umedecida.

O arenito obteve um elevado  $P_i$  quando ensaiado na condição de umidade seca ao ar, em torno de 60,8% e o menor  $P_i$  quanto pré-umedecida, em torno de 5,8%. Não era de se esperar que a menor perda ocorresse com a amostra pré-umedecida, porém, esses resultados podem estar associados à grande variabilidade do material ensaiado.

O coeficiente de sorção ( $s$ ), obtido do ensaio de infiltrabilidade, e a perda de massa por imersão ( $P_i$ ) para as camadas amostradas, nas três condições de



umidade são apresentados na Tabela 13, onde a relação Pi/s indica a erodibilidade dos solos.

Para Nogami e Villibor (1979), o solo é considerado erodível quando essa relação é maior ou igual a 52. Pejon (1992) *apud* Vilar e Prandi (1993) classificam os solos em erodíveis quando a relação Pi/s for superior ao valor 40.

Tabela 13 - Valores do coeficiente de sorção (s) e perda de massa por imersão (Pi)

CAMADA		Horizonte Superficial	Arenito
Natural	s (cm/min <sup>1/2</sup> )	0,029	0,007
	Pi (%)	0,6	5,2
	Pi /s	<b>20,6</b>	<b>742,85</b>
Seca ao ar	s (cm/min <sup>1/2</sup> )	0,031	0,006
	Pi (%)	8,1	60,8
	Pi/s	<b>261,2</b>	<b>10.133,3</b>
Pré-umedecida	s (cm/min <sup>1/2</sup> )	0,002	0,001
	Pi (%)	23,6	4,3
	Pi /s	<b>11.800</b>	<b>4.300</b>

Os valores de Pi/s tanto para o horizonte superficial quanto para o arenito são bastante elevados, maior do que 52, o que indica solos erodíveis segundo Nogami e Villibor (1979), exceto a amostra do horizonte superficial, ensaiada em condição de umidade natural, cujo valor é de 20,6 classificada, portanto, como não-erodível.

Os valores de Pi/s foram plotados no gráfico da Figura 42 onde verificou-se que maioria delas se concentram no campo dos materiais considerados erodíveis.

O arenito e o horizonte superficial são considerados erodíveis segundo resultados dos ensaios de perda de massa por imersão e infiltrabilidade, exceto o horizonte superficial em condição de umidade natural. O ensaio de desagregação mostrou comportamentos diferentes entre estes materiais onde o horizonte superficial resistiu à inundação sem desagregar-se. Isto se deve provavelmente à presença de raízes, matéria orgânica e óxido de Fe neste horizonte.

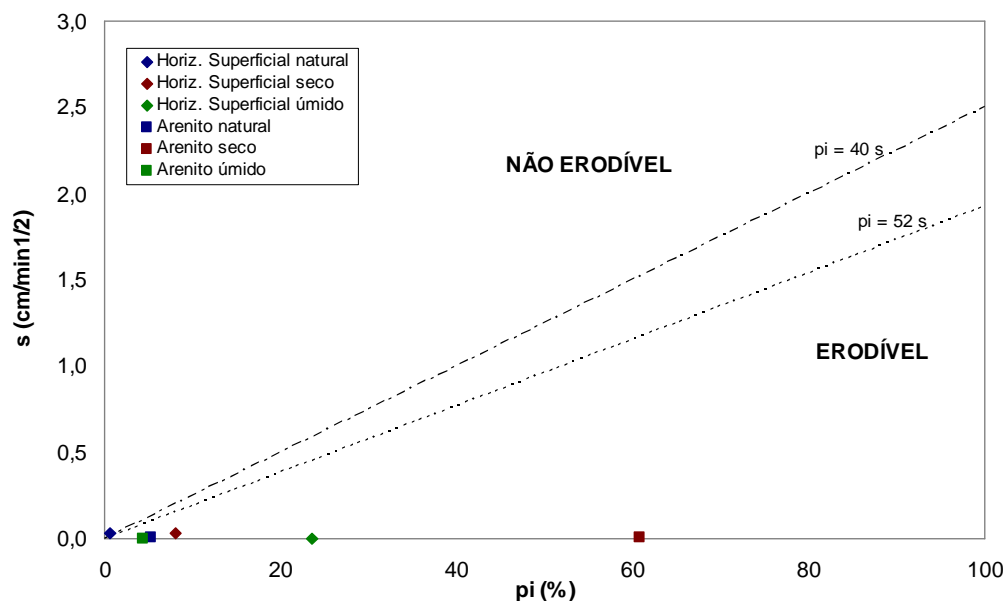


Figura 42 - Classificação das camadas de acordo com critério de erodibilidade segundo Nogami e Villibor (1995) e Pejon (1992)

### 3.3.1.3 Análise do ensaio de Inderbitzen

A descrição do ensaio de Inderbitzen, utilizado para a avaliação direta da erodibilidade, está disposta no Capítulo 2.

Efetou-se o ensaio de Inderbitzen com 24 amostras indeformadas do horizonte superficial do solo e 24 amostras da rocha sedimentar do tipo arenito, totalizando 48 amostras. Primeiramente, foram efetuados os ensaios com as amostras em condição de umidade natural, em seguida utilizaram-se as amostras secas ao ar durante 72 horas e, por fim, as pré-umedecidas com água na base das amostras por volta de 24 horas. As inclinações utilizadas no ensaio foram 10°, 26°, 45° e 54°.

Nas amostras ensaiadas do horizonte superficial e da camada de arenito foi possível confirmar a relação direta entre a perda de solo, a inclinação da rampa e a vazão de ensaio. Na Figura 43, é possível observar que a perda de solo é tanto maior quanto maior for a inclinação da rampa utilizada nos ensaios do horizonte superficial sobre as seguintes condições: 10 min de tempo padrão, condição de umidade natural e vazão de 3 l/min.

Para o arenito nas mesmas condições de umidade, tempo padrão e vazão, observou-se a mesma relação direta da declividade com a perda de solo, porém, na declividade de 26° a perda de solo foi inferior àquela com inclinação de 10°. Isto pode estar relacionado à problemas na realização do ensaio ou a variabilidade do material em termos de grau de cimentação e granulometria (Figura 44).

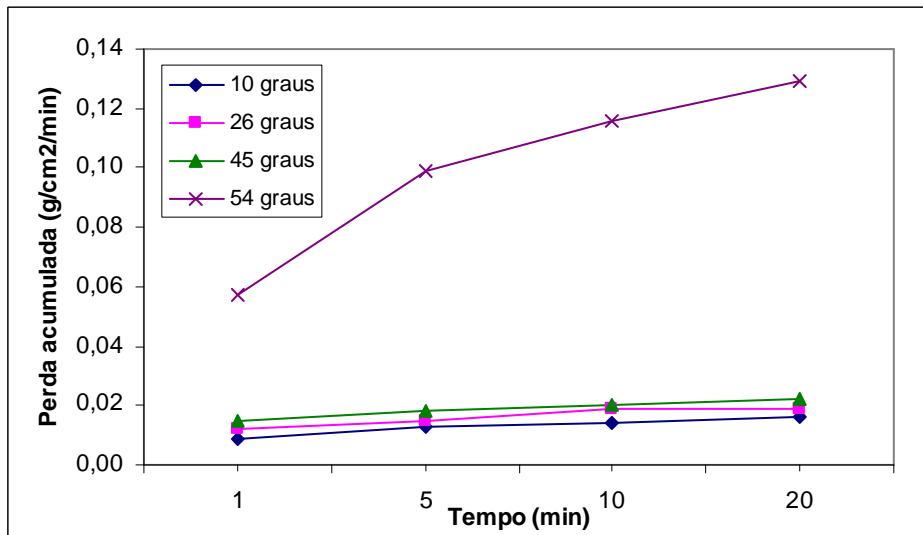


Figura 43 - Perda acumulada de solo para amostras em condições naturais de umidade e vazão de 3 litros, nas diferentes inclinações do aparelho Inderbitzen. As amostras correspondem ao horizonte superficial A/B.

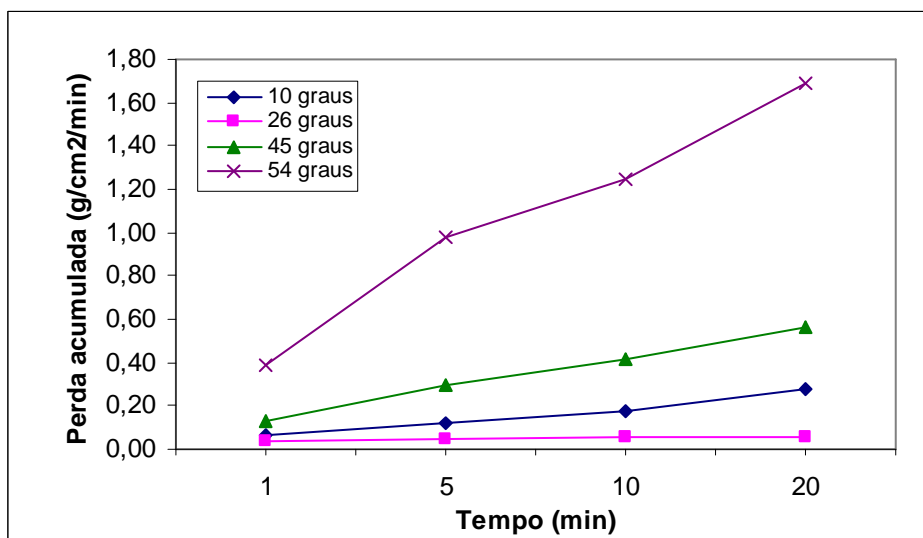


Figura 44 - Perda acumulada de solo para amostras em condições naturais de umidade e vazão de 3 litros, nas diferentes inclinações do aparelho Inderbitzen. As amostras correspondem à rocha sedimentar do tipo arenito

Maiores inclinações de rampa implicam em maiores perdas, mesmo que a perda seja pouco significativa como no caso das amostras do horizonte superficial.

Verificou-se que nas inclinações de 10°, 26° e 45°, as amostras sofreram estabilização das perdas a partir do primeiro minuto do teste, enquanto que, na rampa inclinada aos 54 graus, as perdas de solo estabilizaram-se somente depois de 10 minutos. Porém, com inclinação tão elevada as perdas, depois de um determinado tempo, estão relacionadas ao fluxo turbulento no interior do anel

Para uma mesma condição de umidade, por exemplo, as amostras de arenito perderam de 0,017 a 0,026 g/cm<sup>2</sup> numa vazão de 3 l/min. Ensaio essas amostras em uma vazão de 6 l/min as perdas foram de 0,048 a 0,074 g/cm<sup>2</sup>, mostrando que há uma relação direta entre a perda de solo e a vazão utilizada no ensaio.

É possível afirmar que as amostras secas perderam uma quantidade maior de solo devido à perda de umidade após 72 horas de exposição ao ar. Sem a presença da água na amostra, que em certa quantidade lhe confere uma parcela de resistência (fenômeno de sucção), a tensão transmitida pelos contatos entre as partículas (tensão efetiva) propiciou maior desagregação e transporte de material, em comparação com as amostras em condição de umidade natural.

Em condição pré-umedecida o solo apresentou a menor resistência à erosão laminar imposta pelo equipamento Inderbitzen. As perdas variaram em torno de 0,01 a 0,06 g/cm<sup>2</sup> durante o ensaio com vazão de 3 litros e de 0,02 a 0,14 g/cm<sup>2</sup> para a vazão de 6 litros para o horizonte superficial do solo.

Constatou-se, que a maior perda de material ocorreu nos primeiros 5 minutos do ensaio para as três condições umidade, para as quatro inclinações e para as duas vazões que foram submetidas as amostras. Isso ocorre, segundo Bastos (1999), devido à perda de coesão do solo através do umedecimento pelo fluxo superficial.

A Tabela 14 mostra a perda acumulada (g/cm<sup>2</sup>) para as camadas amostras na vazão de 3 l/min, com inclinação de 45°.

Tabela 14 - Perda de material versus tempo no ensaio de Inderbitzen

Tempo (min)	Horizonte superficial (perda em g/cm <sup>2</sup> )			Arenito (perda em g/cm <sup>2</sup> )		
	Natural	Seca ao ar	Pré-umedecida	Natural	Seca ao ar	Pré-umedecida
1	0,012	0,015	0,010	0,034	0,128	0,014
5	0,016	0,018	0,013	0,043	0,294	0,016
10	0,018	0,020	0,014	0,049	0,420	0,016
20	0,021	0,022	0,017	0,053	0,563	0,017

A Figura 45 mostra que as maiores perdas ocorreram entre os primeiros 5 e 10 minutos do ensaio.

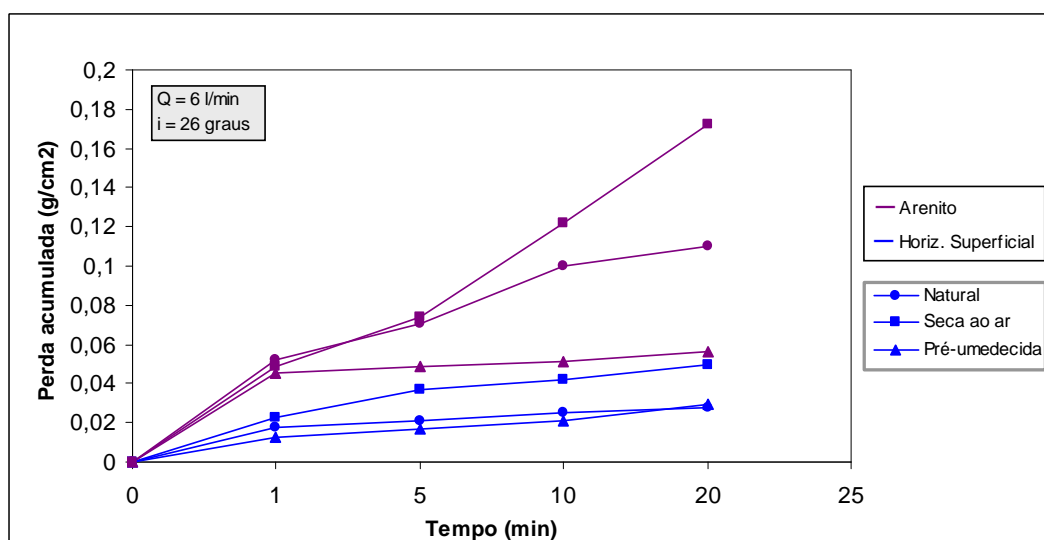


Figura 45 - Perda acumulada de solo para amostras em diferentes condições e umidade e vazão de 6 litros na inclinação de 26°, nas diferentes inclinações do aparelho Inderbitzen

Analisando o gráfico da Figura 43, é possível verificar que a perda de material foi maior no arenito do que no horizonte superficial. Para uma mesma unidade as perdas foram maiores nas condições de umidade seca ao ar e menores nas pré-umedecidas.

Em todas as condições de umidade e inclinações, a rocha sedimentar apresentou uma resistência muito menor à ação erosiva da água simulada pelo aparelho. Portanto, constatou-se que o desprendimento das partículas da camada

de arenito é superior e ocorre mais rapidamente do que na camada superficial do solo. Pode-se relacionar a isso, a variabilidade da cimentação na camada de arenito.

O fato de ocorrerem perdas maiores para a condição pré-umedecida, do horizonte superficial, pode ser explicado pela saturação diminuir a resistência do solo à erosão através da poropressão, ou seja, a força da água “empurra” as partículas tentando afastá-las causando a sua desagregação.

Para a determinação do parâmetro  $k$  ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ ) e a tensão cisalhante hidráulica crítica  $\tau_{h \text{ crit}}$  (Pa), efetuou-se o cálculo de erodibilidade para os resultados obtidos no tempo de 10 minutos do ensaio. Isso porque, no período de 1e 5 minutos existe a influência direta da primeira lâmina d'água sobre a amostra que causa um desprendimento maior das partículas.

Enquanto no tempo de 20 minutos, as perdas também podem ser elevadas em função, principalmente, da turbulência que ocorre sobre amostras muito erodíveis, que já apresentam sulcos quando submetidas a esse tempo de ensaio. Na camada superficial do solo isso não acontece, porém em algumas amostras de arenito, foi possível observar esse comportamento, o que descaracteriza o ensaio de Inderbitzen.

Os cálculos referentes a esses parâmetros são apresentados no Capítulo 2. Através dos valores de  $K$  e  $\tau_h$ , foi possível estabelecer comparações entre a suscetibilidade à erosão entre as camadas do horizonte superficial e de arenito presentes na voçoroca do Buraco Fundo.

O parâmetro  $k$  indica a erodibilidade do solo, então, quanto mais elevado for, mais suscetível é o solo/rocha à erosão. Valores baixos para  $\tau_h$  a indicam que uma tensão menor é suficiente para desencadear o processo de destacamento e transporte das partículas.

As curvas de perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ ) *versus* tensão hidráulica  $\tau_h$  das amostras em condição de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida são apresentadas nas Figuras 46 e 47.

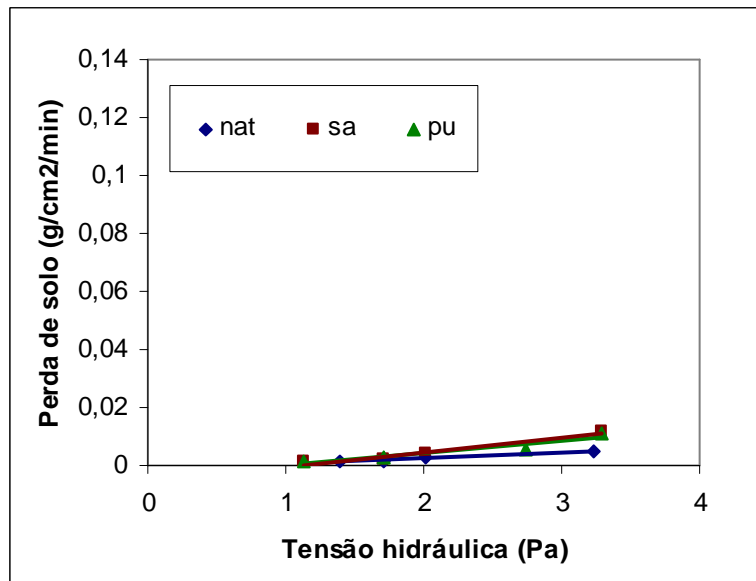


Figura 46 - Valores da perda de solo versus a tensão hidráulica para a camada do horizonte superficial do solo nas diferentes condições de umidade

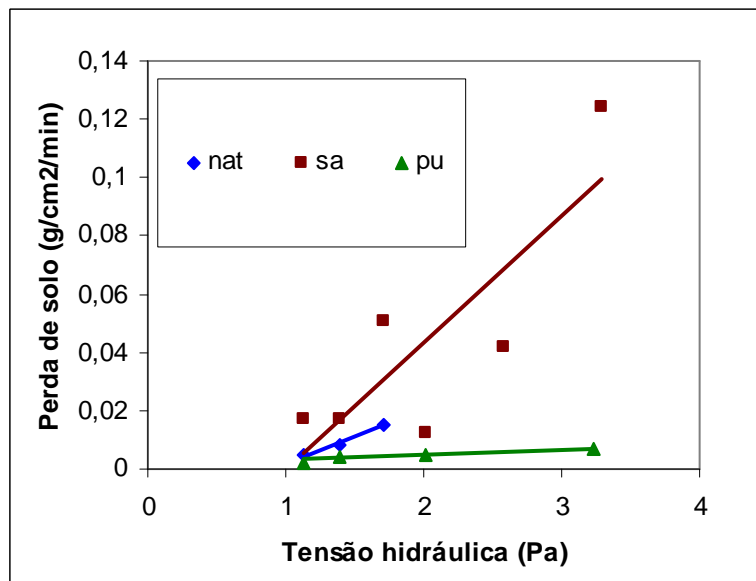


Figura 47 - Valores da perda de solo versus a tensão hidráulica para a camada de arenito nas diferentes condições de umidade

A Tabela 15 apresenta um resumo dos valores referentes à erodibilidade ( $k$ ) e a tensão hidráulica ( $\tau_h$ ) de ambas as camadas amostradas, em diferentes índices de umidades.

Tabela 15 - Valores da taxa de erodibilidade  $k$  e tensão hidráulica crítica  $\tau_h$  da camada do horizonte superficial e da camada de arenito no ensaio de Inderbitzen

	Natural		Seca ao ar		Pré-úmida	
	K (g/cm <sup>2</sup> /min/Pa)	$\tau_h$ (Pa)	K (g/cm <sup>2</sup> /min/Pa)	$\tau_h$ (Pa)	K (g/cm <sup>2</sup> /min/Pa)	$\tau_h$ (Pa)
Horiz. A/B	0,002	0,8	0,005	1,2	0,004	1,0
Arenito	0,018	0,5	0,0044	1,0	0,001	Indet.

As amostras demonstraram um comportamento típico para o ensaio, ou seja, para tensões menores houve perdas menores e, com o aumento da tensão hidráulica imposta pelo equipamento Inderbitzen, a quantidade de partículas desprendidas das amostras também foram maiores.

Para a camada de arenito o coeficiente de erodibilidade ( $k$ ) chegou a 0,08 g/cm<sup>2</sup>/min numa tensão hidráulica de 3,5 Pa. Para o horizonte superficial esse valor ficou em torno de 0,02 g/cm<sup>2</sup>/min para a mesma tensão.

Os valores  $\tau_{h \text{ crit}}$  de ambas as camadas ficaram bem próximos, porém a camada de arenito apresentou  $\tau_{h \text{ crit}}$  inferior, entre 0,5 e 1,0, enquanto que os valores para a camada superficial situaram-se entre 0,8 e 1,2. Para a amostra de arenito em condição de umidade pré-umedecida não foi possível calcular a tensão hidráulica crítica.

Os valores de  $K$  foram, em média, maiores para a camada de arenito do que para a camada superficial, portanto, neste caso, a rocha é considerada muito mais erodível que o solo. Suas taxas variam de 0,002 a 0,005, bem inferiores quando comparadas com as taxas do arenito que são de 0,001 a 0,0044.

O gráfico apresentado na Figura 48 mostra todos os ensaios e os valores de perda de solo e a sua relação com a  $\tau_{h \text{ crit}}$  e o coeficiente de erodibilidade ( $K$ ).

A média da  $\tau_h$  para todas as amostras nas diferentes vazões e teores de umidade foi de 1,1 Pa para o horizonte superficial e de 0,95 Pa para o arenito. O coeficiente de erodibilidade médio para as camadas foi de 0,004 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa para o horizonte superficial e de 0,03 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa para a camada de arenito.



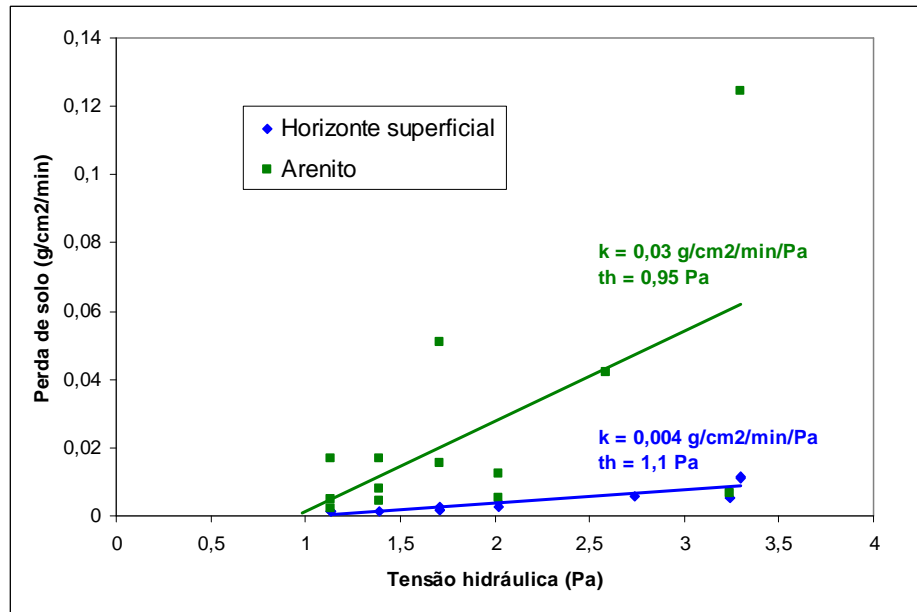


Figura 48 - Perda de solo versus tensão hidráulica para o horizonte superficial e para a camada de arenito todas as condições de umidade

Constata-se que o destacamento das partículas da camada de arenito é superior e ocorre mais rapidamente do que no horizonte superficial, o que pode estar relacionado à perda da resistência devido à sucção e a aparente fragilidade do agente cimentante entre suas partículas.

Já o horizonte superficial devido à presença de matéria orgânica, raízes e um teor de finos mais elevado em suas amostras, apresentou uma maior resistência à desagregação quando comparado com camada de arenito.

A erodibilidade dos solos depende praticamente da capacidade de desagregação e transporte de suas partículas. Dessa forma, nota-se que, frente aos índices hídricos empregados nesse ensaio, o horizonte superficial do solo apresentou-se resistente ao processo de erosão laminar. Ao contrário disso, a camada de arenito mais foi facilmente erodida pela lâmina d'água, principalmente na condição de umidade seca ao ar.

Com esses resultados é possível afirmar que os teores de umidade, tanto do solo quanto da rocha sedimentar, são decisivos para o comportamento do material frente à ação erosiva da água. Em períodos de estiagem, as camadas expostas perdem umidade para atmosfera, sendo facilmente erodidas em um evento de chuva torrencial.

## 4 CONCLUSÃO

A microbacia do Arroio Sarandi está localizada entre os municípios de Santa Maria e Dilermando de Aguiar/RS. Caracteriza-se por um relevo plano, com coxilhas suaves de declividade pouco acentuada. A litologia da região é composta por rochas sedimentares do tipo arenito com lentes de siltito e argilitos pertencentes à Formação Santa Maria, Membro Passo das Tropas. Os solos são do tipo argissolos com textura arenosa em superfície e variação no teor de argila conforme a profundidade. O uso e ocupação do solo estão relacionados à agricultura de subsistência e à pecuária extensiva.

Em função do seu avançado estágio de desenvolvimento, a voçoroca do Buraco Fundo foi a incisão erosiva estudada em maiores detalhes. A voçoroca possui aproximadamente 300 m de comprimento e 10 m de profundidade e esta localizada em uma vertente côncava-convexa. Desenvolveu-se em uma zona de falha segundo uma orientação preferencial N20°-30°E, ocorrendo alinhamentos secundários de orientação NE, N e NW formando os braços da incisão. O desenvolvimento do processo erosivo está associado aos escorregamentos rotacionais e abatimentos segundo direção preferencial onde se estabelecem as pseudo-dolinas.

Para os estudos propostos, foram analisados dois perfis estratigráficos diferentes. O Perfil I, localizado na cabeceira da incisão, com aproximadamente 7m de espessura onde ocorrem escorregamentos circulares mais acentuados e o Perfil II, com aproximadamente 8,5 m de espessura que, por ser de mais fácil acesso e por apresentar camadas semelhantes as do Perfil I, foi o local escolhido para realização das amostragens referentes aos ensaios de avaliação da erodibilidade.

No interior da incisão foram encontradas inúmeras feições erosivas que representam os mecanismos atuantes no processo e contribuem, individualmente ou em associação, para a evolução da voçoroca. São elas: panelas ou marmitas; escamas; escorregamentos circulares; corrida de lama; alcovas de regressão; escoamento de filetes; dutos ou *piping*; pináculos; e pedestal ou *demoiselles*. Certamente, das feições observadas, os escorregamentos são os maiores responsáveis pelo avanço da erosão, principalmente na cabeceira de voçoroca onde encontram-se paredões verticalizados de grande profundidade.

Além destas feições, deve-se salientar a presença de inúmeras pseudo-dolinas associadas à linhas de falhas próximas à incisão, originadas pelo colapso do horizonte superficial após a retirada, pelo escoamento subsuperficial, da camada subjacente que lhe servia de sustentação. Acredita-se que esse processo seja, juntamente com os escorregamentos, o responsável pela origem e pelo avanço da voçoroca do Buraco Fundo.

Os valores de  $P_i/s$  tanto para o horizonte superficial quanto para o arenito são bastante elevados, maior do que 52, o que indica solos erodíveis segundo Nogami e Villibor (1979), exceto a amostra do horizonte superficial, ensaiada em condição de umidade natural, cujo valor é de 20,6 classificada, portanto, como não-erodível.

A média da tensão hidráulica para todas as amostras nas diferentes vazões e teores de umidade foi de 1,1 Pa para o horizonte superficial e de 0,95 Pa para o arenito. O coeficiente de erodibilidade médio para as camadas foi de 0,004 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa para o horizonte superficial e de 0,03 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa para a camada de arenito o que significa que a rocha é aproximadamente 10 vezes mais erodível que o solo.

Constata-se que o destacamento das partículas da camada de arenito é superior e ocorre mais rapidamente do que no horizonte superficial, o que pode estar relacionado à perda da resistência devido à sucção e a aparente fragilidade do agente cimentante entre suas partículas. Já o horizonte superficial, devido à presença de matéria orgânica, raízes e um teor de finos mais elevado em suas amostras apresentou uma maior resistência à desagregação quando comparado com camada de arenito.

Os resultados dos ensaios de erodibilidade foram compatíveis com os resultados esperados. Os métodos de avaliação indireta da erodibilidade, como os ensaios de desagregação, perda de massa por imersão e infiltrabilidade, forneceram boas indicações do comportamento do solo e rocha frente à erosão. Estes ensaios, por serem de fácil execução poderão balizar os locais para a amostragem de ensaios mais complexos, como o de Inderbitzen.

A dificuldade encontrada neste trabalho para a realização dos ensaios e a obtenção de resultados mais consistentes, se deve a grande variabilidade granulométrica e de cimentação dos materiais, tanto horizontal quanto verticalmente. Desta forma sugere-se que em trabalhos futuros nesta região, seja realizado um mapeamento com maior detalhe das camadas estudadas procurando estabelecer suas

variações em profundidade e lateralmente e que as amostragens para a avaliação direta da erodibilidade sejam acompanhadas de análises granulométricas toda vez que se perceber mudanças na coloração e granulometria do material.

Com base nos resultados obtidos até agora, é possível afirmar que o horizonte superficial é mais resistente aos processos erosivos quando comparado à camada de arenito. Portanto, sugere-se, para os processos erosivos ainda incipientes que ocorrem na região, a sua contenção a fim de evitar estes avancem e atinjam a camada de rocha sedimentar, pois, conforme os resultados deste trabalho, esta é mais erodível que as camadas superficiais do solo.

Uma forma de contenção refere-se ao isolamento da área afetada com sulcos, ravinas, pseudo-dolinas, vertentes e a própria voçoroca do Buraco Fundo. Como nesta área predominam as pastagens, é necessária a retirada do gado, o que pode ser feito por meio de cercas de arame farpado, não deixando penetrar na área reservada nenhuma criação, pois, o pisoteio dos animais nas bordas da incisão erosiva desagrega o solo e, no caso da voçoroca do Buraco Fundo, contribui com os escorregamentos rotacionais responsáveis pelo avanço da erosão. Além disto, a presença de gado nas áreas submetidas a erosão impedirá a formação de um bom revestimento vegetal, indispensável para evitar a lavagem da superfície do terreno.

A área cercada deve ser maior do que a voçoroca. Se, por exemplo, uma voçoroca tem cerca de três metros de profundidade, a distância da cerca ao bordo mais próximo ao entalhe deve ser de 6 a 8m, conforme especificação da EMBRAPA (2002). Convém deixar uma distância ainda maior na cabeceira da voçoroca, porque neste local a erosão é mais intensa. No caso da voçoroca do Buraco Fundo, como ela tem cerca de 10 m de profundidade, sugere-se que a distância de colocação da cerca deva ficar em torno de 20 metros de suas bordas e em torno de 30 metros na sua cabeceira.

Nesta região os agricultores comumente utilizam as pseudo-dolinas como “aguadas” para o gado construindo taipas para contenção da água. Percebe-se que as taipas não possuem vertedouros e desta forma, em períodos de chuvas intensas elas rompem aumentando o processo erosivo. Sugere-se que os agricultores procurem orientação técnica de Órgãos como a EMATER para reavaliação destas pequenas barragens.

A recuperação destas áreas já erodidas, procurando torná-las novamente agricultáveis é muito difícil e cara e passa por diferentes medidas corretivas que,

segundo a EMBRAPA (2002), envolve controle da erosão à montante ou cabeceira da encosta, retenção dos sedimentos no interior da incisão e a revegetação, que deve ser feita tanto nas áreas de captação quanto na parte interna da voçoroca.

Onde já houve escorregamentos, é possível a suavização do talude (retaludamento) por métodos mecânicos, com a aplicação de fertilizantes e sementes de gramíneas que possam cobrir o solo rapidamente, como o azevém (anual) e pensacola (perene) que podem revegetar o solo antes que novas chuvas possam erodir a parte mobilizada. Para efetuar o retaludamento é preciso, antes de tudo, um estudo de estabilidade de taludes onde se deve avaliar entre outras coisas o ângulo de atrito dos materiais envolvidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Analuce de Araújo. **Voçorocas: Medidas de Prevenção e Contenção em Áreas Rurais**. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, 2007.

AGÜERO, José Lopes de Sebastião G. de. **A nova agricultura**. Rio de Janeiro: Salvat, 1979.

AUGUSTIN, Cristina Helena Ribeiro Rocha; ARANHA, Paulo Roberto Antunes. **Piping em área de voçorocamento, nordeste de Minas Gerais**. Revista Brasileira de Geomorfologia: Minas Gerais, 2006.

AIRES, Quincy Claude. **La erosión del suelo y su control**. Barcelon: Omega, 1960.

ANDRADE, Manuel Correa de. **O desafio Ecológico: Utopia e Realidade**. São Paulo: Hucitec, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1968. 6p. Origem: MB-30.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7108: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984. 3p. Origem: MB-31.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4.8 mm – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984. 8p. Origem: MB-28.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995. 18p. Origem: TB-3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457/86 Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**, 1968. 13p. Origem: MB-32.

BASTOS, Cezar Augusto Burkert. **Estudo geoténico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999, 303f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Rio Grande.

BERTONI, Joaquim; NETO, Francisco Lombardi. **Conservação dos solo**. São Paulo: Ícone, 1999.

BIGARELLA, J.J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Ed. da UFSC, v. 3, 2003. p. 877-1436.

BITAR, Omar Yazbek. **Meio Ambiente e Geologia**. São Paulo: Senac, 2004.  
CAMAPUM DE CARVALHO, J. et al. (Org.). **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. 464 p.

CARVALHO, J. C. **Processos erosivos no centro-oeste Brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 2006.

CASSETI, V. **Estudo dos efeitos morfodinâmicos pluviais no Planalto de Goiânia**. Tese de Doutorado. USP, S. Paulo, 1983.

DAL CONTE, Francisco Manoel. **Índice de Erodibilidade de um solo Podzólico Vermelho Amarelo, determinado sob condições de chuva simulada**. 1982, 67f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria.

DE LLANO, Filiberto Lopez Cadenas; CRIADO, Martin Blanco. **Aspectos cualitativos e cuantitativos de la erosion hídrica, y del transporte y deposito de materiales**. Madrid: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiências, 1968.

DIAS, Fernando Peres; HERRMANN, Maria Lúcia de Paula. **Suscetibilidade a deslizamentos: estudo de caso no bairro Saco Grande, Florianópolis – SC**. Caminhos de Geografia. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

DOMINGUES, Elvira Neves. Caracterização das feições erosivas e relações com o meio hidrobiológico em áreas impactadas da serra do mar, na região de Cubatão (SP). **Geociências**. UNESP: São Paulo, 2001.

DREW, David. **Processos interativos homem-meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand, 2002.

EMBRAPA SOLOS. **Relatório técnico e plano de monitoramento do projeto de recuperação de Áreas Degradadas**. Rio de Janeiro, 2002.

FÁCIO, J.A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. 1991. 107f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 1991.

FREIRE, E.P. Ensaio Inderbitzen modificado: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade do solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DA EROSÃO, 7., 2001, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2001.

GALETI, Paulo Anestar. **Conservação do Solo; Reflorestamento; Clima**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino agrícola, 1973.

\_\_\_\_\_, P.A. **Práticas de controle à erosão**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1985. 278 p.

GUERRA, Antônio José Teixeira; Marçal, Mônica dos Santos. **Geomorfologia Ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.

\_\_\_\_\_, A.J.T. Processos erosivos nas encostas. In: CUNHA, S.B.; GUERRA, A.J.T. (Org) **Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. p. 139-155.

\_\_\_\_\_, Antônio José Teixeira; SILVA, Antônio Soares da; BOTELHO, Rosângela Garrido Machado. **Erosão e Conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

\_\_\_\_\_, A.J.T.; MENDONÇA, J.K.S. Erosão dos solos e a questão ambiental. In: VITTE, A.C.; GUERRA, A.J.T. (Org.). **Reflexões sobre a geografia física do Brasil**. São Paulo: Bertrand Brasil, 2004.

HALLIDAY (2004), W.R. Pseudo Karst. In: GUN J. (Ed.). **Encyclopedia of Caves and Kars Science**, New York:Fitzroy Dearborn. 2004. P1321 a 1331.

HERNANDEZ, Fernando Braz Tabgerino (org.). **Conservação dos recursos do solo e água e irrigação coletiva nas microbacias hidrográficas dos córregos Sucuri, Bacuri e Macumã no município de Palmeira D'Oeste – São Paulo**. São Paulo: UNESP, 2000.

INDERBITZEN, A.L. **An erosion tests for soils**. Material reseach and standarts. Philadelphia, v. 1, n. 7, p. 553-554, 1 july. 1961.

INFANTI JUNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 131-152.

IPT. **Manual de ocupação de encostas**. CUNHA, M.A. (Coord). São Paulo: IPT, 1991, n. 1831, 216 p.

JACINTHO, E.C. et al. Solos Tropicais e o Processo Erosivo. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO. M.T.S. (Org.). **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. p. 93-156.

LACERDA, W. A.; SILVA, T.R.M. Erodibilidade dos solos de uma voçoroca da região de Ouro Preto, Minas Gerais. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DA EROSÃO, 7., 2001, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2001.

LEMOS, Clarice Farian. Avaliação da erosão entre sulcos em solos de diferentes classes de uso na bacia do rio Bucha (PR), através do aparelho Inderbitzen. **Revista Eletrônica Geografar**. Curitiba, 2007.

LEPSH, Igo F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

MACIEL FILHO, C.L. **Introdução à geologia de engenharia**. 2. ed. Santa Maria: UFSM; Brasília: CPRM, 1997. 284 p.



MENDES, Carlos André Ribeiro. **Erosão superficial em encosta íngreme bob cultivado perene e com pousio no município de Bom Jardim – RJ**. 2006, 236f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2006.

MIGUEL, Miriam Gonçalves; TEIXEIRA, Raquel Souza; PADILHA, Ana Carolica Ciriaco. Curvas Características de Sucção do Solo Laterítico da Região de Londrina/PR. **Revista de Ciência & Tecnologia**. V. 12, Nº 24, 2004.

MONTENEGRO, José Onaldo. **Características Físicas e Fator de Erodibilidade de Solos da Depressão Central do Rio Grande do Sul**. 1976, 92f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria, 1976.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. **Bulletin of International Association of Engineering Geology**, Krefeld, n. 19, p.196-199, 1979.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Ed. Villibor, 1995. p. 169-196.

OLIVEIRA, M.A.T. Processos Erosivos e Preservação de Áreas de Risco de Erosão por Voçorocas. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos – conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 57-99.

PAIVA, J.B.D. de.; BELING, F.A. Estimativa da produção anual de sedimentos para fins de avaliação do assoreamento de reservatórios. Estudo de caso: Rio das Velhas, Rio Paracatú e Urucuia. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 7., 2006, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre: ABRH, 2006. CD-ROM.

PINHEIRO, R. J.; NUMMER, A. V.; SANGOI, D. Caracterização de processo erosivo tipo voçoroca no oeste do estado do Rio Grande do Sul. In: 5ª Conferência Brasileira de estabilidade de Encostas, 2009, São Paulo. **Anais**. São Paulo: ABMS, 2009. CD ROM.

PIRES, Lislane Souza; SILVA, Max Leandro Naves; CURI, Nilton. **Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na região centro-leste de Minas Gerais**. Pesquisa agropecuária brasileira. Brasília, 2006.

RECKZIEGEL, Bernardete Weber; NETO, Silvana Fernandes. **A assistência técnica e educação escolar no distrito de São Valentim, Santa Maria, RS**. Santa Maria:UFSM, 2004.

SANTOS, C.A, MERSCHMANN, M.A.C. **Ensaio de erodibilidade como parâmetro no estudo de ravinas e voçorocas, na região de Santo Antônio do Leite, Distrito de Ouro Preto – MG**. VI Simpósio Nacional de Controle de Erosão: Presidente Prudente/SP, 2001.

SANTOS, Clibson Alves dos; SOBREIRA, Frederico Garcia; NETO, Ana Luiza Coelho. Comportamento hidrológico superficial e erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, Distrito de Ouro Preto/MG. **Revista Escola de Minas**, vol.55 n<sup>o</sup>.4, Ouro Preto, 2002.

SCHERER, C. M. S. et AL. Arcabouço Estratigráfico do Mesozóico da Bacia do Paraná. In: HOLZ, Michael; DE ROS, L.F. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, 2000.

SILVA, J.L.S. **Estudo dos processos de silicificação e calcificação em rochas sedimentares mesozóicas do Rio Grande do Sul, Brasil**. 1997, 157f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre.

SOUTO, Karine Vicência; LACERDA, Homero. Uso da terra, erosão acelerada e assoreamento na microbacia do córrego dos Góis, Anápolis (GO). Seminário de Iniciação Científica da UEG. **Anais**. Anápolis, 2004.

SUERTEGARAY, D.M.A. Desertificação: recuperação e desenvolvimento sustentável. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B (Org.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertland Brasil, 2003. p. 249-290.

TATTO, Janaina. **Análise dos Parâmetros Geológicos-Geotécnicos que Condicionam Erosão por Voçoroca no Município de São Francisco de Assis**. 2007, 84f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria.

WERLANG, M. K. **Configuração da rede de drenagem e modelado do relevo: conformação da paisagem na zona de transição da Bacia do Paraná na Depressão Central do Rio grande do Sul**. 2004, 191f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria.

VENTURI, Luis Antonio Bittar (org.). **Praticando Geografia**: técnicas de campo e laboratório. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

VILAR, O.M.; PRANDI, E.C. Erosão dos solos. In: Cintra, J.C.A.; Albiero, J.H. (Org.). **Solos do interior de São Paulo**. São Carlos: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica; USP, v.1, 1993. p. 177-206.