

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

CARACTERIZAÇÃO DA GRAMÍNEA *VETIVERIA*
***ZIZANIOIDES* PARA APLICAÇÃO NA**
RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS
POR EROSÃO

Margarita María Dueñas Orozco

Belo Horizonte

2009

**CARACTERIZAÇÃO DA GRAMÍNEA *VETIVERIA*
ZIZANIOIDES PARA APLICAÇÃO NA
RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS
POR EROSÃO**

Margarita María Dueñas Orozco

Margarita María Dueñas Orozco

**CARACTERIZAÇÃO DA GRAMÍNEA *VETIVERIA*
ZIZANIOIDES PARA APLICAÇÃO NA
RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS
POR EROSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Caracterização, prevenção e controle da poluição

Orientador: Prof. Gustavo Ferreira Simões

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2009

O74c	<p>Orozco, Margarita Maria Dueñas Caracterização da gramínea Vetiveria Zizanioides para aplicação na recuperação de áreas degradadas por erosão [manuscrito] / Margarita Maria Dueñas Orozco .— 2009. xi, 81 f. , enc. : il.</p> <p>Orientador: Gustavo Ferreira Simões.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 76-79</p> <p>1. Erosão – Teses. 2. Solos – Degradação – Teses. 3. Meio ambiente – Teses. I. Simões, Gustavo Ferreira. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 628(043)</p>
------	--

Ficha elaborada pelo Processamento Técnico da Biblioteca da EE/UFMG

HUELLAS

Una noche un hombre tuvo un sueño.

Soñó que iba paseando por una playa.

A medida que caminaba,

se iba proyectando en su mente la película de su vida.

*Se dio cuenta de que en cada escena de la película de su vida
existían dos pares de huellas en la arena: las suyas y las de Dios.*

Cuando la última escena de su vida apareció ante él,

volvió a mirar retrospectivamente

las huellas sobre la arena de la playa.

Entonces notó que muchas veces

a lo largo de su vida había tan sólo un par de huellas...

Comprobó que ocurría

en los momentos más difíciles de su existencia.

Llegó a preocuparse en gran manera por este hecho,

y preguntó a su Dios:

—"Señor,

tú me dijiste una vez que si decidía seguirte,

caminarías siempre conmigo...

Sin embargo he notado que durante los momentos de mi vida

en que tenía más dificultades y problemas

tan sólo existía un par de huellas.

No comprendo por qué

cuando más te necesitaba más me abandonabas".

Su Dios respondió:

—"Hijo, te quiero y nunca te he abandonado.

En los momentos de angustia y sufrimiento,

cuando tú has contemplado tan sólo un par de huellas,

eran los momentos en que yo te transportaba en mis brazos".

Anónimo

AGRADECIMENTOS

A Deus por suas infinitas bênçãos. Obrigada por trazer-me a este lindo lugar e dar-me a oportunidade de crescer como pessoa e como profissional, além de conhecer pessoas maravilhosas e vivenciar momentos únicos e inesquecíveis.

Aos meus pais Hugo e Alma que me ensinaram tudo o que sei, que me formaram como sou e que me incentivaram a assumir grandes desafios com alegria e dedicação. Obrigada por presentear-me com uma família harmoniosa, fonte de amor, segurança e respeito. Obrigada pela confiança e pelo orgulho que sempre demonstraram ter em mim.

As minhas irmãs Patri e Carito que mesmo longe sempre estiveram comigo, sendo permanentemente minha fortaleza. Agradeço toda a disposição para resolver meus problemas e as palavras oportunas cheias de carinho e compreensão.

Ao Rafa, um ser único e maravilhoso, que me acompanhou nesta caminhada em todos os momentos, foi sempre meu refúgio, minha paz, minha felicidade.

A toda minha família, especialmente a Andreita, minha tia Pilar e minha tia Carmen E., pelas palavras de apoio e por torcerem por meu sucesso.

Ao meu orientador Gustavo, exemplo de dedicação, trabalho, perfeccionismo e real vocação pela docência. Obrigada pelas longas horas de oportunas explicações, pela compreensão e disposição e por abrir minha mente ao conhecimento de uma área antes desconhecida, com paciência e boa vontade.

A Sofi, colaboradora incansável e grande amiga, por seu carisma, seu espírito lutador e por brindar-me com seu lindo sorriso e sua ajuda espontânea.

Aos meninos de iniciação científica Patrícia, Vinicius, Davi e Publio, sempre tão dispostos e prestativos, envolvendo-se no projeto como se fosse deles. Vão chegar longe.

Aos meninos do laboratório de geotecnia, especialmente a Tatiana, Sandra, Alonso e Ezequiel, pelos ensinamentos dos ensaios referentes ao projeto e sua contínua colaboração.

Ao Paulo por suas sábias dicas no laboratório e pela ajuda na coleta das amostras indeformadas.

Aos meus amigos do coração Marília, João, Paulo, Krisdany e Rosana por estarem sempre comigo, secando minhas lágrimas e me dando ânimo para continuar na luta.

A minhas queridas amigas brasileiras, quase irmãs, Lupita e Helenzinha, por sua companhia, seus conselhos, pela boa convivência e por fazerem minha vida mais agradável e alegre.

Aos professores e funcionários do DESA, especialmente a Iara, pela colaboração e apoio.

A professora Liséte por estar atenta as minhas necessidades e por ser exemplo de integridade.

Aos funcionários do Aterro Sanitário por permitir-me realizar meu trabalho de campo, apoiando-me durante todo o projeto.

Ao pessoal da Deflor Bioengenharia, especialmente ao professor Aloísio Rodrigues por financiar este projeto e por dar-nos suporte na sua implementação. Aos trabalhadores da Fazenda Guarará pelo serviço e cooperação.

Ao professor Edgar Mantilla, a Ana Lucia e ao Frederico pela abertura do laboratório no departamento de estruturas para realização dos ensaios de tração.

A Roci, Fer, Jessi e Luisfer por serem minha família neste país distante, dando-me a oportunidade de me sentir em casa e ter sempre um cantinho colombiano como refúgio nos momentos de saudade. A tia Lid por seu acolhimento e enorme carinho.

Aos meus amigos colombianos que sempre confiaram em mim, que me alegravam com suas lindas mensagens, especialmente a Carito Diaz por seu incentivo para que eu pleiteasse a bolsa e por sua orientação no processo, bem como, suas palavras de força e amizade.

Ao Governo Brasileiro, através do CNPq, por outorgar-me a bolsa de mestrado e por permitir-me ampliar meus conhecimentos e iniciar-me como pesquisadora.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

RESUMO

O surgimento de áreas degradadas no Brasil tem aumentado consideravelmente ao longo dos anos, ocasionando inúmeros prejuízos ao meio ambiente. Segundo a FAO (2005), aproximadamente 16% da área total do Brasil apresenta algum estado de degradação do solo induzida por atividades antrópicas. Em razão disto, o presente estudo tem como objetivo caracterizar a gramínea *Vetiveria zizanioides* para aplicação na recuperação de áreas degradadas por erosão, através da instalação de parcelas em campo e realização de um programa de ensaios de laboratório e campo. A gramínea foi escolhida, em virtude de suas características especiais, notadamente a alta tolerância a condições extremas, pouca altura e extenso sistema radicular. Para alcançar o objetivo, considerou-se a adaptação e crescimento da planta nos substratos de estudo, analisados em nível físico-químico. Além disso, avaliaram-se as propriedades mecânicas das raízes do *Vetiveria zizanioides*, estudando o ganho de resistência imposta pela sua raiz no solo, assim como sua resistência à tração. Do mesmo modo, determinou-se a perda de solo gerada pela erosão hídrica em cada parcela de estudo com diferentes tratamentos implantados. Os resultados mostraram que a gramínea requer cuidados em sua fase inicial assim como outras plantas; no entanto, ela se mostrou resistente tendo sobrevivido a condições adversas. No tocante à resistência ao cisalhamento, ao contrário do esperado, as matrizes de solo-raiz apresentaram menores resistências do que o solo sem raiz. Possivelmente a escolha da escala de trabalho não foi a mais adequada, sendo recomendado trabalhar com corpos de prova maiores ou fazer os ensaios diretamente em campo com equipamentos de maior porte. Confirmando resultados reportados por diferentes autores, observou-se grande variabilidade nos dados referentes à resistência das raízes submetidas à tração. Da mesma maneira, ratificou-se a tendência de que raízes de menores diâmetros apresentam maiores resistências. Com relação à perda de solo, observou-se que as maiores perdas foram geradas nas parcelas de controle, onde não existiu nenhum tipo de recobrimento do solo, assim como na área de maior inclinação e maior espaçamento entre os cordões da gramínea. Em face desses resultados, verifica-se que não é possível assegurar o êxito da aplicação de técnicas de bioengenharia na recuperação de áreas degradadas apenas com estudos isolados. O interesse sobre o assunto não se esgota nesta pesquisa, de modo que o tema prescinde de pesquisas complementares a serem efetivadas em escala real.

Palavras-chave: *Vetiveria zizanioides*, bioengenharia de solos, controle de erosão.

ABSTRACT

The appearance of degraded areas in Brazil has been increasing considerably along the years, causing countless damages to the environment. According to FAO (2005), approximately 16% of the total area of Brazil presents some state of soil degradation induced by human activities. In reason of this, the present study has as objective characterizes the Vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) for application in the recovery of areas degraded by erosion, through the installation of plots in field and accomplishment of a laboratory and field experimental program. This grass was chosen because of its special characteristics, especially the high tolerance to extreme conditions, little height and extensive root system. To reach the objective, it was considered the adaptation and growth of the plant in the studied substrata, analyzed in physical and chemical level. Besides, the mechanical properties of the *Vetiveria zizanioides*' roots were evaluated, studying the increase in resistance imposed by roots in the soil, as well as its root tensile strength. In the same way, it was considered the soil losses generated by the water erosion in each plot with different implanted treatment. The results showed that the grass requires care in its initial growth phase as well as other plants; however, it is resistant and can survive under adverse conditions. Concerning shear strength, unlike the expected, the soil-root system presented smaller resistances than the soil without roots. Possibly the choice of the work scale was not the most appropriate, being recommended working with larger samples or to do the tests directly in field with larger size equipments. Confirming results reported by other authors, great variability was observed in the data regarding the root tensile strength. In the same way, it was ratified the trend of smaller diameters roots to present larger tensile strength. Regarding the soil losses, it was observed that the largest losses were generated in the control plots, where there was no type of soil cover, as well as in the area of larger inclination and larger spacing among the strings of the grass. In face of those results, it is verified that is not possible to assure the success of bioengineering techniques application in the recovery of degraded areas just with isolated studies. The interest on the subject is not exhausted with this research, so it is necessary to carry out additional researches on real scale.

Key-words: *Vetiveria zizanioides*, soil bioengineering, erosion control.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS	X
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3 REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1 DEGRADAÇÃO AMBIENTAL DO SOLO	4
3.2 BIOENGENHARIA	6
3.3 ESTABILIDADE DE TALUDES OU ENCOSTAS	9
3.4 MORFOLOGIA E RESISTÊNCIA DAS RAÍZES	11
3.5 VETIVERIA ZIZANIOIDES	15
4 MATERIAL E MÉTODOS	18
4.1 ÁREA DE ESTUDO	18
4.1.1 <i>Climatologia</i>	18
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS	19
4.2.1 <i>Caracterização física</i>	19
4.2.2 <i>Caracterização química</i>	19
4.3 DEMARCAÇÃO E IMPLANTAÇÃO DAS PARCELAS.....	20
4.4 TRATAMENTOS IMPLANTADOS.....	22
4.5 AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA ADAPTAÇÃO E CRESCIMENTO DO VETIVERIA ZIZANIOIDES.....	23
4.6 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....	24
4.7 ENSAIOS DE TRAÇÃO	26
4.8 AVALIAÇÃO DA PERDA DE SOLO.....	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
5.1 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DURANTE O EXPERIMENTO.....	32
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS	33
5.2.1 <i>Caracterização física</i>	33
5.2.2 <i>Caracterização química</i>	35
5.3 AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA ADAPTAÇÃO E CRESCIMENTO DO VETIVERIA ZIZANIOIDES.....	37
5.3.1 <i>Aspectos comuns a todas as áreas de estudo</i>	37
5.3.2 <i>Aspectos específicos de cada área de estudo</i>	41
5.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....	48
5.5 ENSAIOS DE TRAÇÃO	55
5.6 AVALIAÇÃO DA PERDA DE SOLO.....	60
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
ANEXO A.....	80
ANEXO B.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – <i>Vetiveria zizanioides</i> (a) Muda; (b) Detalhe parte aérea; (c) Detalhe parte radicular.....	15
Figura 4.1 – Caracterização física (a) Massa específica e teor de umidade; (b) Coleta de amostras de solo para análise	19
Figura 4.2 – Esquema geral das parcelas implantadas em campo e alguns de seus detalhes.....	21
Figura 4.3 – Detalhes das parcelas: (a) Lâminas plásticas; (b) Retentor de sedimentos tipo Bermalonga©	22
Figura 4.4 – Tratamentos implantados em campo	23
Figura 4.5 – Procedimento de coleta de amostras indeformadas em campo.....	25
Figura 4.6 – Ensaio de cisalhamento direto: (a) Prensa de cisalhamento direto; (b) Corpo de prova após o ensaio	25
Figura 4.7 – Ensaio de raízes: (a) Cinza gerada após incineração de raízes; (b) Ensaio de massa específica das raízes	26
Figura 4.8 – (a) Equipamento para realização de ensaios de tração; (b) Esquema de corpos de prova antes e após os ensaios de tração.....	27
Figura 4.9 – Corpos de prova para ensaios de tração de raízes com diferentes diâmetros.....	28
Figura 4.10 – Canalizadores de sedimentos: (a) Detalhe frontal; (b) Detalhe posterior	29
Figura 4.11 – Procedimento de coleta de amostras em campo para avaliação da perda de solo: (a) Medição da altura de água escoada; (b) Homogeneização da mistura; (c) Retirada de alíquota.....	29
Figura 5.1 – Variação da precipitação e temperatura médias mensais durante o experimento.....	32
Figura 5.2 – Variação da umidade relativa do ar média mensal durante o experimento.....	33
Figura 5.3 – Curvas granulométricas dos solos.....	34
Figura 5.4 – Folhas secas e amareladas nos primeiros meses de implantação das parcelas	38
Figura 5.5 – Florescência do <i>Vetiveria zizanioides</i>	40
Figura 5.6 – Medição da parte aérea e parte radicular do <i>Vetiveria zizanioides</i> extraído da área experimental	40
Figura 5.7 – Vista geral de taludes desnudos antes da instalação das parcelas experimentais na área da favela.....	42
Figura 5.8 – Vista geral de taludes com parcelas experimentais na área da favela.....	42
Figura 5.9 – Talude desnudo antes da instalação das parcelas experimentais na área da favela corte.....	42
Figura 5.10 – Talude no final do projeto na área da favela corte.....	42
Figura 5.11 – Talude desnudo antes da instalação das parcelas experimentais na área da favela aterro.....	42
Figura 5.12 – Talude no final do projeto na área da favela aterro. Capim vetiver e presença de mamona como planta invasora.....	42
Figura 5.13 – Dificuldades na área da favela: (a) Presença de gado; (b) Capim destruído pela pastagem; (c) Efeito do pisoteio do gado	43
Figura 5.14 – Resíduos sólidos na área e deterioração das parcelas	44
Figura 5.15 – Feições erosivas observadas nas parcelas	44
Figura 5.16 – Talude desnudo antes da instalação das parcelas experimentais na área de campo.....	45
Figura 5.17 – Parcelas 1 a 3 na área de campo.....	45
Figura 5.18 – Parcelas 4 a 6 na área de campo.....	45
Figura 5.19 – Parcelas 7 a 9 na área de campo.....	45
Figura 5.20 – Talude no final do projeto na área de campo vista 1	46
Figura 5.21 – Talude no final do projeto na área de campo vista 2	46
Figura 5.22 – Talude desnudo antes da instalação das parcelas experimentais na área da escola vista 1	47
Figura 5.23 – Talude desnudo antes da instalação das parcelas experimentais na área da escola vista 2	47
Figura 5.24 – Vista geral de taludes com parcelas experimentais na área da escola.....	47
Figura 5.25 – Parcelas de 1 a 5 na área da escola	47

Figura 5.26 – Parcelas de 6 a 8 na área da escola	48
Figura 5.27 – Parcelas de 9 a 12 na área da escola	48
Figura 5.28 – Ensaio 1: Deslocamento horizontal vs Tensão cisalhante.....	49
Figura 5.29 – Ensaio 1: Deslocamento horizontal vs Deslocamento vertical	49
Figura 5.30 – Ensaio 2: Deslocamento horizontal vs Tensão cisalhante.....	50
Figura 5.31 – Ensaio 2: Deslocamento horizontal vs Deslocamento vertical	50
Figura 5.32 – Ensaio 4: Deslocamento horizontal vs Tensão cisalhante.....	50
Figura 5.33 – Ensaio 4: Deslocamento horizontal vs Deslocamento vertical	50
Figura 5.34 – Ensaio 5: Deslocamento horizontal vs Tensão cisalhante.....	50
Figura 5.35 – Ensaio 5: Deslocamento horizontal vs Deslocamento vertical	50
Figura 5.36 – Ensaio 6: Deslocamento horizontal vs Tensão cisalhante.....	51
Figura 5.37 – Ensaio 6: Deslocamento horizontal vs Deslocamento vertical	51
Figura 5.38 – Envoltórias de resistência lineares.....	52
Figura 5.39 – Envoltórias de resistência não-lineares.....	52
Figura 5.40 – Ensaio 3: Deslocamento horizontal vs Tensão cisalhante.....	54
Figura 5.41 – Envoltória de resistência linear.....	54
Figura 5.42 – Variação da resistência à tração com o diâmetro das amostras ensaiadas (Planta de dois anos).....	55
Figura 5.43 – Box-Plot dos resultados dos ensaios (Planta de dois anos).....	56
Figura 5.44 – Variação da resistência à tração com o diâmetro das amostras ensaiadas (Planta de três anos).....	57
Figura 5.45 – Box-Plot dos resultados dos ensaios (Planta de três anos).....	58
Figura 5.46 – Erosões do tipo sulco e ravina nas parcelas F-4, F-5 e E-4	60
Figura 5.47 – Alíquotas coletadas no 26/03/09 na área da favela.....	62
Figura 5.48 – Mistura de água e solo em uma parcela na área da favela	62
Figura 5.49 – Lodo gerado em uma parcela da área da favela.....	62
Figura 5.50 – Alíquotas coletadas no 26/03/09 na área da escola 1.....	63
Figura 5.51 – Alíquotas coletadas no 26/03/09 na área da escola 2 e 3.....	63
Figura 5.52 – Peneiramento amostras 17/03/09.....	63
Figura 5.53 – Peneiramento amostras 25/03/09.....	63
Figura 5.54 – Peneiramento amostras 30/03/09.....	63
Figura 5.55 – Perda de solo medida em campo para os tratamentos (escala natural)	64
Figura 5.56 – Perda de solo medida em campo para os tratamentos (escala logarítmica)	64
Figura 5.57 – Relação Perda de solo (PS)/R.K.LS para os tratamentos (escala natural)	68
Figura 5.58 – Relação Perda de solo (PS)/R.K.LS para os tratamentos (escala logarítmica)	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Vantagens dos métodos de bioengenharia.....	8
Tabela 3.2 – Efeitos hidromecânicos benéficos da vegetação	10
Tabela 3.3 – Taxas de erosão estimadas na Costa Pacífica.....	11
Tabela 3.4 – Resistência à tração de diversas espécies de plantas	12
Tabela 3.5 – Características do <i>Vetiveria zizanioides</i>	16
Tabela 4.1 – Caracterização física do substrato	19
Tabela 4.2 – Distribuição de parcelas em campo	20
Tabela 4.3 – Caracterização geral do mix de sementes.....	23
Tabela 5.1 – Análise granulométrica do solo	34
Tabela 5.2 – Análises físicas do solo	35
Tabela 5.3 – Análises químicas do solo	35
Tabela 5.4 – Características dos ensaios de cisalhamento direto	49
Tabela 5.5 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento.....	52
Tabela 5.6 – Estatística descritiva dos resultados dos ensaios (Planta de dois anos).....	56
Tabela 5.7 – Estatística descritiva dos resultados dos ensaios (Planta de três anos).....	57
Tabela 5.8 – Cobertura das parcelas experimentais estimada de forma qualitativa	61
Tabela 5.9 – Quantidade de sedimentos calculados para diferentes eventos de chuva	61
Tabela 5.10 – Classes de interpretação para o fator K.....	66
Tabela 5.11 – Eficiência do Vetiver System na redução da perda do solo e na diminuição do escoamento superficial	67
Tabela 5.12 – Eficiência de diferentes tratamentos na redução da perda do solo e na diminuição do escoamento superficial	68
Tabela 5.13 – Tabela resumo dos fatores locais para a USLE e suas correlações	71

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Associação Americana de Ensaios e Materiais)
CTRS BR-040	Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040
C	Parcelas experimentais de controle
Ci	Parcelas da Área Campo
Ei	Parcelas da Área Escola
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMIC	Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda.
Fi	Parcelas da Área Favela
FAO	<i>The Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura)
GLASOD	<i>Global Assessment of Soil Degradation</i> (Avaliação Global da Degradação do Solo)
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MEG	Massa Específica dos Grãos
NBR	Norma Brasileira
Ri	Erosividade da chuva do evento i
RAR	<i>Root Area Ratio</i> (Taxa de raiz por área)
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i> (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos)
USLE	<i>Universal Soil Loss Equation</i> (Equação Universal da Perda do Solo)
MUSLE	<i>Modified Universal Soil Loss Equation</i> (Equação Universal da Perda do Solo Modificada)
V	Parcelas experimentais com cordões de vetiver
VMB	Parcelas experimentais com cordões de vetiver + mix de sementes + biomanta
VS	<i>Vetiver System</i> (Sistema vetiver)
A	Perda de solo calculada por unidade de área
C	Fator uso e manejo
E	Energia cinética de um evento de chuva
Es	Energia cinética do segmento de chuva
I	Intensidade da chuva
I30	Máxima intensidade de chuva em 30 min
K	Fator erodibilidade do solo
L	Fator comprimento do declive
p	Lâmina total de chuva para o segmento
R	Fator erosividade da chuva
S	Fator grau de declive
P	Fator prática conservacionista
PS	Perda de solo

X	Comprimento da vertente
τ	Resistência ao cisalhamento do material
σ	Tensão normal na superfície de ruptura
Φ	Ângulo de atrito interno
c	Intercepto de coesão

1 INTRODUÇÃO

O surgimento de áreas degradadas, no Brasil, tem aumentado consideravelmente ao longo dos anos, ocasionando inúmeros prejuízos ao meio ambiente. Segundo a FAO (2005), aproximadamente 16% da área total do Brasil apresenta algum estado de degradação do solo induzida por atividades antrópicas. Em ambientes urbanos, a acelerada urbanização, a falta de planejamento e as inadequadas técnicas de manejo do solo são fatores que incrementam essa degradação e promovem a perda de solos férteis e sua progressiva desertificação.

Especificamente em Belo Horizonte, segundo estudos de Viana (2000), é notório o predomínio de feições erosivas do tipo sulco (75%), correspondentes ao estágio inicial de erosão superficial. As ravinas apresentam-se com 16%, seguidas dos solapamentos com 5%, logo após as voçorocas com 3% e outro tipos de feições erosivas com 1%. Todas essas feições erosivas produzem um significativo volume de sedimentos.

Segundo Oliveira (1996), que realizou um estudo preliminar sobre a produção de sedimentos na Bacia Hidrográfica da Pampulha, em Belo Horizonte (MG), e do volume de aporte à represa de mesmo nome, o aporte anual médio de sedimentos é de 380.000 m³/ano, sendo que o reservatório já se encontra com um volume assoreado de 9.080.000 m³, correspondente a 50% do seu volume inicial. A autora afirmou que o aporte anual de sedimentos na bacia, varia conforme a intensidade e frequência dos eventos chuvosos e também, com a evolução da urbanização. A metodologia adotada para esta avaliação foi baseada na equação Universal de Perda de solo Modificada (MUSLE), sendo necessária a realização de hipóteses e simplificações para conseguir estimativas próximas, correspondendo a condições extremas de escoamento superficial. Assim, o estudo propôs como medida de extrema urgência a retirada de um volume considerável de sedimentos por meio de medidas estruturais de controle de assoreamento, sem descartar que são necessárias também medidas não estruturais para a resolução satisfatória desta questão. Com tudo, a ação coordenada das municipalidades é primordial já que os custos de recuperação são bem maiores que os custos de prevenção.

Com o objetivo de mitigar esses impactos ambientais e minimizar os riscos inerentes à instabilidade de taludes, a bioengenharia tem surgido como uma técnica eficiente e de baixo custo, sendo uma alternativa aos métodos tradicionais de estabilização e reforço de solos. A vegetação tem sido reconhecida não só por suas qualidades estéticas, mas também por seus

efeitos hidromecânicos benéficos e pela proteção do solo contra a erosão. Além disso, a vegetação afeta a estabilidade superficial do solo, principalmente pelo aumento na resistência ao cisalhamento, através do reforço oferecido pelas raízes (GRAY & SOTIR, 1996).

A técnica de bioengenharia proposta neste projeto visa utilizar o *Vetiveria zizanoides* (conhecido popularmente como capim vetiver), gramínea com propriedades únicas e uma alta adaptabilidade, para fins de controle de erosão e estabilização de taludes. São múltiplas as vantagens tanto em nível técnico e econômico, quanto ecológico e estético que são proporcionadas pelo seu uso. A gramínea foi escolhida, dadas suas características particulares de adaptação em condições extremas, seu sistema radicular denso, que alcança profundidades até de 3 metros, e seu uso como barreira de retenção de sedimentos. Segundo Truong & Hengchaovanich (1997) a raiz do vetiver tem uma resistência à tração média equivalente a um sexto (1/6) do aço doce. Por essa razão, o papel da gramínea na estabilização de taludes pode ter um papel importante ao comparar-se com o ganho de resistência dado por outras plantas e árvores já testadas.

Entretanto, a carência de informação precisa acerca das propriedades das raízes das plantas (NORRIS & GREENWOOD, 2006) e a ausência de metodologias para sua quantificação (GRAY & SOTIR, 1996) são razões que motivam o desenvolvimento do presente projeto. Poucas referências encontradas na literatura avaliam a resistência ao cisalhamento que as raízes impõem ao solo, seja em laboratório ou em campo.

Considerando que técnicas de bioengenharia não são muito divulgadas e utilizadas no Brasil, o presente projeto tem como objetivo investigar com maior detalhe as propriedades mecânicas das raízes e o uso dessas técnicas em condições locais, visando determinar o comportamento peculiar da gramínea e incentivar seu uso extensivo para a recuperação de tantas áreas degradadas presentes em nosso ambiente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Caracterizar a gramínea *Vetiveria zizanioides* para aplicação na recuperação de áreas degradadas por erosão.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os substratos da área de estudo sob o ponto de vista físico-químico;
- Avaliar qualitativamente a adaptação, comportamento e crescimento do *Vetiveria zizanioides* nos taludes estudados;
- Determinar o ganho de resistência imposta pela raiz do *Vetiveria zizanioides* no solo em estudo;
- Determinar a resistência à tração das raízes do *Vetiveria zizanioides* em relação a seu diâmetro;
- Analisar a eficiência proporcionada pelo *Vetiveria zizanioides* na retenção de partículas do solo, gerando uma diminuição na perda do mesmo;
- Comparar os resultados obtidos no estudo com dados internacionais, para determinar o efeito das condições locais no desempenho da planta.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 *Degradação ambiental do solo*

Degradação ambiental do solo indica a redução dos potenciais usos das terras por uma combinação de processos tanto naturais quanto antrópicos agindo sobre elas. Para estes últimos, os fatores de degradação do solo, podem ser divididos em cinco grandes categorias (GLASOD, 1991):

- a. Desmatamento para a agricultura ou pastagens, florestas comerciais de grande escala, construção de estradas, desenvolvimento urbano etc.;
- b. Superpastoreio: que destrói a cobertura do solo, causa compactação e acelera a invasão de espécies arbustivas indesejáveis;
- c. Atividades agrícolas: o manejo inadequado da terra inclui o cultivo de solos frágeis; pousio reduzido; uso indiscriminado do fogo; práticas que resultam na exportação de nutrientes do solo; transposição de rios para fins de irrigação ou irrigação inadequada de solos;
- d. Superexploração da vegetação para uso doméstico (combustível, cercas etc.), deixando proteção insuficiente contra a erosão do solo;
- e. Atividades industriais ou bioindustriais que causam poluição do solo.

A forma de degradação mais comum é a erosão, já que é uma das causas principais pelas quais a perda da capacidade do solo para uso presente e futuro apresenta-se. Segundo Carvalho *et al.* (2006), o termo erosão provém do latim (*erodere*) e significa “corroer”. Nos estudos ligados às Ciências da Terra, o termo é aplicado aos processos de desgaste da superfície terrestre (solo) pela ação da água, do vento, do gelo e de organismos vivos (plantas e animais), além da ação do homem.

A erosão é um processo que envolve destacamento, transporte e deposição da partícula (ARAUJO *et al.*, 2005). Este processo é causado basicamente por forças de tração ou arrasto (água, vento, gelo), sendo função da velocidade, descarga, forma e rugosidade da superfície. Por outro lado, a erosão é contida por forças de atrito ou coesão que são função das

propriedades do solo, sua estrutura e as interações físico-químicas que nele acontecem (GRAY & SOTIR, 1996).

Como regra geral, regiões com solos altamente erodíveis, relevo íngreme, vegetação escassa e ventos fortes e com um clima seco, mas com tormentas intensas ocasionais, apresentam a mais alta perda de solo por erosão. Atividades humanas freqüentemente intensificam ou aceleram as taxas de erosão, particularmente quando associadas à remoção da vegetação, cultivos ou outros distúrbios do solo, o que incrementa ou concentra o escoamento superficial (GRAY & SOTIR, 1996).

Em regiões de clima tropical, como é o caso do Brasil, a água é o agente imediato e decisivo do processo erosivo, atuando desde a fase de alteração da rocha (intemperismo químico) até a fase de remoção e transporte das partículas desagregadas (VIANA, 2000). A erosão hídrica é controlada por quatro fatores que são: clima, tipo de solo, topografia e cobertura vegetal. Os parâmetros climáticos de maior importância para este tipo de erosão são a intensidade e duração da precipitação. Dependendo do tipo de solo alguns deles são inerentemente mais susceptíveis à erosão que outros; esta susceptibilidade do solo à erosão é conhecida como “erodibilidade”. Comprimento e declividade dos taludes são as variáveis topográficas de maior influência, assim como o tipo e extensão da cobertura vegetal (GRAY & SOTIR, 1996).

A erosão hídrica ou pluvial manifesta-se de diferentes maneiras. Começa com o impacto das gotas de chuva e evolui finalmente para a formação de voçorocas. Os diversos tipos de erosão hídrica são:

- a. **Efeito *splash***: resulta do impacto das gotas de chuva caindo diretamente sobre as partículas de um solo exposto, desagregando-o.
- b. **Erosão laminar**: também chamada erosão em lençol, é a remoção do solo de uma área inclinada em camadas finas. É o escoamento superficial que dá origem a este tipo de erosão, já que se distribui pelas encostas de forma dispersa, sem se concentrar em canais (GUERRA e CUNHA, 1995).
- c. **Erosão em ravinas**: é a remoção do solo pela água através de pequenos, porém, bem definidos canais, onde se concentra o fluxo sobre o solo. Geralmente este tipo de

erosão é mais sério que a erosão laminar, porque as velocidades do escoamento superficial são mais altas nas ravinas ou canaletas. A erosão por ravinamento é mais séria onde ocorrem chuvas intensas, em bacias hidrográficas ou locais com características de alto escoamento superficial e camada superficial do solo solta.

- d. **Erosão em voçorocas:** as voçorocas são canais de fluxo intermitente, maiores que as ravinas. Esses canais levam água durante e imediatamente após as chuvas e, a diferença das ravinas, não podem ser removidas com lavouras normais do solo. Elas tendem a se formar onde grandes volumes de escoamento superficial são concentrados e descarregados em encostas com solos erodíveis.
- e. **Erosão em *piping*:** A erosão subterrânea ou *piping* é um processo de formação de tubos, ou seja, formação de canais a partir da face de uma encosta ou talude por meio do carreamento de partículas. Esse processo pode evoluir para grandes cavidades no subsolo.

Assim, a consequência imediata dos estágios iniciais dos processos erosivos é a remoção da camada fértil do solo, expondo horizontes de maior erodibilidade e correspondendo à perda de solos agricultáveis. A formação de estágios mais avançados como sulcos, ravinas e voçorocas provoca a inutilização parcial ou total da área atingida. Além disso, feições do tipo voçoroca podem danificar ou destruir edificações, estradas, vias públicas, plantações etc., expondo às pessoas ao risco geológico (VIANA, 2000).

Essa remoção ou perda do solo, causará, de modo complementar, assoreamento dos rios, dos lagos e finalmente a deposição do material sedimentar nas plataformas continentais dos oceanos (TEIXEIRA *et al.*, 2001). O impacto deste sedimento na qualidade da água é muito significativo. Gray & Sotir (1996) destacaram que os sedimentos eram o principal poluente nos Estados Unidos em termos de magnitude e impacto negativo aos cursos de água.

3.2 Bioengenharia

A bioengenharia de solos é um termo específico que se refere primariamente à utilização de plantas vivas ou partes delas com o intuito de mitigar problemas ambientais, tais como encostas erodidas e desestabilizadas, margens de rios, sistemas de trilhas, aterros sanitários, áreas mineradas, dentre outros. Raízes e caules servem como estrutura principal e elementos

mecânicos no sistema de proteção de taludes (GRAY & SOTIR, 1996). Ao contrário de outras tecnologias nas quais as plantas são meramente um componente estético do projeto, na bioengenharia elas são um dos componentes mais importantes (ARAUJO *et al.*, 2005).

Técnicas de bioengenharia são baseadas no conhecimento biológico e, em particular, no conhecimento botânico, para a implementação de medidas de proteção e estabilização (SCHIECHTL & STERN, 1996). O sucesso dessa implementação requer também algum conhecimento dos fatores que governam a massa e a estabilidade superficial dos taludes.

Segundo Morgan & Rickson (1995), bioengenharia e engenharia biotécnica são termos que se encontram comumente na literatura, mas existe confusão nas suas definições precisas. Segundo os autores, bioengenharia refere-se ao uso de alguma forma de vegetação, sendo uma única planta ou uma coleção de plantas, como material de engenharia. Engenharia biotécnica refere-se às técnicas onde a vegetação é combinada com estruturas inertes, obtendo assim os benefícios tanto de componentes vegetais quanto de componentes não vegetais para o esquema proposto. No presente trabalho serão adotadas estas definições.

Segundo Araujo *et al.* (2005) o sistema de tecnologias que hoje é denominado bioengenharia pode ser encontrado desde os povos antigos da Ásia e da Europa. Historiadores chineses, por exemplo, registraram o uso dessas técnicas no reparo de diques desde o ano 28 a.C. Antigos visitantes ocidentais à China remetem sobre margens de rios e barragens estabilizadas com grandes cestos tecidos com salgueiro, cânhamo ou bambu, preenchidos com pedras.

A utilização desses materiais naturais como métodos para o controle da erosão foram perdendo popularidade com a chegada da Revolução Industrial. Sistemas “duros” ou inertes foram promissores inicialmente por serem mais duráveis, baratos e seguros. Segundo Gray & Sotir (1996), esta tendência foi muito mais marcada nos Estados Unidos que na Europa. Neste último, algumas pessoas continuaram usando e melhorando ambos os métodos de construção (vivos e inertes).

Por volta do século XVI, técnicas de bioengenharia do solo estavam sendo utilizadas por toda a Europa. Aproximadamente na mesma época, na Áustria estavam-se desenvolvendo técnicas de construção de barreiras vivas contra a sedimentação, plantando linhas de estacas de plantas em cursos de água para o aprisionamento de sedimentos e para reforma de canais.

Até nossos dias, muitas são as publicações e as experiências que se tem com referência à bioengenharia e também à evolução das técnicas, tendo tornado esta tecnologia mais conhecida no exterior. No entanto, ainda há resistência às técnicas em muitos países, inclusive no Brasil, justamente pelo fato de ainda ser pouco conhecida e divulgada (ARAUJO *et al.*, 2005).

Os benefícios dos métodos da bioengenharia são descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Vantagens dos métodos de bioengenharia

VANTAGENS	
TÉCNICAS	Proteção contra erosão superficial Aumento na estabilidade das encostas através do reforço e drenagem do solo pelas raízes Proteção contra a queda de rochas Proteção contra o vento
ECOLÓGICAS	Regulação da umidade e temperatura próximas à superfície, criando condições adequadas para o crescimento vegetal Aperfeiçoamento do regime hídrico do solo através da interceptação, evapotranspiração e armazenamento Melhoramento da estrutura do solo e formação de um horizonte superior Criação e provisão de habitats para a fauna e flora locais Utilização de materiais biodegradáveis
ECONÔMICAS	Redução de custos de construção e manutenção Criação de áreas agricultáveis e de lazer
ESTÉTICAS	Integração das estruturas à paisagem Redução da poluição visual A paisagem se torna mais atraente

Fonte: Araujo *et al.* (2005)

Diferentes classificações para a bioengenharia de solos têm sido descritas por vários autores (GRAY & SOTIR, 1996; SCHIECHTL & STERN, 1996, ARAUJO *et al.*, 2005). Segundo Schiechtl & Stern (1996), técnicas de bioengenharia de solos são divididas em quatro grupos:

- a. Técnicas de proteção do solo: protegem rapidamente o solo por meio da ação de uma cobertura, controlando a erosão superficial e a degradação imediata. Melhora a retenção da água e promove a atividade biológica. Exemplo desta técnica são as biomantas antierosivas fabricadas com fibras vegetais ou sintéticas.
- b. Técnicas de estabilização de solos: são projetadas para reduzir ou eliminar distúrbios de forças mecânicas. Elas estabilizam e seguram taludes sujeitos a deslizamentos por meio da penetração de raízes, diminuindo a poro-pressão através da transpiração e melhorando a drenagem. Geralmente esta técnica é complementada por trabalhos de proteção do solo para resguardá-lo contra a erosão.

- c. Técnicas de construção combinadas: combina o uso de plantas vivas com materiais inertes (pedra, concreto, aço, plástico) com o objetivo de segurar taludes instáveis. Isto incrementa a eficiência e a expectativa de vida das medidas empregadas.
- d. Técnicas de construção complementares: inclui semeadura e plantio e objetiva afiançar a transição do estágio de construção ao projeto completo.

3.3 Estabilidade de taludes ou encostas

De acordo com Morgan & Rickson (1995) o uso da vegetação para estabilização de taludes começou na antiguidade. O uso de construções biotécnicas para o solo aconteceu pela primeira vez nos Estados Unidos. Experiências passadas mostram que taludes vegetados são mais resistentes contra movimentos de massa e erosão da água (GRAY & SOTIR, 1996). Mais recentemente, o papel da vegetação em alguns processos geotécnicos específicos tem sido reconhecido.

A estabilidade de encostas é governada pelas cargas e pela resistência do solo. A altura das árvores em crescimento adiciona cargas, mas, as raízes das árvores funcionam como reforço do solo e incrementam a resistência. A vegetação influencia indiretamente através deste efeito no regime de umidade do solo. As plantas interceptam água de chuva e retiram a água do solo via evapotranspiração. Isto reduz a umidade do solo e a poro-pressão, incrementando a resistência ao cisalhamento do solo. As raízes das plantas tendem a incrementar a permeabilidade do solo e a infiltração, enquanto a camada orgânica associada com a cobertura vegetal tende a retardar esta última (MORGAN & RICKSON, 1995).

A vegetação tem uma função extremamente importante no controle da erosão pluvial. As perdas do solo devido a esta erosão podem ser diminuídas até mil vezes, mantendo-se uma cobertura densa de gramíneas ou vegetação herbácea (USDA, 1978). Os benefícios protetores ou estabilizadores da vegetação dependem do tipo de vegetação e do tipo de processo de degradação da encosta. Uma cobertura de gramíneas ou vegetação herbácea muito densa, por exemplo, oferece uma das melhores proteções contra a erosão superficial. Ao contrário de uma vegetação arbórea com raízes profundas, que é mais eficiente para prevenir ou mitigar rupturas superficiais de massas de solo (GRAY & SOTIR, 1996; ARAUJO *et al.*, 2005).

É assim que o *Vetiveria zizanioides* conjuga os efeitos benéficos tanto da vegetação herbácea quanto da vegetação arbórea, dada sua pouca altura e seu extenso sistema radicular. Estes efeitos apresentam-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Efeitos hidromecânicos benéficos da vegetação

EFEITOS HIDROMECAÑICOS BENEFICOS DA VEGETAÇÃO	
VEGETAÇÃO HERBÁCEA E GRAMÍNEA	VEGETAÇÃO ARBÓREA
Interceptação: as folhagens e os resíduos de plantas absorvem a energia da chuva e previnem o destacamento do solo pelo impacto da chuva.	Reforço do solo pelo sistema radicular: as raízes reforçam mecanicamente o solo pela transferência de tensões cisalhantes.
Contenção: o sistema radicular agrega ou contém fisicamente as partículas do solo enquanto a parte aérea filtra os sedimentos do escoamento superficial.	Redução da umidade do solo: a evapotranspiração e a interceptação na folhagem podem limitar a formação de uma poro-pressão positiva da água.
Retardamento: caules e folhas incrementam a rugosidade da superfície e diminuem a velocidade do escoamento superficial.	Suporte: os caules ancorados e incrustados podem agir como suporte ou pilastra, cancelando as tensões cisalhantes para abaixo da encosta.
Infiltração: plantas e seus resíduos ajudam a manter a porosidade e permeabilidade do solo e, portanto atrasam ou impedem o escoamento superficial.	Sobrecarga: o peso da vegetação pode, em certos casos, aumentar a estabilidade, aumentando a tensão normal na superfície de cisalhamento.

Fonte: Adaptado de Gray & Sotir (1996).

Na maior parte das vezes, a vegetação tem uma influência benéfica na estabilidade de taludes, mas, ocasionalmente pode afetar esta estabilidade de forma adversa ou apresentar efeitos indesejáveis, como obstruir a visão e dificultar inspeção de encostas. No entanto, existem técnicas que buscam maximizar os benefícios das plantas, minimizando assim seus riscos, como a seleção e colocação apropriada das plantas e adequadas técnicas de manejo, como a poda e a brotação.

Efeitos como a sobrecarga podem ser tanto benéficos quanto adversos, dependendo do solo e das condições da encosta. O principal mecanismo desestabilizador é, provavelmente, o vento, que pode causar uma instabilidade local no talude. A principal influência prejudicial na estabilidade da massa de solo, associada à vegetação arbórea, parece ser a preocupação com as cargas externas e o perigo delas caírem ou virarem sob ação de ventos muito fortes.

A redução da umidade leva a uma menor poro-pressão na encosta devido à evapotranspiração, mas, por outro lado, sua redução pode acentuar o aparecimento de rachaduras levando conseqüentemente a uma maior capacidade de infiltração.

Dado que o desenvolvimento da vegetação arbórea em encosta reforça o solo e melhora a estabilidade, de forma recíproca a sua remoção pode enfraquecer os solos e desestabilizar os taludes. Amaranthus *et al.* (1985) estimaram que as taxas de erosão e deslizamentos em áreas

perturbadas eram, em média, cem vezes maiores em áreas de estradas do que em encostas naturais não perturbadas (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Taxas de erosão estimadas na Costa Pacífica

TIPOS DE TERRENO	PERDAS MÉDIAS POR EROSÃO (m ³ /ha/ano)	AUMENTO DA EROSÃO EM RELAÇÃO À COBERTURA NATURAL
Áreas naturais	0,32	-
Áreas aradas	1,48	5x
Áreas de estradas	52,12	109x

Fonte: Adaptado de Amaranthus *et al.* (1985).

Tuchy (1982) *apud* García *et al.* (2003) constatou que o índice de erosão antes da abertura de uma estrada florestal era de 30 kg/ha/ano, porém, durante a abertura, ele aumentou para 3.000 kg/ha/ano. Depois do término da implantação da estrada, o índice de erosão baixou, após algum tempo, para 120 kg/ha/ano. O autor relatou ainda que o tempo teórico da erosão de um solo de floresta de 18 cm de profundidade é de 575.000 anos, mas o mesmo solo, sem a floresta, seria erodido em 18 anos.

3.4 Morfologia e resistência das raízes

A vegetação afeta a estabilidade do solo, principalmente pelo aumento na resistência ao cisalhamento, através do reforço oferecido pelas raízes. O valor do sistema radicular nesse aspecto dependerá da sua resistência e concentração, características de ramificação e distribuição espacial no solo (GRAY & SOTIR, 1996). O reforço de raízes é influenciado pelo tipo e natureza da vegetação e as variações das condições do solo no local (Van BEEK *et al.*, 2005).

A morfologia das raízes é controlada geneticamente e pelas condições ambientais. O desenvolvimento de uma determinada arquitetura radicular em resposta a esses dois fatores, dita sua contribuição à estabilidade da encosta. Em geral, sistemas radiculares com raízes fortes e profundas, que penetram potenciais planos de cisalhamento, tendem a aumentar a estabilidade contra deslizamentos superficiais.

Devido às exigências de oxigenação pelas células das raízes, estas tendem a concentrar-se próximas à superfície, fazendo com que a influencia das raízes no reforço mecânico do solo se restrinja a até 1,5 m de profundidade.

Podem ser encontradas na literatura grandes variações na resistência das raízes, que dependem da espécie vegetal utilizada e de fatores locais, tais como o ambiente de desenvolvimento, a estação do ano, o diâmetro e a orientação das raízes. A resistência à tração das raízes de diversas espécies vegetais pode-se aproximar de 70 MPa, mas parece situar-se na escala de 10 a 40 MPa, para a maioria das espécies. O grupo das coníferas tende a apresentar resistências menores do que árvores decíduas. Os arbustos parecem ter resistências radiculares pelo menos comparáveis àquelas das árvores (GRAY & SOTIR, 1996).

Na Tabela 3.4, apresenta-se um quadro resumo da resistência à tração de varias espécies vegetais, entre elas o *Vetiveria zizanioides*, com o objetivo de visualizar claramente a variação que entre elas acontece e os valores obtidos por diversos estudos realizados.

Tabela 3.4 – Resistência à tração de diversas espécies de plantas

Espécie	Diâmetro de raízes (mm)	Resistência à tração (MPa)	Fonte
Late Juncellus	0.38±0.43	24.50±4.2	Hengchaovanich (2003)
Dallis grass	0.92±0.28	19.74±3.00	
White Clover	0.91±0.11	24.64±3.36	
Vetiver grass	0.66±0.32	85.10±31.2	
Common Centipede grass	0.66±0.05	27.30±1.74	
Bahia grass	0.73±0.07	19.23±3.59	
Manila grass	0.77±0.67	17.55±2.85	
Bermuda grass	0.99±0.17	13.45±2.18	
<i>Fagus sylvatica</i>	1.33	57.47	Bischetti <i>et al.</i> (2005)
<i>Salix purpurea</i>	1.28	51.47	
<i>Salix caprea</i>	1.42	47.80	
<i>Fraxinus excels</i>	1.95	36.86	
<i>Alnus viridis</i>	2.03	20.42	
<i>Corylus avellana</i>	1.65	67.87	
<i>Picea abies</i>	1.78	38.94	
<i>Larix deciduas</i>	1.68	66.14	
Elygrass	-	25 – 70	Cazzuffi <i>et al.</i> (2006)
Eragrass	-	38 – 55	
Pangrass	-	15 – 23	
Vetivergrass	-	25 – 60	
Vetiver Grass	0.2 – 2.2	40 – 180	Hengchaovanich (2003)
Vetiver Grass	0.7 – 0.8	75	Boletin vetiver (2006)
<i>Salix sp.</i> (sauce)		9 – 36	Hengchaovanich (2003) Boletin vetiver (2006)
<i>Populus sp.</i> (alamo)		5 – 38	
<i>Alnus sp.</i> (aliso)		4 – 74	
<i>Pseudotsuga sp.</i> (abeto de Douglas)		19 – 61	
<i>Hacer sacharinum</i> (arce plateado)		15 – 30	
<i>Tsuga heterophylla</i> (cicuta del oeste)		27	
<i>Vaccinum sp.</i> (gaulussacia)		16	
<i>Hordeum vulgare</i> (cebada) (zacate, hierbas)		15 – 31	
(musgo)		2 – 20	
<i>Vetiveria zizanioides</i> (pasto vetiver)		0.002 – 0.007	
		40 – 120	

Vários pesquisadores (MENDONÇA E CARDOSO, 1998; BISCHETTI *et al.*, 2005; BRANSBY *et al.*, 2006; De BAETS *et al.*, 2008) relatam uma redução na resistência radicular com o aumento do diâmetro. As raízes não são diferentes, a esse respeito, das fibras de outros materiais que exibem uma tendência semelhante. Fica evidente então, que as raízes mais finas podem contribuir para o aumento da resistência e, conseqüentemente, do reforço do solo (Van BEEK *et al.*, 2005). Estas últimas não só tem a vantagem de apresentar resistências maiores, como também uma resistência superior para serem arrancadas do solo, porque apresentam uma superfície específica maior do que as raízes mais grossas, para taxas de área radicular equivalentes (GRAY & SOTIR, 1996).

As fibras radiculares aumentam a resistência ao cisalhamento do solo, primariamente pela transferência das tensões cisalhantes que se desenvolvem na matriz do solo para as fibras, através do atrito na interface ao longo da extensão das fibras que estão fixas. Quando o cisalhamento ocorre, a fibra é deformada. Essa deformação causa um alongamento da fibra, desde que haja atrito suficiente na interface raiz-solo e uma tensão limitada para manter as fibras no lugar e evitar deslizamento ou o arrancamento das raízes. Esse alongamento mobiliza a resistência da fibra. O componente dessa força tangencial à zona de cisalhamento resiste diretamente à ruptura, enquanto o componente normal aumenta a tensão normal no plano de cisalhamento (GRAY & SOTIR, 1996).

Uma das características mecânicas importantes das raízes é a sua resistência à tração, ao contrário dos solos, que apresentam resistência à compressão. O efeito combinado de solo e raízes resulta em reforço do solo (De BAETS *et al.*, 2008). Três diferentes respostas são possíveis durante o cisalhamento de um solo reforçado com fibras, que são o rompimento, o alongamento ou o deslizamento de fibras.

A resistência ao cisalhamento de um solo é, usualmente, dada pelo Critério de Mohr-Coulomb, conforme Equação 3.1:

$$\tau = c + \sigma \tan \Phi \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Em que:

τ : resistência ao cisalhamento do material;

σ : tensão normal na superfície de ruptura;

Φ : ângulo de atrito interno;

c: intercepto de coesão.

O ângulo de atrito interno (Φ) e a coesão (c) são conhecidos como parâmetros de resistência ao cisalhamento. Eles podem ser determinados por vários ensaios de laboratório em amostras representativas de solo ou, alternativamente, em ensaios de campo, ou retroanalizados, a partir da avaliação de escorregamentos acontecidos, utilizando, por exemplo o método das fatias nos taludes de estudo.

Segundo Thermann *et al.*, (2006) muitos são os fatores que influenciam no valor de resistência de cisalhamento de um solo. Entre eles, as propriedades do solo, como a forma e tamanho do grão, distribuição do tamanho dos grãos, conteúdo de água, grau de compactação etc. Outro fator, inclui parâmetros do procedimento do ensaio, como velocidade de deslocamento, tamanho do plano de cisalhamento, tipo de aparato e preparação do ensaio. Uma terceira fonte que poderia ter influência nas imprecisões dos ensaios são introduzidas pelo equipamento em si mesmo e pelos procedimentos de laboratório (preparação da amostra, colocação da amostra no equipamento etc.).

A principal razão para a perda de estabilidade e do aumento na frequência de deslizamentos de encostas, após uma derrubada da vegetação, é o decaimento da raiz e a perda de resistência. As raízes menores são as primeiras a desaparecer após um corte ou derrubada. Haverá um período entre o corte e a regeneração da nova brotação em que a estabilidade diminuirá gradativamente, alcançando um mínimo, e então aumentará novamente, conforme as novas raízes se estabelecem no solo. Esse tempo depende da espécie de árvore, das condições do local e do momento das operações de reflorestamento (GRAY & SOTIR, 1996).

Algumas pesquisas realizadas com o objetivo de estudar as propriedades mecânicas das raízes das plantas e o reforço do solo derivado da ação das mesmas tem utilizado resultados empíricos ou bases qualitativas ou quantitativas, para avaliar o potencial das plantas para aplicação em bioengenharia . Esses estudos incluem ensaios em campo, testes de laboratório e aplicação de modelos de simulação. Ao mesmo tempo, esses estudos produzem dados que mostram o incremento na resistência ao cisalhamento devido à interação solo-raiz e descrevem a relação e as características que influenciam o fenômeno (GOLDSMITH, 2006).

3.5 *Vetiveria zizanioides*

Vetiveria zizanioides L (Nash) recentemente reclassificada como *Chrysopogon zizanioides* L (Roberty) é uma gramínea perene, com talos eretos que atingem de 0,5 a 1,5 m de altura e folhas relativamente rígidas e compridas, com 75 cm de comprimento e não mais de 8 mm de largura (THE WORLD BANK, 1993). O sistema radicular, com numerosas fibras e raízes cilíndricas, é capaz de alcançar 3 m de profundidade e em alguns casos tem-se conseguido raízes até de 5 metros (CAZZUFFI *et al.*, 2005; BOLETIN VETIVER NÚMERO 14, 2006). A espécie, originária da Índia, foi promovida em 1980 pelo Banco Mundial para a conservação de solos.



Figura 3.1 – *Vetiveria zizanioides* (a) Muda; (b) Detalhe parte aérea; (c) Detalhe parte radicular

Mediante testes de DNA comprovou-se que a maioria de cultivos de *V. zizanioides*, distribuídos em mais de 120 países tropicais e subtropicais, são estéreis, ainda que apresentem espigas e inflorescência de uma atrativa cor avermelhada.

O primeiro uso que tornou o capim vetiver (nome comum) conhecido em nível mundial foi o óleo ou essência extraído por destilação das raízes da planta e usado em perfumes. Na antiguidade utilizou-se também na confecção de artesanatos e tetos para moradias (BOLETIN VETIVER NÚMERO 14, 2006). Devido a suas características morfológicas, fisiológicas e ecológicas únicas, tem um papel muito importante na proteção ambiental e na construção civil, como apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Características do *Vetiveria zizanioides*

CARACTERÍSTICAS	VANTAGENS
MORFOLÓGICAS	Talos duros e eretos que podem resistir a fluxos de água intensos; Densas barreiras quando plantadas juntas, reduzindo a velocidade do fluxo e formando um eficiente filtro; Sistema radicular profundo e denso.
FISIOLÓGICAS	Tolerância a variações extremas do clima (secas, fogo, geada, alagamento); Ampla faixa de pH no solo (3-10,5); Alta tolerância a níveis tóxicos de metais (Al, Mn, Cd, Cr etc.).
ECOLÓGICAS	Reprodução por mudas, sendo assim uma planta não invasora (sementes estéreis); Promove a sucessão natural.

Fonte: Adaptado de Truong & Hengchaovanich (1997) e Grimshaw (2005).

A resistência à tração das raízes do *Vetiveria zizanioides* varia entre 40 e 180 MPa para um diâmetro de raízes entre 0,2 e 2,2 mm. A resistência média é de cerca de 75 MPa (equivalente a aproximadamente 1/6 do aço doce) com diâmetro de raízes de 0,7 a 0,8 mm, sendo este diâmetro o mais comum para as raízes da gramínea (TRUONG & HENGCHAOVANICH, 1997; HENGCHAOVANICH, 1998; BOLETIN VETIVER NÚMERO 14, 2006).

Por seu rápido crescimento e seu sistema de raízes extenso e profundo o capim vetiver pode prover a força estrutural necessária em um relativo curto período de tempo. Cazzuffi *et al.* (2006) descrevem que as raízes da planta são capazes de crescer 2 m nos primeiros dois anos, enquanto Truong & Hengchaovanich (1997) referem um crescimento de 2 a 3 m no primeiro ano. As raízes apresentam sistema radicular agregante, formando um grampeamento natural estabilizante de encostas e taludes.

Devido a esta característica especial das raízes do *Vetiveria zizanioides* se estenderem profundamente no solo, causando o aperto e ancoragem necessários para prevenir deslizamentos superficiais, alguns pesquisadores tem estudado a resistência ao cisalhamento gerada pela interação solo-raiz. É assim que Mickovski *et al.* (2005) relatam como a resistência ao cisalhamento foi determinada em laboratório por meio de amostras de 60x60x20 mm a uma velocidade de 0,2 mm/h. Esses resultados ao mesmo tempo, foram confirmados por ensaio de campo com amostras de dimensões de 32x32 cm de lado e 20 cm de altura.

De igual maneira, Cazzuffi *et al.* (2006) realizaram ensaios de cisalhamento direto em laboratório para capim vetiver e outras três espécies de gramíneas introduzidas em áreas do Mediterrâneo. Os ensaios foram realizados em um grande equipamento, onde foi necessário construir um suporte projetado especialmente, capaz de fixar a amostra durante o ensaio. As amostras possuíam dimensões de 200 mm de diâmetro e 1 m de altura.

Por outro lado, o vetiver sobrevive em vários tipos de solo (inclusive areias, argilas, cascalhos e até solos ricos em alumínio) com limitações mínimas. É resistente a pragas, doenças, déficit hídrico, geadas e fogo. Forma-se por touceiras e se reproduz somente por mudas. O pasto vetiver, devido a sua alta resistência, freqüentemente atua como planta pioneira, estabelecendo-se em condições hostis e criando micro-climas que permitem o desenvolvimento de plantas nativas (TRUONG & LOCH, 2004; CAZZUFFI *et al.*, 2006).

É usada como barreira para reter sedimentos, dado que a planta cresce uma em direção à outra (biotactismo positivo) e na estabilização de aterros e áreas erodidas (PEREIRA, 2006). O sistema de conservação de solos (sistema vetiver) quando plantado em curvas de nível, forma uma barreira protetora nos taludes, que reduz o escoamento superficial, fazendo com que os sedimentos depositem-se. Sendo as barreiras impermeáveis e não concentrando o escoamento superficial, a água filtra-se através delas, alcançando a base do talude com uma velocidade menor, sem causar erosão nem se concentrar em uma área particular.

Graças às características especiais do vetiver e a sua alta tolerância a condições climáticas e edáficas adversas, incluindo elevados níveis de metais pesados; ele também vem sendo utilizado amplamente para fitorremediação e reabilitação de áreas contaminadas como minas e barragens de rejeitos em países como Austrália, Chile, China, África do sul, Tailândia e Venezuela (BOLETIN VETIVER NÚMERO 14, 2006).

4 MATERIAL E MÉTODOS

As atividades desenvolvidas envolveram a implantação e monitoramento de um conjunto de parcelas experimentais em campo e a realização de um programa de ensaios de laboratório.

4.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040 (CTRS BR-040) na região noroeste do município de Belo Horizonte – MG.

O trabalho de campo foi desenvolvido entre abril de 2008 e março de 2009. Foram escolhidos quatro taludes naturais de diferentes inclinações e tipos de solo. Estes taludes apresentavam algum tipo de erosão e foram deixados completamente desnudos ou descobertos para iniciar os experimentos. As quatro áreas selecionadas são denominadas: favela corte, favela aterro, campo e escola. Cabe ressaltar que esses nomes originaram-se pela nomeação anterior das áreas pelos funcionários do aterro sanitário.

4.1.1 Climatologia

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima de Belo Horizonte está inserido no domínio climático Cwa, denominado clima tropical de altitude, em que o período de verão registra chuvas e temperaturas elevadas, enquanto o inverno é caracterizado por baixas temperaturas e pouca precipitação. A temperatura é amena durante todo o ano, variando de 16°C a 31°C, sendo a média de 21°. O mês mais frio geralmente é julho, enquanto o mês mais quente usualmente é janeiro.

A cidade conta com a proteção da Serra do Curral, que barra os ventos mais fortes. A umidade relativa do ar gira em torno de 65% e a média anual de chuvas é de 1600 mm, sendo mais freqüentes de outubro a março.

A CTRS possui uma estação pluviométrica próxima à área de estudo que permite o acompanhamento pontual da precipitação, parâmetro climatológico de relevante importância para a avaliação da perda do solo. A temperatura e a umidade relativa do ar são também parâmetros monitorados.

4.2 Caracterização dos substratos

Com o objetivo de determinar as condições e propriedades iniciais do solo em cada uma das áreas de estudo, foi realizada uma caracterização físico-química dos substratos.

4.2.1 Caracterização física

Em campo foram determinados a massa específica e o teor de umidade do solo em cada área de estudo, por meio da coleta de amostra em um cilindro de volume conhecido, pesado posteriormente e levado à estufa (105-110°) por 24 horas (Figura 4.1a).



Figura 4.1 – Caracterização física (a) Massa específica e teor de umidade; (b) Coleta de amostras de solo para análise

Foram coletadas aleatoriamente 8 amostras de solo (2 favela corte, 1 favela aterro, 2 campo, 3 escola) a uma profundidade aproximada de 20 cm (Figura 4.1b), identificadas e levadas ao laboratório para as respectivas análises (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Caracterização física do substrato

PARÂMETROS	METODOLOGIA	LOCAL
Massa específica	EMBRAPA 1997 (adaptadas)	Laboratório da CTRS BR-040
Teor de umidade		
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181/84	Laboratório de Geotecnia Ambiental (UFMG)
Massa específica dos grãos	ABNT NBR 6508/84	
Limite de liquidez	ABNT NBR 6459/84	
Limite de plasticidade	ABNT NBR 7180/84	Em campo
Permeabilidade	Permeâmetro de Guelph	

4.2.2 Caracterização química

Com o objetivo de analisar a fertilidade natural dos substratos foram retiradas no total 6 amostras compostas de solo, sendo que na área escola, que é a maior de todas, foram retiradas 4 amostras. A coleta das amostras consistiu na divisão da área a ser amostrada de maneira

uniforme, limpeza do local escolhido retirando capim, pedras e sujeira e, finalmente a escavação de um furo, com profundidade aproximada de 20 cm, para a coleta da amostra de solo.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos limpos, devidamente identificados e enviados posteriormente para o Laboratório e Planejamento Agropecuário MINIMAX Ltda., para realização das análises para caracterização química, segundo seus procedimentos. Os principais parâmetros de fertilidade avaliados foram: pH em água, acidez potencial (H+Al), macronutrientes (P, K, N) e micronutrientes (Cu, Mn, Zn, Fe, B), matéria orgânica (M.O.) e carbono (C).

4.3 Demarcação e implantação das parcelas

Foram implantadas 37 parcelas, cada uma com área de 48 m² (12 m de comprimento e 4 m de largura) distribuídas conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Distribuição de parcelas em campo

ÁREA	Nº. DE PARCELAS	INCLINAÇÃO	ESPAÇAMENTO ENTRE CORDÕES
Favela corte	9	45%	4 m
Favela aterro	7	38%	4 m
Campo	9	30%	4 m
Escola	12	29%	2 m
TOTAL	37	-	-

O espaçamento entre cordões foi definido com o objetivo de avaliar posteriormente as perdas de solo em campo, comparando igual espaçamento e diferente inclinação (áreas favela corte e campo) e igual inclinação e diferente espaçamento (áreas campo e escola).

A Figura 4.2 apresenta um esquema da distribuição das parcelas em campo com os detalhes dos tratamentos implementados e o espaçamento entre cordões da gramínea em estudo.

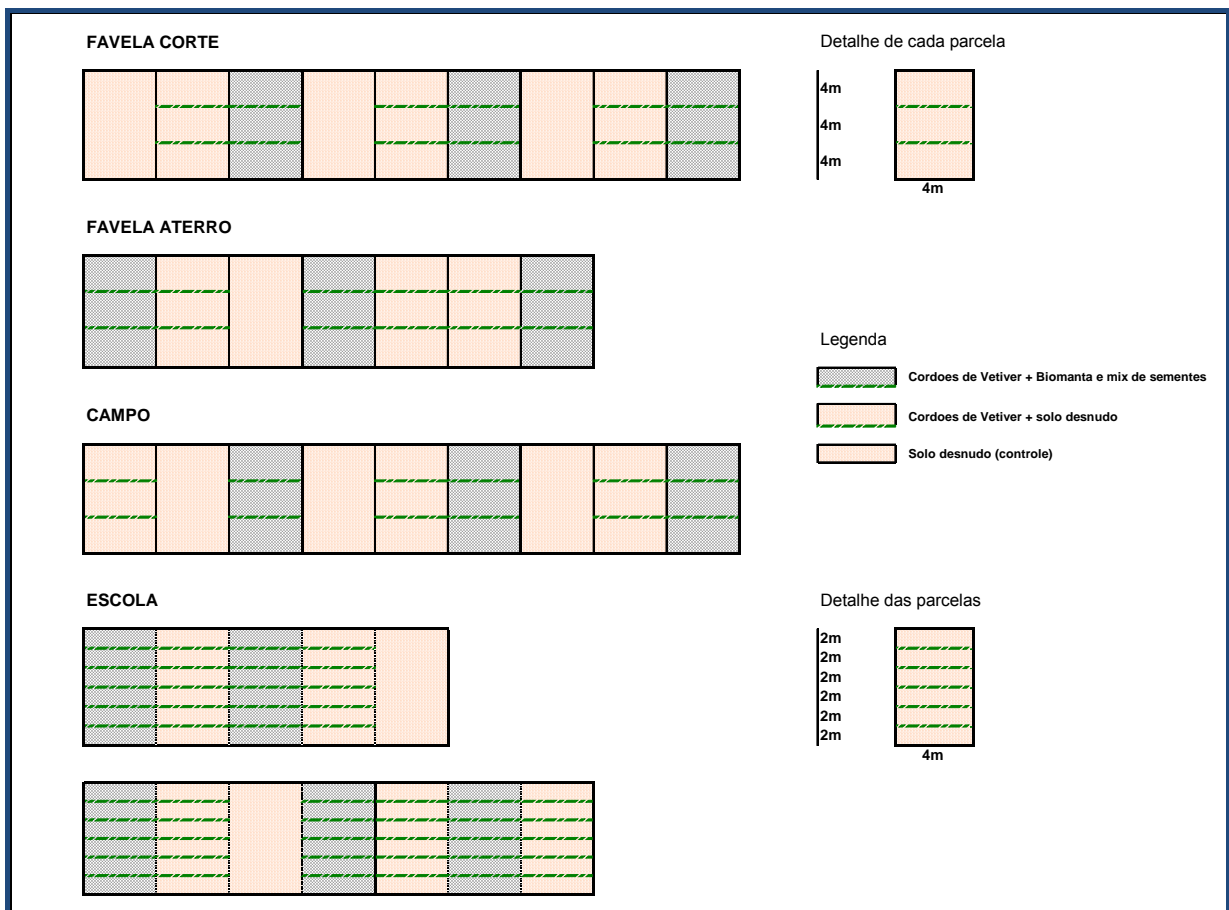


Figura 4.2 – Esquema geral das parcelas implantadas em campo e alguns de seus detalhes

As dimensões das parcelas foram escolhidas tentando aproveitar ao máximo as áreas. As parcelas foram separadas por meio de uma lâmina de plástico cravada no solo a uma profundidade aproximada de 20 cm, com o intuito de evitar influências externas em cada parcela (Figura 4.3a).

No topo dos taludes instalou-se um retentor de sedimentos tipo Bermalonga®, dentro de uma valeta de aproximadamente 10 cm de profundidade, conforme mostrado na Figura 4.3b. Este retentor foi posicionado transversalmente ao sentido do fluxo e à declividade do talude e teve como objetivo evitar a passagem de sedimentos por sua base, proporcionando maior aderência com o solo.



Figura 4.3 – Detalhes das parcelas: (a) Lâminas plásticas; (b) Retentor de sedimentos tipo Bermalonga©

No extremo inferior de cada parcela implantou-se um canalizador de sedimentos com o objetivo de avaliar posteriormente as perdas de solo em cada uma delas.

4.4 Tratamentos Implantados

Os tratamentos consistiram de parcelas de controle, parcelas de vetiver e parcelas de vetiver e mix de sementes, implantados em triplicata, conforme Figura 4.4.

Parcelas de controle: Estas parcelas não possuíam tratamento nenhum, ou seja, o solo permaneceu desnudo (sem recobrimento). Serviram posteriormente como parcelas testemunha, para comparar a eficiência dos tratamentos aplicados.

Parcelas de *Vetiveria zizanioides*: Nestas parcelas foram plantados cordões da gramínea. As mudas do capim foram plantadas a cada 15 cm, com uma densidade aproximada de 7 plantas por metro linear (THE WORLD BANK, 1993). Nas áreas da favela e do campo os cordões tiveram um espaçamento de 4 m, enquanto na área da escola o espaçamento foi de 2 m entre os cordões.

Parcelas de *Vetiveria zizanioides* + mix de sementes + biomanta: Nestas parcelas, além dos cordões de vetiver, foi adicionado um mix de sementes, em covas feitas previamente no solo. Para proteger estas sementes e evitar sua acumulação na base da parcela por uma precipitação eventual, foi instalada uma biomanta (Tela Fibrax® 400BF) constituída 100% por fibras de coco, entrelaçadas por meio de uma costura industrial longitudinal com fios degradáveis de polipropileno. Além dessa função, as biomantas protegem de maneira imediata o solo contra a erosão superficial, servindo de “mulch” para a germinação das sementes e incorporando matéria orgânica no solo, dentre outras muitas vantagens.



Figura 4.4 – Tratamentos implantados em campo

O mix de espécies utilizado nas parcelas experimentais e algumas de suas características são descritos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Caracterização geral do mix de sementes

NOME CIENTÍFICO	NOME COMUM	PORCENTAGEM EM PESO	CLASIFICAÇÃO BOTÂNICA
<i>Avena strigosa</i>	Aveia preta	5%	<i>Gramineae</i>
<i>Brachiaria decumbens</i>	Braquiária	25%	<i>Gramineae</i>
<i>Cajanus cajan</i>	Feijão guandu	10%	<i>Leguminosae</i>
<i>Canavalia ensiformis</i>	Feijão-de-porco	7,5%	<i>Leguminosae</i>
<i>Crotalaria spectabilis</i>	Crotalária	10%	<i>Leguminosae</i>
<i>Lolium multiflorum</i>	Azevém	5%	<i>Gramineae</i>
<i>Melinis multilora</i>	Capim gordura	20%	<i>Gramineae</i>
<i>Raphanus sativus</i>	Nabo forrageiro	10%	<i>Leguminosae</i>
<i>Stizolobium aterrimum</i>	Mucuna preta	7,5%	<i>Leguminosae</i>

Todo o trabalho anterior foi realizado de modo manual. Nas parcelas de vetiver + mix de sementes + biomanta e nas covas onde foram plantadas as mudas, foi realizada uma adubação com fosfato natural e esterco de curral. Depois de finalizar a implantação das parcelas, as áreas do campo e da escola foram irrigadas a cada dois dias por meio de um jato que simulou o efeito da chuva, tarefa realizada e supervisionada pelos funcionários da CTRS da BR-040. A área da favela, por dificuldade no acesso, não foi irrigada.

4.5 Avaliação qualitativa da adaptação e crescimento do *Vetiveria zizanioides*

Foram feitas inspeções em campo, utilizando o método de observação direta e registro de fotos das parcelas experimentais, avaliando assim a adaptação e desenvolvimento da gramínea em estudo. Essas inspeções se realizaram mensalmente, após a instalação total das parcelas.

4.6 Resistência ao cisalhamento

A determinação do incremento da resistência dada pelas raízes do *Vetiveria zizanioides* ao solo foi realizada por meio de ensaios de cisalhamento direto em laboratório, segundo a norma ASTM D3080-04 (Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions).

Dado que o desenvolvimento das plantas nas parcelas experimentais apresentou-se lento, não tendo o crescimento esperado, a coleta das amostras para os ensaios de cisalhamento direto foi realizada na Fazenda Guarará no município de Santana dos Montes-MG, após o período de inverno. Nesta fazenda, a empresa Deflor Bioengenharia Ltda., possui um extenso cultivo de *Vetiveria zizanioides* e um viveiro onde são devidamente cuidadas as mudas da planta extraídas de grandes touceiras, para a implantação em diferentes obras civis de sua competência.

Numa primeira coleta (setembro), escolheu-se uma planta com idade de dois anos e duas profundidades (50 e 80 cm) para a amostragem dos blocos indeformados de solo-raiz. Os blocos tiveram, para a primeira profundidade, dimensões de 55 x 55 x 50 cm e para a segunda profundidade, dimensões de 30 x 30 x 30 cm. Na segunda coleta (novembro), amostrou-se também um indivíduo de dois anos a uma profundidade de 40 cm, tendo o bloco dimensões de 40 x 40 x 40 cm. Voltou-se à primeira planta e coletou-se uma nova amostra na profundidade de 1m. Foi também coletado um bloco de solo sem raiz, para permitir a comparação das duas situações. Resumindo, foram coletadas 4 amostras de solo-raiz e 1 amostra de solo sem raiz.

Depois da escolha do indivíduo a ser amostrado, sua parte aérea foi cortada com uma serra para permitir um melhor posicionamento e penetração do amostrador na profundidade de interesse. Após o posicionamento do amostrador e o desbaste cuidadoso das bordas do bloco de solo-raiz, procedeu-se a extração da amostra indeformada, conforme mostrado na Figura 4.5. Este procedimento foi repetido para todas as amostras nas diferentes profundidades.

As amostras coletadas foram seladas com papel filme transparente para a conservação da umidade natural. Em seguida, foram transportadas ao laboratório e conservadas em câmara úmida.



Figura 4.5 – Procedimento de coleta de amostras indeformadas em campo

Foi utilizada uma prensa de cisalhamento direto que permite realizar os ensaios em corpos de prova de 10 x 10 cm de aresta e 2 cm de altura (Figura 4.6a). Para cada uma das 5 amostras indeformadas foram extraídos 3 corpos de prova para a realização dos ensaios nas tensões normais de 25, 50 e 100 kPa, possibilitando a obtenção da envoltória de resistência. Durante o processo foi utilizada aparelhagem adequada e houve perturbações mínimas do solo. Foi determinada neste momento a umidade inicial de cada corpo de prova extraído. O ensaio consiste basicamente de três fases: saturação (inundação), adensamento e cisalhamento. A velocidade utilizada nos ensaios foi de 0,1 mm/min e foi definida em função dos resultados da fase de adensamento, de forma a garantir a condição drenada nos ensaios.



Figura 4.6 – Ensaios de cisalhamento direto: (a) Prensa de cisalhamento direto; (b) Corpo de prova após o ensaio

É importante ressaltar que depois de realizado cada ensaio de cisalhamento direto (Figura 4.6b), o corpo de prova era pesado e imediatamente levado para estufa a 105°C por 24 h, com o objetivo de determinar sua umidade final. Em seguida, o corpo de prova era levado a uma mufla a 550°C pelo mesmo período de tempo, para obter o resultado do teor de matéria orgânica contido no corpo de prova.

Testes anteriores realizados para a determinação de umidade de solo contendo raiz, demonstraram uma diferença irrelevante entre colocar as amostras em estufa de 50°C e colocá-las em estufa de 105°C. Testes feitos somente com raiz demonstraram que esta é convertida em cinza (Figura 4.7a) e que a relação entre o peso seco da raiz depois da estufa e a cinza resultante da queima é relativamente constante.



Figura 4.7 – Ensaio de raízes: (a) Cinza gerada após incineração de raízes; (b) Ensaio de massa específica das raízes

Objetivando avaliar os índices físicos iniciais e finais das amostras, considerando a presença das raízes, foi determinada a massa específica das raízes (Figura 4.7b), adaptando a metodologia da massa específica dos grãos (MEG) utilizada em solos para este caso.

4.7 Ensaio de tração

A determinação das propriedades mecânicas dos materiais é obtida por meio de ensaios mecânicos, realizados no próprio produto ou em corpos de prova de dimensões e formas especificadas, segundo procedimentos padronizados. O ensaio de tração consiste em submeter o material a um esforço que tende a alongá-lo até a ruptura.

No ensaio de tração, a raiz é deformada por alongamento até o momento em que se rompe. Este ensaio permite conhecer como as raízes reagem aos esforços de tração, quais os limites de tração que suportam e a partir de que momento acontece sua ruptura.

As Figuras 4.8a e 4.8b apresentam exemplo de equipamento do ensaio e formato das amostras ou corpos de prova, respectivamente.

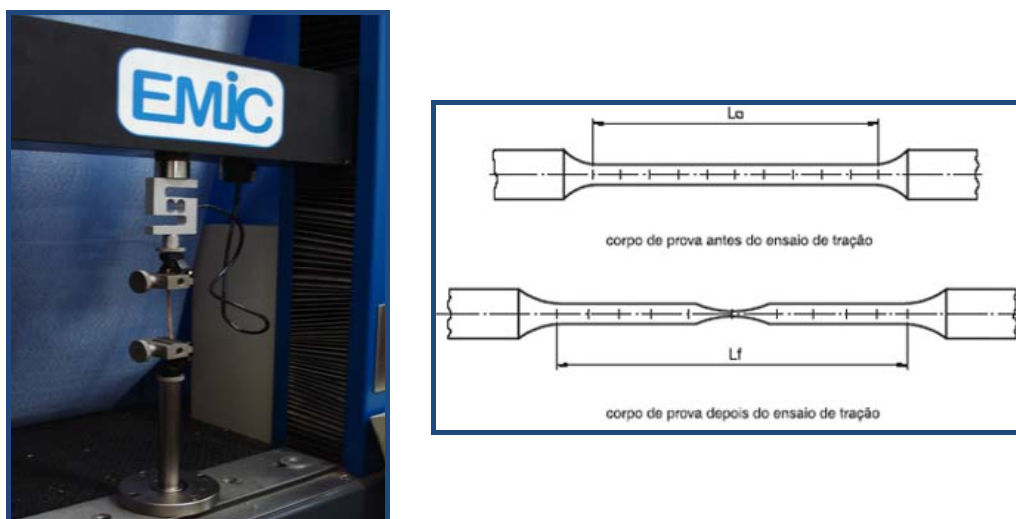


Figura 4.8 – (a) Equipamento para realização de ensaios de tração; (b) Esquema de corpos de prova antes e após os ensaios de tração

As plantas utilizadas nos ensaios foram coletadas na Fazenda Guarará, no município de Santana dos Montes, MG, por meio da abertura de pequenas trincheiras no solo, tomando cuidado de não danificar suas raízes. Posteriormente as amostras foram colocadas em sacolas plásticas e transportadas ao laboratório, onde permaneceram em câmara úmida até o início dos ensaios. A idade aproximada das plantas ensaiadas era de 2 e 3 anos.

O equipamento utilizado para os ensaios de tração foi uma prensa EMIC modelo DL3000 (Digital Line), onde a medição da força é realizada por meio de células de carga, com uma precisão de 1% do valor lido. Para segurar a raiz, foi utilizado um par de garras articuladas de aperto frontal para ensaios de tração com capacidade máxima de 50 kgf, com mordentes revestidos com poliuretano. A velocidade utilizada foi de 10 mm/min, dado baseado na revisão da literatura (BISCHETTI *et al.*, 2005; MICKOVSKI *et al.*, 2005; De BAETS *et al.*, 2008; GENET *et al.*, 2008).

Para determinação da resistência à tração das raízes do *Vetiveria zizanioides* foram realizados ensaios em corpos de prova de comprimento de 10 cm retirados das touceiras do capim. Foram escolhidos diâmetros aproximados de raiz de 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm e 2 mm e para cada diâmetro foram extraídos 50 corpos de prova (Figura 4.9). O procedimento preliminar consistiu na medição do diâmetro de cada corpo de prova em dois pontos (superior e inferior) e depois no posicionamento do corpo nas garras e a medição do comprimento da raiz entre elas.



Figura 4.9 – Corpos de prova para ensaios de tração de raízes com diferentes diâmetros

No transcorrer do ensaio foram registrados a força máxima aplicada (N), o deslocamento (mm) da raiz e a tensão máxima (MPa), até a ruptura do corpo de prova. Os corpos de prova que apresentaram algum tipo de problema durante o ensaio, tais como escorregamento da amostra das garras, foram descartados da análise.

4.8 Avaliação da perda de solo

Como se mencionou anteriormente, cada parcela instalada foi delimitada com uma lona plástica, evitando assim a contribuição de água escoada e de sedimentos de áreas vizinhas. Foi recolhido o solo erodido em um canalizador de sedimentos para suas medições posteriores.

O canalizador de sedimentos consistiu em uma calha de madeira instalada na base da parcela a uma profundidade de 20 cm, a qual recebia e dirigia o sedimento carreado para um tubo de PVC de 50 mm de diâmetro e 20 cm de comprimento (Figura 4.10). Para conseguir uma boa impermeabilização do canalizador, foi colocada argamassa de cimento nas junções entre o solo e a madeira, assim como entre a madeira e o tubo de PVC. O sedimento foi conduzido finalmente para um recipiente com capacidade de 50L, que tinha sido previamente colocado em uma pequena trincheira na base de cada parcela e segurada por meio de estacas, evitando assim que o recipiente virasse com o peso da água da chuva.



Figura 4.10 – Canalizadores de sedimentos: (a) Detalhe frontal; (b) Detalhe posterior

Em fevereiro de 2009 foram instalados os canalizadores de sedimentos e foram realizadas as coletas em campo da seguinte maneira: após a ocorrência da precipitação natural, media-se com uma régua métrica a altura de água escoada retida no interior do recipiente. Posteriormente, homogeneizava-se energeticamente a mistura (sedimento + água) e finalmente retirava-se uma alíquota de 500 ml em uma garrafa plástica (Figura 4.11). Esta amostra, rotulada com data de coleta e identificada pela origem da parcela, era levada ao laboratório onde se determinava a concentração de sedimentos por meio de secagem em estufa a temperatura de 105-110°C até constância de massa (MAGALHÃES, 2005).



Figura 4.11 – Procedimento de coleta de amostras em campo para avaliação da perda de solo: (a) Medição da altura de água escoada; (b) Homogeneização da mistura; (c) Retirada de alíquota

Após a coleta, os recipientes foram esvaziados, lavados e novamente preparados para as coletas seguintes. Posteriormente determinou-se a perda de solo para cada tratamento e, por comparação direta, avaliou-se a eficiência de cada um deles. A comparação foi baseada nos termos da equação universal de perda de solos (USLE), apresentada na Equação 4.1 (TROEH *et al.*, 1980; GRAY & SOTIR, 1996; SILVA *et al.*, 2004). Esta equação é um modelo de erosão empírico que tem sido amplamente utilizado para predição de perda de solo (LAL, 1994).

$$A = R * K * LS * C * P \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Em que:

A = perda de solo calculada por unidade de área (t/ha);

R = fator erosividade da chuva;

K = fator erodibilidade do solo;

L = fator comprimento do declive;

S = fator grau de declive;

C = fator uso e manejo;

P = fator prática conservacionista.

Para o cálculo de erosividade da chuva (CORTOLIMA, 2006), inicialmente obteve-se a energia cinética unitária (e) para cada segmento de chuva, conforme os seguintes hipóteses (Equações 4.2 e 4.3):

$$(1) e = 0,283 \quad \text{se } I > 76 \text{ mm/h} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$(2) e = 0,119 + 0,0873 \text{Log}(I) \quad \text{se } I \leq 76 \text{ mm/h} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Em que: I = intensidade da chuva (mm/h).

A energia cinética total do evento foi calculada aplicando as Equações 4.2 ou 4.3 a segmentos ou intervalos de chuva de intensidade constante e somando todos os valores dos intervalos.

Em seguida, calculou-se a energia total do segmento de chuva mediante a Equação 4.4:

$$E_s = e * p \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Em que:

E_s = energia cinética do segmento de chuva;

p = lâmina total de chuva para o segmento.

Para obter a energia total do segmento somam-se também todos os valores obtidos com a Equação 4.4.

A determinação do fator R foi realizada através do método direto baseado na leitura de bandas pluviográficas, por meio da Equação 4.5:

$$R = E_s * I_{30} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Em que:

E_s = energia cinética de um evento de chuva (Mj/ha.mm);

I_{30} = Máxima intensidade da chuva em 30 minutos.

No anexo A, mostram-se os cálculos realizados para a obtenção do fator erosividade da chuva (R).

O cálculo do fator de erodibilidade do solo (K), foi determinado de forma indireta, com base nas características físicas e químicas dos substratos, a partir dos dados de classe textural e de teor de matéria orgânica do solo, segundo Kirby & Morgan (1980). Os dados tabelados sugeridos pelos autores, encontram-se no Anexo B.

O fator LS foi determinado mediante a Equação 4.6, conforme as características locais (SILVA *et al.*, 2004):

$$LS = \left(\frac{\sqrt{X}}{100} \right) \cdot (1,36 + 0,97 \cdot S + 0,1385 \cdot S^2) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Em que:

X = comprimento da vertente (m);

S = declividade (%).

Os fatores C e P não foram considerados no cálculo, tendo sido a avaliação realizada em termos de erosão potencial do solo e não erosão real.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Condições climáticas durante o experimento

As parcelas experimentais foram instaladas durante os meses de abril e maio de 2008. No mês de abril ocorreram chuvas tímidas e no mês de maio não houve nenhuma precipitação, questão que afetou fortemente o desenvolvimento e crescimento tanto do *Vetiveria zizanioides* quanto do mix de sementes composto por gramíneas e leguminosas.

As chuvas aumentaram durante os meses de novembro de 2008 a março de 2009, sendo que no mês de dezembro de 2008 aconteceu a máxima precipitação (559,7 mm). A temperatura mais baixa ocorreu no mês de julho de 2008, registrando 24,6°C, enquanto que as temperaturas mais altas ocorreram nos meses de dezembro de 2008 e fevereiro de 2009, com 31,0°C e 31,5°C, respectivamente.

A Figura 5.1 apresenta o gráfico de precipitação e temperatura médias mensais que foram registradas durante o período de abril de 2008 a abril de 2009, período no qual foi realizado o trabalho de campo na CTRS BR-040.

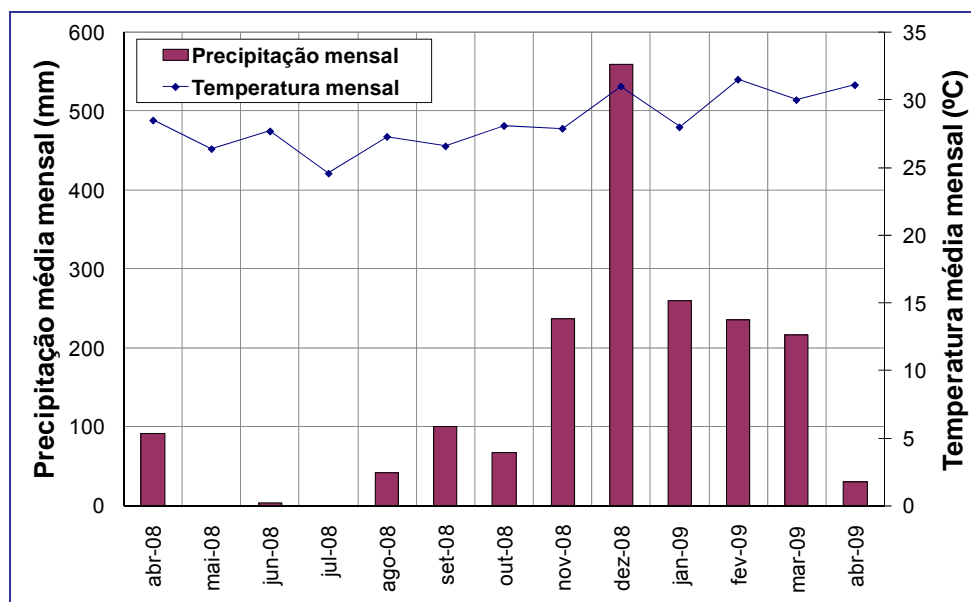


Figura 5.1 – Variação da precipitação e temperatura médias mensais durante o experimento

A umidade relativa do ar variou entre 20% no mês de agosto de 2008 até 88,5% no mês de março de 2009, tal como se mostra na Figura 5.2.

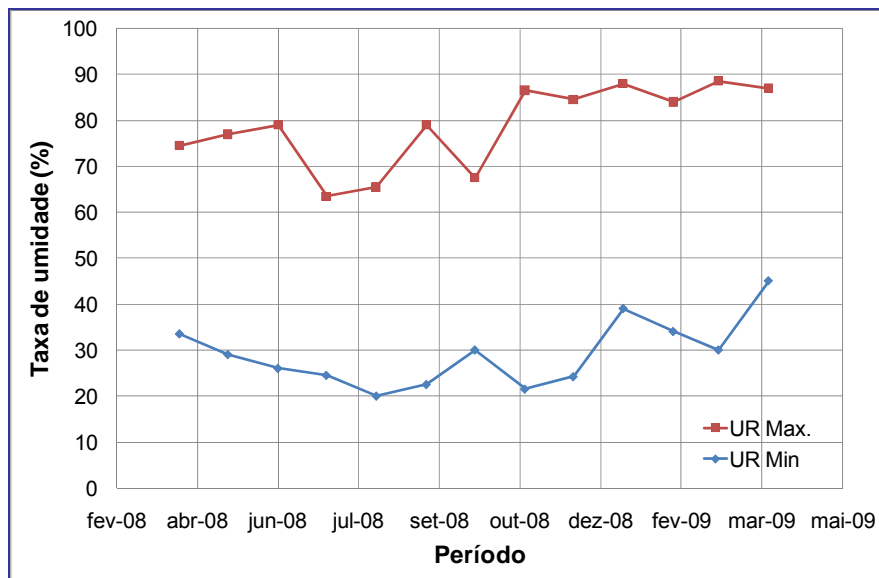


Figura 5.2 – Variação da umidade relativa do ar média mensal durante o experimento

5.2 Caracterização dos substratos

Com as características físicas e químicas do solo, assim como alguns condicionantes externos, permite-se, além de determinar as condições iniciais e as propriedades do mesmo, analisar e estimar de maneira aproximada a erodibilidade do solo.

5.2.1 Caracterização física

Os resultados da caracterização dos solos da área de estudo por meio da análise granulométrica mostram a distribuição das diferentes frações que constituem os solos dos taludes estudados, onde argila e areia foram as frações predominantes. Segundo o sistema unificado de classificação de solos, o solo da área da favela apresentou o comportamento de uma argila pouco plástica arenosa enquanto o solo do campo comportou-se como silte arenoso. Já na área da escola, esta classificação mostrou-se bastante heterogênea. Na Tabela 5.1 e na Figura 5.3, apresentam-se os resultados desta análise segundo a classificação da ABNT e o Sistema Unificado.

Tabela 5.1 – Análise granulométrica do solo

ÁREA	ARGILA (%)	SILTE (%)	AREIA (%)	PEDREGULHO (%)	CLASSIFICAÇÃO SISTEMA UNIFICADO
F. corte	59	1	39	1	Argila pouco plástica arenosa
	43	8	48	1	Argila pouco plástica arenosa
F. aterro	47	8	44	1	Argila pouco plástica arenosa
Campo	42	3	47	8	Silte arenoso
	55	4	40	1	Silte arenoso
Escola	30	12	54	4	Areia argilosa
	26	9	58	7	Areia siltosa
	47	8	45	0	Argila pouco plástica arenosa

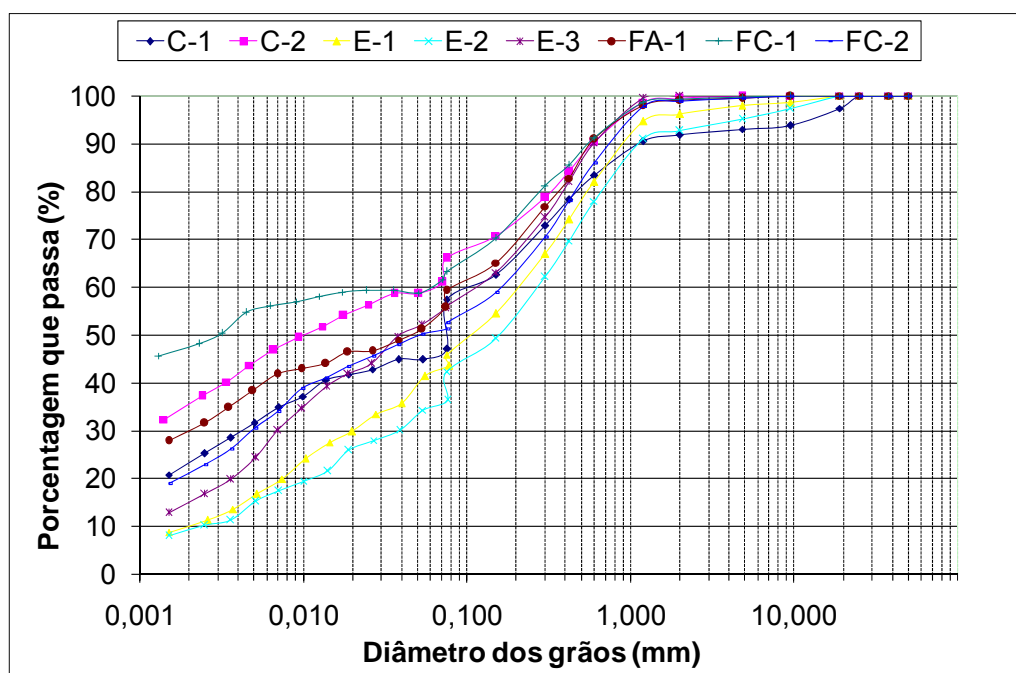


Figura 5.3 – Curvas granulométricas dos solos

É importante mencionar que no caso de solos granulares (areia), a granulometria tem relação direta com seu comportamento. No caso de solos finos (argila e silte), a presença de água tem uma influência maior que a granulometria devido à interação dela com os grãos minerais, afetando portanto a plasticidade e a coesão dos solos.

A área da favela apresentou maiores teores de umidade, talvez pela proximidade do córrego que atravessa o aterro sanitário. A massa específica dos grãos (MEG) teve uma variação de $2,59 \text{ g/cm}^3$, na área da escola, até $2,75 \text{ g/cm}^3$ na área da favela. O índice de plasticidade (IP) variou entre 11 a 23%. Os valores do coeficiente de permeabilidade obtidos foram de 10^{-4} cm/s para todas as áreas.

Os resultados das análises físicas dos solos das quatro áreas são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Análises físicas do solo

ÁREA	DENSIDADE (g/cm ³)	UMIDADE (%)	MEG (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	PERMEABILIDADE (cm/s)
Favela corte	1,94	19,92	2,75	49	26	23	10 ⁻⁴
			2,64	34	17	17	
Favela aterro	1,77	22,43	2,65	41	25	16	
Campo	1,79	21,27	2,64	47	33	14	
			2,68	47	30	17	
Escola	1,74	13,07	2,59	34	18	16	10 ⁻⁴
			2,72	38	27	11	
			2,68	37	20	17	

Quando discutido o fenômeno da erosão, estipula-se de maneira geral que solos com maior porcentagem de argila são menos susceptíveis a este fenômeno, é dizer, menos erodíveis. De igual maneira, quanto maior o índice de plasticidade (IP) menor a erodibilidade do substrato (CARVALHO *et al.*, 2006). Evidentemente, estas observações são gerais e sua validade é quase sempre função de outros elementos e sua respectiva correlação.

5.2.2 Caracterização química

A seguir são apresentados e discutidos os resultados da caracterização química dos substratos onde foram implantadas as parcelas experimentais, com a finalidade de caracterizar os possíveis efeitos da fertilidade do solo no desenvolvimento do *Vetiveria zizanioides* e do mix de sementes. Na Tabela 5.3, apresentam-se os resultados desta análise.

Tabela 5.3 – Análises químicas do solo

Amostra	pH	Eq. mg/100 cc				ppm		%			Micronutrientes ppm					ppm
	H ₂ O	H	Al	Ca	Mg	P	K	M.O	C	N	Cu	Mn	Zn	Fe	B	Na
Escola 1	6,4	1,2	0,1	3,4	0,9	67	52	0,92	0,54	0,05	1,8	35,5	2,4	200,6	Tr	7
Escola 2	6,4	1,2	Tr	3,6	0,7	3	81	0,72	0,42	0,04	1,8	64,3	2,0	249,4	Tr	6
Escola 3	6,7	1,1	Tr	3,6	1,0	6	52	0,85	0,49	0,05	25,9	40,7	2,2	253,8	Tr	7
Escola Mistura	6,6	1,2	Tr	3,4	1,1	18	63	0,95	0,55	0,05	6,8	45,4	2,1	226,0	Tr	7
Favela	6,6	1,2	Tr	2,3	1,6	7	57	0,53	0,31	0,03	2,1	15,5	3,8	266,8	Tr	35
Campo	7,3	1,0	Tr	7,1	1,0	7	91	1,72	0,99	0,10	3,4	82,0	7,7	229,8	Tr	18

Tr: Traço

Observa-se, então, que segundo a classificação química para interpretação de pH em água, o pH das amostras está compreendido entre 6,4 e 7,3 o que significa que o solo encontra-se entre uma acidez fraca e uma alcalinidade fraca, muito perto do valor neutro. Conforme a classificação agrônômica, a acidez ativa do solo está compreendida entre alta e muito alta (ALVAREZ V. *et al.*, 1999 *apud* EMPRABA, 2000). Em termos de nutrição de plantas a

faixa ideal de pH deveria estar entre 5,5 a 6,0 para contribuir com uma maior disponibilidade de nutrientes (DIAS, 1998).

A acidez potencial (H+Al), que apresenta valores entre 1,0 e 1,3 mg/100cc, é classificada como baixa para todas as áreas de estudo.

Relacionada também com a acidez do solo está a disponibilidade dos nutrientes cálcio e magnésio e de micronutrientes como manganês, ferro, cobre e zinco (EMBRAPA, 2000). Em relação ao cálcio, todas as amostras da escola apresentam resultados de 3,4 a 3,6 mg/100 cc (bom); a área da favela apresenta o menor valor com 2,3 mg/100 cc (médio) e a área de campo apresenta o maior valor de todos com 7,1 mg/100 cc (muito bom). Em relação ao magnésio os valores estão compreendidos entre 0,7 e 1,6 mg/100 cc, de médio a muito bom, sendo o valor mínimo na escola e o máximo na favela.

Dentre os micronutrientes, o zinco apresenta valores próximos de 2,0 ppm na escola (bom a muito bom); valor de 3,8 ppm na favela (muito bom) e valor de 7,7 ppm no campo (muito bom), este último o maior valor se comparadas todas as áreas. Para o manganês, a favela apresenta o menor valor, enquanto o campo obtém o maior valor. Não entanto, segundo a interpretação para a disponibilidade de micronutrientes (ALVAREZ V. *et al.*, 1999 *apud* EMPRABA, 2000), o manganês em todas as áreas é classificado como muito bom. Com respeito ao ferro, todas as amostras tem valores superiores a 200 ppm, sendo o maior valor o da favela com 266,8 ppm. Quando analisadas as amostras gerais, o cobre apresenta o maior valor na área da escola (6,8 ppm), seguido da área de campo (3,4 ppm) e logo após a área da favela (2,1 ppm). O boro não se encontra disponível em nenhuma das três áreas analisadas.

Analisando os macronutrientes, o nitrogênio estabelece-se numa faixa de 0,03 a 0,10%, sendo o menor valor na área da favela e o maior, na área de campo. Para o potássio, considerando as amostras gerais, observa-se a mesma tendência do nitrogênio, já que na área da favela o valor é de 57 ppm, na área da escola 63 ppm e na área de campo 91 ppm.

A disponibilidade de fósforo, de acordo com o teor de argila do solo, é classificada como boa para a área da escola, e baixa para as áreas da favela e campo, com 18, 7 e 7 ppm, respectivamente.

Finalmente, o carbono orgânico e a matéria orgânica apresentam tendências similares aos macronutrientes. O carbono na área da favela é classificado como muito baixo, com valor de 0,31%; as áreas da escola e do campo estão classificadas como baixo tendo valores de 0,55 % e 0,99% respectivamente. A matéria orgânica classifica-se como muito baixa a baixa com valores de 0,53 % na favela e 1,72% no campo.

Com respeito à erodibilidade do solo, quanto maior o teor de matéria orgânica, menor a erodibilidade deste. Regiões áridas, por exemplo, são pobres em matéria orgânica porque as temperaturas altas aceleram sua decomposição. Este escasso conteúdo de matéria orgânica torna o solo mais sensível à erosão (GÓMEZ, 1990).

5.3 Avaliação qualitativa da adaptação e crescimento do *Vetiveria zizanioides*

Para um melhor entendimento, a avaliação qualitativa foi dividida em duas partes. Na primeira, relatam-se os aspectos que foram comuns para todas as áreas de estudo, e na segunda, descrevem-se aspectos específicos de cada uma das áreas.

5.3.1 Aspectos comuns a todas as áreas de estudo

Conforme as observações de campo, nos primeiros três meses (maio, junho, julho) após a implantação das parcelas, as folhas das mudas apresentaram uma leve cor amarelada (Figura 5.4), sendo que no mês de julho, quando a temperatura em Belo Horizonte diminuiu consideravelmente, as pontas das folhas ficaram de cor roxa, possivelmente devido às baixas temperaturas observadas no período. Este comportamento foi mais acentuado na área da escola e menos acentuado na área da favela, muito provavelmente pela maior umidade do solo que apresentou esta última área.



Figura 5.4 – Folhas secas e amareladas nos primeiros meses de implantação das parcelas

Possivelmente a falta de irrigação das parcelas nos primeiros dias após a instalação das mesmas prejudicou o desenvolvimento normal das mudas do *Vetiveria zizanioides*, que tiveram que contar só com a umidade do solo disponível naquele momento. De acordo com o Boletim Vetiver (2006) a ‘única’ desvantagem do sistema vetiver é a grande exigência de água e o controle de ervas daninhas no primeiro ou segundo ano de implantação.

Segundo Truong & Hengchaovanich (1997) é melhor plantar o vetiver em solos úmidos. Quando plantada em solos secos é necessário a irrigação imediata após a implantação das mudas. Caso não ocorram precipitações, é necessário irrigar as parcelas diariamente na primeira semana e a cada dois ou três dias para as próximas duas semanas, dependendo do clima.

Por outro lado, Chong & Chu (2007) relatam em seu estudo que, normalmente, o capim vetiver recebendo maior quantidade de água cresce muito melhor que recebendo menos, tanto em termos de biomassa radicular como de biomassa aérea. É assim que o incremento da taxa de irrigação pode ser considerada como uma medida simples para prover uma densa cobertura, realçando o crescimento do *Vetiveria zizanioides*. Outras medidas de manutenção, como o corte de folhas velhas, pode evitar uma excessiva remoção de nutrientes do sistema.

Foi evidenciado, em todas as áreas, o melhor desenvolvimento das parcelas com mix de sementes e biomanta que as parcelas que tinham unicamente cordões da gramínea em estudo. Como bem conhecido, a biomanta reduz a evaporação da água do solo, incorpora matéria orgânica e mantém os nutrientes do solo, proporcionando rapidez no processo de vegetação. A

biomanta demonstrou ser uma excelente ferramenta de bioengenharia para fins de recuperação de áreas degradadas.

Em algumas poucas parcelas, as sementes do mix acumularam-se na base dos taludes, proporcionando maior concentração de plantas nas porções inferiores das parcelas. Como esperado, isto se deve à inclinação dos taludes e ao efeito da água, que carrega as sementes a uma posição de menor energia.

Nos meses de junho, julho e agosto de 2008, o mix de sementes em geral teve um desenvolvimento muito lento, ainda que, perfilharam-se duas das gramíneas consideradas como forrageiras de inverno: a aveia preta e o azevem anual. Já no final do mês de agosto e começo de setembro de 2008 estas espécies se apresentaram secas e murchas.

A altura inicial das mudas do *Vetiveria zizanioides* foi de aproximadamente 50 a 60 cm. No segundo trimestre após a implantação das parcelas (agosto, setembro e outubro de 2008), o crescimento das plantas foi muito heterogêneo, apresentando alturas de 60 a 80 cm e algumas poucas touceiras obtendo alturas até de 1m. O volume destas plantas mais altas foi também superior ao volume das plantas com alturas menores.

No mês de setembro de 2008 foi necessário fazer um replantio de novas mudas do capim vetiver em todas as áreas de estudo, na tentativa de formar cordões mais densos e substituir algumas mudas que definitivamente estavam mortas. A partir desta ação implementada e com a chegada da época de chuva no mês de novembro, o crescimento do *Vetiveria zizanioides* e das espécies do mix foi vertiginoso e rápido, apresentando cores mais verdes, maior suporte e melhor desenvolvimento das parcelas de estudo. Foram detectadas nesta época, espécies como o capim gordura e o feijão de porco, este último em menor proporção.

A partir de janeiro de 2009, alguns indivíduos de crotalária espectabilis começaram a florescer, sendo mais perceptíveis suas flores amarelas no mês de março e tendo maior destaque na área da favela. Além desta espécie, predominaram no período de verão o feijão guandu, a mucuna preta e a brachiaria decumbens. O nabo forrageiro, que possui predominantemente flores brancas, foi a espécie do mix que se apresentou em menor quantidade.

No mês de março de 2009 percebeu-se o início da florescência do capim vetiver. O capim apresentou uma espiga com uma leve cor roxa, muito atrativa, assim como se descreve no Boletim Vetiver (2006) e como é apresentado na Figura 5.5.



Figura 5.5 – Florescência do *Vetiveria zizanioides*

No final do projeto, especificamente no mês de abril de 2009, a altura variou entre 1,3 m e 1,8 m para a maioria de plantas, tendo alturas máximas até de 2,3 m. Depois de um ano da implantação das parcelas, três indivíduos de *Vetiveria zizanioides* foram extraídos em campo, para realizar a medição direta da profundidade da raiz, obtendo-se como resultado 20 a 25 cm de profundidade em média e 50 cm a máxima profundidade alcançada nestas plantas (Figura 5.6).



Figura 5.6 – Medição da parte aérea e parte radicular do *Vetiveria zizanioides* extraído da área experimental

Possíveis causas para o baixo desenvolvimento do sistema de raízes, quando comparado com dados da literatura, podem ser o tipo de solo e as condições climáticas adversas nos primeiros meses de implantação das parcelas em campo.

Em geral, pode-se considerar que o desenvolvimento do capim vetiver, desde o começo até o final do projeto foi muito heterogêneo, dada a altura e o volume das plantas e as condições do solo e do clima registradas durante a execução da totalidade do trabalho de campo. Não entanto, a gramínea foi resistente e se recuperou exitosamente das condições adversas do clima no início do projeto.

Pela dependência do *Vetiveria zizanioides* à irrigação e às vantajosas condições do solo, a gramínea parece ser mais apropriada para uso em soluções de engenharia, quando as áreas são cuidadosamente preparadas e periodicamente mantidas. (MICKOVSKI *et al.*, 2005).

5.3.2 Aspectos específicos de cada área de estudo

Descrevem-se a seguir alguns aspectos da adaptação e crescimento da planta nas diferentes áreas de estudo, assim como algumas dificuldades e limitações observadas durante o projeto.

Área favela

Nesta área foram instaladas 16 parcelas (Figuras 5.7 a 5.12), sendo 9 na favela corte (superior) e 7 na favela aterro (inferior). A favela aterro recebeu este nome devido ao fato de que o solo que se encontra nesta zona é um solo que foi removido, não apresentando totalmente as propriedades de um solo natural.



Figura 5.7 – Vista geral de taludes desnudos antes da instalação das parcelas experimentais na área da favela



Figura 5.8 – Vista geral de taludes com parcelas experimentais na área da favela



Figura 5.9 – Talude desnudo antes da instalação das parcelas experimentais na área da favela corte



Figura 5.10 – Talude no final do projeto na área da favela corte



Figura 5.11 – Talude desnudo antes da instalação das parcelas experimentais na área da favela aterro



Figura 5.12 – Talude no final do projeto na área da favela aterro. Capim vetiver e presença de mamona como planta invasora

A área da favela apresentou as maiores dificuldades para o bom desenvolvimento do vetiver, não só pela maior inclinação do talude e o maior espaçamento entre cordões da planta, mas também por causas externas como:

- Dificuldade de acesso à área, não permitindo em nenhum momento a irrigação das parcelas de estudo. Mesmo assim, as plantas resistiram a esta condição sem secar completamente, talvez devido à proximidade do córrego e à maior umidade do solo no início da instalação das parcelas;
- Presença de gado na área de estudo provocando pisoteio e deterioração tanto das biomantas como das mudas plantadas (Figura 5.13 a, b e c). Além disso, no mês de outubro de 2008 detectou-se que o gado estava comendo as mudas, fato que se apresenta contrário às afirmações encontradas na literatura onde relata-se que o capim vetiver, uma vez estabelecido, não é palatável pelo gado. Não entanto, folhas jovens ou tenras, poderiam ser apetitosas para o mesmo (THE WORLD BANK, 1993). Por outro lado, Bu *et al.*, (2008) descreve que plantas de *Vetiveria zizanioides* são dificilmente destruídas pelo gado;
- Presença de crianças que brincavam no local e escorregavam pelos taludes de estudo;
- Acumulação de resíduos sólidos na área, muitas vezes de grandes dimensões, que eram carreados pela chuva prejudicando o desenvolvimento das plantas (Figura 5.14).



Figura 5.13 – Dificuldades na área da favela: (a) Presença de gado; (b) Capim destruído pela pastagem; (c) Efeito do pisoteio do gado



Figura 5.14 – Resíduos sólidos na área e deterioração das parcelas

Em três das parcelas da favela corte (parcelas 7, 8 e 9) e na área da favela aterro, sobretudo, observou-se o crescimento da mamona (*Ricinus communis* L.). A mamona é originária da Ásia meridional e foi introduzida em quase todo o mundo, principalmente nas regiões tropicais e subtropicais. É largamente difundida por todo o Brasil, não havendo praticamente terreno baldio, mata ou lavoura abandonada onde ela não cresça.

É importante ressaltar que na área da favela corte, foram observadas diversas feições erosivas de pequeno porte após a ocorrência das chuvas, especificamente no período do verão (Figura 5.15).

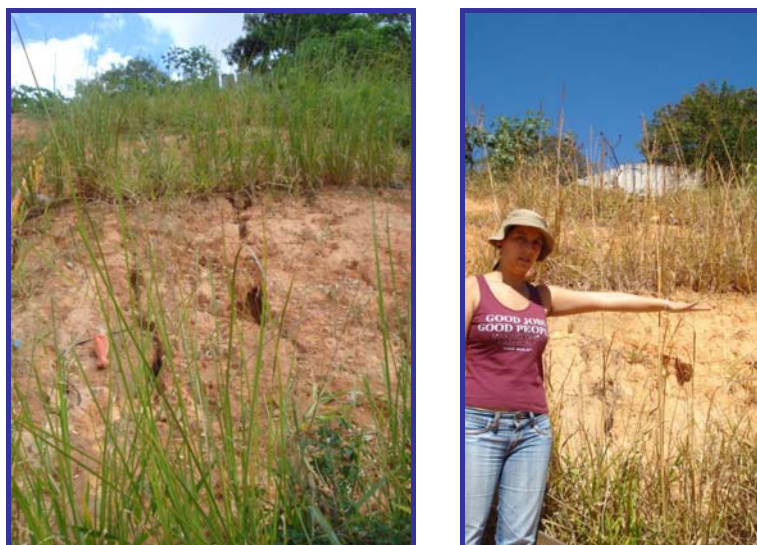


Figura 5.15 – Feições erosivas observadas nas parcelas

Área campo

Foi a área onde além das mudas de vetiver, outras plantas tiveram o maior e mais rápido crescimento, provavelmente, devido às melhores condições do solo que visualmente tinha um

aspecto mais rico em húmus e nutrientes. Com os resultados obtidos na análise química este aspecto foi confirmado, já que a área de campo apresentou os maiores teores de potássio (K) e nitrogênio (N) ao igual que de carbono (C) e matéria orgânica (M.O), quando comparada com as demais áreas de estudo. A disponibilidade de cálcio (Ca) e de micronutrientes como o manganês (Mn) e o zinco (Zn) também tiveram valores elevados. Nas Figuras 5.16 a 5.19 apresentam-se as parcelas da área campo.



Figura 5.16 – Talude desnudo antes da instalação das parcelas experimentais na área de campo



Figura 5.17 – Parcelas 1 a 3 na área de campo



Figura 5.18 – Parcelas 4 a 6 na área de campo



Figura 5.19 – Parcelas 7 a 9 na área de campo



Figura 5.20 – Talude no final do projeto na área de campo vista 1



Figura 5.21 – Talude no final do projeto na área de campo vista 2

Infelizmente, espécies como o capim colônia (*Panicum maximum*) e o girassol mexicano (*Tithonia rotundifolia/speciosa*) invadiram todas as parcelas desta área, impedindo a visualização do vetiver e gerando uma competição entre as espécies do mix e as espécies mencionadas. No final do projeto não era possível ver todas as lonas plásticas que dividiam uma parcela da outra. O terreno então tornou-se muito homogêneo, não diferenciando os tratamentos instalados no começo do projeto (Figuras 5.20 e 5.21).

Segundo Truong & Hengchaovanich (1997) ainda que o *Vetiveria zizanioides* é altamente tolerante a condições extremas de solo e clima, é altamente intolerante à sombra. O sombreamento poderia reduzir seu crescimento e, em casos extremos, poderia eliminar a gramínea a longo prazo. Por tanto, vetiver tem um melhor crescimento em lugares abertos e pode ser necessário o controle de ervas daninhas durante a fase de estabelecimento.

Área escola

Nas Figuras 5.22 e 5.23 apresentam-se os taludes descobertos antes da implementação das parcelas em campo. Nas Figuras 5.24 a 5.27 podem ser visualizadas as 12 parcelas pertencentes a esta área. A caracterização física do solo nesta área permitiu confirmar a heterogeneidade que foi percebida visualmente no início da instalação das parcelas, onde se observaram claramente três diferentes tipos de solo.



Figura 5.22 – Talude desnudo antes da instalação das parcelas experimentais na área da escola vista 1



Figura 5.23 – Talude desnudo antes da instalação das parcelas experimentais na área da escola vista 2

Na área classificada como areia siltosa (parcelas 6, 7 e 8) o desenvolvimento das plantas foi muito melhor, mas, como aconteceu na área campo, em tais parcelas observou-se claramente a presença de espécies invasoras, o que dificultou a diferenciação dos tratamentos instalados nelas. A análise química nesta área específica apontou uma maior quantidade de potássio e manganês disponível no solo.



Figura 5.24 – Vista geral de taludes com parcelas experimentais na área da escola



Figura 5.25 – Parcelas de 1 a 5 na área da escola



Figura 5.26 – Parcelas de 6 a 8 na área da escola



Figura 5.27 – Parcelas de 9 a 12 na área da escola

Nas outras duas áreas foi possível notar claramente a diferença entre os tratamentos.

5.4 Resistência ao cisalhamento

A caracterização física do solo em estudo propiciou os seguintes resultados: massa específica do solo natural de $1,5 \text{ g/cm}^3$; teor de umidade inicial de 29%; massa específica dos grãos (MEG) de $2,71 \text{ g/cm}^3$; limite de liquidez (LL) 48% e limite de plasticidade (LP) 37 %, obtendo assim um índice de plasticidade (IP) de 11%. As frações na análise granulométrica foram: argila 61%, silte 7%, areia 31% e pedregulho 1%. Segundo o Sistema Unificado, este solo foi classificado como silte arenoso.

A massa específica das raízes teve como resultado $0,91 \text{ g/cm}^3$ para raízes de uma planta fresca e $1,23 \text{ g/cm}^3$ para raízes de uma planta velha. A relação entre o peso seco da raiz depois da estufa e a cinza resultante da queima foi calculada como sendo 15%.

A presença de raízes de plantas na matriz do solo resulta em um incremento na coesão do solo através do efeito do reforço, o qual usualmente, aumenta a estabilidade superficial dos taludes (van Beek *et al.*, 2005).

A resistência ao cisalhamento do solo em estudo foi determinada em amostras indeformadas e saturadas, em duas plantas com idade aproximada de dois anos. Foram utilizadas tensões normais de 25, 50 e 100 kPa, reproduzindo assim a situação de confinamento de campo.

Na Tabela 5.4 são apresentadas as características e alguns índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto realizados no laboratório.

Tabela 5.4 – Características dos ensaios de cisalhamento direto

Planta	Ensaio	Profundidade (cm)	Tensão Normal (kPa)	Índice de Vazios Inicial	Índice de Vazios Final	Teor de Matéria Orgânica (%)
1	1	0-50	25	1,78	1,50	15,9
			50	1,63	1,26	13,9
			100	1,66	1,04	16,0
	2	50-80	25	2,03	1,67	15,8
			50	1,53	1,38	15,0
			100	1,87	1,32	15,7
	5	100-140	25	1,62	1,37	14,6
			50	1,51	1,25	14,4
			100	1,65	1,18	14,8
2	6	0-40	25	1,48	1,27	13,7
			50	1,29	1,13	14,0
			100	1,23	1,04	12,9
Solo sem raiz	4	0-40	25	1,32	1,24	14,5
			50	1,29	1,22	15,0
			100	1,28	1,11	14,9

As curvas deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical obtidas nos ensaios de cisalhamento direto são apresentadas nas Figuras 5.28 a 5.37. Os valores das tensões cisalhantes foram obtidos para o deslocamento horizontal de 4,0 mm.

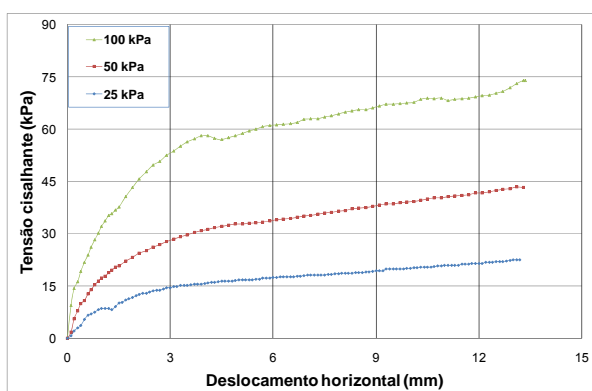


Figura 5.28 – Ensaio 1: Deslocamento horizontal vs Tensão cisalhante

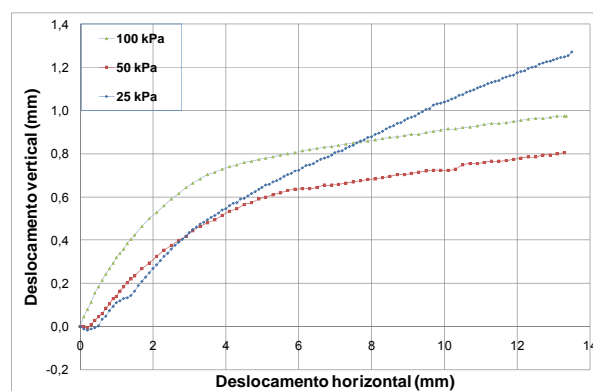


Figura 5.29 – Ensaio 1: Deslocamento horizontal vs Deslocamento vertical

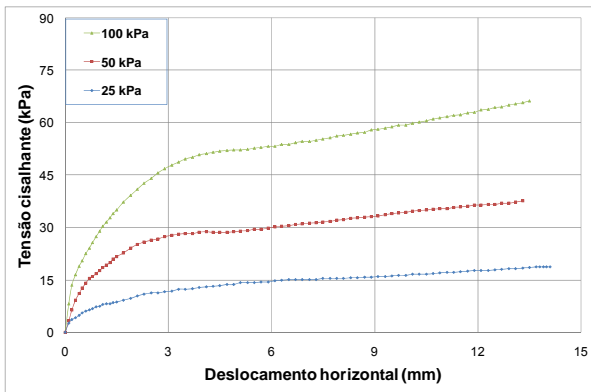


Figura 5.30 – Ensaio 2: Deslocamento horizontal vs Tensão cisalhante

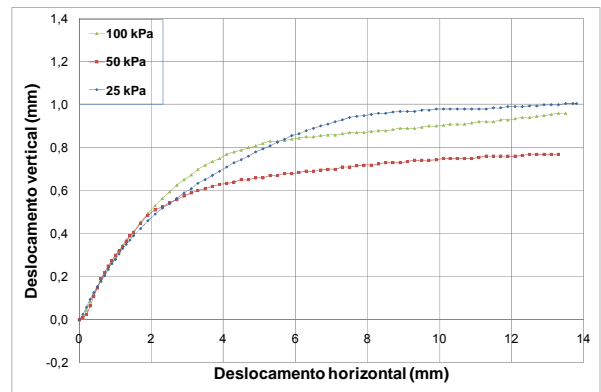


Figura 5.31 – Ensaio 2: Deslocamento horizontal vs Deslocamento vertical

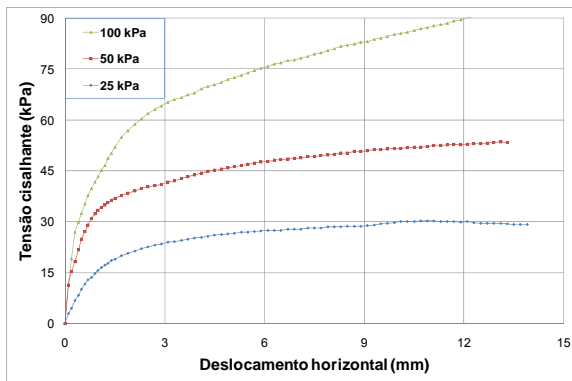


Figura 5.32 – Ensaio 4: Deslocamento horizontal vs Tensão cisalhante

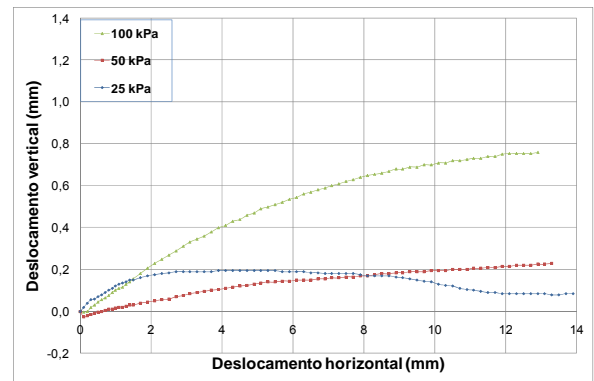


Figura 5.33 – Ensaio 4: Deslocamento horizontal vs Deslocamento vertical

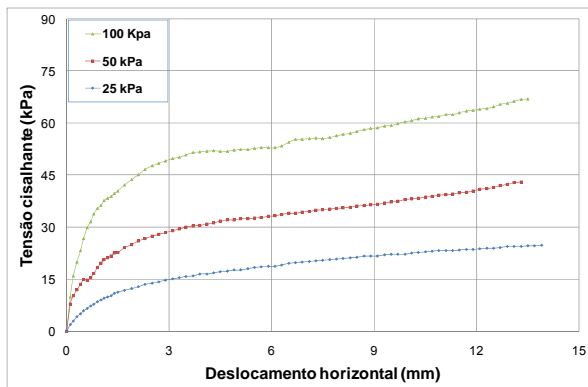


Figura 5.34 – Ensaio 5: Deslocamento horizontal vs Tensão cisalhante

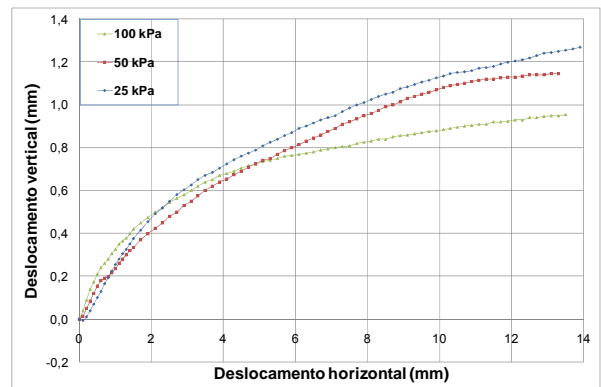


Figura 5.35 – Ensaio 5: Deslocamento horizontal vs Deslocamento vertical

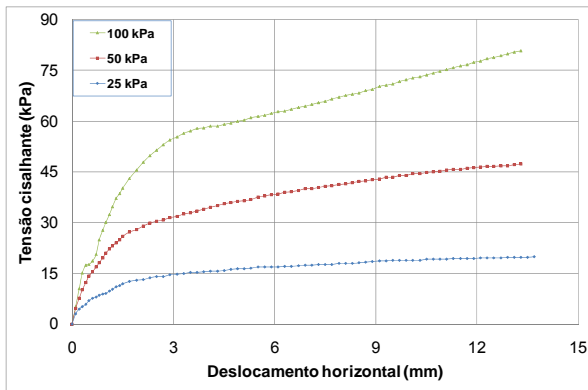


Figura 5.36 – Ensaio 6: Deslocamento horizontal vs Tensão cisalhante

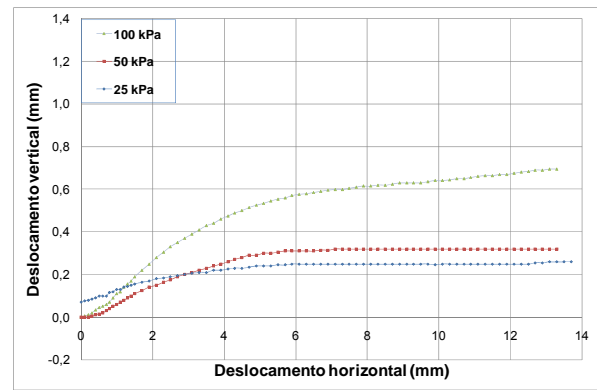


Figura 5.37 – Ensaio 6: Deslocamento horizontal vs Deslocamento vertical

Observa-se em todas as amostras um ganho contínuo de resistência, com uma tendência à estabilização, em alguns corpos de prova, para elevados níveis de deslocamento. Esse comportamento é típico de materiais dúcteis ou plásticos, ao contrário de materiais quebradiços que são caracterizados por uma tensão de pico.

Os gráficos de tensão cisalhante vs deslocamento horizontal mostram que, em geral, a tensão cisalhante, até o final dos ensaios, apresenta um contínuo acréscimo. Isto poderia indicar também que a ruptura da raiz não ocorre durante os ensaios de cisalhamento direto, se não, o alongamento ou deslizamento das fibras.

Com relação à variação de volume dos corpos de provas testados, durante a fase de cisalhamento, foi verificado que algumas amostras, só no começo desta fase, tiveram uma pequena dilatação, mas, ao longo do ensaio, houve contração do material.

As Figuras 5.38 e 5.39 apresentam as envoltórias de ruptura lineares (admitindo a validade da equação de Mohr-Coulomb) e não lineares. As envoltórias não lineares apresentaram melhores ajustes aos dados de campo, sugerindo a necessidade de realização de mais ensaios em níveis de tensões normais mais baixos, o que de certa forma simularia de forma mais adequada a situação de campo.

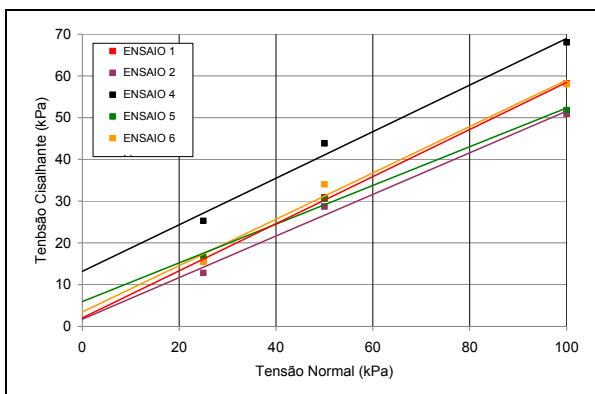


Figura 5.38 – Envolvórias de resistência lineares

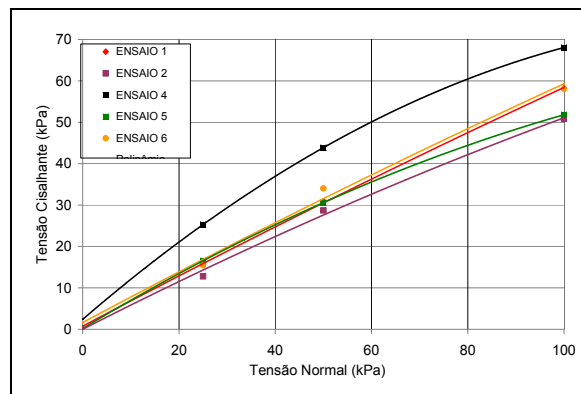


Figura 5.39 – Envolvórias de resistência não-lineares

Na Tabela 5.5 são apresentados os parâmetros de resistência ao cisalhamento, calculados para cada uma das envoltórias dos cinco ensaios realizados, admitindo a validade da equação linear de Mohr-Coulomb.

Tabela 5.5 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento

Planta	Ensaio	Profundidade (cm)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
1	1	0-50	2,0	30
	2	50-80	1,7	27
	5	100-140	6,0	25
2	6	0-40	3,4	30
Solo sem raiz	4	0-40	13,0	30

Comparando os parâmetros de resistência ao cisalhamento, resultado das envoltórias de ruptura para cada ensaio, percebe-se que para a planta 1 o ângulo de atrito tem uma pequena diminuição à medida que a profundidade de amostragem aumenta (Ensaio 1, 2 e 5). Isto se deve ao fato de que a presença de raízes no solo tende a decrescer com a profundidade e, portanto, a coesão e o ângulo de atrito deveriam diminuir proporcionalmente. Bischetti *et al.* (2005) e Mattia *et al.* (2007) relatam que os valores da RAR (Root Area Ratio) e, conseqüentemente, o reforço, diminuem com a profundidade.

Por outro lado, analisando estes mesmos resultados para a mesma profundidade, mas em plantas diferentes (ensaio 1 e 6), nota-se variação da coesão e igual ângulo de atrito.

Ao contrário da maioria dos dados apresentados na literatura (MENDONÇA E CARDOSO, 1998; CAZZUFFI *et al.*, 2006), a maior resistência ao cisalhamento foi encontrada na amostra de solo sem raiz, que apresentou o valor mais alto de coesão, mas ângulo de atrito semelhante às demais amostras. Embora as amostras tenham sido coletadas no mesmo solo, os índices

físicos iniciais, especificamente o índice de vazios mostrou que na amostra de solo sem raízes, o solo era muito mais denso e conseqüentemente mais resistente que os demais.

Acredita-se então, que a escala de trabalho usada para a realização dos ensaios de cisalhamento direto não foi a mais adequada, devido às dimensões dos corpos de prova testados (10x10x2 cm) que não simulariam com total fidelidade a situação real que apresentasse em campo. Mendonça e Cardoso (1998), que realizaram ensaios de cisalhamento direto em campo, utilizando uma caixa de grandes dimensões (0,75x0,75x0,5 m) e argumentando que a amostra seria representativa do material a ensaiar, relataram a impossibilidade técnica de realizar estes ensaios em laboratório sobre amostras recolhidas nos locais dos ensaios realizados em campo, devido à dimensão das partículas envolvidas.

No estudo realizado por Cazzuffi *et al.* (2006), a contribuição das raízes na resistência ao cisalhamento do solo foi evidente. Nos ensaios realizados, os valores de resistência ao cisalhamento em amostras com raízes foram sempre superiores aos valores obtidos em amostras sem raízes. A coesão foi quantificada como estando em um intervalo entre 2 kPa e 15 kPa, em concordância com outros estudos realizados.

Resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados por Mendonça e Cardoso (1998) mostram um incremento da resistência ao cisalhamento do solo conferido pela presença de raízes.

Coelho (2007) realizou ensaios de compressão simples em campo e no laboratório, com a finalidade de determinar a coesão aparente em solos permeados com raízes de braquiaria umidicola e capim elefante. O autor observou que nas profundidades de solo com maior influência da vegetação, ou seja, nos primeiros 30 cm de profundidade, traduzida pela maior concentração de raízes e radículas por unidade de volume do solo, foram maiores os valores de coesão aparente encontrados. Aumentando-se a profundidade diminui-se a densidade radicular e com isto a coesão aparente.

Os resultados obtidos de tensão cisalhante em função da deformação para a raiz de capim elefante em percentagens de 0,5; 1; 2 e 3% mostram que o aumento da concentração da raiz nem sempre corresponde ao aumento da resistência ao cisalhamento, porque porcentagens de 3% implicaram em uma diminuição desta resistência. Segundo o autor, este efeito pode ser

decorrente do envelhecimento das raízes, que formam pontos de concentração de raízes com menor coesão no corpo de prova, favorecendo o seu rompimento.

Os ensaios relatados anteriormente, foram realizados com cargas normais de 25, 50 e 100 kPa. Com a finalidade de comparar as envoltórias obtidas para estas tensões e tensões maiores, foi realizado um ensaio com tensão de 200 kPa, conservando as tensões de 25 e 50 kPa. O resultado do ensaio de cisalhamento direto e a envoltória de resistência apresentam-se nas figuras 5.40 e 5.41.

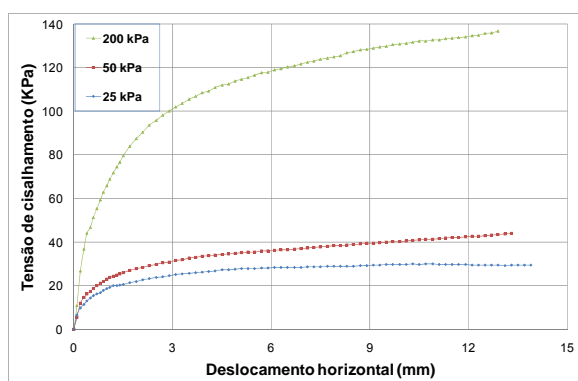


Figura 5.40 – Ensaio 3: Deslocamento horizontal vs Tensão cisalhante

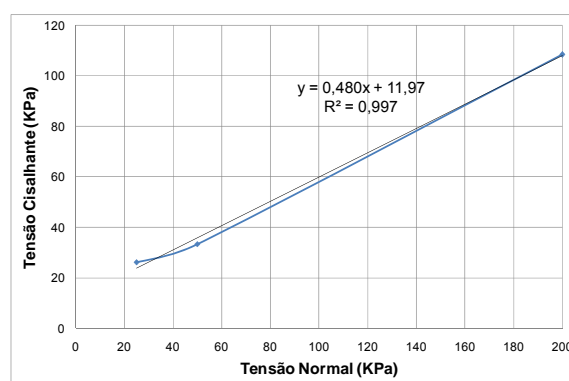


Figura 5.41 – Envoltória de resistência linear

Observa-se que a tendência da envoltória, quando feita com maiores tensões, é de apresentar um valor de coesão e um ângulo superiores que com tensões baixas, neste caso, 12 kPa e 48° . Genet *et al.* (2008), utilizando tensões normais de 100, 200, 300 e 400 kPa, obtiveram valores muito maiores em comparação com o presente estudo.

A percepção de Goldsmith (2006), que relata que, em geral, os resultados da tensão de cisalhamento são amplos e variados, dadas as condições não controladas dos lugares naturais onde foram realizadas as coletas das amostras, é também uma observação vista no presente trabalho. Seria importante realizar um maior número de ensaios, em campo e no laboratório, que possibilitassem uma análise estatística e permitissem inferir melhores conclusões.

Uma das razões para a não realização de um maior número de ensaios de cisalhamento direto no laboratório, foi a dificuldade e o tempo exigido para moldar os corpos de prova, que muitas vezes quebravam no final da execução ou na colocação do corpo na caixa de cisalhamento. Outro fator importante que deve ser considerado é o tempo de execução total dos ensaios de cisalhamento direto, que passa pelas fases de inundação, adensamento e cisalhamento, sendo que um só ensaio pode durar até 3 dias consecutivos.

5.5 Ensaios de tração

A Figura 5.42 apresenta os resultados válidos dos ensaios de resistência à tração das raízes realizados em uma planta de *Vetiveria zizanioides* com idade aproximada de dois anos.

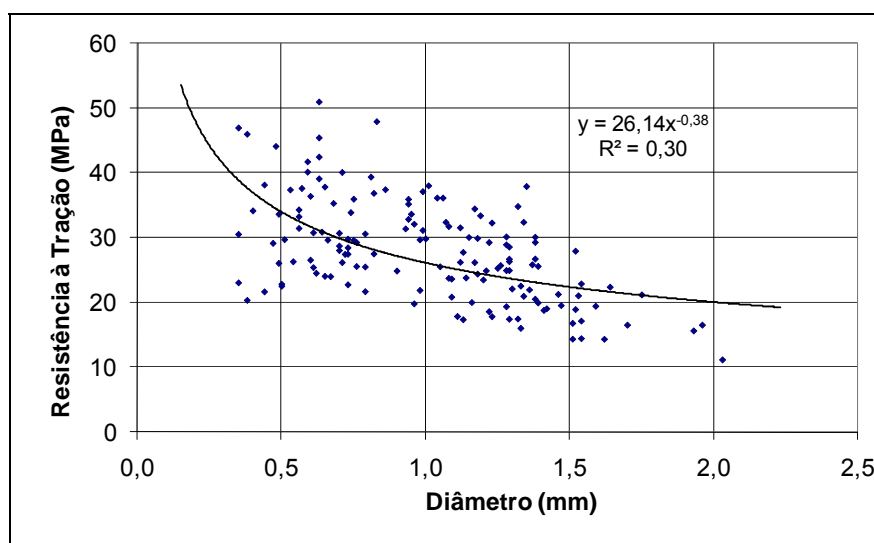


Figura 5.42 – Variação da resistência à tração com o diâmetro das amostras ensaiadas (Planta de dois anos)

A Tabela 5.6 e a Figura 5.43 apresentam os resultados da análise estatística descritiva dos resultados. Foram definidas 6 faixas de diâmetros, denominadas F1 a F6:

- F1 – inferiores a 0,50 mm;
- F2 – entre 0,50 e 0,75 mm;
- F3 – entre 0,75 e 1,00 mm;
- F4 – entre 1,00 e 1,25mm;
- F5 – entre 1,25 e 1,50 mm;
- F6 – acima de 1,50 mm.

Tabela 5.6 – Estatística descritiva dos resultados dos ensaios (Planta de dois anos)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Número de ensaios válidos	14	37	23	29	30	16
Mínimo	20	23	20	17	16	11
Máximo	47	51	48	38	38	28
Médias						
Média	31	32	31	27	24	18
Mediana	30	31	31	26	25	17
Variação						
Desvio padrão	9	7	7	6	5	4
Coeficiente de Variação	0,30	0,20	0,21	0,22	0,22	0,22
Percentuais						
10%	22	25	22	18	19	14
25%	23	27	26	24	20	15
50%	30	31	31	26	25	17
75%	37	37	36	32	28	21
90%	45	41	37	35	30	16

Obs.: Valores das resistências em MPa.

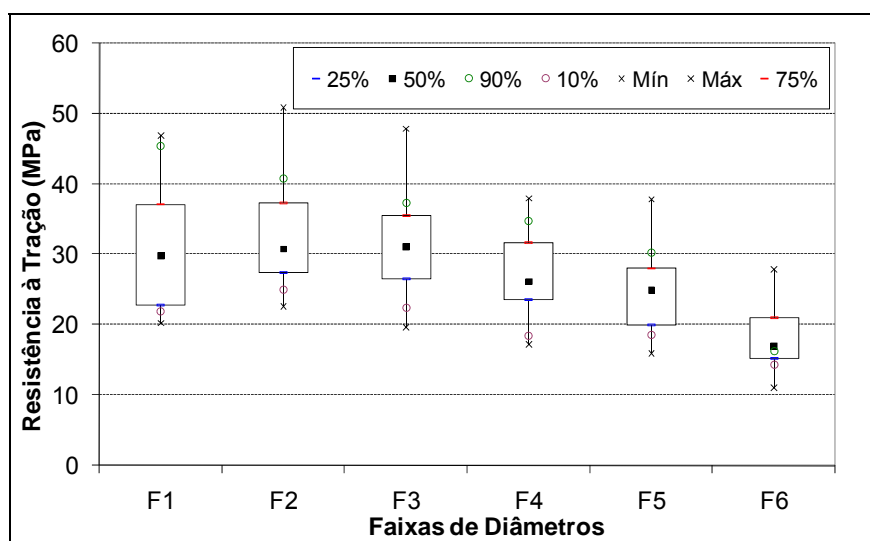


Figura 5.43 – Box-Plot dos resultados dos ensaios (Planta de dois anos)

A Figura 5.44 apresenta os resultados válidos dos ensaios de resistência à tração das raízes realizados em uma planta de *Vetiveria zizanioides* com idade aproximada de três anos.

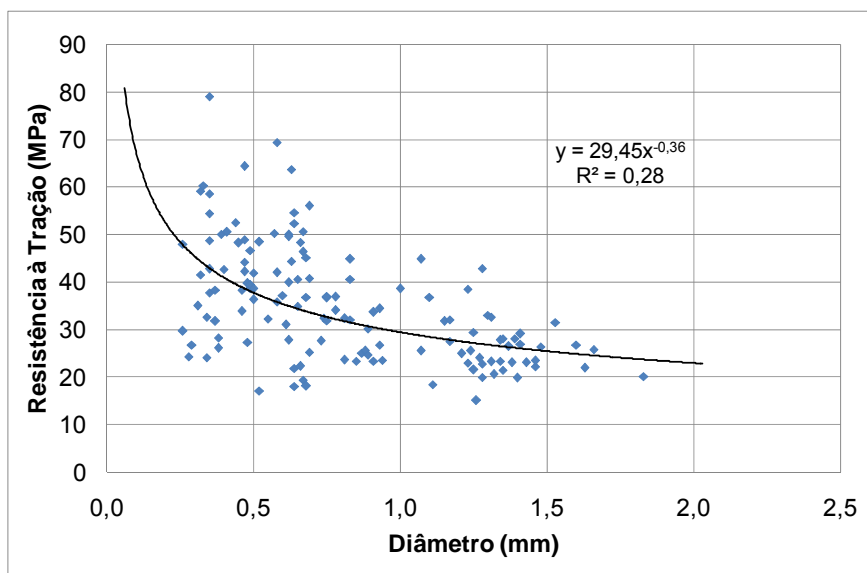


Figura 5.44 – Variação da resistência à tração com o diâmetro das amostras ensaiadas (Planta de três anos)

A Tabela 5.7 e a Figura 5.45 apresentam os resultados da análise estatística descritiva dos resultados, com as mesmas faixas definidas anteriormente.

Tabela 5.7 – Estatística descritiva dos resultados dos ensaios (Planta de três anos)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Número de ensaios válidos	39	37	18	13	23	5
Mínimo	24	17	23	19	15	20
Máximo	79	69	45	45	43	32
Médias						
Média	42	39	31	29	25	25
Mediana	42	37	31	28	23	26
Varição						
Desvio padrão	12	13	7	7	6	4
Coefficiente de Variação	0,28	0,33	0,22	0,25	0,22	0,18
Percentuais						
10%	27	21	23	22	20	21
25%	34	31	25	25	23	22
50%	42	37	31	28	23	26
75%	49	48	34	32	28	27
90%	59	53	39	38	32	30

Obs.: Valores das resistências em MPa.

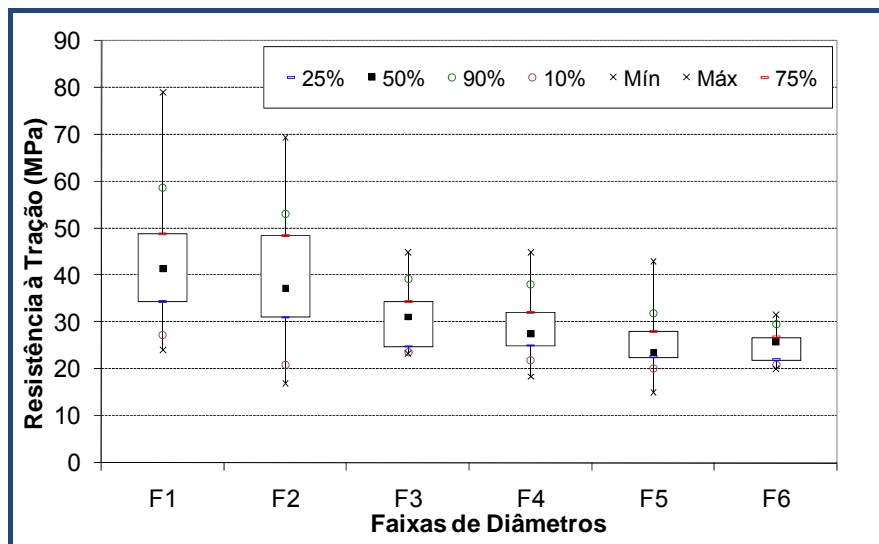


Figura 5.45 – Box-Plot dos resultados dos ensaios (Planta de três anos)

Observa-se uma grande dispersão dos valores mas, de uma forma geral, confirmou-se a tendência de redução da resistência à tração das raízes do capim vetiver com o aumento do diâmetro das amostras ensaiadas.

Resultados apresentados por Bischetti *et al.*, (2005) exibem grande variabilidade da resistência à tração medida em raízes de 8 diferentes espécies testadas, mas destacam que esta variação também acontece se considerada uma só espécie de planta.

O coeficiente de correlação resultante das linhas de tendência nos gráficos que relacionam resistência a tração das raízes e diâmetro foram de 0,30 e 0,28 para a planta de 2 e 3 anos respectivamente. Embora baixos, esses valores estão próximos aos obtidos por outros autores em diferentes estudos. Bischetti *et al.*, (2005), obtiveram coeficientes de correlação entre 0,34 e 0,82. De igual maneira, De Baets *et al.*, (2008) relataram coeficientes de correlação na faixa de 0,22 a 0,92, depois de estudar 25 espécies de plantas típicas do Mediterrâneo. Finalmente, Genet *et al.*, (2008) descrevem o coeficiente de correlação para árvores novas sendo de 0,15 e de 0,36 para árvores intermédias e maduras.

Na planta de dois anos de idade o valor máximo obtido foi de 51 MPa na faixa de 0,5 a 0,75 mm de diâmetro, enquanto que na planta de três anos o máximo valor foi de 79 MPa, apresentado na faixa de diâmetros inferiores a 0,50 mm. Este último valor apresentou-se muito próximo ao valor de resistência média relatados por Truong & Hengchaovanich (1997), Hengchaovanich (2003) e Boletim Vetiver Número 14 (2006). No entanto, os valores médios obtidos mostraram-se inferiores aos relatados na literatura.

A planta de dois anos de idade apresentou o maior número de dados de resistência na faixa de 20 a 40 MPa enquanto que os valores obtidos para a planta de três anos, os resultados concentraram-se em uma faixa superior, de 20 a 50 MPa. Esses resultados sugerem que, possivelmente, gramíneas com idades ainda maiores, poderiam apresentar valores de resistência à tração mais altos que os obtidos no presente estudo.

Vários estudos (MENDONÇA E CARDOSO, 1998; BISCHETTI *et al.*, 2005; BRANSBY *et al.*, 2006; De BAETS *et al.*, 2008) verificaram que a resistência a tração é muito elevada para raízes finas, diminuindo significativamente com o aumento do diâmetro.

Por outro lado, a diminuição na resistência à tração com o incremento do diâmetro da raiz foi explicado por Genet *et al.* (2005) por diferenças na estrutura da raiz. Esses autores atribuem esta adversa relação ao alto conteúdo de celulose contido nas raízes mais finas. Eles observaram que a resistência à tração incrementou com a diminuição do diâmetro da raiz que apresentava um maior conteúdo de celulose para as espécies *Pinus pinaster* e *Castanea sativa*.

Em concordância com o anteriormente exposto, Genet *et al.* (2008) relataram que árvores maduras possivelmente possuem altas quantidades de celulose a qual é responsável pela resistência à tração, embora não existam estudos que investiguem este fenômeno como função da idade das árvores. Em seu estudo com *Cryptomeria japonica*, árvores jovens apresentaram resistência à tração de 22.6 ± 1.1 MPa, árvores intermédias apresentaram valores de 25.3 ± 1.2 MPa e árvores maduras tiveram resistências de 31.7 ± 1.3 MPa. Os diâmetros das raízes testadas estiveram em uma faixa de 0,25 a 3,5 mm, de 0,45 a 4,20 mm e de 0,3 a 4,3 mm para árvores jovens, árvores intermédias e árvores maduras, respectivamente. Neste mesmo estudo, não foram encontradas diferenças na resistência a tração de raízes crescendo a diferentes profundidades assim como crescendo a diferentes distâncias do tronco.

Nos gráficos de resistência à tração apresentados no estudo de De Baets *et al.*, (2008), são comparadas a resistências de arbustos, árvores e capins. Observa-se que, dentre estes três grupos, os capins testados apresentam resistências maiores que arbustos e árvores; estes dois últimos com resultados muito próximos.

Variações na idade da raiz, taxa de crescimento, direção pela variação do conteúdo de umidade do solo, textura e estado do solo, são fatores que podem ser responsáveis pela variabilidade na resistência a tração das raízes (De BAETS *et al.*, 2008).

Cazzuffi *et al.* (2006), notaram que existe certa influência da resistência à tração das raízes no incremento da resistência ao cisalhamento. De fato, Elygrass e Vetiver grass, caracterizadas por uma alta resistência à tração, são as espécies que foram capazes de oferecer o mais alto incremento na resistência do solo ao cisalhamento.

5.6 Avaliação da perda de solo

O solo é o elemento passivo da erosão. A resistência ou sensibilidade deste à erosão pela água ou pelo vento é função de suas propriedades intrínsecas e extrínsecas. Não é possível prevenir a erosão, mas é possível e necessário reduzir as perdas de solo por erosão a taxas toleráveis (TROEH *et al.*, 1980).

Foram identificadas erosões tipo sulco e ravina, especificamente nas parcelas experimentais denominadas F-4, F-5 e E-4, em maior proporção; e as parcelas E1, E2 e E10, em menor proporção, acentuadas na época da chuva. Na Figura 5.46, mostram-se as parcelas mais afetadas por este fenômeno erosivo.

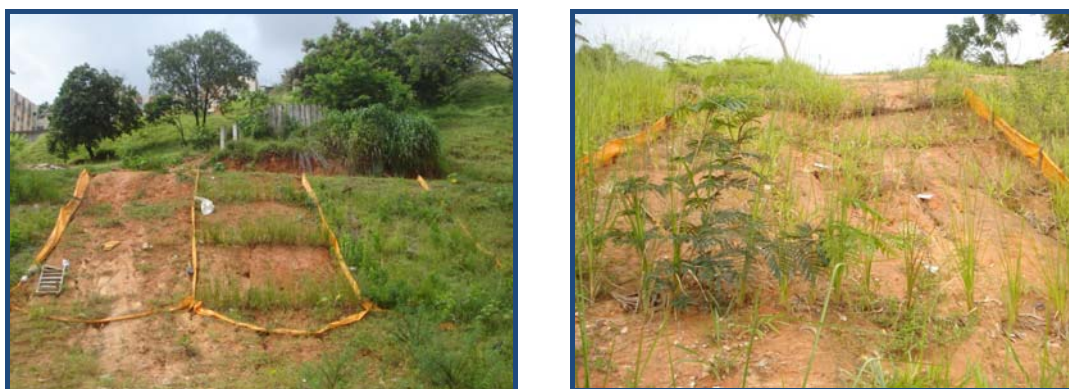


Figura 5.46 – Erosões do tipo sulco e ravina nas parcelas F-4, F-5 e E-4

Esse fato fez com que a água de chuva tivesse caminhos preferenciais para circular pelos taludes, removendo cada vez mais partículas de solo para a base dos mesmos. As perdas do solo portanto, foram maiores, devido a essas formas de erosão presentes na área.

A Tabela 5.8 apresenta uma avaliação qualitativa da porcentagem de cobertura vegetal observada em cada parcela no momento das coletas para avaliação da perda de solo. Esta porcentagem foi estimada qualitativamente através das freqüentes inspeções realizadas em campo.

Tabela 5.8 – Cobertura das parcelas experimentais estimada de forma qualitativa

ÁREA	% DE COBERTURA					
ESCOLA 1	C E-1 20%	V E-2 60%	VMB E-3 95%	V E-4 50%	VMB E -5 90%	
ESCOLA 2	V E-6 100%	VMB E-7 100%	V E-8 100%			
ESCOLA 3	VMB E-9 90%	C E-10 20%	V E-11 70%	VMB E-12 85%		
FAVELA	C F-1 15%	V F-2 40%	VMB F-3 80%	C F-4 10%	V F-5 40%	VMB F-6 90%

Na avaliação da perda de solo foram realizadas 5 coletas em campo durante os meses de fevereiro e março de 2009, após a ocorrência de chuvas naturais consideradas relevantes para a coleta de amostras. Esta parte do estudo foi realizada nas áreas da favela e escola. Na área campo, como foi descrito anteriormente, não foi possível realizar a avaliação, devido à invasão de espécies competindo com o *Vetiveria zizanioides* e por se apresentar o terreno muito homogêneo sem permitir a diferenciação dos tratamentos implantados. A Tabela 5.9 apresenta os resultados obtidos nas 5 coletas de sedimentos realizadas em campo. Além das datas das coletas, são apresentados também o fator erosividade da chuva (R), determinada conforme metodologia descrita anteriormente.

Tabela 5.9 – Quantidade de sedimentos calculados para diferentes eventos de chuva

Coleta		26/02/2009	17/03/2009	25/03/2009	26/03/2009	30/03/2009
R		125,6891	387,5911	168,8948	24,7735	320,2048
Parcela	Tratamento	Sedimento total (kg)	Sedimento total (kg)	Sedimento total (kg)	Sedimento total (kg)	Sedimento total (kg)
E-1	C	0,211	42,265	5,181	0,106	20,292
E-2	V	0,237	0,178	0,067	0,055	0,100
E-3	VMB	0,085	0,261	0,062	0,060	0,174
E-4	V	0,221	0,265	0,087	0,079	0,212
E-5	VMB	0,063	0,051	0,065	0,012	0,057
E-6	V	0,022	0,027	0,013	0,006	0,025
E-7	VMB	0,017	0,013	0,003	0,005	0,017
E-8	V	0,074	0,091	0,058	0,011	0,050
E-9	VMB	0,271	0,523	0,108	0,012	0,107
E-10	C	4,229	2,840	0,661	0,190	1,386
E-11	V	0,670	0,843	0,246	0,072	0,248
E-12	VMB	0,182	0,270	0,083	0,015	0,099
F-1	C	3,904	36,337	25,860	0,384	10,722
F-2	V	2,880	37,924	12,771	0,107	10,790
F-3	VMB		1,446	0,980	0,009	0,723
F-4	C	5,931	55,433	49,462	0,561	46,077
F-5	V	2,190	59,307	20,934	0,226	3,267
F-6	VMB		0,009	0,012	0,008	0,057

Os dados da parcela C E-1, que se encontram ressaltados, correspondem a dois motivos diferentes: o primeiro dado (26/02/09) foi obtido na primeira coleta, onde ainda não se tinha a experiência da realização da amostragem e possivelmente não se misturou com a suficiente

energia para homogeneizar a mescla. No segundo dado (17/03/09), o resultado de sedimento excessivo foi explicado pelos funcionários da CTRS-BR040: em dias anteriores moradores da vila, que encontra-se próxima à área, tinham depositado grande quantidade de areia e entulho próximo à parte superior da parcela.

No dia 26/02/09 os recipientes coletores no momento da coleta encontravam-se vazios e portanto não foi tomada alíquota para as parcelas F-3 e F-6. Isto possivelmente aconteceu por fugas da água escoada fora do canalizador de sedimentos.

Nas Figuras 5.47, 5.50 e 5.51, mostram-se as alíquotas coletadas no dia 26/03/09 após a ocorrência da chuva natural acontecida no dia anterior. Do mesmo modo apresenta-se nas Figuras 5.48 e 5.49 a mistura (sedimento + água) e o lodo gerado, respectivamente.



Figura 5.47 – Alíquotas coletadas no 26/03/09 na área da favela



Figura 5.48 – Mistura de água e solo em uma parcela na área da favela



Figura 5.49 – Lodo gerado em uma parcela da área da favela



Figura 5.50 – Alíquotas coletadas no 26/03/09 na área da escola 1



Figura 5.51 – Alíquotas coletadas no 26/03/09 na área da escola 2 e 3

Após a mistura (sedimento + água) ser levada à estufa de 105-110°C até constância de massa, unicamente o sedimento (de três eventos chuvosos e para algumas parcelas) foi peneirado, com a finalidade de identificar o diâmetro dos grãos que eram carregados pela água da chuva e determinar se a incidência da erosão era feita em solos finos ou grossos. Nos gráficos 5.52 a 5.54, mostram-se s resultados destes ensaios.

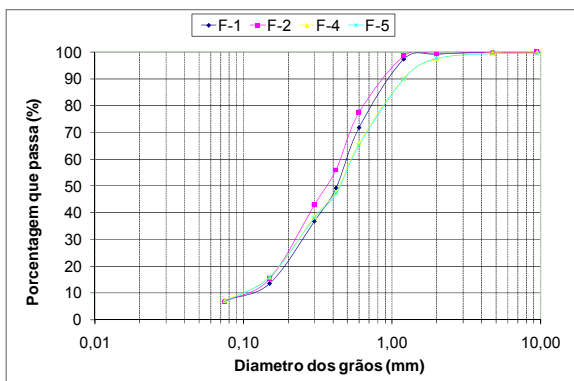


Figura 5.52 – Peneiramento amostras 17/03/09

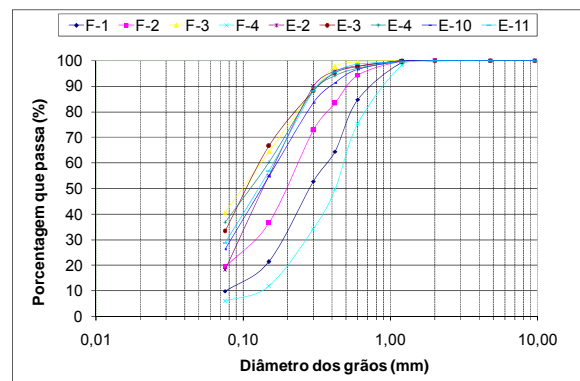


Figura 5.53 – Peneiramento amostras 25/03/09

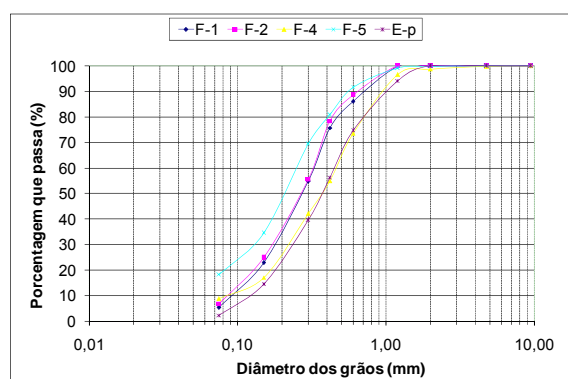


Figura 5.54 – Peneiramento amostras 30/03/09

De acordo com a classificação da ABNT, os gráficos mostram que as partículas carregadas pela chuva nos casos indicados, foram partículas consideradas granulares ou grossas, com diâmetros superiores a 0,06 mm.

A Figura 5.55 apresenta o gráfico em escala natural das perdas de solo medidas em campo nos diferentes tratamentos para os 5 eventos chuvosos. A Figura 5.56 apresenta o mesmo gráfico, só que em escala logarítmica.

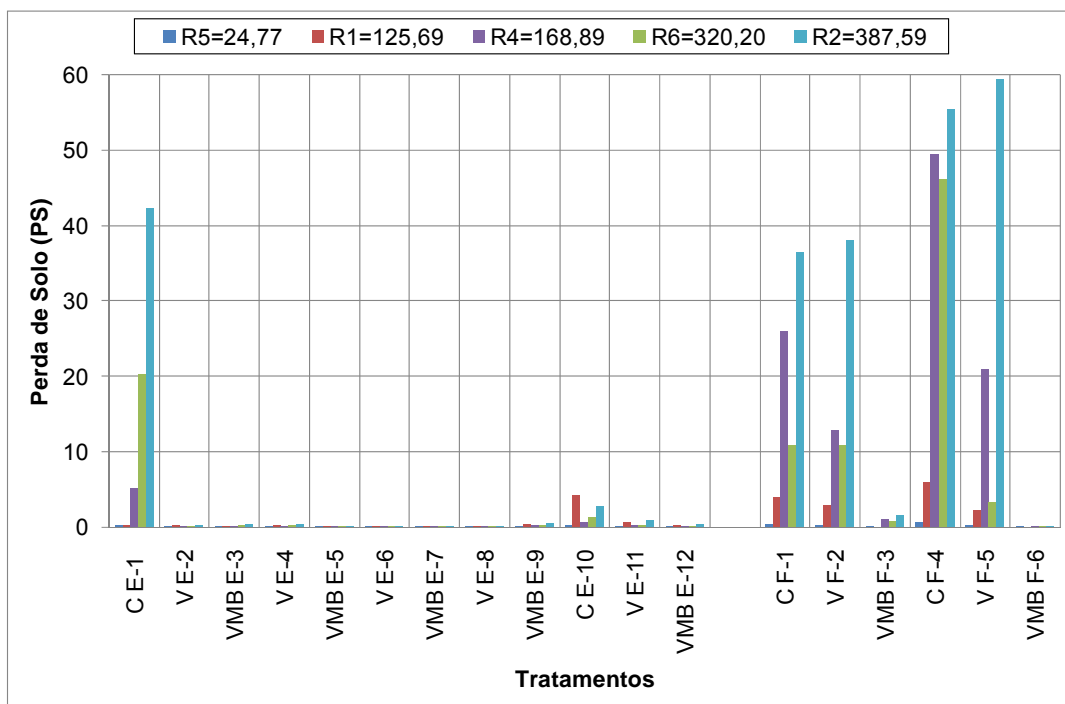


Figura 5.55 – Perda de solo medida em campo para os tratamentos (escala natural)

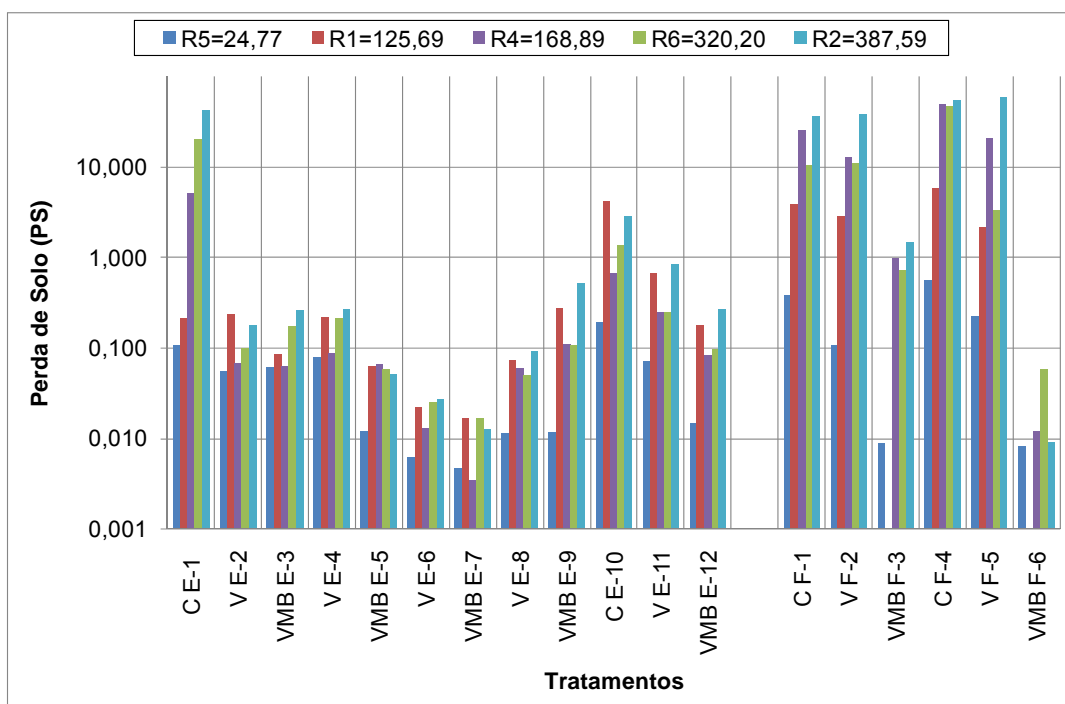


Figura 5.56 – Perda de solo medida em campo para os tratamentos (escala logarítmica)

Observa-se claramente que nas parcelas de controle (C), as quais não possuíam nenhum tipo de cobertura ou recobrimento, as perdas de solo são muito superiores que as apresentadas nas parcelas com vetiver (V) e vetiver, mix de sementes e biomanta (VMB), respectivamente. A exceção a este fato acontece unicamente na parcela V F-5 devido possivelmente à presença de uma voçoroca, como foi explicado anteriormente.

Os resultados sugerem que a cobertura presente em cada parcela, por meio da parte aérea das plantas (folhas), intercepta e absorve a energia cinética produzida pela intensidade da chuva e previne o destacamento do solo, evitando que este se deposite em outras áreas. De igual maneira, o *Vetiveria zizanioides* junto com as gramíneas e leguminosas do mix de sementes, ajudam na infiltração da água no solo retardando o escoamento superficial.

Segundo Gómez (1990), para erodir um solo coberto de vegetação, precisa-se de uma força 3 vezes maior que para produzir arraste em solos sem proteção.

Por outro lado, infelizmente, a relação direta entre a erosividade da chuva (fator R) e a perda de solo (PS) nas parcelas experimentais não foi confirmada, para todos os eventos chuvosos, com os resultados gerados nas coletas realizadas. Era esperado que com maiores índices de erosividade da chuva se obtivessem maiores perdas de solo nas áreas, questão que não se percebe para todos os tratamentos. Não entanto, devem ser considerados outros fatores que influenciam a perda de solo tais como teor de umidade, sucção, diferença de dias entre os eventos chuvosos, dentre outros.

Observando a área da favela para a coleta realizada no dia 25/03/2009 e que foi denominada como R4, não se ajusta à tendência esperada, apresentando um visível incremento na perda do solo. Isto pode ser explicado, já que em dias anteriores a esta coleta, as parcelas F1 a F5 foram reparadas, colocando na base do talude solo compactado e ajustando novamente as tábuas de madeira que pelo peso do solo tinham-se aberto, danificando assim o canalizador de sedimentos.

Freqüentes reparos e manutenções nas parcelas após os eventos chuvosos tiveram que ser realizados, sendo esta uma limitação para a aplicação da metodologia e tendo interferência negativa nos resultados posteriores da perda do solo.

Pode-se ressaltar também que algumas parcelas de vetiver, mix de sementes e biomanta (VMB) apresentam maior perda de solo que parcelas unicamente com vetiver (V). Como exemplo, pode-se citar, as parcelas V E-8 e VMB E-9, esta última com maior perda de solo. Como explicação, tem-se que a parcela E-8 encontrava-se situada em uma área onde plantas invasoras foram detectadas e portanto sua cobertura foi muito maior, enquanto a parcela E-9, ainda tendo todos os componentes, possuía uma cobertura menor.

Com relação ao fator K, estimado de maneira indireta a partir da caracterização física e química dos solos, percebe-se que quanto maior seja este índice maior será a erodibilidade do solo, tal como se apresenta na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Classes de interpretação para o fator K

Intervalos de valores de K (t.ha.ano/tm.ha.mm)	Classes de interpretação
< 0,0195	Erodibilidade baixa
0,0195 – 0,039	Erodibilidade média
>0,039	Erodibilidade alta

Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2004)

A área que apresentou o menor K foi a área compreendida pelas parcelas E-6, E-7 e E-8, parcelas cujas perdas de solo, visualizadas na Figura 5.55, são menores que para as demais parcelas.

A inclinação do terreno é também um dos fatores mais importantes na erosão do solo. A medida que esta aumenta, aumenta a erosão. A maior velocidade da água que escoar pelos taludes, própria de gradientes maiores, faz que seja maior a quantidade de solo desprendido de seu lugar e transportado para outras áreas (GÓMEZ, 1990).

É assim que na área da favela, com inclinação aproximada de 45%, observa-se uma maior perda de solo para as 6 parcelas que compõem este conjunto, diferentemente das parcelas da área da escola que, com inclinação aproximada de 29%, apresentou menores perdas de solo. Da mesma maneira pode-se analisar a influência do espaçamento entre os cordões de capim vetiver, que na favela foram plantados a uma distância de 4 m e na escola esta distância variou para 2 m, com 3 cordões na primeira área e 6 cordões na segunda.

Ao início dos experimentos pretendia-se avaliar a influência do espaçamento entre cordões do *Vetiveria zizanioides*, realizando coletas em áreas com igual inclinação e espaçamento

diferente (escola e campo) e com igual espaçamento e diferente declividade (favela e campo). Isto, infelizmente não pôde ser realizado, pelas condições expostas nos itens anteriores.

Como as parcelas experimentais possuíam o mesmo comprimento (12 m), a influência da extensão do talude na produção de sedimentos não foi avaliada.

Em diferentes estudos verifica-se a eficiência do sistema vetiver na redução da perda do solo e na diminuição do escoamento superficial, tal como se apresenta na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Eficiência do Sistema Vetiver (VS) na redução da perda do solo e na diminuição do escoamento superficial

Países	Perda de solo (t/ha)			Escoamento Superficial (% de chuva)		
	Controle	Convencional	VS	Controle	Convencional	VS
Tailândia	3,9	7,3	2,5	1,2	1,4	0,8
Venezuela	95,0	88,7	20,2	64,1	50,0	21,9
Venezuela (15%)*	16,8	12,0	1,1	88,0	76,0	72,0
Venezuela (26%)*	35,5	16,1	4,9			
Vietnam	27,1	5,7	0,8			
Bangladesh		42,0	6 – 11			
India (1,7%)*		14,4	3,9		23,3	15,5

* Declividade do talude

Fonte: Truong & Loch (2004)

Observa-se, com relação à tabela anterior, que taludes com maior inclinação e parcelas de controle, apresentam maiores perdas de solo (caso Venezuela). Percebe-se, também, que o sistema vetiver ou Vetiver system (VS) retém grande quantidade de solo nos seus cordões, evitando seu carreamento para outras áreas.

Bu *et al.*, (2008) estudaram o efeito de barreiras vivas no controle da erosão, através de parcelas experimentais com dimensões de 2 m x 10 m (largura x comprimento) e 15% de inclinação, utilizando quatro diferentes espécies de plantas, entre elas, o *Vetiveria zizanioides*.

A diferença do presente estudo, a perda de solo e o escoamento superficial, foram determinados por meio de chuvas simuladas. Os resultados obtidos por esses autores apontam que o escoamento superficial e a perda de solo nas parcelas de controle foram sempre mais altas que nas parcelas contendo barreiras vivas. A taxa de redução de perda de solo variou entre 18,4% e 70%, enquanto o escoamento superficial foi reduzido entre 17,2% e 70,8%. Estes autores reportaram também que cada barreira utilizada tem uma função considerável no controle da erosão, mas, não foi evidenciada uma diferença estatística significativa entre as quatro espécies testadas para o controle da erosão.

Sudhishri *et al.*, (2008) avaliaram durante três anos consecutivos o comportamento hidrológico de barreiras mecânicas e vegetais para o escoamento superficial, a perda de solo e a fertilidade do solo, dentre outros objetivos. Para isso, instalaram parcelas experimentais, cada uma com área de 150 m² (30 m x 5 m), em um talude degradado de 11% de declividade. O experimento incluiu 5 tratamentos, sendo três com barreiras vegetais (cordões a cada 10 m), um com barreira mecânica (fardo de pedras) e um controle. Os resultados apresentam-se na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Eficiência de diferentes tratamentos na redução da perda do solo e na diminuição do escoamento superficial

Tratamentos	Escoamento Superficial (%)				Perda de solo (t/ha)			
	2000	2001	2002	Média	2000	2001	2002	Média
Stone bund	12,25	11,12	12,32	11,90	5,96	5,16	5,80	5,64
Hill broom	13,85	13,00	14,06	13,64	6,92	6,02	7,16	6,70
Vetiver	8,79	7,85	9,88	8,84	4,22	3,85	4,06	4,04
Sambuta	9,36	8,25	10,83	9,48	4,49	4,02	4,65	4,39
Control	26,02	24,84	26,78	25,88	13,90	13,70	14,28	13,96

Fonte: Sudhishri *et al.*, (2008)

A Figura 5.57 apresenta a relação entre a perda de solo medida em campo e o fator RKLS para os 5 eventos chuvosos, em escala natural. A Figura 5.58 mostra o gráfico em escala logarítmica. Conforme a USLE, essa relação é proporcional ao fator de uso e manejo (C).

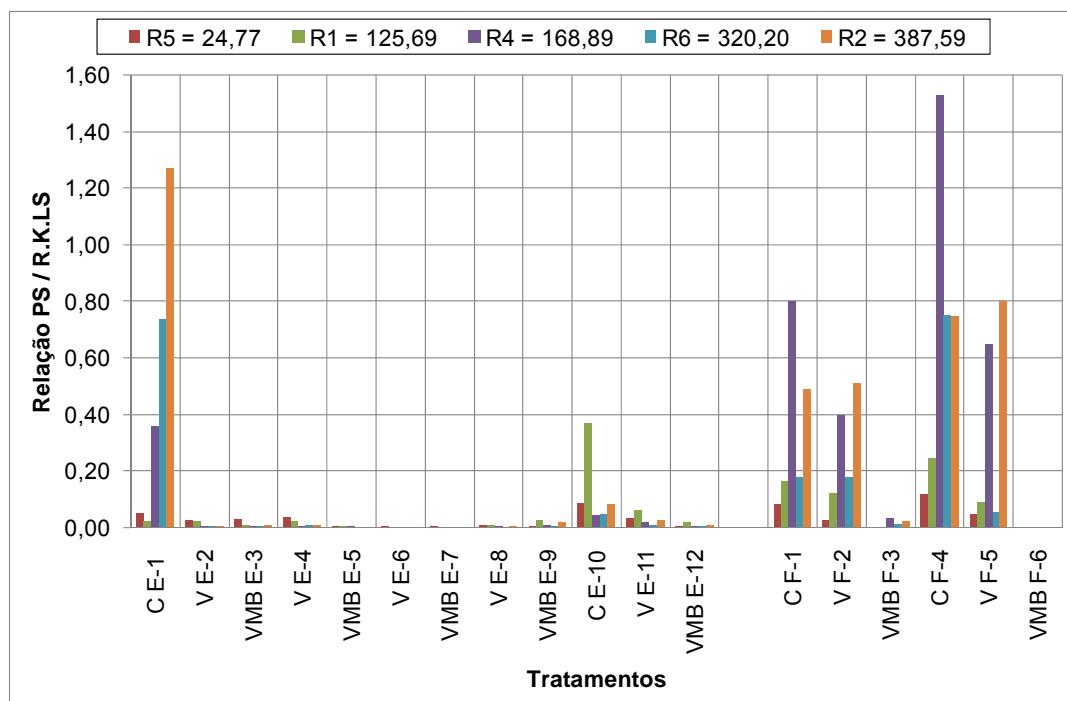


Figura 5.57 – Relação Perda de solo (PS)/R.K.LS para os tratamentos (escala natural)

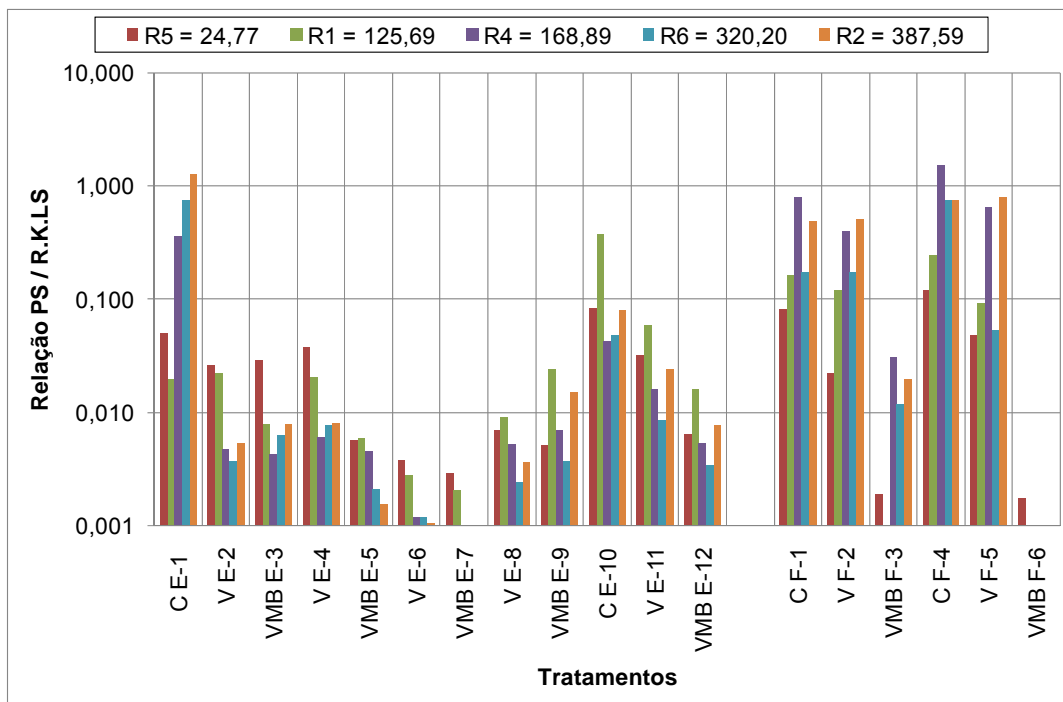


Figura 5.58 – Relação Perda de solo (PS)/R.K.LS para os tratamentos (escala logarítmica)

Observa-se no gráfico em escala logarítmica que a relação entre o fator PS/R.K.LS pode ser, em alguns casos, de até 100 vezes maior para parcelas de controle quando comparadas com parcelas com vetiver, mix de sementes e biomanta.

Isto confirma os dados tabelados obtidos por estudos realizados por diferentes autores que atribuem ao fator C o valor de 0,010 para campos com boa cobertura, enquanto atribuem valor de 1,000 para solo exposto. No entanto, valores numéricos do fator C podem variar ao longo do ano devido à variação sazonal da eficácia da cobertura do solo em função do estado de estresse hídrico, existência ou não de cobertura morta sobre a superfície, dentre outros fatores (SILVA *et al.*, 2004). Embora de forma lenta, a cobertura das plantas muda inexoravelmente durante a permanência dos cultivos ou tratamentos implantados (TROEH *et al.*, 1980).

Considerando o pequeno intervalo de tempo entre as coletas realizadas, esta relação deveria ser constante para todos os eventos chuvosos avaliados em cada tratamento, mas, considerando as muitas variáveis que influenciam o processo erosivo e que a estimativa de perda de solo foi avaliada em campo, isto não foi observado (Tabela 5.13). Provavelmente se este estudo fosse realizado em laboratório, com simuladores de chuva e em parcelas sob controle permanente, esta tendência poderia ser obtida sem a incidência de tantas variações.

Pelo exposto anteriormente, ressalta-se que cada estudo é diferente e que os resultados dependem da complexa correlação entre fatores como clima, tipo de solo, topografia e cobertura vegetal, presentes em cada área específica.

Convém salientar que nenhum método de pesquisa em erosão é abrangente o bastante para ser utilizado exclusivamente e fornecer resultados sólidos e amplos para a tomada de decisões em atividades conservacionistas e/ou de reabilitação de áreas degradadas pelo processo erosivo. Assim, o ideal é o uso de métodos que se complementem e juntos possibilitem a compreensão global mais próxima da realidade local e natural (SILVA *et al.*, 2004).

Tabela 5.13 – Tabela resumo dos fatores locais para a USLE e suas correlações

Parcela	Tratamento	Cobertura (%)	K	Inclinação (%)	X (m)	LS	R5 = 24,7735	R1= 125,6891	R4= 168,8948	R6= 320.2048	R2= 387,5911	Média
							PS/R5.K.LS	PS/R1.K.LS	PS/R4.K.LS	PS/R6.K.LS	PS/R2.K.LS	
E-1	C	20	0,017	29	12	5,0565	0,0497	0,0195	0,3568	0,7372		0,2908
E-2	V	60	0,017	29	12	5,0565	0,0260	0,0219	0,0046	0,0036	0,0053	0,0123
E-3	VMB	95	0,017	29	12	5,0565	0,0284	0,0079	0,0043	0,0063	0,0078	0,0109
E-4	V	50	0,017	29	12	5,0565	0,0372	0,0202	0,0060	0,0077	0,0080	0,0159
E-5	VMB	90	0,017	29	12	5,0565	0,0056	0,0059	0,0045	0,0021	0,0015	0,0039
E-6	V	100	0,013	29	12	5,0565	0,0038	0,0027	0,0012	0,0012	0,0010	0,0020
E-7	VMB	100	0,013	29	12	5,0565	0,0029	0,0020	0,0003	0,0008	0,0005	0,0013
E-8	V	100	0,013	29	12	5,0565	0,0070	0,0090	0,0053	0,0024	0,0036	0,0055
E-9	VMB	90	0,018	29	12	5,0565	0,0052	0,0237	0,0070	0,0037	0,0148	0,0109
E-10	C	20	0,018	29	12	5,0565	0,0843	0,3697	0,0430	0,0476	0,0805	0,1250
E-11	V	70	0,018	29	12	5,0565	0,0321	0,0586	0,0160	0,0085	0,0239	0,0278
E-12	VMB	85	0,018	29	12	5,0565	0,0064	0,0159	0,0054	0,0034	0,0077	0,0078
F-1	C	15	0,017	45	12	11,2747	0,0809	0,1620	0,7988	0,1747	0,4891	0,3411
F-2	V	40	0,017	45	12	11,2747	0,0225	0,1195	0,3945	0,1758	0,5105	0,2446
F-3	VMB	80	0,017	45	12	11,2747	0,0019		0,0303	0,0118	0,0195	0,0158
F-4	C	10	0,017	45	12	11,2747	0,1182	0,2462	1,5279	0,7508	0,7462	0,6779
F-5	V	40	0,017	45	12	11,2747	0,0475	0,0909	0,6467	0,0532	0,7983	0,3273
F-6	VMB	90	0,017	45	12	11,2747	0,0017		0,0004	0,0009	0,0001	0,0008

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do exposto no presente trabalho e de acordo com os resultados específicos obtidos dos experimentos aqui realizados, pode-se concluir que:

A caracterização física dos substratos permitiu confirmar a homogeneidade dos taludes naturais escolhidos para a implementação das parcelas experimentais, questão marcante na área da favela e na área de campo.

A umidade do solo obtida foi um fator importante no desenvolvimento do capim vetiver, já que na área da escola, que apresentou menores teores, as folhas ficaram secas e murchas, enquanto nas áreas da favela e campo, elas resistiram às condições adversas climáticas iniciais e à falta de irrigação, apresentando um melhor aspecto.

A fertilidade do solo na área de campo mostrou-se mais apropriada para a implementação de vegetação em taludes descobertos, fato ratificado pelos maiores índices de macronutrientes (N e K), matéria orgânica (M.O.) e carbono (C), quando comparados com as demais áreas. No entanto, essa maior fertilidade fez que espontaneamente surgissem plantas invasoras e que os tratamentos implantados inicialmente não pudessem ser diferenciados, eliminando a possibilidade da avaliação da perda de solo nesta área de estudo. Além disso, a caracterização química confirmou as apreciações da área (feitas de maneira visual) como tendo o melhor substrato para a implementação das parcelas.

A época escolhida para a implantação das parcelas, ocorrida nos meses de abril e maio de 2008, não favoreceu o desenvolvimento e rápido crescimento do *Vetiveria zizanioides*, devido à precipitação quase nula nos meses de maio, junho e julho, além das baixas temperaturas, principalmente no mês de julho. Apesar disto, a chegada da chuva no mês de novembro fez que as plantas se reativassem, apresentando um melhor aspecto e gerassem uma melhor cobertura das parcelas com tratamentos.

Como qualquer outra planta, o *Vetiveria zizanioides* precisa em seus inícios de todos os cuidados necessários para um adequado e rápido crescimento. Devem ser consideradas medidas como a abundante irrigação, o enriquecimento do substrato por meio de adubo e a adequação dos terrenos onde irá ser plantada. Além disso, é importante a aplicação de técnicas de manejo que potencializem o desenvolvimento das plantas, como o controle de

ervas daninhas e o corte de folhas velhas que absorvem nutrientes em excesso. Não entanto, o capim vetiver mostrou-se como uma planta resistente, já que com a chegada da época da chuva sua parte aérea teve melhoras notáveis e com isto, o desenvolvimento da planta foi rápido e constante.

Foi evidenciado, em todas as áreas, o melhor desenvolvimento das parcelas com biomanta e mix de sementes que as parcelas que tinham unicamente cordões da gramínea em estudo. Como bem conhecido, a biomanta reduz a evaporação da água do solo, incorpora matéria orgânica e mantém os nutrientes do solo, proporcionando rapidez no processo de vegetação. A biomanta demonstrou ser uma excelente ferramenta de bioengenharia para fins de recuperação de áreas degradadas.

Em geral, pode-se considerar que o desenvolvimento do capim vetiver, desde o começo até o final do projeto foi muito heterogêneo, quando observados fatores como a altura e o volume das plantas e o desenvolvimento do sistema radicular.

Com relação à resistência ao cisalhamento, as amostras de solo-raiz apresentaram menores resistências que o solo sem raiz devido ao menor índice de vazios calculado para este último, estando portanto mais denso.

Acredita-se que a escala de trabalho usada para a realização dos ensaios de cisalhamento direto não foi a mais adequada, devido às dimensões dos corpos de prova testados (10x10x2 cm) que não simulariam com total fidelidade a situação real que se apresenta em campo.

Confirmando resultados reportados por diferentes autores, foi observada grande variabilidade no comportamento das resistências à tração máximas obtidas. Da mesma maneira, ratificou-se a tendência de que raízes de menores diâmetros apresentam as maiores resistências à tração. O *Vetiveria zizanioides* alcançou resistências médias de 18 – 32 MPa e de 25 – 42 MPa, para a planta de 2 e 3 anos de idade, respectivamente. Estes valores mostram-se inferiores aos relatados na bibliografia.

A concentração de dados de resistência à tração reportados pela planta de 3 anos de idade encontra-se em um patamar um pouco maior aos dados obtidos na planta com menor idade. Este fato sugere que plantas de *Vetiveria zizanioides* mais desenvolvidas teriam resistências ainda maiores que as alcançadas neste estudo.

Parcelas experimentais de controle resultaram em maiores perdas de solo, quando comparadas com parcelas com cordões de vetiver e cordões de vetiver, biomanta e mix de sementes. Portanto, sistemas de cobertura do solo podem ser muito úteis na prevenção da erosão. Solos descobertos ou desnudos são mais propensos à erosão.

A variação no grau de declividade dos taludes estudados influenciou notavelmente na produção de sedimentos nas parcelas experimentais. A área da favela com maior inclinação (45%) produziu as maiores perdas que a área da escola, que possuía menor inclinação (29%).

Diversos fatores, entre eles, clima, tipo de solo, topografia e cobertura vegetal, afetam o fenômeno da erosão e devem ser analisados com detalhe para obter avaliações consistentes e precisas. A correlação entre esses fatores e sua adequada interpretação poderão ajudar na escolha de melhores medidas de controle para a proteção do solo contra a erosão.

A equação universal de perda de solo (USLE) aplica-se para séries de dados de mais de 20 anos, sendo sua validade limitada para eventos de chuva individuais. Contudo, pode ser uma estimativa aproximada para o cálculo de perdas reais acontecidas em campo.

Fazem-se as seguintes recomendações para a complementação e aprimoramento deste estudo, ou para trabalhos futuros que venham a ser baseados nesta pesquisa:

- Realizar a implantação de parcelas experimentais com *Vetiveria zizanioides* no período de incidência de chuva, para conseguir um melhor e mais rápido desenvolvimento da gramínea em estudo;
- Caracterizar sob os pontos de vista físico, químico e se possível, biológico os substratos no final do projeto, para verificar se as condições iniciais dos mesmos foram melhoradas com a implantação dos cordões de *Vetiveria zizanioides* e mix de sementes. Estas condições incluiriam melhora na fertilidade do solo e na estabilidade de agregados e, portanto, prevenção de futura erosão do solo;
- Analisar a relação custo-benefício que avalie diferentes técnicas de engenharia (bioengenharia e engenharia biotécnica) na recuperação de áreas degradadas, determinando se o sistema vetiver é rentável a curto, médio e longo prazo;
- Estudos similares poderiam ser realizados a escala real, ou seja, em obras civis ou projetos civis que estejam sendo ou tenham sido executados aplicando o sistema vetiver como

solução de bioengenharia. Portanto, seria adequado fazer a avaliação a grande escala de projetos reais;

- Recomenda-se, para os ensaios de cisalhamento direto, trabalhar com corpos de prova maiores ou fazer os ensaios diretamente em campo com equipamentos de maior porte. Da mesma maneira, poderiam ser feitos maior número de ensaios, analisando portanto maior número de amostras;
- Análises estatísticas para ensaios de cisalhamento direto que permitam obter melhores conclusões ao respeito desta característica mecânica dos solos em estudo;
- Avaliações de perda de solo em campo devem ser realizadas por períodos de tempo mais longos que permitam avaliar com maior precisão todas as variáveis que fazem parte deste complexo processo que é o controle de erosão;
- Em virtude da variabilidade dos dados e da falta de uma correlação direta entre erosividade de chuva (fator R) e perda de solo, o aumento de número de observações realizadas em um intervalo de tempo maior, deveria ser considerado;
- A aplicação da metodologia USLE poderia ser combinada com Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para estimar erosão laminar e em sulcos em níveis maiores aos estudados no presente estudo (bacias hidrográficas, nível regional etc.);
- Estudos que visem o uso do *Vetiveria zizanioides* para fitorremediação e reabilitação de áreas contaminadas, minas e barragens de rejeitos, assim como para tratamento de esgoto e líquidos lixiviados diversos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação do Limite de Liquidez**, NBR 6459. Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm**: Determinação da massa específica, NBR 6508. Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação do Limite de Plasticidade**, NBR 7180. Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Análise Granulométrica**, NBR 7181. Rio de Janeiro, 1984.
- AMARANTHUS, M.P.; RICE, R.M.; BARR, N.R.; ZIEMER, R. Logging and forest roads related to increase debris slides in Southwestern Oregon. **Journal of Forestry**, v. 83, n. 4, p. 229-233, abr. 1985.
- ARAÚJO, G.; ALMEIDA, J.; GUERRA, A. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. 320 p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**, D3080, 2004.
- BISCHETTI, G.; CHIARADIA, E.; SIMONATO, T.; SPEZIALI, B.; VITALI, B.; VULLO, P.; ZOCCO, A. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). **Plant and Soil**, Italy, n. 278, p. 11-22, 2005.
- BOLETÍN VETIVER. Maracay, Venezuela: RLAV - Red Latinoamericana del Vetiver, n. 14, oct. 2006.
- BRANSBY, M.F.; DAVIES, M.C.R.; MICKOVSKI, S.B.; SONNENBERG, R.; BENGOUGH, A.G.; HALLETT, P.D. **Stabilisation of slopes by vegetation reinforcement**. In: PROC. ICSMGE, Hong-Kong, 2006.
- BU, C.F.; CAI, Q.G.; NG, S.L.; CHAU, K.C.; DING, S.W. Effects of hedgerows on sediment erosion in Three Gorges Dam Area, China. **International Journal of Sediment Research**, China, n. 23, p. 119-129, 2008.
- CARVALHO, J. (Org.); SALES, M.M. (Org.); SOUZA, N.M. (Org.); MELO, M.T.S. (Org.). **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. 1 ed. Brasília: FINATEC, 2006, v.1. 464 p.
- CAZZUFFI, D.; CORNEO, A.; CRIPPA, E. Slope stabilisation by perennial “gramineae” in Southern Italy: plant growth and temporal performance. **Geotechnical and Geological Engineering**, Italy, n. 24, p. 429-447, 2006.
- CHONG, C.W.; CHU, L.M. Growth of vetivergrass for cutslope landscaping: effects of container size and watering rate. **Urban Forestry & Urban Greening**, China, n. 6, p. 135-141, 2007.
- COELHO, A.T. **Efeitos da vegetação herbácea associada a técnicas de bioengenharia de solos no controle de erosão em margens de áreas de reservatório da UHE Volta Grande, nos municípios de Água Comprida/MG e Miguelópolis/SP**. 2007. 184 f. Tese de Doutorado – PPG-SMARH, UFMG, Belo Horizonte.

- CORTOLIMA – Corporación Autónoma Regional del Tolima (Colombia). **Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica mayor del río Coello**. Ibagué. 2006. 356 p.
- De BAETS, S.; POESEN, J.; REUBENS, B.; WEMANS, K.; De BAERDEMAEKER, J.; MUYS, B. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. **Plant Soil**, Belgium, n. 305, p. 207-226, 2008.
- DIAS, L.E. **Caracterização de substratos para fins de recuperação de áreas degradadas**. In: RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS. Ed. 1. Viçosa: UFV, p. 27-44, 1998. 251 p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212 p.
- EMBRAPA – FERTILIDADE DE SOLOS. **Interpretação de resultados de análise do solo**. 2000. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho/feranalise.htm>. Acesso em: 20 de junho de 2009.
- FAO – LAND AND WATER DEVELOPMENT DIVISION. **National soil degradation maps**, 2005. Disponível em: <http://www.fao.org/landandwater/agll/glasod/glasodmaps.jsp?country=BRA&search=Display+map+%21%22>. Acesso em: 8 de dezembro de 2007.
- GARCIA, A.R.; MACHADO, C.C.; SILVA, E.; SOUZA, A.P.; PEREIRA, R.S. Volume de enxurrada e perda de solo em estradas florestais em condições de chuva natural. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.4, p. 535-542, 2003.
- GENET, M.; STOKES, A.; SALIN, F.; MICKOVSKI, S.B.; FOURCAUD, T.; DUMAIL, J.; Van BEEK, R. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. **Plant and Soil**, UK, n.278, p. 1-9, 2005.
- GENET, M.; KOKUTSE, N.; STOKES, A.; FOURCAUD, T.; CAI, X.; JI, J.; MICKOVSKI, S. Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability. **Forest Ecology and Management**, France, n. 256, p. 1517-1526, 2008.
- GLASOD – GLOBAL ASSESSMENT OF SOIL DEGRADATION. OLDEMAN, L.R.; HAKKELING, R.T.A.; SOMBROEK, W.G. (Orgs.). **World map of the status of human-induced soil degradation**. 2. ed. rev. Nairobi: Wageningen, 1991. 35 p.
- GOLDSMITH, W. Soil strength reinforcement by plants. In: **Proceedings of Annual Conference, International Erosion Control Association**, February, 2006, Long Beach, California.
- GÓMEZ, A.M. **Control de la erosión hídrica**. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 1990. 83 p.
- GRAY, D.H.; SOTIR R.B. **Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control**. Canada: John Wiley & Sons, Inc, 1996. 378 p.
- GRIMSHAW, R. **The vetiver system**: Vetiver grass Technology: Technology characteristics. Apresentação de slides. 28 slides, [ca. 2005].
- GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. 472 p.
- HENGCHAOVANICH D. Vetiver System for Slope Stabilization. In: **Proceedings of Third Internatioal Vetiver Conference**, October, 2003, Guangzhou, China.

- KIRBY, M.J.; MORGAN, R.P. **Soil erosion**. John Wiley and Sons. 1980. 312 p.
- LAL, R. (Ed.). **Soil erosion** – Research methods. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1994. 340 p.
- MAGALHÃES, A.F. **Avaliação do desempenho de técnicas de bioengenharia na proteção e conservação da cobertura final de taludes em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso para o aterro sanitário de Belo Horizonte, MG**. 2005. 169 f. Dissertação de Mestrado – PPG-SMARH, UFMG, Belo Horizonte.
- MATTIA, C.; BISCHETTI, G.B.; GENTILE, F. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species. In: STOKES, Alexia *et al.* (Ed.). **Eco and Ground bio-engineering: the use of vegetation to improve slope stability**. Netherlands: Springer, 2007. p. 43-51.
- MENDONÇA, A.; CARDOSO, A. Contribuição da vegetação para a estabilidade de taludes. Parte II – Estudo de um caso. **Geotecnia**, Portugal, n. 83, p. 5-26, 1998.
- MICKOVSKI, S.B.; van BEEK, L.P.H.; SALIN, F. Uprooting of vetiver uprooting resistance of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*). **Plant and Soil**, UK, n. 278, p. 33-41, 2005.
- MORGAN, R.P.C; RICKSON, R.J. **Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach**. London: Chapman & Hall, 1995. 274 p.
- NORRIS, J.E.; GREENWOOD, J.R. Assessing the role of vegetation on soil slopes in urban areas. In: **IAEG – International Association for Engineering Geology and the Environment: Engineering Geology for Tomorrow's Cities**. 10th, 2006, Nottingham: The Geological Society of London.
- OLIVEIRA, M.G. **Estudo dos processos erosivos e avaliação da produção de sedimentos na Bacia Hidrográfica da Pampulha**. 1996. 166 f. Dissertação de Mestrado – PPG-SMARH, UFMG, Belo Horizonte.
- PEREIRA, A.R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle da erosão**. Belo Horizonte: Editora Fapi Ltda., 2006. 150 p.
- SCHIECHTL, H.M.; STERN R. **Ground bioengineering techniques for slope protection and erosion control**. Australia: Blackwell Science, 1996. 146 p.
- SILVA, A.M.; SCHULZ, H.E.; CAMARGO, P.B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: RiMa Editora, 2004. 140 p.
- SUDHISHRI, S.; DASS, A.; LENKA, N.K. Efficacy of vegetative barriers for rehabilitation of degraded hill slopes in eastern India. **Soil & Tillage Research**, India, n. 99, p. 98-107, 2008.
- TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.R.; TAIOLI, F.. **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2001. 558 p.
- THE WORLD BANK. **Vetiver Grass: the hedge against erosion**. 4. ed. Washington, D.C.: The World Bank, 1993. 78 p.
- THERMANN, K.; GAU, C.; TIEDEMANN, J. Shear strength parameters from direct shear tests – influencing factors and their significance. In: **IAEG – International Association For Engineering Geology and the Environment: Engineering Geology for Tomorrow's Cities**. 10th, 2006, Nottingham: The Geological Society of London.
- TROEH, F.R.; HOBBS, J.A.; DONAHUE, R.L. **Soil and water conservation for productivity and environmental protection**. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1980. 718 p.

- TRUONG, P.; HENGCHAOVANICH, D. Application of the Vetiver grass system in land stabilization, erosion and sediment control in civil construction. In: **Queensland Main Roads Southern Region Symposium**, 1997, Toowoomba.
- TRUONG, P.N.V.; LOCH, R. Vetiver system for erosion and sediment control. In: **ISCO - International Soil Conservation Organisation Conference**, 13th, 2004, Brisbane.
- TUCHY, E. Forestry ecology in mountains areas. In: **Logging in Mountains Forests**, 1982, Rome - FAO. p. 9-14.
- USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Prediction rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Handbook n. 537. Washington D.C.: USDA, 1978.
- Van BEEK, L.P.H.; WINT, J.; CAMMERAAT, L.H.; EDWARDS, J.P. Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes. **Plant and Soil**, UK, n.278, p. 55-74, 2005.
- VIANA, C. S. **Caracterização dos processos erosivos no Município de Belo Horizonte - Uma contribuição à Gestão Ambiental e ao Planejamento Urbano**. 2000. 217 f. Dissertação de Mestrado – PPG-SMARH, UFMG, Belo Horizonte.

ANEXO A

CÁLCULO DA EROSIVIDADE DAS CHUVAS (FATOR R)

Coleta	Evento	Hora	Duração (h)	Lamina de chuva (mm)	Intensidade (mm/h)	Ei (Mj/ha.mm)	ES (Mj/ha)	I30 (mm/h)	EI30 (Mj.mm/ha.h)	
	22/2/2009	15:00-15:30	0,5	1,00	2,00	0,1453	0,1453			
		17:00-17:30	0,5	3,00	6,00	0,1869	0,5608			
		17:30-18:00	0,5	10,80	21,60	0,2355	2,5434			
		18:00-18:30	0,5	1,20	2,40	0,1522	0,1826			
		18:30-19:00	0,5	1,40	2,80	0,1580	0,2213			
		19:00-19:30	0,5	1,00	2,00	0,1453	0,1453			
		19:30-20:00	0,5	0,60	1,20	0,1259	0,0755			
		20:00-20:30	0,5	0,20	0,40	0,0843	0,0169			
		24/2/2009	14:15-14:30	0,25	0,20	0,80	0,1105	0,0221		
			03:15-03:30	0,25	0,80	3,20	0,1631	0,1305		
			03:30-04:00	0,5	4,00	8,00	0,1978	0,7914		
			04:00-04:30	0,5	4,20	8,40	0,1997	0,8387		
			04:30-05:00	0,5	1,00	2,00	0,1453	0,1453		
26/2/2009						5,8189	21,6000	125,6891		
	15/3/2009	17:00-17:15	0,25	0,30	1,20	0,1259	0,0378			
		18:10-18:40	0,5	0,20	0,40	0,0843	0,0169			
		19:30-20:00	0,5	4,00	8,00	0,1978	0,7914			
		20:00-20:30	0,5	14,00	28,00	0,2453	3,4347			
		20:30-21:00	0,5	18,00	36,00	0,2549	4,5876			
		21:00-21:30	0,5	8,40	16,80	0,2260	1,8981			
		17/3/2009						10,7664	36,0000	387,5911
	23/3/2009	12:20-12:50	0,5	0,60	1,20	0,1259	0,0755			
		18:00-18:30	0,5	0,20	0,40	0,0843	0,0169			
	24/3/2009	13:20-13:50	0,5	0,80	1,60	0,1368	0,1095			
		15:00-15:30	0,5	0,20	0,40	0,0843	0,0169			
		15:30-16:00	0,5	6,60	13,20	0,2168	1,4311			
		16:00-16:30	0,5	15,40	30,80	0,2490	3,8338			
25/3/2009						5,4836	30,8000	168,8948		
	25/3/2009	13:10-13:40	0,5	5,20	10,40	0,2078	1,0805			
		15:10-15:50	0,5	2,00	4,00	0,1716	0,3431			
		15:50-16:20	0,5	4,20	8,40	0,1997	0,8387			
		16:20-16:50	0,5	0,40	0,80	0,1105	0,0442			
		19:10-19:40	0,5	0,60	1,20	0,1259	0,0755			
26/3/2009						2,3821	10,4000	24,7735		
	26/3/2009	17:10-17:40	0,5	2,20	4,40	0,1752	0,3854			
		17:40-18:10	0,5	3,80	7,60	0,1959	0,7444			
	27/3/2009	19:30-20:00	0,5	0,10	0,20	0,0580	0,0058			
		15:40-16:10	0,5	0,80	1,60	0,1368	0,1095			
	28/3/2009	06:40-7:10	0,5	3,00	6,00	0,1869	0,5608			
		07:10-07:40	0,5	4,40	8,80	0,2015	0,8864			
		10:00-10:30	0,5	1,00	2,00	0,1453	0,1453			
		10:30-11:00	0,5	4,80	9,60	0,2048	0,9828			
		11:00-11:30	0,5	0,30	0,60	0,0996	0,0299			
		11:30-12:00	0,5	5,00	10,00	0,2063	1,0315			
		12:00-12:30	0,5	0,20	0,40	0,0843	0,0169			
		12:30-13:00	0,5	0,40	0,80	0,1105	0,0442			
		13:00-13:30	0,5	2,80	5,60	0,1843	0,5161			
		13:30-14:00	0,5	2,60	5,20	0,1815	0,4719			
		14:00-14:30	0,5	4,20	8,40	0,1997	0,8387			
		14:30-15:00	0,5	0,10	0,20	0,0580	0,0058			
		15:30-16:00	0,5	0,60	1,20	0,1259	0,0755			
		16:00-16:30	0,5	10,60	21,20	0,2348	2,4888			
		16:30-17:00	0,5	6,80	13,60	0,2180	1,4821			
		17:00-17:30	0,5	6,60	13,20	0,2168	1,4311			
		17:30-18:00	0,5	0,60	1,20	0,1259	0,0755			
		18:00-18:30	0,5	0,30	0,60	0,0996	0,0299			
			29/3/2009	04:00-04:30	0,5	0,70	1,40	0,1318	0,0922	
04:30-05:00	0,5			0,70	1,40	0,1318	0,0922			
05:40-06:10	0,5			0,60	1,20	0,1259	0,0755			
18:30-19:00	0,5			6,00	12,00	0,2132	1,2793			
19:00-19:30	0,5			0,40	0,80	0,1105	0,0442			
19:30-20:00	0,5			0,90	1,80	0,1413	0,1272			
20:00-20:30	0,5			2,40	4,80	0,1785	0,4283			
20:30-21:00	0,5	1,40	2,80	0,1580	0,2213					
01:00-01:30	0,8	2,40	3,00	0,1607	0,3856					
30/3/2009						15,1040	21,2000	320,2048		

ANEXO B

VALORES DO COEFICIENTE DE ERODIBILIDADE DO SOLO (K) ASSOCIADOS À TEXTURA E AO CONTEÚDO DE MATÉRIA ORGÂNICA

TEXTURA DO SOLO	Teor de Matéria Orgânica (%)		
	< 0,5	0,5-2,0	> 2,0
Areia	0,007	0,004	0,003
Areia fina	0,0021	0,018	0,013
Areia muito fina	0,055	0,047	0,037
Areia franca	0,016	0,013	0,011
Areia fina franca	0,032	0,026	0,021
Areia muito fina franca	0,058	0,050	0,040
Franco arenoso	0,036	0,032	0,025
Franco arenoso fino	0,046	0,040	0,032
Franco arenoso muito fino	0,062	0,054	0,043
Franco	0,050	0,045	0,038
Franco siltoso	0,063	0,055	0,043
Silte	0,079	0,068	0,055
Franco-argilo-arenosa	0,036	0,033	0,028
Franco-argilosa	0,037	0,033	0,028
Franco-argilo-siltosa	0,049	0,042	0,034
Argilo-arenosa	0,018	0,017	0,016
Argilo-siltosa	0,033	0,030	0,025
Argila	0,017	0,038	-----

Fonte: Kirby & Morgan (1980)