

FLÁVIO PEREIRA DA MOTA SILVEIRA

**EROSÃO EM ENTRESSULCOS E PARÂMETROS DE RUGOSIDADE VEGETAL EM
ÁREA DE PASTAGEM**

RECIFE – PE

2013

FLÁVIO PEREIRA DA MOTA SILVEIRA

**EROSÃO EM ENTRESSULCOS E PARÂMETROS DE RUGOSIDADE
VEGETAL EM ÁREA DE PASTAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo

RECIFE – PE

2013

FLÁVIO PEREIRA DA MOTA SILVEIRA

**EROSÃO EM ENTRESSULCOS E PARÂMETROS DE RUGOSIDADE
VEGETAL EM ÁREA DE PASTAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo

Orientador: Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice

Co-Orientador: Prof. Dr. Ivandro de França da Silva

RECIFE – PE

2013

Ficha catalográfica

S587e Silveira, Flávio Pereira da Mota
Erosão em entressulcos e parâmetros de rugosidade vegetal em
área de pastagem / Flávio Pereira da Mota Silveira. – Recife, 2013.
48 f. : il.

Orientador: José Ramon Barros Cantalice.
Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade
Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Agronomia,
Recife, 2013.
Referências.

1. escoamento superficial 2. *Brachiaria decumbens* 3. Chuva
simulada 4. Rugosidade hidráulica 5. Taxas de erosão I. Cantalice,
José Ramon Barros, orientador II. Título

CDD 631.4

FLÁVIO PEREIRA DA MOTA SILVEIRA

**EROSÃO EM ENTRESSULCOS E PARÂMETROS DE RUGOSIDADE
VEGETAL EM ÁREA DE PASTAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo

Dissertação defendida e aprovada em 21 de fevereiro de 2013, pela banca examinadora:

ORIENTADOR:

**Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice
DEPA/SOLOS/UFRPE**

EXAMINADORES:

**Prof. Dr. Flávio Pereira de Oliveira
DSER/CCA/UFPB**

**Prof^a. Dr^a Izabel Cristina de Luna Galindo
DEPA/SOLOS/UFRPE**

**Prof. Dr. Bradford Wilcox
Texas A & M University**

Campeão Vencedor
Jamily

*Acredite é hora de vencer
essa força vem de dentro de você
Você pode até tocar o céu se crer
Acredite que nenhum de nós
já nasceu com jeito pra super herói
nossos sonhos a gente é quem constrói
é vencendo os limites escalando as fortalezas
conquistando o impossível pela fé*

*Campeão vencedor Deus da asas faz teu vôo
Campeão vencedor essa fé que te faz imbatível
te mostra o teu valor...
Acredite que nenhum de nós
já nasceu com jeito pra super herói
nossos sonhos a gente é quem constrói
é vencendo os limites escalando as fortalezas
conquistando o impossível pela fé*

*Campeão vencedor Deus da asas faz teu vôo
Campeão vencedor essa fé que te faz imbatível
te mostra o teu valor...
tantos recordes você pode quebrar
as barreiras você pode ultrapassar
e vencer*

Vida de viajante
Luiz Gonzaga e Hervê Cordovil

*Minha vida é andar
Por esse país
Pra ver se um dia
Descanso feliz
Guardando as recordações
Das terras por onde passei
Andando pelos sertões
E dos amigos que lá deixei.*

*Chuva e sol
Poeira e carvão
Longe de casa
Sigo o roteiro
Mais uma estação
E a saudade no coração*

*Minha vida é andar...
Mar e terra
Inverno e verão
Mostra o sorriso
Mostra a alegria
Mas eu mesmo não
E a alegria no coração*

Dedico a Deus por ser tão maravilhoso em minha vida.

Dedico com todo amor, carinho, respeito, satisfação e gratidão àqueles que sempre estiveram ao meu lado e sempre acreditarem em mim, que um dia eu poderia conquistar mais essa vitória. Dedico à minha mãe, Maria de Fátima, ao meu irmão, Hélio, e a minha madrinha, Rita.

*Dedico de forma especial à maior benção que Deus colocou em minha vida, o anjo que Ele me deu de presente, minha maior alegria, felicidade, razão para viver e fonte inspiradora de tudo que faço e farei até o meu fim, o meu filho, meu anjo Lucas.
Papai te ama muito, filho!!!*

Dedico a Carolina Bassetto Benato como forma de expressar a gratidão dada nos momentos em que mais precisei de seu apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais essa oportunidade que Ele me proporcionou, mais essa porta aberta no meu caminho. E mesmo com as dificuldades que enfrentei, o Senhor nunca me abandonou, deu-me forças e ajudou-me a concluir esse projeto.

À minha mãe Maria de Fátima, meu irmão Hélio, minha tia Rita, meu tio Nêgo e tia Solange, tia Têê e a todos os meus familiares que de alguma forma ou outra apoiaram-me nessa caminhada.

Agradeço ao apoio incondicional de Carolina Bassetto Benato que esteve ao meu lado, prestando toda atenção e ajuda, sobretudo na reta final do mestrado.

Aos meus amigos de longa data: Bonaldo, Fábio, Cláudio, Pedro Ivo, João Vitor, Michael, David, Anderson, Gilberto, pela amizade, carinho e consideração.

Aos irmãos que fiz em Areia e que, com certeza, torceram por mim: Stênio Dantas, Tiago Azeredo, José Guimarães, Afonso Campos, Demetrius Silva, Nilson Érito, Júlio César, Flávio Oliveira, Régis Santos, Ramon Costa e Rafael Paiva. Agradeço especialmente a Lamartine, incentivador das minhas conquistas profissionais durante a graduação e que orientou-me a inscrever na seleção do mestrado da UFRPE. E a Remy, um irmão que acompanhou-me e ajudou-me muito durante a graduação e mais uma vez me prestou grande ajuda.

Aos colegas de turma pela amizade, respeito, pelos momentos difíceis que passamos juntos, pelas noites em claro, pelo carinho e pelos bons momentos proporcionados durante esse curso: Igor Tenório, Aníbia Vicente, Diego Melo, Yuri Jacques, Ygor Jacques, Camila Lapenda, Maykon Leite, Janielly Lemos, Elaine Almeida, Gerson Moreira, Esmeralda Lopes, Monaliza Andrade e Marcos Massutti. Em especial a Igor Tenório, Aníbia Vicente e Diego Melo, grandes amigos que Deus colocou no meu caminho.

Ao grupo de Manejo e Conservação do Solo, Yuri Jacques, Douglas Monteiro, Cicero Gomes, Leidivam Pereira, Michelangelo de Oliveira, João Victor, Wagner Luis, Vitor Piscoya. Aos responsáveis por esse trabalho, Douglas, Yuri, Cicero, Leidivam. Principalmente Douglas e Yuri por toda dedicação e atenção que tiveram para comigo, tanto empenho que as vezes

parecia que o trabalho era deles. Muito obrigado mesmo. Sou profundamente grato pelo empenho desses dois.

Ao Prof. José Ramon Barros Cantalice pela oportunidade e orientação, mas, sobretudo, pela paciência em esclarecer minhas dúvidas mesmo à distância e pela compreensão de minha ausência, em alguns momentos, em função da minha paternidade. A ele, minha enorme gratidão.

Ao Prof. Ivandro de França da Silva pela disponibilidade em me ajudar no trabalho de campo.

Ao Sr. Getúlio Fidélis de Araújo por dispor de sua propriedade para realização do experimento.

Aos funcionários do PPGCS: Dona Socorro e Seu Josué.

Ao PPGCS pela oportunidade de realizar esse curso de mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Erosão em entressulcos.....	3
2.2. Estudos atuais com erosão em entressulcos	5
2.3. Hidráulica do escoamento na erosão em entressulcos.....	8
2.4. Rugosidade vegetal criada pela vegetação emersa e/ou submersa ao escoamento superficial	10
2.5. Efeito da declividade na erosão hídrica do solo	12
2.6. Erosão em pastagens	14
2.7. Degradação de pastagem no brejo paraibano	15
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1. Caracterização da área experimental	17
3.2. Delineamento experimental	19
3.3. Avaliação da erosão em entressulcos.....	19
3.4 Características da chuva simulada	20
3.5. Avaliação das características hidráulicas.....	21
3.6. Avaliação dos parâmetros hidráulicos originados a partir da vegetação ...	23
3.7. Avaliação das taxas de erosão	24
3.8. Avaliação do coeficiente de escoamento superficial e da porcentagem de cobertura do solo pelo método fotográfico	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1. Características hidráulicas do escoamento em entressulcos.....	28
4.2. Taxas de erosão em entressulcos	31
4.3. Rugosidade vegetal gerada pela pastagem emersa ao escoamento superficial.....	37
5. CONCLUSÃO	41
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização geográfica da área experimental no município de Areia, no Estado da Paraíba.....	17
Figura 2. Fotografia retirada de satélite da propriedade em que foi realizada o estudo (A); Área de realização dos testes de chuva simulada (B).....	18
Figura 3. Esquema ilustrativo da montagem das parcelas experimentais. Delimitação da área (A). Abertura do espaço para colocação da chapa de alumínio (B). Chapa de alumínio cravada ao solo com a calha coletora na parte inferior da parcela (C).	20
Figura 4. Aplicação da chuva simulada: Pluviômetros colocados aleatoriamente ao lado da parcela (A); Vista frontal do simulador de chuva em operação (B).....	21
Figura 5. Esquema de classificação dos regimes de escoamento gerados durante as simulações de chuva. Fonte: Bezerra, 2004.....	23
Figura 6. Moldura colocada sobre a vegetação em área representativa da parcela experimental.....	26
Figura 7. Quadro-padrão utilizado para determinar a porcentagem de cobertura do solo com a projeção fotográfica sobre o mesmo (Bezerra & Cantalice 2006).....	26
Figura 8. Descarga líquida observada em função do tempo de aplicação da chuva simulada nas declividades de 15%, 25%, 35% e 45%.....	29
Figura 9. Taxa de infiltração em função do tempo de aplicação da chuva simulada nas declividades de 15%, 25%, 35% e 45%.....	31
Figura 10. Coeficiente de escoamento em função do tempo de aplicação da chuva simulada nas declividades de 15%, 25%, 35% e 45%.....	34
Figura 11. Perda de solo na erosão em entressulcos em função do tempo de aplicação da chuva simulada nas declividades de 15%, 25%, 35% e 45%.....	37
Figura 12. Coeficientes de arraste vegetal da <i>Brachiaria decumbens</i> em função do número de Reynolds da planta obtidos a partir do escoamento superficial sobre a <i>Brachiaria decumbens</i> emersa nas diferentes condições de declive no município de Areia – PB.....	39
Figura 13: Tensões de arraste vegetal em função da altura da lâmina de escoamento originadas a partir do escoamento superficial sobre a	

<i>Brachiaria decumbens</i> emersa nas diferentes condições de declive no município de Areia – PB.....	40
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização química amostrada na profundidade de 0 – 20 cm na área de pastagem.	16
Tabela 2: Densidade de partículas (D _p), Densidade de solo (D _s), Porosidade total (Pt) e Análise granulométrica da área de pastagem no município de Areia – PB.	16
Tabela 3: Variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos gerados por chuva simulada em diferentes declividades no município de Areia-PB..	25
Tabela 4. Umidade Inicial amostrado na profundidade de 0 – 20cm nas diferentes declividades estudadas.....	28
Tabela 5. Taxas de erosão em entressulcos, Coeficiente de escoamento superficial e Taxa de cobertura do solo de um Argissolo sob pastagem em diferentes declividades no município de Areia – PB.....	31
Tabela 6. Densidade de partículas (D _p), Densidade do solo (D _s), Porosidade total (Pt), Análise Granulométrica e Classificação Textural do solo das parcelas experimentais em diferentes declives em área de pastagem degradada no município de Areia – PB.....	32
Tabela 7. Algumas características morfológicas e análise granulométrica de dois Argissolos descritos por Souza et al. (2010) em Serra Talhada – PE e, Maia & Ribeiro (2004) de Coruripe-AL.....	33
Tabela 8: Parâmetros médios de rugosidade vegetal originados a partir do escoamento superficial sobre <i>Brachiaria decumbens</i> emersa em diferentes condições de declive no município de Areia – PB.....	35

SILVEIRA, Flávio Pereira da Mota. MSc. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Fevereiro de 2013. EROSÃO EM ENTRESSULCOS E PARÂMETROS DE RUGOSIDADE VEGETAL EM ÁREA DE PASTAGEM. Orientador: Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice; Co-orientador: Prof. Dr. Ivandro de França da Silva.

RESUMO

A microrregião do Brejo Paraibano nas últimas décadas vem sofrendo um processo de substituição de sua cobertura nativa por culturas agrícolas, sobretudo por pastagens para exploração de pecuária extensiva, o que vem favorecendo a ocorrência de degradação do solo na forma de erosão hídrica. Diante desse contexto, este estudo teve como proposta quantificar as taxas de erosão em entressulcos sob chuva simulada e avaliar os parâmetros da rugosidade vegetal emersa ao escoamento em área de pastagem em relevo movimentado. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado nas condições de declive: 15%, 25%, 35% e 45%, em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob pastagem, em 5 repetições, totalizando 20 parcelas experimentais. A velocidade média do escoamento e as taxas de infiltração na pastagem variaram significativamente com a elevação do declive contribuindo para elevação das taxas de erosão até o declive de 35%. Na condição de 45% de declive não ocorreram as maiores perdas de solo em virtude de ter ocorrido a remoção do horizonte A, estando o processo erosivo atuando sobre o horizonte B textural. O coeficiente de arraste vegetal da pastagem expressou elevação quando ocorreu diminuição da turbulência do escoamento entre as plantas. Com o aumento da lâmina de escoamento, houve um maior fluxo de energia entre a massa de água e a estrutura vegetal da gramínea *Brachiaria decumbens*, que se refletiram na diminuição dos valores de tensão de arraste na planta.

Palavras-chave: Escoamento superficial, *Brachiaria decumbens*, chuva simulada, rugosidade hidráulica, taxas de erosão.

SILVEIRA, Flávio Pereira da Mota. MSc. Universidade Federal Rural de Pernambuco. February 2013. Interrill erosion and roughness parameters vegetable in a pasture. Orientador: Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice; Co-orientador: Prof. Dr. Ivandro de França da Silva.

ABSTRACT

The Brazilian region known as Brejo Paraibano, in recent decades has been undergoing a process of replacing its native coverage by crops, mainly for pasture for extensive livestock farm, which has favored the occurrence of soil degradation in the form of water erosion. Given this context, this study aimed to quantify the rates of interrill erosion under simulated rainfall and evaluate the roughness parameters vegetable emerged to laminar flow in a pasture area hilly relief. The experiment was conducted in a completely randomized design with 4 treatments, 15%, 25%, 35% and 45% slope in a Ultisol under pasture, 5 replications, totaling 20 plots. The mean flow velocity and infiltration rates of pasture varied significantly with increasing slope contributing to increased erosion rates up to 35%. In the condition of 45% slope was not the greatest soil losses have occurred because of the removal of the horizon, in which the erosion process is acting on the argilic B horizon. The vegetation drag coefficient to pasture expressed elevation when there was a decrease of turbulent flow between plants. In the condition height flow increase, there was a greater energy flow between the mass of water and the plants structure of *Brachiaria decumbens* that resulted in decreasing on the force drag tension of plants.

Keywords: Surface flow, *Brachiaria decumbens*, simulated rain, hydraulic roughness, erosion rates.

1. INTRODUÇÃO

A erosão hídrica é uma ação de degradação física do solo ocorrida mediante ação da precipitação e do escoamento superficial, promovendo três processos fundamentais: desagregação, transporte e deposição das partículas do solo (Asadi et al. 2007; Silva et al. 2012). A primeira e mais importante etapa, desagregação das partículas do solo, acontece devido ao impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo desprendendo as partículas de solo da massa que as contém, e é agravada quando não há ou encontra-se em quantidade reduzida, cobertura vegetal sobre a superfície, seja cobertura viva ou restos culturais, promovendo o selamento superficial do solo, reduzindo a capacidade de infiltração, gerando o escoamento superficial. No segundo momento, tem-se o transporte das partículas desagregadas, advindos do efeito *splash*, salpicamento das partículas desagregadas quando do encontro das gotas de chuva com a massa de solo, ocorrendo em distâncias menores, e o escoamento superficial, que sucede-se quando a taxa de precipitação supera a capacidade de infiltração de água no solo, transportando as partículas a distâncias maiores, bem como, com poder de desagregação. E, finalizando o processo, tem-se a deposição das partículas desagregadas, que acontece quando a capacidade de transporte é superada pela resistência do material transportado, por meio de seu peso ou por extinção da lâmina de escoamento.

A erosão hídrica é compreendida por dois sub-processos em função do mecanismo de desagregação e transporte do solo, erosão em entressulcos e erosão em sulcos (Liu et al., 2006; Govers et al., 2007). Na erosão em entressulcos, o impacto das gotas de chuva é o mecanismo predominante no desprendimento do solo, e o fluxo laminar é o principal agente transportador deste material. Enquanto que na erosão em sulcos o fluxo superficial concentrado e turbulento é o principal agente desagregador.

A magnitude com que ocorre esse processo é comandada por uma série de fatores que agem interagindo entre si, dentre os quais: cobertura vegetal, tipo de solo, condições climáticas, topografia, práticas de manejo da terra e das culturas, e práticas conservacionistas (Romkens et al., 2001; Asadi et al., 2007). A declividade representa um fator de extrema importância nesse processo, consistindo em um dos fatores mais estudados na erosão em entressulcos.

A vegetação exerce influência no controle da erosão hídrica através da cobertura que esta proporciona, por meio de suas raízes e de seus resíduos que recobrem a superfície, além de seus próprios aspectos de composição estrutural, bem como o padrão de crescimento (Gyssels et al., 2005).

A microrregião do Brejo Paraibano, mais precisamente no município de Areia, nas últimas décadas vem sofrendo um processo de substituição de sua cobertura nativa por culturas agrícolas, sobretudo por pastagens para exploração de pecuária extensiva. Além do mais, nessa região predominam áreas de relevo ondulado a montanhoso que, aliado às práticas inadequadas de sistemas de manejo adotadas pela maioria dos produtores, resultam na degradação do solo, acarretando a ocorrência do processo de erosão que é facilmente identificado em quase todas as propriedades da região.

Diante desse contexto, este estudo teve como proposta quantificar as taxas de erosão em entressulcos sob chuva simulada na forma de desagregação e das perdas de solo, e avaliar os parâmetros da rugosidade vegetal emersa ao escoamento laminar em área de pastagem analisando-se o efeito das diferentes classes de declividade na microrregião do Brejo Paraibano. Bem como, relacionar as taxas de cobertura propiciada pela pastagem com as taxas de erosão do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Erosão em entressulcos

A erosão hídrica do solo tem início pelo processo físico denominado de erosão em entressulcos, que acontece pela combinação de dois diferentes processos: 1) a desagregação da massa do solo pelo impacto das gotas de chuva e pelo fluxo em entressulcos (Everaert, 1991; Kinnell & Cummings, 1993; Nearing, 1997; Zartl et al., 2001; Cassol et al., 2004); 2) o transporte do solo desagregado pelo escoamento em entressulcos, que parece não ter capacidade de transportar todo sedimento produzido pelo impacto das gotas de chuva (Everaert, 1991). Govers (1996) acrescenta que o escoamento superficial da erosão em entressulcos não tem capacidade de realizar incisões na superfície do solo e, Gerits et al. (1990) colocam que o escoamento superficial na erosão em entressulcos é com frequência chamado de fluxo laminar raso, que tem regime de escoamento superficial laminar, o qual é o principal mecanismo de transporte do material desprendido (Nunes, 2006). Quando se trata de erosão em entressulcos, o agente principal que provoca a desagregação das partículas da massa do solo é o impacto das gotas de chuva, impondo uma energia cinética sobre a massa do solo na forma de força de pressão e cisalhamento sendo capaz de desintegrar uma grande quantidade de partículas da massa de solo original (Cassol & Lima, 2003). Foltz et al. (2009) indicam que a erosão em entressulcos é a combinação entre dois processos distintos: o “splash” e o escoamento superficial. Sendo “splash”, a desagregação e o transporte das partículas do solo resultantes do impacto das gotas de chuva diretamente sobre a massa do solo. Esse material desagregado então é transportado pela rasa lâmina de escoamento superficial. E por fim, ocorre a deposição desse sedimento pela ação da gravidade.

A erosão em sulcos representa o segundo momento do processo de erosão hídrica do solo e caracteriza-se pela mudança na forma do escoamento, passando a se concentrar em pequenas depressões da superfície do solo denominadas sulcos de erosão (Cantalice et al., 2005). De acordo com estes autores, o escoamento superficial concentrado possui uma tensão de cisalhamento capaz de desagregar o solo. A desagregação do solo pelo fluxo superficial concentrado é o processo dominante de desprendimento das

partículas na erosão em sulcos (Meyer, 1981; Kinnell & Cummings, 1993; Braida & Cassol, 1996).

Áreas em que ocorre erosão em entressulcos atuam como se fossem fornecedoras de sedimentos para erosão em sulcos, agem como se estivessem abastecendo a erosão em sulcos com sedimentos desagregados (Nearing, 1997). A erosão em entressulcos inicia o processo erosivo, contribuindo com o aporte de sedimentos para os sulcos. Essa diferenciação nos tipos de erosão está ligada ao aumento contínuo da concentração do escoamento superficial.

Na erosão em entressulcos há uma seletividade de transporte de partículas finas do sedimento produzido predominantemente em suspensão em decorrência da incapacidade do escoamento superficial, neste tipo de erosão, transportar partículas mais grosseiras ou mesmo, pela deposição deste sedimento (Shi et al., 2012).

Para Fu et al. (2011), quando se trata de erosão em entressulcos, a declividade representa o principal efeito na desagregação e transporte de partículas de solo. Os autores justificam o enunciado baseados em três relações observadas em conclusões de diversos autores, em que todas elas seguem uma mesma orientação, de que as perdas de solo aumentam com a inclinação do declive, sendo as seguintes: as perdas de solo ocorreriam em função da percentagem do grau de declive; as perdas pelo escoamento podem ser representadas por uma função linear do seno do declive; e, as perdas pelo escoamento podem ser representadas por uma função polinomial do seno do declive.

As condições de superfície do solo, representadas pela ausência ou presença de cobertura vegetal, a rugosidade da superfície do solo e a declividade do terreno, configuram fatores que exercem forte influência no processo de erosão em entressulcos (Amorim et al., 2001). Assouline & Ben-Hur (2006) citam três fatores que estão fortemente relacionados com a erosão em entressulcos: o escoamento superficial, a intensidade de precipitação e o ângulo de inclinação da superfície que afetam diretamente os processos de desagregação e o transporte. Para Defersha et al. (2011), a intensidade de precipitação, topografia e propriedades do solo são os principais fatores que interferem na erosão em entressulcos.

A erosão em entressulcos representa a forma de erosão hídrica do solo mais prejudicial do ponto de vista agrícola, uma vez que é responsável pela

remoção da camada mais superficial do solo onde se encontram a matéria orgânica, os elementos nutrientes e os insumos agrícolas, afetando negativamente a produção das culturas, além de inferir nas condições para ocorrência dos processos microbiológicos que se refletem na fertilidade do solo (Cantalice et al., 2009).

2.2. Estudos atuais com erosão em entressulcos

Com o intuito de analisar a influência de diferentes formas de cobertura do solo em área com cana-de-açúcar, solos descoberto, resíduo em contato direto com o dossel, dossel da cana-de-açúcar e efeito somado do dossel da cultura e do resíduo em contato com a superfície do solo sob o escoamento superficial na erosão em entressulcos, Bezerra & Cantalice (2006) identificaram que o efeito conjunto do dossel com o resíduo da cultura ocasionou elevação da rugosidade hidráulica e dos volumes de interceptação vegetal, reduzindo as lâminas de escoamento e intensificando as taxas de infiltração de água no solo, conseqüentemente, refletindo nas menores taxas de desagregação do solo.

Objetivando avaliar a distribuição de tamanho de sedimentos resultado da erosão em entressulcos, em três Latossolos do Rio Grande do Sul, Latossolo Vermelho aluminoférrico, Latossolo Vermelho distroférrico e Latossolo Vermelho distrófico com diferentes classes texturais, Nunes & Cassol (2011) identificaram variação na distribuição de diâmetro dos sedimentos de acordo com a textura do solo e sedimentos com partículas e agregados com tamanho inferior aos do solo original.

Garbiate et al. (2011) realizaram um ensaio com o objetivo de avaliar a concentração de matéria orgânica e nutrientes em sedimentos e na água do escoamento superficial oriundas da erosão em entressulcos em distintos sistemas de manejo na colheita da cana-de-açúcar, cana crua e queimada, e as relações existentes com algumas propriedades físicas do solo. Os pesquisadores observaram que nos sistemas com colheita mecanizada de cana queimada, ocorreu elevação na concentração de sedimentos do escoamento, em virtude da erosão em entressulcos, da mesma forma como ocorreu aumento na concentração de matéria orgânica, fosforo, potássio, cálcio e magnésio. Também houve efeito negativo na qualidade do solo neste sistema de colheita, em função da pressão exercida pelo tráfego das máquinas.

Yan et al. (2008) desenvolveram fórmulas para avaliar as taxas de erosão em entressulcos acrescentando o índice de estabilidade de agregados nas avaliações de predição da erodibilidade do solo. As taxas de perda de solo e escoamento em entressulcos mostraram-se relacionadas com a estabilidade de agregados, demonstrando que esse atributo físico é um bom indicador da susceptibilidade do solo a erosão.

Bremenfeld et al. (2013) realizaram um ensaio com o objetivo de compreender a influência da erosão em entressulcos, encrostamento superficial e ruptura dos agregados do solo no efluxo de CO₂. O encrostamento superficial praticamente não influencia no efluxo de CO₂. Mas a erosão em entressulcos é responsável pela remoção do carbono do solo superficial que possivelmente promoverá liberação de CO₂ em pontos onde houve deposição do sedimento que o contém.

Um experimento foi realizado por Fu et al. (2011) para estudar o efeito do gradiente de declive na erosão do solo e a contribuição das perdas de solo pelo “*splash*” na erosão em entressulcos em encostas declivosas de comprimento curto. O gradiente de declive teve efeito significativo nos resultados encontrados, onde a perda total de solo e perda pelo “*splash*” no sentido descendente do declive aumentaram com o aumento da inclinação do declive, diminuindo após atingir um valor máximo. Por outro lado, as contribuições do “*splash*” no sentido ascendente e lateral do declive diminuíram com a elevação da inclinação do declive.

Liu et al. (2011) realizaram um estudo com a proposta de utilizar o Berílio - 7 (Be-7) como marcador dos sedimentos transportados na erosão em entressulcos, avaliando sua contribuição na perda total de solo. Os resultados encontrados neste experimento mostraram que as contribuições da erosão em entressulcos nos sedimentos diminuem gradualmente, enquanto a erosão em sulcos aumentou. E o Be-7 mostrou-se um marcador preciso e vantajoso nos estudos de erosão do solo.

Martin et al. (2010) avaliaram a influência da cobertura e diversidade vegetal na erosão em entressulcos, através da aplicação de chuvas simuladas. As taxas de cobertura vegetal corresponderam a 10%, 30% e 60% nas diferentes vegetações, gramíneas, dicotiledôneas herbáceas e criptógamos (musgos e/ou líquens) e a máxima interação entre esses três grupos. A porcentagem de cobertura vegetal apresentou maior efeito na erosão em

entressulcos, onde, o tratamento correspondente a 60% de cobertura obteve redução de 83% na produção de sedimentos em comparação com as parcelas sem cobertura. E nesta mesma taxa de cobertura, o tratamento onde houve a maior diversidade vegetal também ocasionou redução significativa na produção de sedimentos.

Com a proposta de avaliar o papel da cobertura vegetal na proteção do solo frente ao processo de erosão em entressulcos, Freitas et al. (2008) realizaram um estudo analisando diferentes formas de cobertura vegetal, Caatinga semi-arbustiva, feijão-guandu e batata-doce em relação ao solo descoberto através das taxas de erosão em entressulcos e dos parâmetros hidráulicos do escoamento superficial. A vegetação representada pela Caatinga semi-arbustiva e pelo feijão-guandu exibiram as maiores porcentagens de cobertura do solo, ocasionando as menores velocidades médias do escoamento superficial e influenciando na diminuição dos resultados das taxas de concentração e desagregação de sedimentos na erosão em entressulcos.

Cassol & Lima (2003) estudando a erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo (manejo sem preparo com resíduos da cultura em superfície; preparo convencional com solo desprovido de cobertura; e preparo convencional com incorporação de resíduos), comprovaram que nos sistemas de semeadura em que não há preparo do solo, ou seja, no qual os resíduos vegetais são mantidos na superfície do solo, ocorre uma redução nas perdas de água quando comparadas ao solo descoberto, mas não sendo inferiores quando comparadas nos sistemas de preparo convencional, em que há incorporação de resíduos. Porém, o sistema sem preparo do solo foi eficaz no controle da erosão, reduzindo em torno de 90% as perdas de solo em relação aos outros tratamentos, solo descoberto e preparo convencional com incorporação dos resíduos.

Oliveira et al. (2012) desenvolveram um estudo com o intuito de analisar como os diferentes sistemas de uso e manejo na cultura agrícola do fumo (solo cultivado com fumo sob preparo convencional; solo cultivado com fumo sob plantio direto; e solo sob mata nativa) exercem efeito no processo de erosão em entressulcos. O solo sob Mata Nativa precisou de uma maior quantidade de energia para desagregar e transportar as quantidades de solo obtidas nos tratamentos fumo cultivado de forma convencional e fumo cultivado no plantio

direto, praticamente o dobro de energia. Em virtude de apresentar maior estabilidade dos agregados e rugosidade superficial.

2.3. Hidráulica do escoamento na erosão em entressulcos

O escoamento superficial ocorre quando a intensidade da chuva excede a taxa de infiltração de água no solo, resultado da superação das abstrações hidrológicas como a detenção e retenção superficial, interceptação vegetal, demanda matricial do solo e evaporação (Bezerra et al., 2010). Em área declivosa, o escoamento superficial inicialmente provoca a erosão em entressulcos e, com o aumento do escoamento, ocorre a formação da erosão em sulcos, os modos básicos de erosão do solo comumente presentes em bacias hidrográficas rurais e agrícolas (Liu et al., 2006).

Ponce (1989) descreve esse escoamento superficial da seguinte maneira:

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_1 \quad (1)$$

onde: q_1 = fluxo lateral por unidade de comprimento ($m^2 s^{-1}$); Q = descarga líquida ($m^3 s^{-1}$); X = comprimento na direção do fluxo (m); A = área do contorno (m^2); t = tempo (s). O autor comenta que em uma condição hidrológica de pequena bacia, o escoamento deve ser considerado levando-se em conta uma superfície plana de comprimento L , declive S e teoricamente de largura infinita. Assim sendo, é recomendado uma análise por unidade de largura. Reformulando a equação (1) para o seguinte modo:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = i \quad (2)$$

em que: q = descarga líquida por unidade de largura ($m^2 s^{-1}$); h = altura da lâmina de escoamento (m); i = excesso de precipitação pluviométrica ($m s^{-1}$).

Como parâmetros hidráulicos do escoamento tem-se a descarga líquida por unidade de largura, a velocidade média do escoamento e viscosidade cinemática da água. Fundamentado nesses parâmetros hidráulicos pode-se determinar outros como altura da lâmina de escoamento, fator de perda de

carga e os números de Reynolds e Froude (Morgan, 1996; Govers, 1989). Simons & Senturk (1992) comentam que o número de Reynolds é a relação entre a magnitude das forças de inércia com as forças viscosas, e o número de Froude é a relação das forças de inércia com os efeitos das forças gravitacionais. Determinados esses dois parâmetros pode ser feita a classificação do regime de escoamento.

Para valores de Froude < 1 , o regime fica caracterizado como lento, sendo Froude > 1 , regime configura-se como rápido. Por outro lado, quando Reynolds < 500 , o regime caracteriza-se como laminar, entre 500 e 2500, regime transicional e, para valores maiores que 2500, o regime fica designado como turbulento. O regime de escoamento em entressulcos caracteriza-se por valores de Reynolds menores que 500, no qual o regime de escoamento superficial é do tipo laminar (Cassol et al., 2004), podendo ser classificado, de acordo com o número de Froude, como lento ou rápido.

Na erosão em entressulcos, a presença de resíduos vegetais sobre a superfície do solo é responsável por afetar as características hidráulicas do escoamento. O aumento da cobertura do solo irá reduzir a velocidade do escoamento por conta do aumento da rugosidade hidráulica, que por sua vez irá elevar a altura da lâmina de escoamento (Cassol et al., 2004; Cantalice et al., 2009).

A resistência ao escoamento em regime laminar, representada pela equação de Darcy-Weisbach, é uma variável hidráulica usualmente aplicada para avaliar a perda de carga do escoamento (Schoneboom et al., 2010). A equação de Darcy-Weisbach é descrita da seguinte maneira:

$$f = \frac{8 ghS}{Vm^2} \quad (3)$$

em que: f = fator de perda de carga (adimensional); g = aceleração da gravidade ($m s^{-2}$); h = altura da lâmina do escoamento (m); S = inclinação do declive ($m m^{-1}$); V_m = velocidade média do escoamento ($m s^{-1}$).

Classicamente, Einstein (1950) separou a resistência total do escoamento (f_t) para canais abertos em resistência de grão (f_g) e resistência de forma (f_f), onde:

$$f_t = f_g + f_f \quad (4)$$

Enquanto Yen (2002), citado por Schoneboom et al. (2010), considerou a necessidade, para fluxos vegetados, de distinguir a perda de carga (f) entre perda de superfície (f') e arrasto (f'') usando o princípio da sobreposição:

$$f = f' + f'' \quad (5)$$

2.4. Rugosidade vegetal criada pela vegetação emersa e/ou submersa ao escoamento superficial

A vegetação desempenha um papel importante no comportamento do escoamento superficial por oferecer resistência ao seu movimento em virtude de um conjunto de atributos que esta possui, elencados como: forma da planta (distribuição de ramos e folhas, aspectos estruturais do caule), dimensão, rigidez, diâmetro, altura, distribuição, densidade de plantas e o grau de submersão (Lee et al., 2004; Jordanova et al., 2006; Hui et al., 2010). Como atestam Feng-Feng et al. (2007), as características de resistência possibilitadas pela vegetação ao escoamento são influenciadas pelo tipo e densidade da vegetação, além da altura da lâmina e velocidade do escoamento. Wu et al. (1999) concordam com os outros autores quando indicam que a resistência exercida pela vegetação ao escoamento superficial varia em função do grau de submersão da vegetação em relação a lâmina de escoamento.

Quando se fala em grau de submersão, podemos encontrá-la diferenciada em duas situações: uma em que a altura da lâmina de escoamento encontra-se em um nível inferior à altura da vegetação, nesse caso, atribuindo-se a denominação de vegetação emersa, e outra situação em que essa lâmina sobrepõe por completo a vegetação, recebendo a denominação de vegetação submersa. Muitas pesquisas vêm sendo realizadas para avaliar a resistência nesses dois tipos de vegetação. Entretanto, grande parte destas pesquisas utiliza-se de material sintético para simular a vegetação, o que de certa forma limita a comparação com a vegetação natural. Silva (2011) discorre que a vegetação exerce uma atuação relevante no processo de transporte de sedimento, ressaltando a necessidade de pesquisas

voltadas para uma melhor compreensão do papel que a vegetação emersa desempenha.

Pesquisas vêm sendo direcionadas visando selecionar variáveis que busquem agrupar as forças de resistência ao fluxo, expressões ou modelagens que quantifiquem a resistência exercida pela vegetação ao fluxo. Nessa perspectiva surgiram o coeficiente de arraste vegetal e a tensão de arraste vegetal. Lee et al. (2004) e Feng-Feng et al. (2007) destacam que a avaliação dos parâmetros de resistência ao escoamento provocado pela vegetação é necessária para a modelagem de fluxo em canais, em áreas sujeitas a inundação, áreas irrigadas e áreas de encosta.

Uma das maneiras de se determinar o coeficiente de arraste vegetal é através da fórmula desenvolvida por Wu et al. (1999). Para chegar a essa modelagem, os autores realizaram um estudo em calha, considerando que o arraste provocado pela vegetação é igual à força gravitacional e o atrito gerado no fundo do canal, bem como nas laterais, é desprezível na presença de vegetação. Dessa forma, tem-se:

$$C'_D = \alpha \frac{2gS}{Vm^2} \quad (6)$$

onde: C'_D = coeficiente de arraste vegetal (m^{-1}); g = aceleração da gravidade ($m s^{-2}$); S = declividade do fundo do canal ($m m^{-1}$); Vm = velocidade média do escoamento ($m s^{-1}$) e $\alpha = \frac{h}{y}$, com h = altura da lâmina de escoamento (m) e y = espessura da vegetação (m). Na avaliação de vegetação emersa, α será igual a 1.

Lee et al. (2004) propuseram uma expressão para cálculo da tensão de arraste vegetal baseado em modelos descritos por vários autores, em que admite o fluxo através de um segmento vertical, estando as plantas em múltiplos arranjos espaciais. O atrito no fundo do canal também é desprezível nesta expressão porque seu efeito é mínimo quando comparado com as forças de resistência ao fluxo em múltiplos arranjos de plantas. Encerrando na seguinte fórmula:

$$\tau_{arraste} = \frac{C'_{da} \rho V^2}{2} \quad (7)$$

sendo: τ_{arraste} = tensão de arraste (N m^{-3}); C'_D = coeficiente de arraste vegetal (adimensional); a = área total projetada por plantas por unidade de volume ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$) considerando o comprimento das folhas da gramínea; ρ = densidade da água (kg m^{-3}) e V = velocidade média do escoamento (m s^{-1}). O valor de C'_D precisa ser multiplicado pela largura do fluxo para torna-lo adimensional e viabilizar sua aplicação na equação.

Wu et al. (1999) utilizando rugosidade artificial para avaliar a resistência que a vegetação oferece em condições de emersão e submersão da lâmina de escoamento observaram que, em condições de emersão da vegetação, para um número de Reynolds constante, o maior coeficiente de arraste vegetal ocorrerá no maior declive. Identificaram, ainda, aumento deste coeficiente com o aumento da rigidez e da densidade do material que foi utilizado para simular a vegetação.

Melo (2008) estudando parâmetros da rugosidade hidráulica criada pela *Ipomoea pes-caprae* no riacho Jacú, localizado no município de Serra Talhada-PE, com vegetação emersa e submersa, encontraram maiores valores para tensão de arraste próximo a base das plantas, região onde se concentram as ramas, folhas e a base do caule. O valor médio encontrado para as duas condições foi de $8,70 \text{ N m}^{-3}$. Porém, Melo (2008) comenta que na condição de submersão a tensão de arraste foi menor devido a uma dissipação da pressão de arraste entre a estrutura vegetal e a lamina d'água acima desta, com valor médio de $5,30 \text{ N m}^{-3}$, enquanto na condição de vegetação emersa, esse valor elevou-se a $11,67 \text{ N m}^{-3}$, uma vez que, a tensão de arraste distribui-se apenas entre as estruturas da planta, ramos, caules e folhas. O mesmo efeito foi observado para o coeficiente de arraste (C'_D), obtendo média de $1,9 \text{ m}^{-1}$ quando a vegetação encontrava-se submersa, e $5,03 \text{ m}^{-1}$ quando houve a emersão.

2.5. Efeito da declividade na erosão hídrica do solo

A erosão do solo em áreas com grau de declividade acentuado configura um processo dinâmico que abrange os processos de escoamento superficial, infiltração e erosão propriamente dita (Liu et al., 2006).

A erosão do solo é grandemente influenciada com o aumento no grau de declividade (Assouline & Ben-Hur, 2006; Armstrong et al., 2011). Uma

justificativa apresentada para esse fato é o aumento da velocidade do escoamento que aumenta a potência desse fluxo e o movimento preferencial de partículas desagregadas no sentido descendente do declive. Romkens et al. (2001) citam que a declividade exerce forte influência na rede de drenagem e na distribuição do escoamento, que, por sua vez, se relacionam diretamente com as perdas de solo.

Segundo Grosh & Jarret (1994), o impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo em encostas mais íngremes possui uma maior energia cinética em virtude do maior ângulo de contato, deste modo, possuindo uma maior capacidade de desagregação das partículas da massa de solo, além de que, o aumento no grau de declividade permite que os agregados sejam mais facilmente desintegrados e estas partículas se movimentem com maior facilidade também.

O efeito do grau de declividade é diferenciado para as duas formas de ocorrência de erosão hídrica, sendo mais pronunciado para a erosão em sulcos do que em entressulcos, em que há um maior aumento nas perdas de solo com o aumento do grau de declive (Fox & Bryan, 1999). A maior influência do grau de declividade na erosão em entressulcos parece ser exercida através do seu efeito sobre a velocidade de escoamento, que, por sua vez, aumenta a sua capacidade de transporte. Os autores encontraram boa correlação entre a perda de solo com esta variável.

Conforme Liu et al. (2006), existe um gradiente crítico de declividade para erosão do solo, onde as perdas de solo atingiriam seu valor máximo, decrescendo a partir desse ponto. Cantalice et al. (2009), avaliando as taxas de erosão em entressulcos em diferentes declives e doses de resíduos de palha de cana-de-açúcar, observaram que houve diferença significativa para as variáveis perdas de solo e taxa de desagregação do solo em relação aos declives avaliados, 5% e 15%. Na declividade de 5% houve limitação do transporte de sedimento desagregado pelo impacto das gotas de chuva, logo, redução das perdas de solo. Demonstrando o efeito deste fator no processo erosivo.

Realizando um ensaio para quantificar a erosão em área de pastagem com diferentes declives e comparando dois estados de cobertura do solo, na presença e ausência de vegetação, Inácio et al. (2007) observaram que as maiores perdas de solo ocorreram com o aumento dos valores das classes de

declividade. Para os maiores declives, 25 – 30% e 35 – 40%, as perdas de solo foram de 26,85 e 20,83 t ha⁻¹, respectivamente, na condição sem cobertura, enquanto que, na presença de cobertura, as perdas foram de 0,64 e 1,23 t ha⁻¹, respectivamente. Na classe de declive menor que 9%, ocorreram perdas de solo de 3,70 e 0,48 t ha⁻¹, nas condições sem cobertura e com cobertura, respectivamente. Os autores afirmam que há aumento das perdas de solo com o aumento da declividade.

Zartl et al. (2001) realizaram um experimento em laboratório sob chuva simulada avaliando a erosão em entressulcos em seis diferentes solos da Áustria, em diferentes intensidade de chuva (40, 60 e 80 mm h⁻¹), em três declividades (7,5, 12 e 16,5%) e condições de superfície do solo distintas (seca, úmida e superfície do solo com encrostamento). Os resultados deste experimento mostraram que a intensidade de precipitação foi o parâmetro que exerceu maior influência nas perdas de solo por erosão em entressulcos para todos os solos estudados. Juntamente com a intensidade de precipitação, o efeito do declive foi mais pronunciado para alguns solos, enquanto as condições de superfície do solo foi para outros.

2.6. Erosão em pastagens

A pastagem representa umas das principais espécies vegetais que formam uma cobertura do solo. São formadas, de maneira geral, por gramíneas, espécies amplamente adaptadas no controle da erosão pela capacidade que possuem em reduzir a intensidade do escoamento e prender as partículas de solo contra a pressão de água, constituindo pequenas rugosidades no terreno que atuarão no retardamento do movimento da água (Bertoni & Lombardi Neto, 2005).

Inácio et al. (2007) quantificando a erosão em pastagem com diferentes classes de declividade, 10 – 15, 25 – 30, 35 – 40% e comparando dois estados de cobertura do solo, na presença de cobertura proporcionada por pastagem e ausência de cobertura, observaram que a pastagem comportou-se eficientemente na proteção do solo contra a erosão em relação à ausência de cobertura. Na ausência de cobertura vegetal, as perdas de solo para as classes de declividade 10 – 15, 25 – 30 e 35 – 40% foram de 6,5, 26,85 e 20,83 t ha⁻¹, respectivamente, enquanto na área coberta com pastagem, esses valores

reduziram-se para 0,58, 0,64 e 1,23 t ha⁻¹, seguindo a mesma ordem de declive.

Bono et al. (1996) desenvolveram um estudo a fim de quantificar as perdas de solo por erosão em pastagens nativas e melhoradas em dois solos, Latossolo e Cambissolo, no município de São João del Rei – MG, no distrito de São Sebastião da Vitória. Para o experimento conduzido em Latossolo, observaram que as perdas de solo variaram de 18,0 t ha⁻¹ ano⁻¹, para a pastagem nativa, a 6,0 t ha⁻¹ ano⁻¹, para a pastagem melhorada. Já para o experimento conduzido em um Cambissolo, observaram-se os maiores valores de perda de solo, que corresponderam a 39,7 t ha⁻¹ ano⁻¹, para a pastagem nativa, a 24,4 t ha⁻¹ ano⁻¹, para a pastagem melhorada. Os autores afirmam que isso está relacionado com as piores propriedades físicas que este apresenta, como baixa macroporosidade, conseqüentemente baixa permeabilidade e encrostamento pronunciado.

Andreollo et al. (2003) avaliando as taxas de perdas de solo em uma área de solo argiloso para as culturas do café, soja e pastagem, observaram que praticamente não houve perda ou ganho de solo na área destinada ao cultivo do café, justificado pelo fato da cultura proporcionar boa cobertura e ter sido plantada em linhas perpendiculares ao declive, enquanto que, para a cultura da soja houve uma perda média de 15,80 ± 1,82 t ha⁻¹ ano⁻¹, e discorreram que isso já era esperado uma vez que o preparo do solo era convencional e permanecia muito tempo exposto à ação das chuvas e encontraram valores médios de perda de solo em pastagem, em torno de 13,90 ± 1,11 t ha⁻¹ ano⁻¹, e esse resultado está de acordo com as condições de campo, haja vista se tratar de uma pastagem degradada, com baixa cobertura do solo, que favorece o processo erosivo nesse ambiente.

2.7. Degradação de pastagem no brejo paraibano

O município de Areia, localizado na microrregião do Brejo Paraibano, por muitas décadas vem passando por um processo de degradação de suas terras decorrente da substituição da cobertura nativa por culturas de subsistência como a cana-de-açúcar, café, banana, e cana-de-açúcar novamente (Souza, 2010a). Porém, um colapso nesse sistema de produção resultou na falência do setor sucroalcooleiro da região, em que as usinas, não tendo condições de se

manterem em função das mudanças econômicas, decretaram falência (Santos, 2009). Parte dessas áreas destinadas ao cultivo da cana-de-açúcar foi mantida visando a produção artesanal da cachaça e rapadura. Mas, a maior parte destas foi substituída pela exploração agropecuária, na qual foram implantadas espécies de braquiária para formação de pastagem.

No tocante ao relevo local, predominam condições de terrenos acidentados em relevo forte ondulado a montanhoso, com declividade acentuada. Nessas condições, o uso de máquinas e implementos agrícolas era escasso, bem como, não havia aplicação de fertilizante químico, havendo um manejo inadequado da cana-de-açúcar. Com isso, a pastagem implantada encontrava-se em áreas que já possuíam potencial produtivo comprometido (Santos, 2009).

O manejo inapropriado das pastagens predomina entre a grande maioria dos produtores locais (Souza, 2010a). Manejo este que ocorre na forma de pastoreio intensivo, ausência de reposição de nutrientes, utilização de queimadas, preparo do solo morro abaixo para o plantio do pasto, ocasionando o declínio de produtividade das pastagens, favorecendo a infestação de plantas invasoras, aparecimento de áreas descobertas, formando graves impactos pelo avançado estágio de degradação e pelas perdas de solo na ocorrência de erosão em entressulcos (Santos, 2009).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado em área explorada com pastagens cultivadas, localizada no município de Areia-PB (Figura 1), situada nas coordenadas geográficas 6° 56' 33.2''S de latitude e 35° 42' 34.2''O de longitude, Sitio Rancho Monte Alegre, propriedade rural pertencente ao Sr. Getúlio Fidélis de Araújo (Figuras 1 e 2). O município está inserido na mesorregião do Agreste Paraibano e na microrregião do Brejo Paraibano com altitude de aproximadamente 620m acima do nível do mar. A topografia da região, em sua grande parte, constitui-se de terrenos acidentados em relevo forte ondulado a montanhoso, com declividade média de 33,5%.



Figura 1. Localização geográfica da área experimental no município de Areia, no Estado da Paraíba.

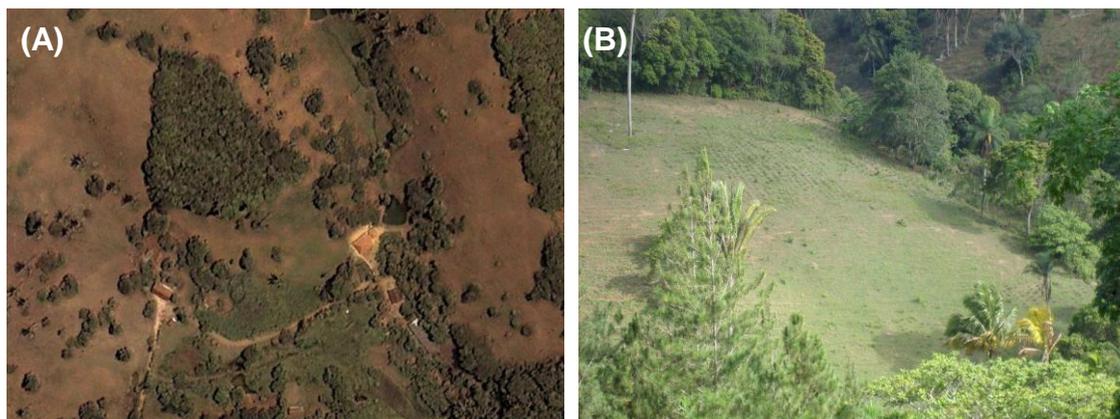


Figura 2. Fotografia retirada de satélite da propriedade em que foi realizada o estudo (A); Área de realização dos testes de chuva simulada (B).

O clima regional classificado pelo sistema internacional de Köppen é do tipo As', correspondendo a quente e úmido com chuvas de outono-inverno (Brasil, 1972), e com precipitação pluvial média anual de 1.400 mm concentradas nos meses de junho e julho. A umidade relativa do ar encontra-se em cerca de 85%, e a temperatura média anual de 26°C, com as mínimas em média de 15°C e máximas de 29°C (Paraíba, 1998). O solo local é classificado de acordo com EMBRAPA (2006), como Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico com A proeminente.

Foi coletada uma amostra de solo composta a partir de 10 amostras simples da área experimental na profundidade de 0 – 20 cm para caracterização química e física da área. As amostras foram levadas aos Laboratórios de Química e Física do solo da UFRPE, sendo postas para secar ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm de malha. As análises químicas seguiram as recomendações de Embrapa (2009) e a análise química do carbono orgânico segundo Chan et al. (2001). Enquanto as análises físicas, análise granulométrica pelo método do densímetro, densidade do solo pelo método do torrão parafinado, densidade de partículas pelo método do balão volumétrico e o cálculo da porosidade total seguiram Embrapa (1997). Os resultados encontram-se nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Foram coletadas amostras simples em cada parcela experimental na profundidade de 0 – 20 cm para análise física conforme descrição anterior.

Tabela 1. Caracterização química do solo na profundidade de 0 – 20 cm na área de pastagem.

Área	Determinações								
	pH*	P	Na ⁺	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al ³⁺	CO
		mg kg ⁻¹			-----cmol _c dm ⁻³ -----				dag kg ⁻¹
	5,1	3,60	0,04	0,21	0,50	0,40	0,45	5,75	2,03

*pH 1:2,5; CO = Carbono Orgânico

Tabela 02. Densidade de partículas (Dp), Densidade de solo (Ds), Porosidade total (Pt) e Análise granulométrica da área de pastagem degradada no município de Areia – PB.

Pastagem	Dp	Ds	Pt	Análise granulométrica		
				Areia	Silte	Argila
	kg dm ⁻³	kg dm ⁻³	cm ⁻³ cm ⁻³		g kg ⁻¹	
	2,71	1,53	0,44	553	47	400

Atualmente essa área vem sendo cultivada com pastagem de capim braquiária (*Brachiaria decumbens*).

3.2. Delineamento experimental

O estudo foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com 4 tratamentos, em 5 repetições, totalizando 20 parcelas experimentais. Os tratamentos corresponderam às diferentes condições de declividade na área da pastagem, sendo os seguintes: 15%, 25%, 35% e 45%.

3.3. Avaliação da erosão em entressulcos

A experimentação da erosão em entressulcos foi realizada em condição de campo, em área de pastagem cultivada em diferentes condições de declividade sob ação de chuva simulada.

Os tratamentos foram estabelecidos em 20 parcelas experimentais com dimensões de 1 m de largura por 2 m de comprimento, delimitadas por chapas de alumínio de 15 cm de altura cravadas no solo a uma profundidade de 8 cm com a maior dimensão no sentido do declive. Na parte inferior essas parcelas possuíam uma calha coletora para a amostragem do escoamento superficial e do sedimento desagregado e transportado (Figura 3).

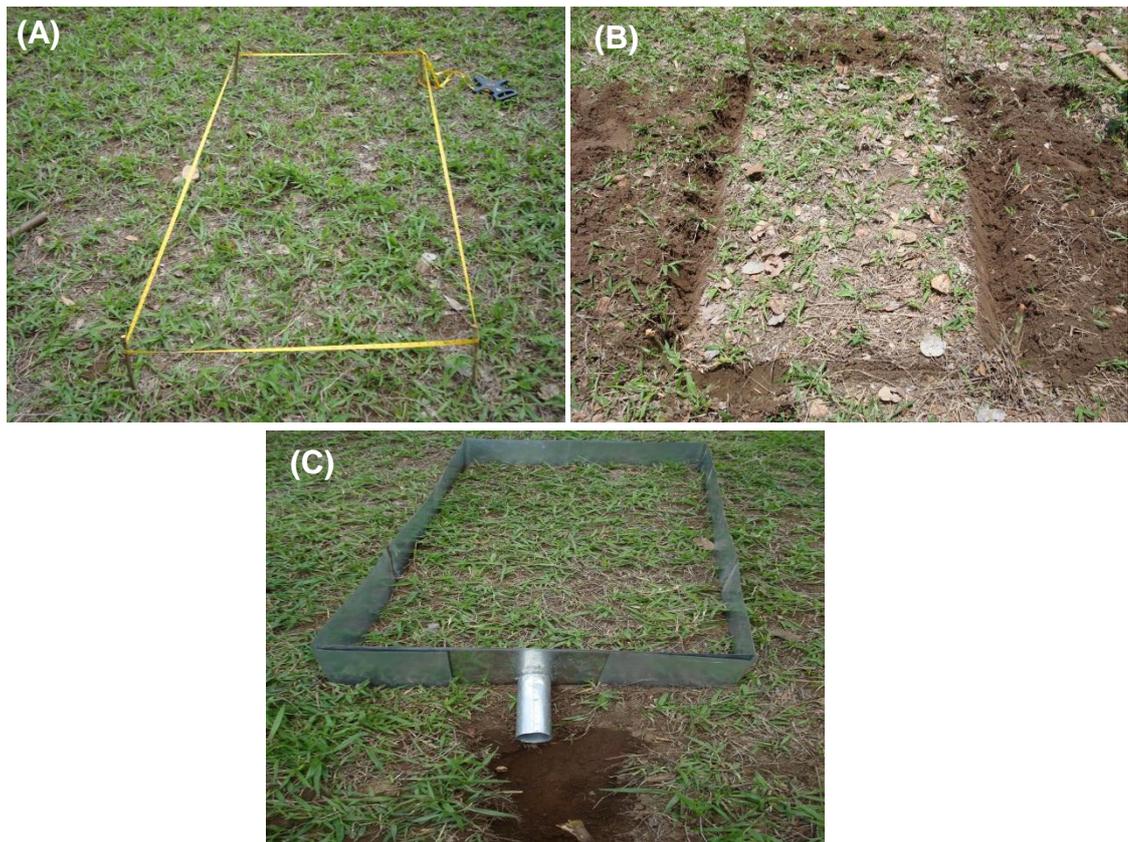


Figura 3. Esquema ilustrativo da montagem das parcelas experimentais. Delimitação da área (A). Abertura do espaço para colocação da chapa de alumínio (B). Chapa de alumínio cravada ao solo com a calha coletora na parte inferior da parcela (C).

3.4 Características da chuva simulada

As chuvas simuladas foram aplicadas utilizando-se um simulador de chuvas desenvolvido no Laboratório de Manejo e Conservação do Solo, do Departamento de Agronomia, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (Figura 4 - A). Este equipamento é composto por um bico aspersor tipo Veejet 80 -150 com diâmetro interno de $\frac{1}{2}$ polegada. O bico encontrava-se a uma altura de 3,1m acima da superfície do solo operando com uma pressão constante de 41kPa na saída da água no bico. A aplicação das chuvas simuladas ocorreu com duração de 40 minutos e intensidade de 90 mm h^{-1} . O abastecimento do equipamento se deu por meio de uma bomba submersa colocada em um reservatório de água de 500 L. Ao lado da área útil das parcelas experimentais foram colocados 10 pluviômetros ao acaso para aferição da intensidade média das chuvas simuladas (Figura 4 - B).

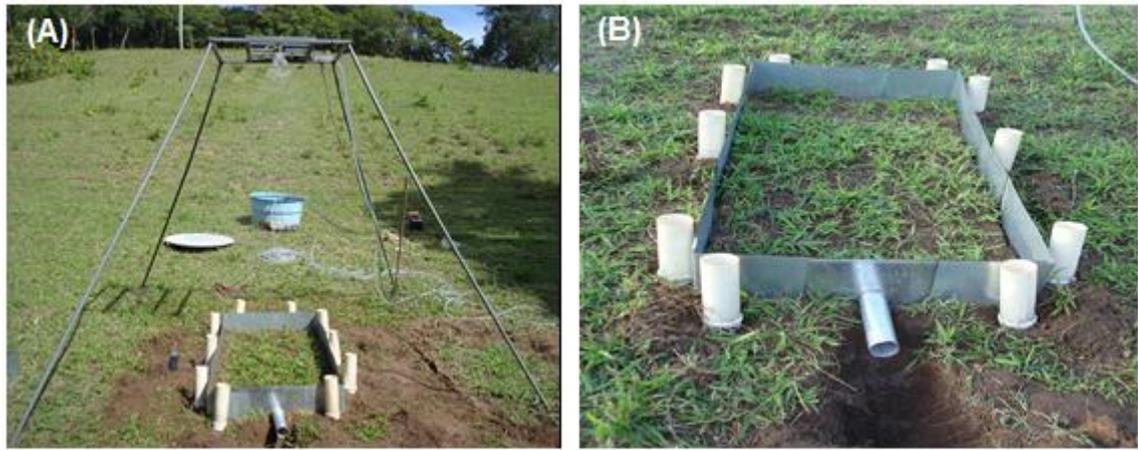


Figura 4. Aplicação da chuva simulada: Pluviômetros colocados aleatoriamente ao lado da parcela (A); Vista frontal do simulador de chuva em operação (B).

3.5. Avaliação das características hidráulicas

Antes do início dos testes de chuva simulada foram coletadas amostras de solo de cada parcela experimental para determinação da umidade do solo, pelo método gravimétrico (EMBRAPA, 1997).

A velocidade superficial (V_s) do escoamento, expressa em $m\ s^{-1}$, foi obtida pela tomada do tempo necessário para que o corante (azul de metileno) percorresse a distância entre dois pontos fixos na parcela experimental. Esta etapa foi realizada em intervalos de 5 minutos após a formação e deslocamento da lâmina de escoamento. Os valores de velocidade superficial do escoamento obtidos foram multiplicados por um fator de correção ($\alpha = 2/3$), para obtenção da velocidade média do escoamento (V_m), em $m\ s^{-1}$, conforme (Cassol et al., 2004; Bezerra & Cantalice 2006; Freitas et al., 2008; Farenhorst & Bryan, 1995 e Katz et al., 1995).

A descarga líquida (q) foi determinada por meio de coleta da enxurrada em potes plásticos, colocados na extremidade inferior da calha coletora, sendo expressa em $m^2\ s^{-1}$. As coletas foram efetuadas a cada 5 minutos, com duração de 30 segundos por amostragem.

A altura da lâmina do escoamento (h) foi determinada através da equação derivada por Woolhiser & Liggett (1967) e Singh (1983) para solução cinemática das equações de Saint-Venant:

$$h = \frac{q}{V_m} \quad (8)$$

em que, h = altura da lâmina de escoamento (m); q = descarga líquida por unidade de largura ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), e V_m = velocidade média do escoamento (m s^{-1}).

O número de Reynolds (Re) foi determinado pela seguinte relação segundo Simons & Senturk (1992):

$$Re = \frac{V_m h}{\nu} \quad (9)$$

em que, Re = número de Reynolds, adimensional; V_m = velocidade média do escoamento (m s^{-1}); h = altura da lâmina de escoamento (m); e ν = viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). A viscosidade cinemática da água foi determinada através da seguinte equação, conforme sugere Julien (1995), com a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) sendo medida por um termômetro em cada ensaio:

$$\nu = [1,14 - 0,031 (T - 15) + 0,00068 (T - 15)^2] \times 10^{-6} \quad (10)$$

em que, ν = viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) e T = temperatura da água em $^{\circ}\text{C}$.

O número de Froude (Fr) foi obtido pela equação conforme Simons & Senturk (1992):

$$Fr = \frac{V_m}{\sqrt{gh}} \quad (11)$$

em que, Fr = número de Froude, adimensional; V_m = velocidade média do escoamento (m s^{-1}); g = aceleração da gravidade (m s^{-2}) e h = altura da lâmina de escoamento (m). De posse dos números de Reynolds e Froude, foram obtidos os regimes de escoamento gerados a partir das chuvas simuladas de acordo com o esquema da Figura 5.

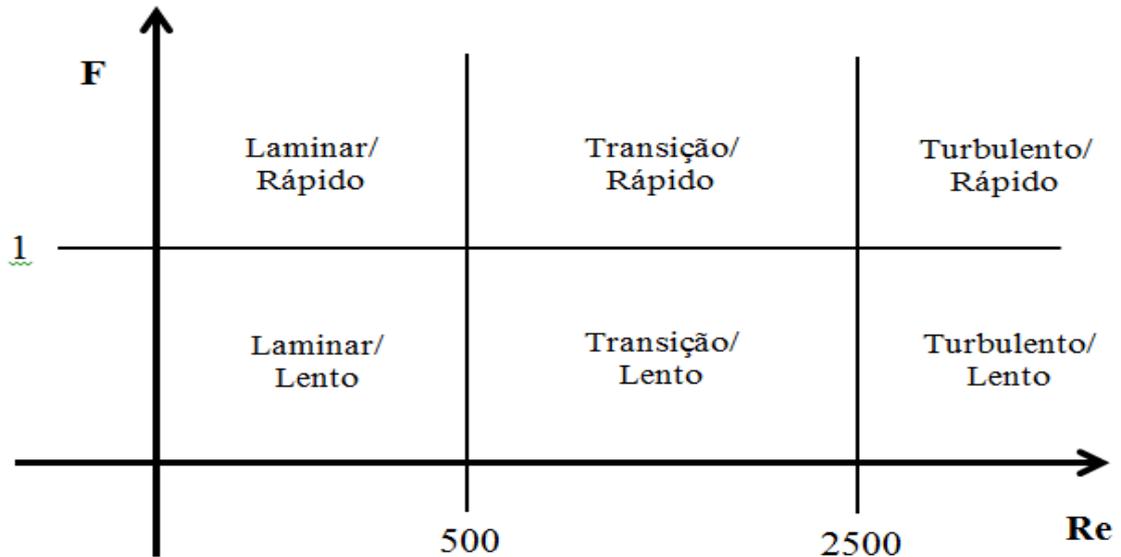


Figura 5. Esquema de classificação dos regimes de escoamento gerados durante as simulações de chuva. Fonte: Bezerra, 2004.

A resistência ao escoamento foi determinada pelo fator de perda de carga de Darcy-Weisbach, conforme a equação proposta por Yang (1996):

$$f = \frac{8 ghS}{Vm^2} \quad (3)$$

em que: f = fator de perda de carga (adimensional); g = aceleração da gravidade ($m s^{-2}$); h = altura da lâmina do escoamento (m); S = inclinação do declive ($m m^{-1}$); Vm = velocidade média do escoamento ($m s^{-1}$).

As taxas de infiltração de água no solo foram obtidas pelo método do Infiltrômetro Aspensor, no qual, as taxas de infiltração foram determinadas pelas diferenças entre as taxas de precipitação e as de escoamento superficial observados nos tratamentos experimentais. Para avaliação das taxas de precipitação pluviométrica, ou seja, da intensidade da chuva, foram colocados 10 (dez) pluviômetros ao lado das parcelas experimentais e de forma casualizada. O conteúdo de cada pluviômetro foi medido em uma proveta.

3.6. Avaliação dos parâmetros hidráulicos originados a partir da vegetação

A tensão de arraste vegetal foi determinada pela equação proposta por Lee et al. (2004) expressa da seguinte forma:

$$\tau_{arraste} = \frac{C'_D a \rho V^2}{2} \quad (7)$$

em que: $\tau_{arraste}$ = tensão de arraste (N m^{-3}); C'_D = coeficiente de arraste vegetal (adimensional); a = área total projetada por plantas por unidade de volume ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$) considerando o comprimento das folhas da gramínea; ρ = densidade da água (kg m^{-3}) e V = velocidade média do escoamento (m s^{-1}). O coeficiente de arraste vegetal foi calculado através da fórmula proposta por Wu et al. (1999):

$$C'_D = \alpha \frac{2gS}{Vm^2} \quad (6)$$

em que: C'_D = coeficiente de arraste vegetal (m^{-1}); g = aceleração da gravidade (m s^{-2}); S = declividade do fundo do canal (m m^{-1}); Vm = velocidade média do escoamento (m s^{-1}) e $\alpha = \frac{h}{y}$, com h = altura da lâmina de escoamento (m) e y = espessura da vegetação (m). No caso da vegetação emersa α foi igual a 1.

O número de Reynolds da planta ($\text{Re}_{\text{Planta}}$) foi determinado conforme equação proposta por Lee et al. (2004) da seguinte maneira:

$$\text{Re}_{\text{Planta}} = \frac{Vs}{\nu} \quad (15)$$

onde: $\text{Re}_{\text{Planta}}$ = número de Reynolds da planta (adimensional); V = velocidade média do escoamento (m s^{-1}); s = espaçamento entre plantas (m); ν = viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

3.7. Avaliação das taxas de erosão

A concentração de sedimentos e as taxas de perdas de solo e de desagregação foram determinadas pela pesagem do material coletado nos potes plásticos colocados na extremidade inferior da calha coletora. Após a pesagem, os potes foram levados para secagem em estufa a 65°C . Transcorrido o tempo necessário para secagem da água, os potes foram pesados novamente, desta vez, já com o solo seco. A relação entre a massa

de solo seco e a massa de mistura água-sedimento expressa a concentração de sedimentos em kg L^{-1} .

As taxas de desagregação do solo (D_i) foram obtidas conforme a expressão:

$$D_i = \frac{M_{SS}}{A \cdot D_c} \quad (16)$$

em que, D_i = taxa de desagregação do solo ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); M_{SS} = massa de solo seco desagregado (kg); A = área da parcela (m^2) e D_c = duração da coleta (s).

As perdas do solo (P_s) foram obtidas conforme a equação:

$$P_s = \frac{\sum(Q \cdot C_s \cdot t)}{A} \quad (17)$$

em que, P_s = perdas de solo (Mg m^{-2}); Q = vazão (L s^{-1}); C_s = concentração de sedimentos (kg L^{-1}); t = intervalo entre as coletas (5 minutos) e A = área da parcela (m^2).

3.8. Avaliação do coeficiente de escoamento superficial e da porcentagem de cobertura do solo pelo método fotográfico

O coeficiente de escoamento superficial (C) foi obtido através da relação entre a Taxa de escoamento superficial (T_e) e a Intensidade de precipitação (I_p), determinado em cada tratamento de acordo com a seguinte fórmula:

$$C = \frac{T_e}{I_p} \quad (18)$$

em que: C = coeficiente do escoamento superficial (adim.); T_e = taxa do escoamento superficial (mm h^{-1}); I_p = intensidade de precipitação (mm h^{-1}). A Taxa de escoamento superficial foi obtida a partir da conversão do volume coletado do escoamento em mililitro para milímetro por hora.

A porcentagem de cobertura do solo exercida pela vegetação, no caso, a gramínea *Brachiaria decumbens*, foi determinada pelo método proposto por Mannering e descrito por Bezerra et al. (2002). Esta metodologia consiste na utilização de projeção fotográfica de uma moldura com dimensões de 76 cm de

largura por 51 cm de comprimento sobre a cobertura vegetal da área (Figura 6).



Figura 6. Moldura colocada sobre a vegetação em área representativa da parcela experimental para determinação da porcentagem de cobertura vegetal.

Com uma câmara digital foram tiradas fotografias enquadrando-se a moldura no visor da câmara, as quais a posteriormente foram projetadas por meio de um computador e um Data Show em um quadro padrão (Figura 7) fixado numa tela. A porcentagem total de cobertura vegetal foi determinada a partir do somatório da contagem das intersecções entre as linhas retas horizontais e verticais com os pontos de cobertura vegetal da superfície projetados. Como existem 50 pontos de intersecção no quadro padrão, cada ponto representa 2% de cobertura.

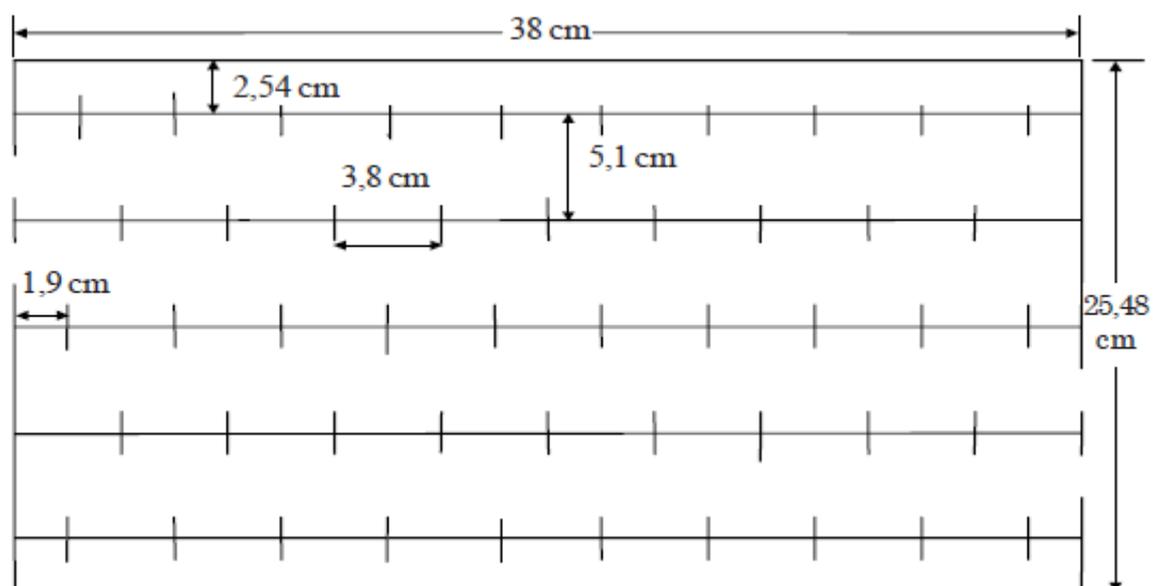


Figura 7. Quadro-padrão utilizado para determinar a porcentagem de cobertura do solo com a projeção fotográfica sobre o mesmo (Bezerra & Cantalice, 2006).

3.9 Análise estatística

As variáveis de erosão hídrica em entressulcos encontradas neste experimento foram submetidas à análise de regressão e análise de variância em delineamento experimental inteiramente casualizado. Também foi realizada a comparação de médias pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade. Para tal, foi utilizado o programa estatístico SAS- Statistical Analytical System (SAS, 2003).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Características hidráulicas do escoamento em entressulcos

Os valores referentes às variáveis hidráulicas do escoamento superficial, descarga líquida por unidade de largura (q), velocidade média do escoamento superficial (V_m), altura da lâmina do escoamento (h), número de Reynolds (Re), número de Froude (Fr), coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach (f), viscosidade cinemática da água (ν), Intensidade de precipitação (I_p) e Taxa de infiltração de água no solo (T_i), obtidos pela aplicação de chuva simulada na área de pastagem do Brejo Paraibano encontram-se na Tabela 3.

Em relação à descarga líquida (q) verifica-se que houve diferença estatística significativa para o declive de 35 em relação aos tratamentos, 15 e 25%, que apresentaram os menores valores.

Tabela 3. Variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos geradas por chuvas simuladas em diferentes declividades no município de Areia-PB

Variável hidráulica	Declividade			
	15%	25%	35%	45%
q ($m^2 s^{-1}$)	$0,81 \times 10^{-5}b$	$0,67 \times 10^{-5} b$	$2,14 \times 10^{-5}a$	$1,39 \times 10^{-5}ab$
V_m ($m s^{-1}$)	0,0232 b	0,0351 ab	0,0401 a	0,0392 a
h (m)	$4,35 \times 10^{-4} a$	$1,98 \times 10^{-4} a$	$5,15 \times 10^{-4} a$	$3,49 \times 10^{-4} a$
Re (Adm.)	9,50 b	7,92 b	25,11 a	16,28ab
Fr (Adm.)	0,43 a	0,84 a	0,58 a	0,71 a
$\log f$ (Adm.)	0,7396 a	0,6042 a	0,9528 a	0,8971 a
ν ($m^2 s^{-1}$)	$8,52 \times 10^{-7}$	$8,52 \times 10^{-7}$	$8,52 \times 10^{-7}$	$8,52 \times 10^{-7}$
I_p ($mm h^{-1}$)	96,80 a	94,52 a	91,95 a	90,36 a
T_i ($mm h^{-1}$)	82,232 a	82,379 a	53,447 b	65,398 ab

Médias seguidas de mesma letra na linha, não diferem significativamente entre si pelo Teste Tukey a 10% de probabilidade. q : descarga líquida por unidade de largura; V_m : velocidade média do escoamento superficial; h : altura da lâmina do escoamento; Re : número de Reynolds; Fr : número de Froude; f : coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach; ν : viscosidade cinemática da água; I_p : intensidade de precipitação; T_i : taxa de infiltração de água no solo. Média de cinco repetições.

Uma análise de regressão entre a descarga líquida (q) e o tempo de aplicação das chuvas (Figura 8) foi feita por meio de quatro bons ajustes de

potência para as quatro condições de declives ensaiados. De maneira global, observa-se que no início dos testes a descarga líquida é pequena, em consequência da maior demanda de infiltração da água. Com o transcorrer do tempo, as abstrações hidrológicas são satisfeitas, inclusive a infiltração e, por consequência, ocorre elevação das taxas de descarga líquida. Aos 15 minutos de aplicação da chuva há uma tendência de estabilização para os declives 15, 25 e 45%, com exceção da condição de declive de 35 %. Nessa condição, a descarga líquida continuou aumentando, quase linearmente, o que parece estar relacionado à menor cobertura vegetal apresentada pela pastagem (Tabela 4).

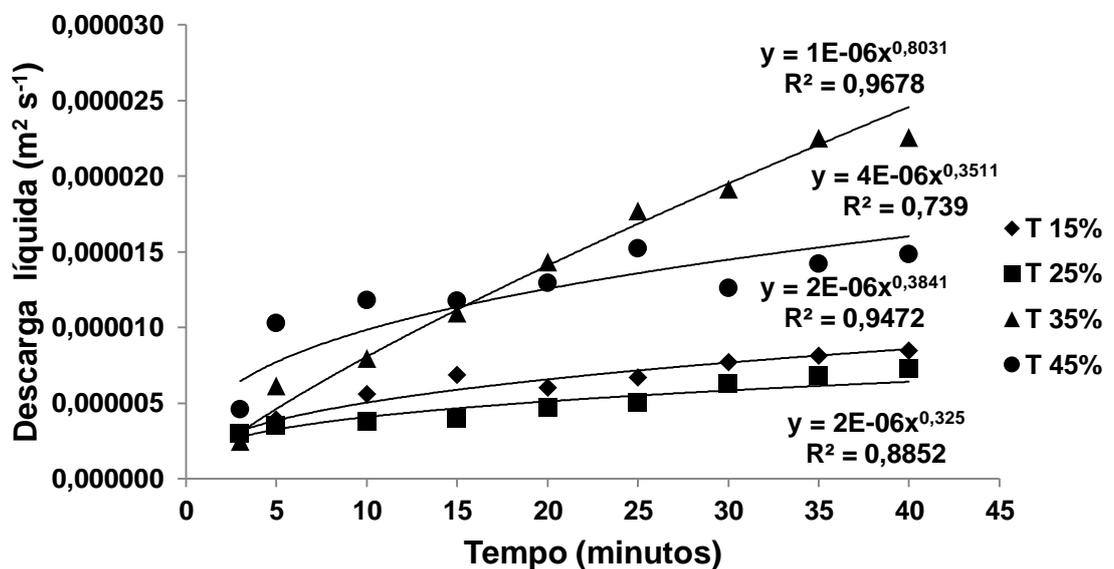


Figura 08. Descarga líquida observada em função do tempo de aplicação da chuva simulada nas declividades de 15%, 25%, 35% e 45%.

Analisando-se a velocidade média do escoamento superficial (Tabela 3), observa-se que os maiores valores, 0,0401 e 0,0392 m s⁻¹, foram obtidos nas declividades de 35 e 45%, respectivamente, ficando os menores declives, com os menores valores. O resultado mostra que essa variável sofreu influência da declividade, no qual, o aumento no grau de declive gerou aumento na velocidade de escoamento. Conforme atestam Amorim et al. (2001) e Cogo et al. (2003) quando discorrem que a velocidade do escoamento superficial aumenta na medida em que aumenta a declividade do terreno, acrescentando que, com isso, a capacidade de transporte de sedimento do escoamento superficial é função da magnitude da lâmina de escoamento.

A análise em conjunto das variáveis hidráulicas (Tabela 3) permite observar a ocorrência de regime laminar lento para todas as lâminas de escoamento gerados nos diferentes declives, de acordo com Simons & Senturk (1992), como apontado pelo número de Reynolds < 500 , variando de 7,92 a 25,11, e número de Froude < 1 , variando de 0,43 a 0,84. O regime de escoamento laminar lento, juntamente com os valores de descarga líquida na ordem de grandeza de $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e os valores da altura da lâmina de escoamento na ordem de grandeza de 10^{-4} m , indicam que houve escoamento característico da erosão em entressulcos, o mesmo observado por Savat (1977); Gerits et al. (1990); Cassol et al. (2004); Bezerra & Cantalice (2006); Bezerra & Cantalice (2009) e Cantalice et al. (2009).

Não houve diferença significativa entre os tratamentos analisados para a variável altura da lâmina de escoamento, bem como para o coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach. Embora fosse esperadas diferenças no grau de declive, as mesmas não foram suficientes para promover diferença nestes parâmetros. O que pode estar relacionado com o seguinte: a literatura cita rebaixamento da lâmina para elevação na declividade (Defersha et al., 2011 e Fox et al., 1997), no entanto, o efeito da cobertura vegetal da gramínea pode ter contrabalanceado esse efeito e, assim, não houve diferença estatística entre as alturas da lâmina de escoamento obtidas.

A taxa de infiltração de água no solo (T_i) diferenciou-se para o declive 35% em relação à 15% e 25%, o que acorda com Fox et al. (1997) ao relatar que o ângulo de inclinação afeta distintos pontos relevantes ao processo de infiltração, incluindo a capacidade de armazenamento de superfície, intensidade de precipitação e a altura da lâmina do escoamento.

A Figura 9 exibe o comportamento temporal da Taxa de Infiltração de água no solo para as diferentes declividades na forma de bons ajustes de potência. No início dos testes, em todos os tratamentos observou-se uma elevada T_i , em virtude de os solos estarem parcialmente secos, com teor de umidade muito próximo (Tabela 6). Porém, na medida em que transcorre o tempo, as tensões matriciais do solo diminuem pela absorção de água na matriz do solo, ocorrendo a formação da lâmina de escoamento, principalmente, nos declives mais acentuados de 35 e 45%. Dessa forma, por consequência ocorre a diminuição da quantidade de água infiltrada. Havendo

diminuição da quantidade de água infiltrada, conseqüentemente haverá um maior escoamento superficial (Tabela 4 e Figura 10).

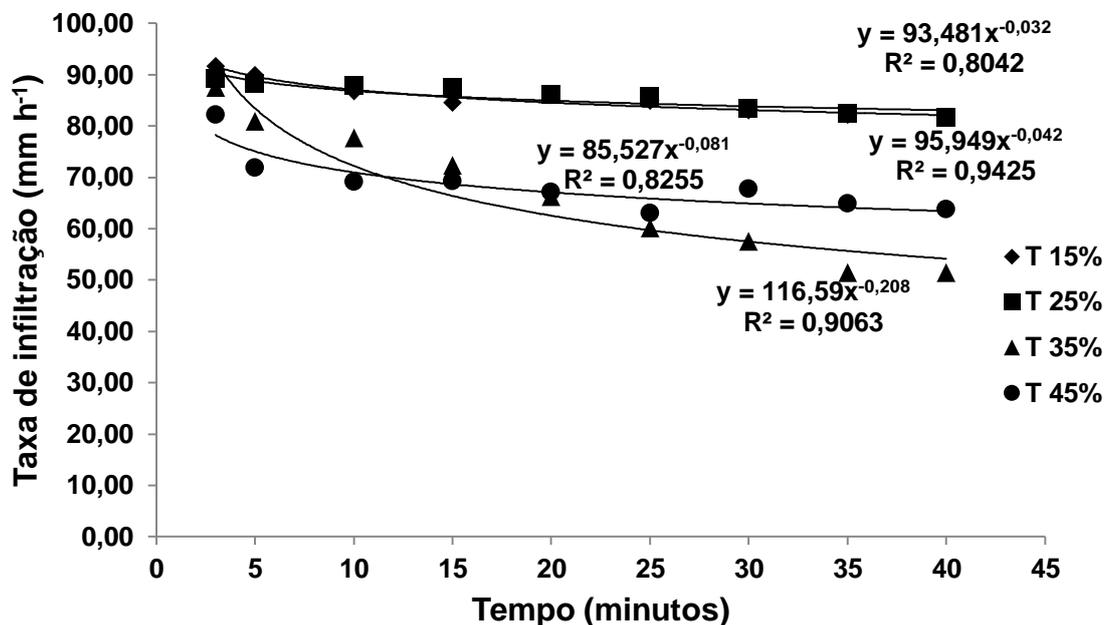


Figura 9. Taxa de infiltração em função do tempo de aplicação da chuva simulada nas declividades de 15%, 25%, 35% e 45%.

Tabela 4. Umidade Inicial amostrado na profundidade de 0 – 20cm nas diferentes declividades estudadas.

Declividade	Umidade Inicial
	%
15%	13,24
25%	10,47
35%	11,24
45%	14,82

4.2. Taxas de erosão em entressulcos

Na Tabela 5 encontram-se os dados observados para as taxas de erosão em entressulcos, concentração de sedimentos (Cs), taxa de desagregação (Di) e perda de solo (PS), e as variáveis coeficiente de escoamento superficial (C) e cobertura do solo (CS) referentes às condições de declive estudadas.

Tabela 5. Taxas de erosão em entressulcos, Coeficiente de escoamento superficial e Taxa de cobertura do solo de um Argissolo sob pastagem em diferentes declividades no município de Areia – PB

Declividade	Cs	Di	PS	C	CS
	kg L ⁻¹	kg m ⁻² s ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Adm	%
15%	0,0090 b	5,66 x 10 ⁻⁵ b	1,2257 b	0,1515 b	74,80 a
25%	0,0066 b	2,01 x 10 ⁻⁵ b	0,5367 b	0,1294 b	79,60 a
35%	0,0120 a	17,39 x 10 ⁻⁵ a	3,5035 a	0,4174 a	53,20 b
45%	0,0036 b	2,23 x 10 ⁻⁵ b	0,7644 b	0,2774 ab	69,20 ab

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem significativamente entre si pelo Teste Tukey a 10% de probabilidade. Cs: concentração de sedimentos; Di: taxa de desagregação do solo; PS: perda de solo; C: coeficiente de escoamento superficial; CS: cobertura do solo. Média de cinco repetições.

Observou para as taxas de erosão desse Argissolo sob pastagem, tanto para taxa de desagregação em entressulcos, que é uma avaliação instantânea, como para perda de solo, que é uma avaliação de integração para todo o teste, os maiores valores para o declive de 35%, como também aconteceu na análise das condições hidráulicas do escoamento da erosão em entressulcos. No entanto, o declive mais acentuado de 45% não foi a condição de maior taxa de erosão, como se esperava a princípio, apesar dessa condição também ter apresentado valores de coeficiente de escoamento superficial mais expressivos. Os valores de concentração de sedimentos seguiram a mesma tendência, ou seja, os maiores valores foram obtidos para condição do Argissolo sob pastagem a 35% de declive.

Inácio et al., (2007) avaliaram a influência da declividade nas taxas de erosão em entressulcos em área com pastagem formada com capim colônio (*Panicum maximum*) em um Chernossolo Argilúvico órtico típico. Os resultados obtidos nas classes de declividade < 9%, 10 – 15%, 25 – 30% e 35 – 40% foram: para a Concentração de sedimentos 3,35 x 10⁻⁴, 6,43 x 10⁻⁴, 5,65 x 10⁻⁴, 1,47 x 10⁻³ kg L⁻¹, respectivamente; para as Taxas de desagregação 1,10 x 10⁻⁵, 1,93 x 10⁻⁵, 1,75 x 10⁻⁵ e 4,5 x 10⁻⁵ kg m⁻² s⁻¹, respectivamente; e para as Taxas de Perda de solo, os resultados obtidos foram 0,48, 0,58, 0,64 e 1,23 Mg ha⁻¹, respectivamente. A taxa de porcentagem de cobertura do solo neste experimento foi de 100% em todos os declives. Sendo, provavelmente, essa a justificativa destes resultados serem inferiores aos obtidos no presente experimento, embora sejam semelhantes.

Os valores do coeficiente de escoamento superficial foram mais elevados para os maiores declives, embora, estatisticamente a condição de 45% de declive não apresentou diferença em relação aos menores declives, 15% e 25%, o que está em conformidade com Liu et al. (2006) ao afirmarem que o grau de declive constitui um dos fatores de maior relevância para formação de escoamento superficial. Os autores também comentam que em área com declive acentuado, o escoamento superficial, inicialmente, provocaria a erosão em entressulcos, para em seguida, com o aumento do escoamento, gerar a erosão em sulcos. Uma análise de regressão entre os valores do coeficiente de escoamento superficial e o tempo de aplicação da chuva simulada para os tratamentos estudados encontra-se na Figura 10.

Nesta figura observa-se que as declividades 15 e 25% tiveram um desempenho semelhante e ligeiramente constante ao longo do tempo de duração dos testes. Aliado ao fato de se encontrarem em condições de relevo inferior aos outros dois tratamentos, a cobertura do solo promovida pela vegetação foi responsável pela redução da quantidade de água perdida pelo escoamento, conseqüentemente, aumentando a quantidade de água infiltrada (Figura 9). Para as declividades 35 e 45%, observou-se a mesma tendência seguida para a T_i (Figura 9), porém no sentido inverso. O coeficiente de escoamento tendeu a elevar-se no decorrer dos testes por efeito do declive, pela menor retenção de água do solo, mas, também, pela diminuição da cobertura nestes tratamentos (Tabela 5). Esse efeito foi mais pronunciado na declividade 35%. Assim como ocorreu para a descarga líquida (Figura 8) e taxa de infiltração (Figura 9), por volta dos 15 minutos de teste, o efeito da cobertura vegetal passa a se destacar.

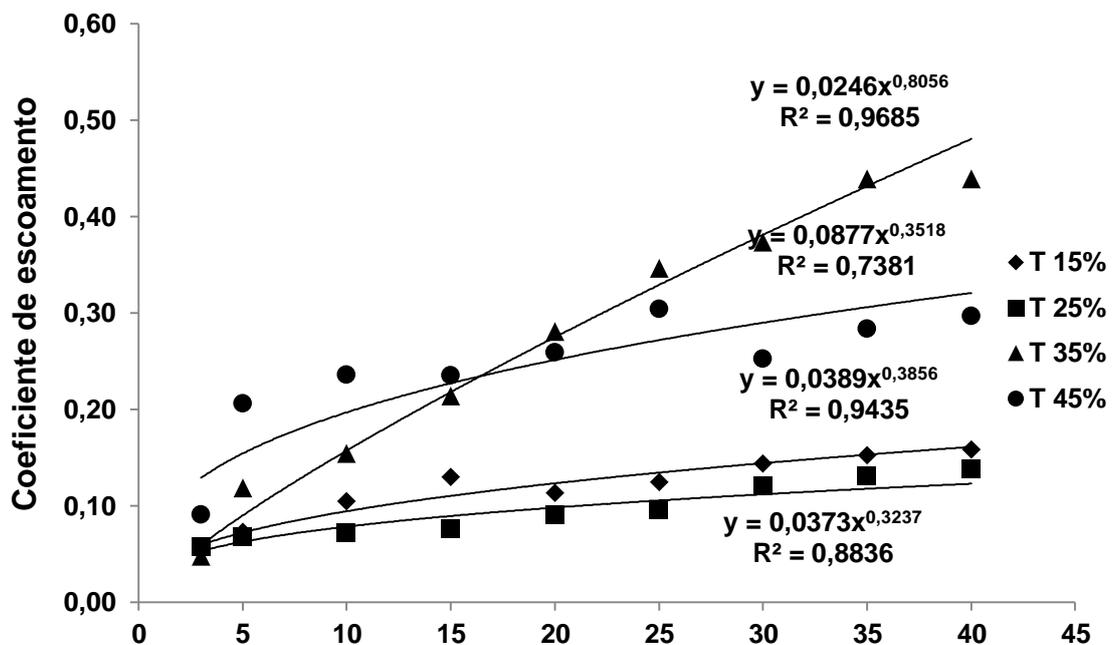


Figura 10. Coeficiente de escoamento em função do tempo de aplicação da chuva simulada nas declividades de 15%, 25%, 35% e 45%.

As maiores taxas de erosão para o Argissolo em condição de 35% de declive justifica-se pela menor taxa de cobertura vegetal, bem como pelo maior coeficiente de escoamento superficial. Como antes discutido, a menor cobertura vegetal da pastagem nesta condição influenciou nas condições hidráulicas do escoamento superficial, também foi responsável pelas maiores taxas de erosão. A diminuição da cobertura do solo pela gramínea no declive de 35% resultou numa maior exposição destas parcelas à ação direta do impacto das gotas de chuva favorecendo, dessa maneira, a ação de desagregação da superfície do solo, uma vez que, a cobertura vegetal sobre a superfície do solo desempenha uma ação bastante efetiva na sua proteção.

Para a condição desse Argissolo sob pastagem com 45% de declive, não ocorreram as maiores perdas de solo. Isso se deve ao pelo fato do mesmo apresentar o horizonte A já removido pela erosão, com a chuva atuando sobre o horizonte B textural (Bt). Como se observa na comparação da Tabela 6 que contem a distribuição granulométrica e a classe textural na profundidade de 0 a 20 cm das áreas de Argissolo sob pastagem, com a Tabela 7 que apresenta as distribuições granulométricas de 3 Argissolos realizadas respectivamente por Souza et al. (2010b) em Argissolo Vermelho–Amarelo distrófico abrupto cambissólico de Serra Talhada – PE e, Maia & Ribeiro (2004) em Argissolo

Amarelo distrófico abrupto fragipânico, A moderado, textura média (leve)/argilosa de Coruripe – Al.

Tabela 6. Densidade de partículas (Dp), Densidade do solo (Ds), Porosidade total (Pt), Análise Granulométrica e Classificação Textural do solo das parcelas experimentais em diferentes declives em área de pastagem degradada no município de Areia – PB.

Declividade	Análise granulométrica						Classificação Textural
	Dp	Ds	Pt	Areia	Silte	Argila	
	kg dm ⁻³	cm ⁻³	cm ⁻³	-----g kg ⁻¹ -----			
15%	2,56	1,59	0,38	795	73	132	Franco Arenosa
25%	2,57	1,60	0,38	758	78	164	Franco Arenosa
35%	2,67	1,65	0,38	709	75	216	Franco Argilo Arenosa
45%	2,63	1,49	0,44	589	55	356	Argilo Arenosa

Pode-se observar na Tabela 6 que apenas no declive de 45% o Argissolo Vermelho-Amarelo sob pastagem apresentou menor teor da fração areia, 589 g kg⁻¹ de solo, e fração argila com 356 g kg⁻¹ de solo, que são incomuns para horizonte superficial de Argissolos, e pela análise dos valores dos teores de areia e argila da Tabela 06, observa-se que esses teores são típicos dos horizontes Bt textural dos Argissolos citados. Dessa forma, comprova-se a remoção ou decapitação do horizonte A do Argissolo Vermelho-Amarelo de Areia-PB na condição de 45% de declive, pela ação anterior do processo de erosão hídrica. Ou seja, tal constatação indica estado de degradação do Argissolo sob pastagem.

Tabela 7. Algumas características morfológicas e análise granulométrica de dois Argissolos descritos por Souza et al. (2010) em Serra Talhada – PE e, Maia & Ribeiro (2004) de Coruripe-AL

	Profundidade	Areia	Silte	Argila
	Cm	g kg ⁻¹		
Souza et al. (2010b)	A 0 – 15	685	194	121
	2Bt1 15 – 37	549	197	254
	2 Bt2 37 – 78	460	264	276
	2BC 78 – 105	481	223	296
	2 Cr 105 – 30	611	285	104
Mata Nativa				
	A 0 – 16	830	60	110
	AB 16 – 34	790	40	170
	Bt 34 – 75	560	30	410
	Btx 75 – 160	540	90	370
2 anos de cultivo de cana-de-açúcar				
Maia & Ribeiro (2004)	Ap 0 – 18	850	50	100
	AB 18 – 35	810	30	160
	Bt 35 – 73	560	30	410
	Btx 73 – 160	380	100	520
	30 anos de cultivo de cana-de-açúcar			
	Ap 0 – 18	800	70	130
	AB 18 – 30	770	50	180
	Bt1 30 – 59	530	50	420
	Bt2 59 – 91	400	90	510
	Btx 91 – 160	340	160	500

O mesmo fato da remoção do horizonte superficial de Argissolo foi mencionado por Santos et al. (2010) e Souza (2010a) investigando as mudanças nos atributos físicos de Argissolo Vermelho-Amarelo em área de floresta nativa secundária e pastagens de capim *Brachiaria* spp na microrregião do Brejo Paraibano, ao observaram que o teor de argila total foi mais elevado nas áreas de pastagem, sendo atribuído à exposição do horizonte subsuperficial devido ao processo erosivo provocado pelo pisoteio animal ou

pela declividade da área, no qual ocorre o transporte da fração areia, restando o horizonte subsuperficial de textura mais fina, ou seja, mais argilosa. Souza (2010a) comentou que a condição de relevo fortemente ondulado e o uso da pastagem/pastoreio favorecem a remoção da camada superficial arenosa, exibindo um horizonte subsuperficial mais argiloso, ou seja, o solo sob pastagem encontrava-se com horizonte superficial mais arenoso decapitado.

Na Figura 11 observa-se a análise de regressão de potência e seus respectivos coeficientes de correlação para a variável perda de solo em função do tempo de aplicação de chuva simulada nas quatro declividades estudadas, verificando-se para o tratamento 35% de declividade que as perdas de solo aumentaram no decorrer dos testes, ao contrário do observado para os demais tratamentos, em que os valores apresentaram pouca variação com o tempo. A declividade acentuada e a menor porcentagem de cobertura vegetal justificam esse comportamento das perdas de solo para o declive de 35%.

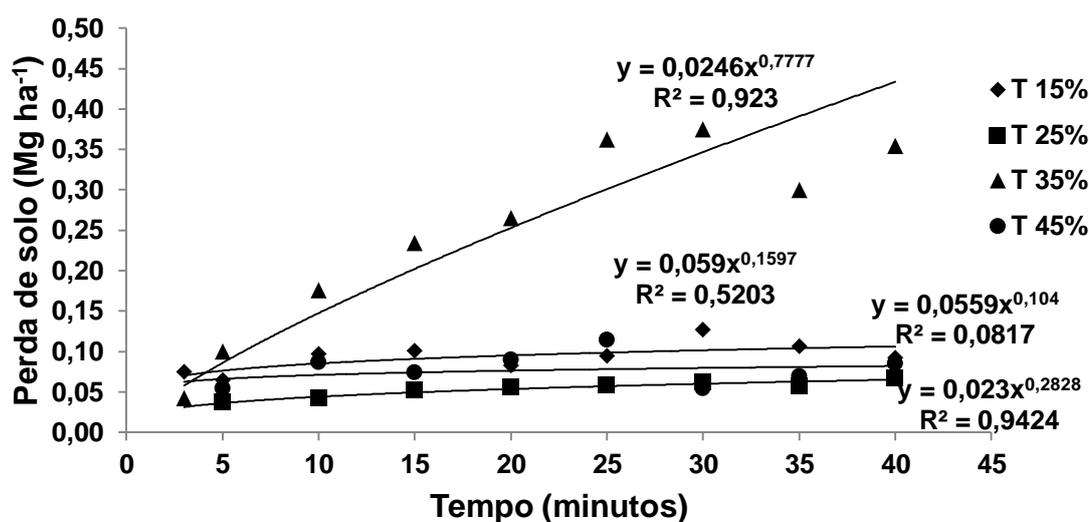


Figura 11. Perda de solo na erosão em entressulcos em função do tempo de aplicação da chuva simulada nas declividades de 15%, 25%, 35% e 45%.

4.3. Rugosidade vegetal gerada pela pastagem emersa ao escoamento superficial

Na avaliação dos parâmetros de rugosidade gerada pela vegetação da pastagem emersa foram obtidos o coeficiente de arraste vegetal (C'_D), a Tensão de arraste vegetal ($\tau_{arraste}$) e o número de Reynolds da planta (Re_{Planta})

conforme as equações (6), (7) e (15), propostas por Wu et al. (1999) e as duas últimas por Lee et al. (2004), estando presente na Tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros médios de rugosidade vegetal originados a partir do escoamento superficial sobre *Brachiaria decumbens* emersa em diferentes condições de declive no município de Areia – PB

Declividade	h m	Q m ³ s ⁻¹	Vm m s ⁻¹	C' _D m ⁻¹	Re _{Planta adm}	τ _{arraste} N m ⁻³
15%	4,35 x 10 ⁻⁴	0,81 x 10 ⁻⁵	0,0232	5338,57	3242,22	428,85
25%	1,98 x 10 ⁻⁴	0,67 x 10 ⁻⁵	0,0351	5337,82	3888,97	917,05
35%	5,15 x 10 ⁻⁴	2,14 x 10 ⁻⁵	0,0401	4110,73	6568,41	406,55
45%	3,49 x 10 ⁻⁴	1,39 x 10 ⁻⁵	0,0392	5469,74	7445,22	806,64

h: altura da lâmina de escoamento; Q: vazão do escoamento; Vm: velocidade média do escoamento; C'_D: coeficiente de arraste vegetal; Re_{Planta} = número de Reynolds da planta; τ_{arraste} = tensão de arraste vegetal.

A partir dos valores de número de Reynolds na planta entre 3342,22 a 7445,22, pode-se indicar que ocorreu fluxo turbulento entre a lâmina de escoamento e a estrutura da gramínea sob o escoamento superficial originado pelas chuvas simuladas em todas as condições avaliadas.

A Figura 12 mostra a elevação do coeficiente de arraste da *Brachiaria decumbens* quando ocorre diminuição da turbulência provocada pela fricção nos pontos de contato entre o fluxo e os elementos estruturais da gramínea, suas folhas, ramos e caules. Fato também observado por Tanino & Nepf (2008), analisando o arraste exercido por cilindros emersos de diâmetro uniforme, rígidos e distribuídos aleatoriamente, constatando diminuição do C'_D com aumento do Re_{planta}, e aumento do C'_D com aumento do volume da fração sólida dos cilindros. Indicando que tal fato ocorre devido a efeitos de resistência.

Entretanto, os ajustes de potência foram melhores para os declives menos elevados, demonstrando que nos declives mais elevados (35 e 45%) houve elevações de velocidade média e da descarga líquida e, por conseguinte, elevação da turbulência. Relações semelhantes foram encontradas por Wilson (2007) em canal experimental com vegetação artificial; por Lee et al. (2004) também em escoamento com regime laminar e vegetação emersa, mas na condição natural do parque Everglades na Florida, EUA e, por Silva (2011) avaliando a interferência da rugosidade hidráulica gerada pela vegetação emersa no transporte de sedimentos no Rio Capibaribe.

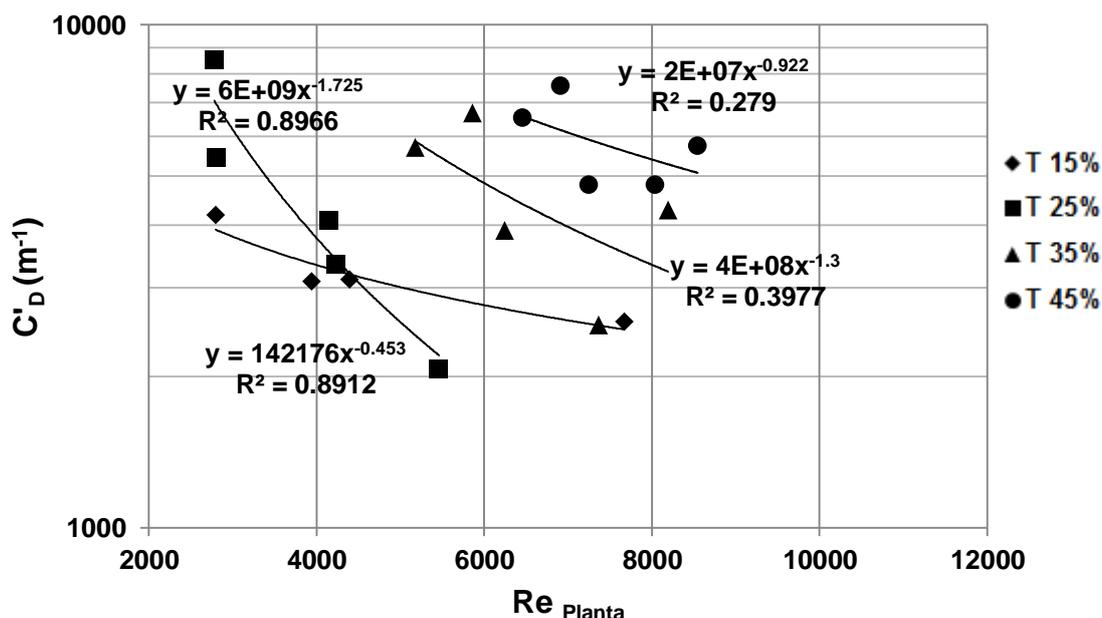


Figura 12. Coeficientes de arraste vegetal em função do número de Reynolds da planta obtidos a partir do escoamento superficial sobre a *Brachiaria decumbens* emersa nas diferentes condições de declive no município de Areia – PB.

No entanto, os valores ora obtidos foram muito superiores aos valores obtidos por Wilson (2007); por Lee et al. (2004), Melo (2008) e Silva (2011), ao que se atribui a condição da lâmina muito delgada gerada pela simulação de chuvas, na ordem de 0,198 a 0,515 mm e atuando entre os elementos vegetais emersos com dimensão de 4 cm de altura, o que resultou em valores de arraste muito elevados, o que está de acordo com Feng-Feng et al. (2007), ao afirmarem que na condição da vegetação emersa, a resistência ao escoamento varia de acordo com a altura da lâmina do escoamento quando a velocidade média não varia muito. No mesmo sentido, Rai et al. (2010) comentam que a resistência que a vegetação oferece ao escoamento varia com a altura da lâmina do escoamento ou com o grau de submersão da vegetação.

Dessa forma, a tensão de arraste nas plantas mostrou-se relacionada com as variações ocorridas com a altura da lâmina de escoamento (Figura 13). Nas declividades 15 e 35%, tratamentos onde ocorreram as menores tensões de arraste, 428,85 e 406,55 N m⁻³, respectivamente, foram observados as maiores alturas da lâmina de escoamento, 4,35 x 10⁻⁴ e 5,15 x 10⁻⁴, respectivamente. Nas declividades 25 e 45% foram visualizados os menores

números da altura de lâmina, $1,98 \times 10^{-4}$ e $3,49 \times 10^{-4}$, respectivamente, sucedendo-se as maiores tensões, 917,05 e 806,64 N m^{-3} , respectivamente, o que leva a identificar uma relação entre essas duas variáveis. Com o aumento da lâmina de escoamento, houve um maior fluxo de energia entre a massa de água e a estrutura vegetal, que se refletiram na diminuição dos valores de tensão de arraste na planta.

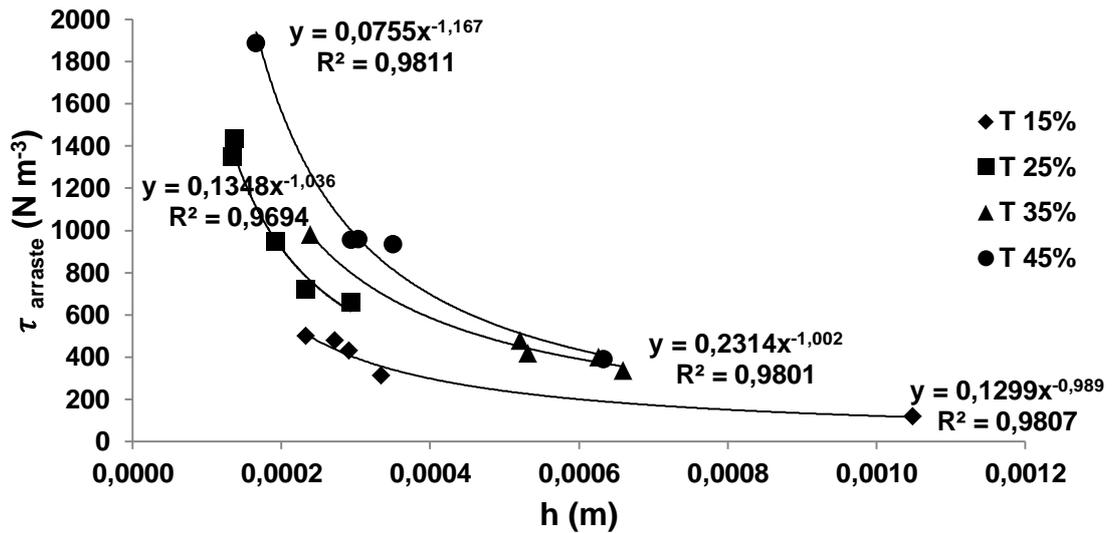


Figura 13: Tensões de arraste vegetal em função da altura da lâmina de escoamento originadas a partir do escoamento superficial sobre a *Brachiaria decumbens* emersa nas diferentes condições de declive no município de Areia – PB.

O mesmo foi observado por Bennett et al. (2002), ao realizaram um ensaio com o intuito de vegetar um canal sistematicamente degradado e registrar os efeitos da densidade de vegetação nos parâmetros hidráulicos, e observaram que ao passo que a densidade vegetal elevou-se, a resistência ao escoamento também foi incrementada, aumentando a altura da lâmina e o coeficiente de resistência e reduzindo a velocidade média do escoamento.

5. CONCLUSÃO

Os resultados aqui obtidos permitem as seguintes conclusões:

1. O regime de escoamento laminar lento, juntamente com os valores de descarga líquida na ordem de $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e os valores da altura de lâmina do escoamento na ordem de 10^{-4} m , encontrados em todos os tratamentos, confirmam que ocorreu erosão em entressulcos;
2. A descarga líquida, a velocidade média do escoamento e as taxas de infiltração da pastagem constituída pela *Brachiaria decumbens* variaram significativamente com a elevação do declive e, assim, contribuíram para elevação das taxas de erosão ate o declive de 35%;
3. Na condição de 45 % de declive do Argissolo Vermelho-Amarelo de Areia-PB sob pastagem constituída pela *Brachiaria decumbens* ocorreu a remoção ou decapitação do horizonte A, pela ação anterior do processo de erosão hídrica, comprovando sua degradação;
4. O aumento da porcentagem da cobertura vegetal elevou as taxas de infiltração de água no solo, mostrando-se dessa forma, um fator pro-ativo de controle da erosão em entressulcos;
5. O coeficiente de arraste vegetal da *Brachiaria decumbens* expressou elevação quando ocorreu diminuição da turbulência provocada pela fricção nos pontos de contato entre o fluxo e os elementos estruturais da gramínea, suas folhas, ramos e caules;
6. Com o aumento da lâmina de escoamento, houve um maior fluxo de energia entre a massa de água e a estrutura vegetal, que se refletiram na diminuição dos valores de tensão de arraste na planta.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 124 – 130, 2001.

ANDREOLLO, A. C.; APPOLONI, C. R.; GUIMARAES, M. F. Uso do céσιο-137 para avaliar as taxas de erosão em culturas de soja, café e pastagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 223-229, 2003.

ARMSTRONG, A., QUINTON, J.N., HENG, B.C.P., CHANDLER, J.H. Variability of interrill erosion at low slopes. **Earth Surface Processes and Landforms**, vol. 36, p. 97 – 106, 2011.

ASADI, H.; GHADIRI, H.; ROSE, C.W.; ROUHIPOUR, H. Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes. **Earth Surface Processes and Landforms**, vol. 32, p. 711–724, 2007.

ASSOULINE, S.; BEN-HUR, M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. **Catena**, vol. 66, p. 211 – 220, 2006.

BENNETT, S. J.; PIRIM, T.; BARKDOLL, B. D. Using simulated emergent vegetation to alter stream flow direction within a straight experimental channel. **Geomorphology**, vol. 44, p. 115 – 126, 2002.

BERTONI, J; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 5. ed. São Paulo: Ícone, 355p, 2005.

BEZERRA, S.A.; CANTALICE, J.R.B. & TARQUI, J.L.Z. Características do escoamento superficial e taxas de erosão em uma área sob cultivo agrícola. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 5; São Paulo, 2002. **Anais**. São Paulo, ABRH, p.403- 411, 2002.

BEZERRA, S.A.; CANTALICE, J.R.B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 30:565-573, 2006.

BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B. Influência da cobertura do solo nas perdas de água e desagregação do solo em entressulcos. **Caatinga**, v. 22, p. 18-28, julho/setembro de 2009.

BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B.; CUNHA FILHO, M.; SOUZA, W. L. S. Características hidráulicas da erosão em sulcos em um Cambissolo do Semi-Árido do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 34, p. 1325 – 1332, 2010.

BONO, J. A. M.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; EVANGELISTA, A. R.; CARVALHO, M. M.; SILVA, M. L. N. Cobertura vegetal e perdas de solo por erosão em diversos sistemas de melhoramento de pastagens nativas. **Pasto Tropical**. v. 18, p. 2-8, 1996.

BRAIDA, J. A.; CASSOL, E. A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um Podzólico Vermelho-Escuro franco-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol, 20, p. 127 – 134, 1996.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. Divisão de Agrologia – SUDENE. **Levantamento exploratório** – Reconhecimento de solo do Estado da Paraíba. Rio de Janeiro. 670p. 1972 (Boletim Técnico, 15).

BREMENFELD, S.; FIENER, P.; GOVERS, G. Effects of interrill erosion, soil crusting and soil aggregate breakdown on in situ CO₂ effluxes. **Catena**, vol. 104, p. 14 – 20, 2013.

CANTALICE, J. R. B.; CASSOL, E. A.; REICHERT, J. M.; BORGES, A. L. O. Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argilo-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 29, p. 597 – 607, 2005.

CANTALICE, J. R. B.; BEZERRA, S. A.; OLIVEIRA, O. F. L.; MELO, R. O. Hidráulica e taxas de erosão em entressulcos sob diferentes declividade e doses de cobertura morta. **Caatinga** (Mossoró,Brasil), v.22, n.2, p.68-74, abril/junho de 2009.

CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 117-124, jan. 2003.

CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHERT, J. M. & MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 685-690, jul. 2004.

CHAN, K.Y.; BOWMAN, A. & OATES, A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an Oxic Paleustalf under different pasture ley. **Soil Science**, Baltimore, vol. 166, n. 1, p. 61 - 67, 2001.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declividade e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27: p. 743 -753, 2003.

DEFERSHA, M. B.; QURAIISHI, S.; MELESSE, A. The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment distribution in the highlands of Ethiopia. **Hydrology and Earth System Science**, v. 15, p. 2367 – 2375, 2011.

EINSTEIN, H. A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. Washington : USDA, 65p. (Technical Bulletin, 1026), 1950.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. Ed. Ver. Atual. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Brasília, 2006. 354p.

EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

EVERAERT, W. Empirical relations for the sediment transport capacity of interrill flow. *Earth Surface and Landforms*, New York, v. 16, p. 513-532, 1991.

FARENHORST, A.; BRYAN, R. B. Particle size distribution of sediment transported by shallow flow. **Catena Verlag**, Cremlingen-Destedt, v. 25, p. 47-62, 1995.

FENG-FENG, G. U.; HAN-GEN, N. I.; DING-MAN, Q. I. Roughness coefficient for unsubmerged and submerged reed. **Journal of Hydrodynamics**, vol. 19, p. 421 – 428, 2007.

FOLTZ, R. B.; COPELAND, N. S.; ELLIOT, W. J. Reopening abandoned forest roads in northern Idaho, USA: Quantification of runoff, sediment concentration, infiltration, and interrill erosion parameters. **Journal of Environmental Management**, N° 90, p. 2542 – 2550, 2009.

FOX, D.M.; BRYAN, R.B.; PRICE, A.G. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. **Geoderma**, vol. 80, p. 181–194, 1997.

FOX, D. M.; BRYAN, R. B. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. **Catena**, vol. 38, p. 211 – 222, 1999.

FREITAS, F. J.; CANTALICE, J. R. B.; BEZERRA, S. A.; SILVA, M. D. R. O.; SANTOS, P. M.; CORREA, R. M.; LIMA, P. A.; FIGUEIRA, S. B. Erosão em entressulcos sob caatinga e culturas agrícolas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:1743-1751, 2008.

FU, S.; LIU, B.; LIU, H.; XU, L. The effect of slope on interrill erosion at short slopes. **Catena**, vol. 84, p. 29 – 34, 2011.

GARBIATE, M. V. et al. Erosão em entre sulcos em área cultivada com cana crua e queimada sob colheita manual e mecanizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 35, p. 2145 – 2155, 2011.

GERITS, J. J. P.; LIMA, J. L. P. D; BROEK, T. M. W. V. D. Overland flow and erosion. In: ANDERSON, M. G.; BURT, T. P. *Process studies in hillslope hydrology*. Chichester: John Wiley & Sons, 1990. p. 173-214.

GOVERS, G. Grain velocities in overland flow: a laboratory study. **Earth Surface and Landforms**, vol. 14, p. 481-489, 1989.

GOVERS, G. Soil erosion process research: a state of the art. Brussel : Paleis der Academien, 1996. 53 p. (Klasse der Wetenschappen, Jaargang 58, n.1)

GOVERS, G.; GÍMENEZ, R.; OOST, KRISTOF VAN. Rill erosion: Exploring the relationship between experiments, modeling and field observations. **Earth-Science Reviews**, vol. 84, p. 87 – 102, 2007.

GROSH, J.L.; JARRETT, A.R. Interrill erosion and runoff on very steep slopes. *Transactions of the ASAE*, St Joseph, v.37, n.4, p.1127-1133, 1994.

GYSSELS, G.; POESEN, J.; BOCHET, E.; LI, Y. Impact of plants roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. **Progress in Physical Geography** **22**, p. 189 – 217, 2005.

HUI, E; HU, X; JIANG, C; MA, F; ZHU, Z. A study of drag coefficient related with vegetation based on the flume experiment. **Journal of Hydrodynamics**, vol. 22(3): 329-337, 2010.

INÁCIO, E. S. B.; CANTALICE, J. R. B.; NACIF, P. G. S.; ARAUJO, Q. R.; BARRETO, A. C. Quantificação da erosão em pastagem com diferentes declives na microbacia do Ribeirão Salomea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.4, p.355–360, 2007.

JORDANOVA, A. A.; JAMES, C. S.; BIRKHEAD, A. L. Practical estimation of flow resistance through emergent vegetation. **Water Management**, vol. 159, p. 173 – 181, 2006.

KATZ, D. M. ; WATTS, F. J. ; BURROUGHS, E. R. Effects of surface roughness and rainfall impact on overland flow. **Journal of the Hydraulics Division, ASCE**, New York, v. 121, p. 547-553, 1995.

KINNELL, P. I. A.; CUMMINGS, D. Soil/slope gradient interactions in erosion by rain impacted flow. **Transactions of the ASAE**, vol. 36, p. 381 – 387, 1993.

LEE, J. K.; ROIG, L. C.; JENTER, H. L.; VISSER, H. M. Drag coefficients for modeling flow through emergent vegetation in the Florida Everglades. **Ecological Engineering**. v.22, pp. 237-248. 2004.

LIU, Q. Q.; XIANG, H.; SINGH, V. P. Asimulation model for unified interrill erosion and rill erosion on hillslopes. **Hydrological processes**, vol. 20. P. 469 – 486, 2006.

LIU, G.; ZHANG, Q.; YANG, M. Using 7Be to trace temporal variation of interrill and rill erosion on slopes. **Procedia Environmental Sciences**, vol. 11, p. 1220 – 1226, 2011.

MAIA, J. L. T.; RIBEIRO, M. R. Propriedades de um Argissolo Amarelo fragipânico de Alagoas sob cultivo contínuo da cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 39, n. 1, p. 79 – 87, 2004.

MARTIN, C.; POHL, M.; ALEWELL, C.; KÖRNER, C.; RIXEN, C. Interrill erosion at disturbed alpine sites: effects of plant functional diversity and vegetation cover. **Basic and Applied Ecology**, vol. 11, p. 619 – 626, 2010.

MELO, R. O. Caracterização da produção de sedimentos de uma microbacia no semi-árido pernambucano. 94p. (Dissertação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.

MEYER, L. D. How rain intensity affects interrill erosion. **Transactions of the ASAE** 24. P. 1472 – 1475, 1981.

MORGAN, R. P. C. Soil Conservation. England, Longman Limited, 2ª edição, 198 p, 1996.

NEARING, M. A. The mechanics of soil detachment by raindrops and runoff. **Eurasian Soil Science**, vol. 30, Nº 5, p. 552-556, 1997.

NUNES, M. C. M. Erosão hídrica em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul. 147p. (Tese) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Produção de sedimentos pela erosão em entressulcos em três Latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 15, n. 6, p. 541 – 547, 2011.

OLIVEIRA, F. P.; BUARQUE, D. C.; VIERO, A. C.; MERTEN, G. H.; CASSOL, E. A.; MINELLA, J. P. G. Fatores relacionados à suscetibilidade da erosão em entressulcos sob condições de uso e manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 16, n. 4, p. 337 – 346, 2012.

PARAÍBA, **Atlas Escolar da Paraíba: Histórico e Cultura**. 2a ed. João Pessoa, Grafset, 1998. 112 p.

PONCE, V. M. **Engineering hydrology: principles and practices**. Englenwood cliffs : PrenticeHall, 640 p. 1989.

RAI, R. K.; UPADHYAY, A.; SINGH, V. P. Effect of variable roughness on runoff. **Journal of Hydrology**, vol. 383, p. 115 – 127, 2010.

ROMKENS, M. J. M.; HELMING, K; PRASAD, S. N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. **Catena**, vol. 46, p. 103-123, 2001.

SANTOS, J. T. Avaliação de pastagens e dos atributos físicos e químicos do solo em áreas sob pastejo extensivo no brejo paraibano. 2009. 152f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2009.

SAS Institute. **Statistical Analytical Systems – SAS for Windows Procedures Guide**: Version, 9.1. Cary, USA, 2002 – 2003.

SANTOS, J. T.; ANDRADE, A. P.; SILVA, I. F.; SILVA, D. S.; SANTOS, E. M.; SILVA, A. P. G. Atributos físicos e químicos do solo de Áreas sob Pastejo na Microrregião do Brejo Paraibano. **Ciência Rural**, vol. 40, n. 12, p. 2486 – 2492, 2010.

SAVAT, J. The hydraulics of sheet flow on a smooth surface and the effect of simulated rainfall. **Earth Surface and Landforms**, New York, v. 2, p. 125 – 140, 1977.

SHI, Z. H.; FANG, N. F.; WUB, F. Z.; WANG, L.; YUE, B. J.; WUA, G. L. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. **Journal of Hydrology**, p. 123 – 130, 2012.

SCHONEBOOM, T.; ABERLE, J. DITTRICH, A. Hydraulic resistance of vegetated flows: Contribution of bed shear stress and vegetative drag to total hydraulic resistance. In: Proceedings of the international conference on fluvial hydraulics river flow, Braunschweig, 2010.

SILVA, Y. J. A. B. Interference of hydraulic roughness generated by unsubmerged vegetation on sediment transport in capibaribe river. 48p. (Dissertação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2011.

SILVA, G. R. V.; SOUZA, Z. M.; MARTINS FILHO, M. V.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. Soil, water and nutrient losses by interrill erosion from green cane cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 36, p. 963 – 970, 2012.

SIMONS, D.B. & SENTURK, F. **Sediment transport technology: water and sediment dynamics**. In: Water resources publications. [Colorado], [s.ed.], 1992. 897p.

SINGH, V.P. Analytical solutions of kinematic for erosion on a plane: II Rainfall of finite duration. **Advances in Water Resources**, 6:88-95, 1983.

SOUZA, J. M. Dinâmica de atributos físicos e químicos de um Argissolo Vermelho Amarelo em topossequência de pastagem cultivada no brejo paraibano. 2010. 72f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água) - Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2010a.

SOUZA, R. V. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; CORRÊA, M. M.; ALMEIDA, M. C.; CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO FILHO, M. R.; SCHULZE, S. M. B. B. Caracterização de solos em uma Topoclimossequência no maciço de Triunfo – Sertão de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 34, p. 1259 – 1270, 2010b.

TANINO, Y.; NEPF, H. M. Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders. **Journal of Hydraulic Engineering**, vol. 134, p. 34 – 41, 2008.

WILSON, C.A.M.E. Flow resistance models for flexible submerged vegetation. **Journal of Hydrology**, v. 342, pp. 213– 222, 2007.

WOOLHISER, D.A. & LIGGETT, J.A. Unsteady onedimensional flow over a plane – the rising hydrograph. **Water Resources Research**, 3:753-771, 1967.

WU, F. C.; SHEN, H. W.; CHOU, Y. J. Variation of roughness for unsubmerged and submerged vegetation. **J. Hydraulic Eng.** v. 125, nº9, pp. 934-942. 1999.

YAN, F.; SHI, Z.; LI, Z.; CAI, C. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of Ultisols in subtropical China. **Soil & Tillage Research**, vol. 100, p. 34 – 41, 2008.

YANG, C. T. (1996). Sediment Transport: Theory and Practice, Ed. Mc Graw-Hill, 396 p. USA.

YEN, B. C. Open Channel Flow Resistance. **Journal of Hydraulic Engineering**, vol. 128, n. 1, p. 20 - 39. 2002.

ZARTL, A.S.; KLIK, A. & HUANG, C. Soil detachment and transport processes from interrill and rill areas. **Phys. Chem Earth**, 26:25-26, 2001.