



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

PPEAMB/UFRPE

WALDEMIR PEREIRA DE SOUZA

ABORDAGEM FÍSICA DO WEPP NA EROÇÃO EM SOLOS EM AMBIENTE SEMIÁRIDO

RECIFE - PERNAMBUCO

2015

WALDEMIR PEREIRA DE SOUZA

ABORDAGEM FÍSICA DO WEPP NA EROÇÃO EM SOLOS EM AMBIENTE SEMIÁRIDO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, Área de Concentração: Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Victor Casimiro Piscoya

Co-orientadores: Prof. Dr. Genival de Barros Junior

Prof. Dr. Maria, de Fatima Cavalcanti Barros

RECIFE - PERNAMBUCO

SETEMBRO – 2015

WALDEMIR PEREIRA DE SOUZA

ABORDAGEM FÍSICA DO WEPP NA EROSÃO EM SOLOS EM AMBIENTE SEMIÁRIDO

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora em 18 de setembro de 2015.

D.Sc. Victor Casimiro Piscoya
ORIENTADOR

D.Sc. José Ramon Barros Cantalice
Examinador interno

D.Sc. Wagner Luis da Silva Souza
Examinador externo

A Deus, pela presença constante em minha vida,
Aos meus amados pais, Hilda Maria e Amaro Pereira,
A minha querida esposa Alcione Sales de Souza,
As minhas queridas filhas Ana Julia e Ana Luiza,
Aos meus irmãos Ana Valéria, Amaro Júnior, Walério e Fernanda,
E ao Professor Victor Piscoya pelo total apoio e amizade,
Aos meus familiares e amigos
Com muito amor e carinho,
Dedico.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação só foi possível, pois contou com o apoio de inúmeras pessoas, que direta ou indiretamente cooperou com pequenas e grandes contribuições, porém, igualmente com tão grande valor. Expresso minha gratidão a todas as pessoas, e aquelas que não foram mencionadas, que se sintam também lembradas. Quero agradecer esta conquista a:

A DEUS, que me deu sabedoria e discernimento perante os obstáculos encontrados, não há maior recompensa na vida que atingir qualquer meta através de nosso esforço e que nada seria possível sem o apoio dEle.

Aos meus amados pais, Hilda Maria Silva de Souza e Amaro Pereira de Souza, principais responsáveis por toda minha formação, pois eles foram apenas a semente para que hoje eu fosse a sua continuidade na vida. E aos meus irmãos Ana Valéria, Amaro Júnior, Walério e Fernanda, pelo companheirismo e compartilhamento de tristeza e alegrias.

A minha querida esposa, Alcione Maria Sales de Souza, pelo carinho, amor, apoio e paciência durante o curso e o desenvolvimento da dissertação, as muitas águas não apagarão o nosso amor. E as minhas duas princesas Ana Julia Sales de Souza e Ana Luiza Sales de Souza frutos do nosso amor.

Ao Professor e orientador Dr. Victor Casimiro Piscoya por sua total orientação, experiência e sabedoria em todos os momentos e por sua compreensão das minhas inúmeras limitações durante a jornada rumo a finalização deste trabalho. Orientador que me transmitiu valiosos ensinamentos.

Ao Professor Dr. José Ramon Barros Cantalice, pelos ensinamentos, amizade e apoio incondicional na execução deste trabalho e nas coletas de dados em campo, exemplo de profissional e professor, que levarei comigo durante toda minha vida profissional.

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pelo suporte financeiro durante a realização do mestrado.

A Secretaria de Educação do Estado de Pernambuco e a todo corpo docente e discente das Escolas Domingos Albuquerque e Centro Educacional Maria Santíssima pelo o apoio e compreensão durante a realização do mestrado.

Ao Dr. Genival de Barros Junior da Unidade Acadêmica de Serra Talhada, por aceitar na orientação e na colaboração.

A Professora Dr. Maria de Fátima Cavalcanti Barros, pela as análises e correções de extrema importância no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. Fernando Rolim Cartaxo, por me ajudar na coleta e classificação do solo, sempre dispondo do seu tempo e conhecimento em Pedologia e também pela amizade.

Ao Dr. Yuri Jacques, pela ajuda com as análises estatísticas dos meus dados, estando sempre disponível com seu conhecimento.

Ao Dr. Wagner Luis da Silva Souza, pela cooperação na análise física do solo além de colaborar sempre que possível com seu conhecimento em física do solo.

Ao Dr. Sérgio Guerra, pela humildade e paciência na elaboração dos mapas sempre dispondo do seu tempo e conhecimento.

Ao Doutorando Douglas Monteiro, pela ajuda na análise dos dados estatísticos e na elaboração dos gráficos no Excel.

A todos os Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, pela transmissão de conhecimento e ensinamento que levarei comigo durante a minha vida profissional.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Manejo e Conservação do Solo e água – Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Pernambuco, pelo suporte técnico.

Aos colegas e amigos da Pós-Graduação em Engenharia Ambiental: Liliana, Elvis Pantaleão, Cristina Ribeiro, Adriana Meguli, Débora, Cristiane, Monize, Fabiana, Cássia, Joyce, Rivaldo, Fernando e Hermon cada um será lembrado com enorme carinho.

Aos amigos Cristina Ribeiro, Hermon Augusto e Vitor Maia pelo companheirismo e ajuda nos testes experimentais em campo no município de Serra Talhada. Sempre dispostos e disponíveis para ajudar.

Aos funcionários do Programa, senhora Ednalva Gomes Taveira e senhor José Luiz Pereira da Silva pelo apoio prestado.

Ao senhor Erasmo Pereira, proprietário da Fazenda Cedro, por gentilmente ter permitido a entrada em sua propriedade para realização dos experimentos em sulcos.

Muito obrigado!!!

*Louvai ao SENHOR, porque ele é bom,
porque a sua benignidade é
para sempre.
Salmos 118:29*

RESUMO

A erosão do solo é um fenômeno irreversível que causa a degradação do solo e a deterioração da qualidade da água, dessa forma, modelos como o Projeto de Predição de Erosão Hídrica (WEPP) de base física podem ser cada vez mais utilizados na avaliação da erosão do solo em sulcos em ambiente semiárido. Objetivou-se quantificar a erosão em sulcos com as relações de erosão do WEPP e avaliar as condições hidráulicas do escoamento superficial sob condições de sulcos pré-formados. O experimento foi realizado na Bacia do Riacho Exu, no município de Serra Talhada, região semiárida de Pernambuco onde foram preparadas parcelas experimentais que consistiram em 16 sulcos pré-formados que foram submetidos a aplicação de diferentes níveis de vazão: 5,87 Lmin⁻¹, 12,10 Lmin⁻¹, 20,33 Lmin⁻¹ e 27,57 Lmin⁻¹ em Neossolo Flúvico. Com a atuação da concentração do escoamento superficial nos sulcos experimentais produziram regimes de escoamento na faixa de turbulento lento nos maiores fluxos aplicados caracterizando a ocorrência da erosão em sulcos. Os valores de erodibilidade em sulcos (K_r) foi de 0,0011 KgN⁻¹s⁻¹ e a tensão crítica de cisalhamento corresponde a 1,91 Pa. Os valores das perdas de solo para a erosão em sulcos foram consideradas altas para um Neossolo Flúvico comportando menor composição granulométrica com maior percentagem de areia.

Palavras-chave: erosão em sulcos; região semiárida; modelo WEPP.

ABSTRACT

Soil erosion is an irreversible phenomenon that causes soil degradation and deterioration of water quality, therefore, models such as water erosion prediction project (WEPP) physical base can be increasingly used to assess erosion rill in semiarid environment. The objective was to quantify the rill erosion with relationships the WEPP and evaluate the hydraulic conditions of runoff under conditions of rill preformed. The experiment was conducted in the exu watershed in Serra Talhada, semiarid region of Pernambuco where was prepared 16 rill preformed who underwent different flow levels: 5.87 L min⁻¹, 12.10 L min⁻¹, 20.33 L min⁻¹ and 27.57 L min⁻¹ in Entisol fluvent. With the performance of the concentration of runoff in rill experimental produced flow regimes slow turbulent in the largest flows applied characterizing the characterizing the occurrence of erosion in rill. The erodibility values in rill (Kr) was 0.0011 kgN⁻¹s⁻¹ and critical shear corresponds to 1.91 Pa. The values of soil losses to erosion rill were considered high for Entisol fluvent behaving smaller particle size composition with a higher percentage of sand.

Keywords: rill erosion; semiarid region; WEPP model.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Erosão em sulcos uma das formas mais comuns de erosão.....	18
Figura 2 -	Sulco com evolução para ravina ocasionado impacto ambiental na Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu.....	23
Figura 3 -	Mapa de localização da área de estudo, Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu.....	29
Figura 4 -	Rede de drenagem mostrando a ordem dos cursos d'água da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu.....	31
Figura 5 -	Carta de declividade da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu.....	32
Figura 6 -	Carta de vegetação e Uso da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu.....	34
Figura 7 -	Preparação dos sulcos pré-formados na área experimental para obtenção dos dados de erosão.....	37
Figura 8 -	Vista parcial de sulcos pré-formados, dissipador de energia e calha coletora de sedimentos nos testes de erosão em sulcos.....	38
Figura 9 -	Perfilômetro nivelado e na posição vertical sobre as chapas metálicas e estruturas de acrílicos que o sustentam.....	40
Figura 10 -	Formas das seções transversais dos sulcos retratados em folha de cartolina utilizando-se o perfilômetro.....	40
Figura 11 -	Esquema de classificação dos regimes de escoamentos superficiais gerados durante os diferentes fluxos crescentes aplicados.....	43
Figura 12 -	Recipientes plásticos com descargas líquidas e sólidas antes e após a secagem.....	44
Figura 13 -	Desmoronamento das paredes laterais do sulco e a desagregação intensa de maior turbulência do escoamento.....	46
Figura 14 -	Relação entre velocidade média e as vazões obtidas dos sulcos gerados pelo fluxo crescente sobre o Neossolo Flúvico estudado.....	47
Figura 15 -	Relação exponencial entre a área e o raio hidráulico dos sulcos gerados pelos fluxos crescentes aplicados na avaliação da erosão em sulcos sobre o Neossolo Flúvico estudado.....	50
Figura 16 -	Erodibilidade de um Neossolo Flúvico (Kr) em sulcos e a tensão crítica de cisalhamento (τ_c), obtidas a partir da regressão das taxas de desagregação do solo (D_r) com as respectivas tensões de cisalhamento do escoamento superficial gerados pelos fluxos crescentes aplicados.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Classificação de declividade da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu	31
Tabela 2 -	Parâmetros físico-hídricos e morfométricos da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu.....	33
Tabela 3 -	Distribuição do uso do solo da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu	35
Tabela 4 -	Características físicas da camada de 0 – 10 cm do Neossolo Flúvico na área dos testes de erosão em sulcos na Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu	36
Tabela 5 -	Características da fertilidade da camada de 0 – 10 cm do Neossolo Flúvico na área dos testes de erosão em sulcos na Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu.....	36
Tabela 6 -	Variáveis hidráulicas dos fluxos aplicados aos sulcos pré-formados sobre o Neossolo Flúvico da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu, para avaliação em sulcos.....	48
Tabela 7 -	Parâmetros da erosão em sulcos obtidos nos sulcos pré-formados sobre o Neossolo Flúvico da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu.....	51

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Ca	Cálcio
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
Cl	Cloro
EDTA	Ácido etilenodiamino tetra-acético
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
K	Potássio
MDEHC	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
Mg	Magnésio
N	Nitrogênio
NO ³⁻	Nitrato
P	Fósforo
Ph	Potencial Hidrogeniônico
SAS	Software Statistical Analysis System. Sistema de Análises de Estatística
SRTM	Shuttle Radar Topoography Mission. Missão Topográfica Radar Shuttle
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco
USLE	Equação Universal de Perda de Solo
UTMS	Universal Transverse Mercator System
WEPP	Water Erosion Prediction Project/ Projeto de Previsão de Erosão Hídrica

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	v
1.INTRODUÇÃO.....	14
1.1.OBJETIVOS.....	16
2.REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1. A erosão em sulcos.....	17
2.2.Erosão hídrica em ambiente semiárido.....	19
2.3.Fatores que intervem no processo erosivo decorrente do escoamento superficial.....	21
2.4.Modelos para predição erosiva.....	22
2.5.Erodibilidade em sulcos.....	25
3.MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1.Localização e descrição da área de estudo.....	29
3.2.Parâmetros físico-hídricos da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu.....	30
3.3.Caracterização do solo na área de experimento da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu.....	35
3.4.Determinação das taxas de erosão em sulcos.....	36
3.5.Parâmetros geométricos de caracterização hidráulica do escoamento nos sulcos de erosão.....	39
3.6.Fatores experimentais e análise estatística.....	45
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1.Caracterização hidráulica do escoamento nos sulcos pré-formados em Neossolo Flúvico.....	46
4.2.Caracterização da erodibilidade e taxa de desagregação do solo em sulcos pré-formados em Neossolo Flúvico.....	50
5.CONCLUSÕES.....	53
6.REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

Um dos problemas existentes na atualidade em todo mundo é a erosão do solo, o mesmo tornou-se uma questão significativa de preocupação social e ambiental (WEI et al., 2007) com graves reflexos socioeconômicos a nível regional, como também mundial, sendo considerado um dos fenômenos mais destrutivos que afeta o solo (BRADY; WEIL, 2013).

De acordo com Filizola et al. (2011) com crescimento populacional surge a erosão antrópica, como um problema mundial relacionada a degradação do solo que levará como consequência a desertificação acelerada, a compactação, o selamento, a salinização e a acidificação do solo, e também a diminuição da matéria orgânica, da fertilidade e a redução da biodiversidade.

Como se pode observar, o crescimento da população humana intensifica a pressão da exploração dos recursos naturais renováveis que acarreta processos de degradação ambiental em vastas áreas do planeta e por sua vez, acentuam mudanças drásticas no meio ambiente. Sendo assim, um dos principais desafios da sociedade é lidar com os problemas ambientais que envolvem os recursos naturais, principalmente relacionados à erosão do solo (FILIZOLA et al., 2011).

A erosão do solo é um fenômeno irreversível que causa a degradação do solo e também a deterioração da qualidade da água, e como consequência pode tornar as terras aráveis inadequadas para a produção agrícola, e estima-se que nos próximos 30 anos, serão necessários 200 milhões de hectares de áreas cultivadas para alimentar a crescente população humana (LAFOND et al., 2006).

O processo de ocupação do solo, com o constante revolvimento do solo sem tecnologia adequada e equivocada, como também sem as mínimas condições técnicas, levou à substituição quase total da vegetação primitiva, dando lugar a cultura de ciclo curto, resultando no maior problema da prática agrícola (ZOCCAL, 2007). Com isso, as práticas de preparo do solo de forma inadequada e o desmatamento tem contribuindo para o aumento dos processos erosivos (FILIZOLA et al., 2011).

Logo, tem-se a necessidade de encontrar alternativas menos impactantes para que a atividade humana continue sendo realizada sem prejudicar o meio ambiente (SANTOS, A., 2014). De acordo com Paiva et al. (2010) a erosão hídrica em região semiárida está tornando-se um sério problema e a mesma deve ser estudada para avaliar o grau de influência da cobertura

vegetal na produção de sedimentos e na degradação do solo, visto que nessas regiões existe uma relação marcante entre a chuva e a erosão que aceleram a degradação do solo.

Na região semiárida do estado de Pernambuco, o sistema de cultivo mais importante é a agricultura de sequeiro (SECTMA, 2009), em virtude disso a vegetação ciliar dos cursos d'água e o bioma caatinga são os locais a terem a sua cobertura vegetal alterada, por serem áreas preferenciais para o cultivo agrícola (NASCIMENTO et al., 2003), intensificando assim o processo de erosão hídrica que corresponde à liberação das partículas do solo; o transporte do sedimento erodido, através do escoamento superficial; e a deposição do sedimento, ou seja, a acumulação dos sedimentos (TAVARES; SUCHET, 2012). Portanto, a produção de sedimentos está se tornando uma preocupação devido aos efeitos negativos como a redução da fertilidade do solo, crescente risco de desertificação, assoreamento e eutrofização dos recursos hídricos (SANTOS et al., 2014). Cerca de 80% das terras agrícolas cultiváveis a nível mundial sofrem de erosão moderada a forte e 10% de erosão ligeiramente moderada (PIMENTEL et al., 1995).

As regiões áridas e semiáridas estão sujeitas a escassez de água, portanto, o conhecimento dos processos hidrosedimentológicos são de fundamentais importância para a permanência e a sobrevivência do homem no campo, assim como o entendimento das respostas hidrológicas das bacias e a aplicação dos modelos hidrológicos para simular respostas das bacias devido a mudanças no clima e no uso das terras cultiváveis. A erosão em entressulcos e em sulcos estão normalmente presentes em campos cultivados em todo mundo causando enormes perdas de solo, então surge a necessidade de desenvolver diversos modelos hidrosedimentológicos, principalmente de base física, para que simulem os processos erosivos na erosão hídrica (LOPES; CANFIELD, 2004; LAI, 2009).

Um desses modelos de base física, o Projeto de Predição de Erosão Hídrica (WEPP) Flanagan e Nearing (1995) levam em consideração os efeitos das mudanças de uso do solo e as características físicas e climatológicas das bacias, que são ferramentas muito úteis para os órgãos governamentais, que uma vez parametrizados, poderão ser utilizados para a previsão de escoamento superficial e produção de sedimentos (ARAGÃO et al., 2009). São cada vez mais imprescindíveis estudos no sentido de verificar o desempenho de modelos como o WEPP na avaliação da erosão do solo em regiões semiáridas procurando quantificar e avaliar as relações físicas da erosão hídrica.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Quantificar e avaliar as relações da erosão hídrica na erosão em sulcos, pela aplicação das relações físicas e hidráulicas de erosão do modelo de base física (WEPP) da Bacia Semiárida do Riacho Exu.

1.1.2. Objetivos específicos

- Quantificar a erosão em sulcos nas vertentes da microbacia de acordo com as relações de erosão do WEPP, originada pela aplicação de fluxos aos sulcos;
- Caracterizar o regime de escoamento superficial que ocorre na erosão em sulcos, gerados por diferentes vazões;
- Avaliar as condições hidráulicas do escoamento superficial sob condições de sulcos pré-formados em Neossolo Flúvico.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. EROÇÃO EM SULCOS

A erosão é considerada um dos problemas mais importante de degradação do solo a nível mundial (VRIELING, 2006), basicamente existem quatro principais tipos de erosão: em entressulcos, em sulcos, ravinas e voçorocas (MERRIT et al., 2003). Sendo que a erosão em sulcos é geralmente observada em áreas de cultivo podendo causar a degradação e enorme perdas de solo (CHEN et al., 2015).

Chen et al. (2015), confirmam que quando a erosão em sulcos é formada, o fluxo da água na superfície torna-se concentrado, e com isso, o escoamento superficial aumenta de forma gradativa na superfície do solo, provocando assim, o aumento significativo da erosão do solo.

De acordo com Lei et al. (2001) o processo erosivo em sulco é considerado um sistema complexo pois envolve a desagregação, o transporte e a deposição das partículas do solo, e que cada subprocesso ocorre simultaneamente em uma determinada posição do sulco de acordo com as características hidrodinâmicas e de resistência a erosão.

Os processos de desagregação do solo pela erosão em sulcos são diferentes do que ocorre na erosão em entressulcos (ROMERO et al., 2007). Uma característica da formação dos sulcos é a concentração do volume de água com maior velocidade que o escoamento difuso. A capacidade de transporte dos sedimentos pelo escoamento é consequência de algumas variações hidráulicas e das características dos sedimentos (MINELLA et al., 2010).

A erosão em sulcos (Figura 1) é caracterizada por uma série de pequenos canais com até 30 cm de profundidade (CERDAN et al., 2002) que apresentam uma complexidade variáveis e que são desenvolvidos em redes (MANCILLA et al., 2005) com o avanço das redes de sulcos ocorre a conexão entre si, e o fluxo concentrado de água flui ao longo da rede de canalização dos sulcos através do escoamento superficial (HERAS et al., 2011). A erosão em sulcos geralmente é compreendida como sendo o efeito da água que ativa uma maior tensão de cisalhamento do solo (KNAPEN et al., 2007).

Durante as últimas décadas foram desenvolvidas várias abordagens para descrever e prever a desagregação e o transporte de sedimentos em sulcos (GOVERS et al., 2007). Contudo, é certo que existe a necessidade de realizar experimentos de campo para determinar o papel dos sulcos na erosão do solo (GOVERS et al., 2007). Com a observação da erosão em campo pode ser medido os parâmetros de escoamento e do transporte de sedimentos e ao mesmo tempo

poderá ser produzidos dados para caracterizar os comportamentos dos sulcos (WIRTZ et al., 2012).



Figura 1 – Erosão em sulcos uma das formas mais comuns de erosão.
Fonte: Wirtz et al.,2012.

Trabalhos experimentais a respeito da erosão em sulcos podem ser realizados em laboratório (MANCILLA et al., 2005) ou também em condições de campo (REJMAN e BRODOWSKI, 2005) utilizando tanto chuva natural ou simulada em diferentes texturas e classes de solos, com o objetivo de investigar e observar a formação dos sulcos (BRUNO et al., 2008; MANCILLA et al., 2005) e também para estimar os principais parâmetros hidráulicos como: área de secção transversal do sulco, perímetro molhado, raio hidráulico, velocidade e tensão de cisalhamento (GIMENEZ et al., 2004; BRUNO et al., 2008) e além disso, propor modelos matemáticos para estimar a perda de solo devido a erosão em sulcos (BRUNO et al., 2008). Outros parâmetros que são testados são o comprimento da declividade, percolação, desenvolvimento do sulco, número de Froude, tensão crítica de cisalhamento, intensidade da chuva e a velocidade do fluxo (WIRTZ et al., 2012).

No processo de formação dos sulcos Merrit (1984) identificou várias etapas que ocorre antes da formação do sulco, uma etapa classificada como regime laminar com número de Reynolds (Re) < 500 , na etapa seguinte, o escoamento se concentra em canais bem definidos, caracterizando o regime transição; na terceira etapa, o sulco apresenta incisões na superfície do

solo, na forma de headcuts, sendo que Merten (2000) denominou de erosão regressiva, que é favorecido pelo escoamento nas laterais dos sulcos, que contribui para o aumento e avanço dos headcuts.

Segundo Slattery e Bryan (1992) o número de Froude é outro parâmetro importante na formação dos sulcos e utilizado para descrever as fases erosivas e o escoamento superficial, portanto, número de Froude de 1,2 relaciona-se ao início de formação dos sulcos para solo com textura arenosa, enquanto solo com textura mais argilosa o escoamento superficial alcança valores de 2,8.

Para Cantalice et al. (2005) na formação dos sulcos de erosão ocorrem variações da geometria de fundo e das paredes do sulco quando o solo é erodido, produzindo assim, alterações nas características hidráulicas do escoamento, que são responsáveis pela dinâmica de formação dos sulcos.

Shen et al. (2015) comentam que a morfologia do sulco desempenha um papel importante na determinação do escoamento superficial e das perdas do solo em encostas. O fluxo nos sulcos tem maior velocidade e transportam mais sedimentos em curvas declivosas que em áreas planas terrestres. O comprimento do sulco e as secções transversais são geralmente empregados como indicadores na morfologia dos sulcos. E ainda, o comprimento dos sulcos, a largura e a profundidade são considerados indicadores morfológicos básicos e que são importantes para calcular outros parâmetros hidráulicos.

2.2. EROSÃO HÍDRICA EM AMBIENTE SEMIÁRIDO

De acordo com Venkateswarlu e Shanker (2012) as terras áridas são definidas pela escassez de água tipicamente caracterizadas por baixa precipitações anuais (300-500mm ao ano ou menos) onde a evapotranspiração excede a precipitação resultando num grande contraste entre as áreas ribeirinhas úmidas e secas e as comunidades das terras altas adjacentes. Os fluxos das regiões áridas e semiáridas são tão importantes para os ecossistemas ribeirinhos que ocupam pequenas porções da paisagem, exercendo uma influência significativa sobre os processos hidrológicos, geomorfológicos e ecológicos (SHAW; COOPER, 2008) e, normalmente, suportam a grande maioria da biodiversidade nessas regiões que apresentam uma alta variabilidade de extremos climáticos sazonais com padrões de precipitação imprevisíveis e regimes climáticos não muito favoráveis para a produção de culturas, apresentando desafios

difíceis para o sucesso do cultivo de culturas com necessidade mínima de água (VENKATESWARLU; SHANKER, 2012).

A escassez de água levou a adaptações fisiológicas e comportamentais únicas em muitas espécies de plantas e animais. Cerca de mais de dois bilhões de pessoas em 100 países vivem em terras áridas incluindo áreas sub-úmidas, semiárido seco, árido e regiões hiperáridas, cobrindo 41,3% da superfície da terra (SAFRIElet al., 2005).

Em regiões semiáridas a erosão do solo é um dos mais graves problemas ambientais que sofre desequilíbrio especificamente pela ação do homem, são nesses locais que exibem um maior potencial para desagregação e transportabilidade do solo. O principal impacto dessas alterações corresponde a vegetação reduzida e a compactação do solo por atividades como sobrepastoreio, pastagem, queima da vegetação e plantio direto (MOGHADAN et al., 2015). A gestão do mal-uso das terras de forma inadequada em regiões semiáridas, incluindo a falta da cobertura vegetal ao longo prazo provoca a erosão (SALLEH; MOUSAZADEH, 2011).

A maior degradação do solo provém da erosão hídrica. Quando gotas de chuva e o fluxo do escoamento removem o solo, produzem impactos às propriedades do solo, diminui o conteúdo da matéria orgânica e de nutrientes do solo (BRADY; WEIL, 2013).

A erosão é um dos principais contribuintes na produção de sedimentos que são transportados pela água e são considerados os maiores poluentes de riachos e lagos, e em termo de volume influenciando na deposição de sedimentos. Os poluentes são transportados nos sedimentos em conjunto com a água de escoamento e podem causar grandes problemas ambientais, principalmente na qualidade da água, incluindo a eutrofização e hipóxia (FLANAGAN et al., 2010).

Os solos da região semiárida são caracterizados por apresentarem baixo teor de matéria orgânica, propriedade essa que podem diminuir a estabilidade da estrutura do solo. Sendo assim, esses solos quando expostos ao impacto das gotas de chuva desenvolvem-se na sua superfície uma estrutura vedante, denominada de selamento, que conduz a uma diminuição da capacidade de infiltração da água (INBAR et al., 2014).

Para Morghadan et al. (2015) as partículas do solo que são desprendidas pelo impacto das gotas de chuva dependem de várias características como: tamanho da gota, desagregação da massa do solo, velocidade da gota, energia cinética e ângulo de impacto da gota, sendo que a taxa de desagregação é influenciada pela propriedade do solo que inclui: a textura, a resistência, a densidade, a coesão, o conteúdo da matéria orgânica, o teor de umidade, a

capacidade de infiltração, a compactação e a rugosidade, a natureza do solo, os agregados, a capacidade iônica e o teor de argila.

2.3 FATORES QUE INTERVÊM NO PROCESSO EROSIVO DECORRENTE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

A erosão é considerada um dos processos mais destrutivo do solo em âmbito mundial. O homem degrada 53 bilhões de hectares do globo terrestre pelo uso do solo levando a deterioração das propriedades física, química e biológica do solo (BRADY; WEIL, 2013; IBÁÑEZ et al., 2014).

A cobertura da superfície do solo é um fator mais importante para controlar a erosão, pois reduz o impacto das gotas de chuva e a velocidade da água que flui sobre o solo. A cobertura total da superfície é viável para muito sistema de pastagens e cultivo (GOVERNO DE QUEELAND, 2013).

Os resíduos vegetais também desempenham um importante papel nos processos erosivos, a sua presença na superfície do solo detém as gotas de chuva que dissipam sua energia impedindo a desagregação das partículas e formação do selamento (TARTARI et al., 2012), e ainda, causa a redução da velocidade do escoamento superficial devido o aumento da rugosidade hidráulica do fluxo superficial que resulta na altura do escoamento na erosão em entressulcos (SILVA, 2007).

A análise dos fatores temporal e espacial determinantes dos padrões do solo é uma tarefa fundamental para a compreensão dos ecossistemas limitados pela água em que as interações entre os processos hidrológicos que regulam a umidade do solo e a vegetação são particularmente acoplados (WILCOX; NEWMAN, 2005). A disponibilidade da água é amplamente reconhecida como o principal recurso de controle para a estrutura da cobertura vegetal (TORMO et al., 2006). A redução consistente da disponibilidade de água induzida pelos processos de erosão do solo poderia promover a ativação a um longo prazo de um processo de auto reforço de degradação, reduzindo o crescimento das plantas e conseqüentemente, aumento da intensidade de erosão e da perda de água associada ao escoamento superficial (WILCON et al., 2003).

A disponibilidade e distribuição espacial deste recurso limitante podem ser visivelmente alteradas quando ocorre uma erosão acelerada do solo, afetando a dinâmica e a função dos ecossistemas (PIMENTEL et al., 1995).

O sistema solo-vegetação tem mecanismos de reabilitação que regulam a formação do solo desenvolvimento da vegetação e os processos de erosão-sedimentação (PUIGDEFÁBREGAS, 2005). No entanto, embora a influência positiva da vegetação aumentando as taxas de infiltração e diminuindo a erosão do solo tem sido amplamente documentada, com menos atenção aos efeitos ecológicos da erosão do solo (WAINWRIGHT; PARSONS, 2010). Desta forma, vários trabalhos indicam um papel crítico do conhecimento das interações erosão-vegetação para a compreensão dos processos de degradação em ambientes limitados pela falta de água, especialmente no atual contexto de uso da terra e mudanças climáticas (ZEHE; SIVAPALAN,2009).

2.4 MODELOS PARA PREDIÇÃO EROSIVA

Os agricultores e gestores de terras precisam da capacidade de estimar a perda de solo para as suas práticas agrícolas atuais, os sistemas de gestão poderiam ser capazes de ajudá-lo a reduzir o risco de erosão que poderão ameaçar o solo e sua produtividade. A tecnologia com base empírica da previsão de erosão do solo, como a Equação Universal da Perda de Solo (USLE) tem sido utilizado por muitos anos para estimar a quantidade de perda média do solo em longo prazo limitado pela sua equação simples, não sendo possível prever outros importantes processos como o escoamento, deposição de sedimento ou a taxa de entrega de sedimentos (FLANAGAN et al., 2010).

De acordo com Smith e Wischmeier (1957) o processo água-erosão, o desprendimento pelo impacto da chuva e transporte por água são muito complexos. A complexidade do problema tem a necessidade do uso de métodos empíricos pelos conservacionistas para solução dos problemas de campo.

Para Bertoni (2012) a erosão de um modo geral corresponde a um processo de desprendimento, transporte e deposição de partículas, causada pela água e que ocasionam impactos ambientais no ecossistema (Figura 2). A erosão pode ser reduzida pelo manejo apropriado do solo, que exige uma coleta de dados de campo e desenvolvimento de modelo preditivo para a avaliação de diferentes cenários de manejo objetivando a proteção do solo (BUJAN et al., 2000).

Variedade de modelos têm sido desenvolvidos para prever tanto o escoamento superficial quanto as perdas de solo (ZHANG et al., 1996) para permitir um melhor

entendimento dos processos do escoamento superficial e da erosão do solo em diferentes situações (YAN et al., 2015).

Modelos hidrosedimentológicos estão sendo amplamente utilizados para o desenvolvimento sustentável das bacias hidrográficas porque fornecem uma base melhor para a compreensão dos processos hidrológicos e também para a avaliação do impacto das atividades humanas no meio ambiente e na produção agrícola (PANDEY et al., 2008).

Para Chandramohan et al. (2015) vários modelos encontram-se disponíveis para a previsão de produção de sedimentos e deposição nas encostas em pequenas bacias. Nos modelos conceituais fatores como produção de sedimentos, como precipitação e escoamento, são considerados como de entrada, enquanto, a produção de sedimentos é tratada como fator de saída, entretanto, nos modelos de base física que proporcionam entendimentos fundamentais dos processos de produção de sedimentos e tem a capacidade de estimar as variações espaciais e temporais do processo de transporte e deposição.



Figura 2 – Sulco com evolução para ravina ocasionando impacto ambiental na Bacia Hidrográfica Semiárida do Riacho Exu, Serra Talhada – PE.

Fonte: Laboratório de Manejo e Conservação do Solo e Água – UFRPE, 2014.

Entre os modelos de base física encontra-se o modelo Projeto de Predição de Erosão Hídrica (WEPP) que tem como finalidade desenvolver tecnologia de nova geração na previsão da erosão hídrica. O WEPP simula muitos dos processos físicos importantes da erosão do solo,

como por exemplo, infiltração, escoamento, gotas de chuva, desagregação, transporte de sedimentos, deposição, crescimento de planta e o resíduo em decomposição como parâmetros de entrada (GELENCSÉRA et al., 2010).

O Modelo WEPP pode ser usado em encostas e em bacias hidrográficas menores, sendo amplamente utilizado para os cálculos da perda de solo (GELENCSÉRA et al., 2010), tem sido utilizado com sucesso em todo mundo (SHEN et al., 2010) e em diferentes condições climáticas nos Estados Unidos, América do Sul, Austrália, Europa, Ásia e África (GOVERS et al., 2011) para estimar o escoamento e perda de solo em diferentes tipos de solo e uso de práticas de manejo de culturas, tornando-se uma importante ferramenta analítica para estimativa do escoamento e da produção de sedimentos (LANE et al., 1997).

O modelo WEPP foi desenvolvido para planejamento da conservação do solo e da água e também para avaliação ambiental. Tem vantagens sobre os outros modelos de erosão existentes, uma vez que fornece estimativa espacial e distribuição temporal da perda de solo ou da deposição (SINGH et al., 2011). E também considera a erosão como a deposição de sedimentos em perfis da paisagem, voçorocas efêmeras dentro do campo e a variação complexa da erosão sobre o campo em diferentes topografias, solos, cultivos e manejo (FLANAGAN; LIVINSTON, 1995).

Para Foste et al. (1995) o modelo WEPP determina a desagregação, transporte e deposição dos sedimentos nos sulcos, a desagregação nos sulcos é considerado um processo não seletivo. Quando a carga de sedimentos a ser transportado é maior que a capacidade de transporte do escoamento ocorre a deposição, a qual é quantificada pela equação abaixo:

$$D_r = \frac{\beta V_f}{q} (T_c - G) \quad (1)$$

em que:

D_r – taxa de desagregação em sulcos ($\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

β – coeficiente induzida pelo impacto das gotas de chuva (o modelo WEPP admite β igual a 0,5);

V_f – velocidade efetiva de queda (deposição) das partículas do sedimento (m s^{-1});

q – vazão de escoamento por unidade de largura do sulco ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$);

T_c – capacidade de transporte de sedimento ($\text{Kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$);

G – carga de sedimentos ($\text{Kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$).

2.5 ERODIBILIDADE EM SULCO

A erodibilidade do solo reúne a maioria das informações referentes às propriedades do solo, e por isso, tem sido um dos fatores mais eficientes aplicados para avaliar os riscos de erosão (VAEZI; BAHRAMI, 2014). É considerada de fundamental importância para a predição de erosão, planejamento da conservação do solo e avaliação de sedimentos relacionados com efeitos ambientais das práticas agrícolas das bacias hidrográficas (WANG et al., 2013).

O fluxo concentrado de água na erosão em sulcos é considerado uma das principais fontes de energia da desagregação do solo, enquanto que as gotas de chuva desempenham papéis mais significativos na erosão em entressulcos (GOVERS et al., 2007). A capacidade do solo em resistir à erosão depende das condições da superfície do solo, no caso da erosão hídrica, varia com as características da chuva, do relevo, da cobertura vegetal, do manejo do solo e das práticas conservacionistas, sendo que dentre os fatores citados o mais que influencia no processo da erosão hídrica é a cobertura vegetal (MARIOTI, 2013).

Nos processos de erosão hídrica com base na predição do modelo WEPP (FLANAGAN; NEARING, 1995), a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) é calculado apenas com base na textura do solo (ALBERTS et al., 1995). Sendo que para Flanagan e Nearing (1995) a erodibilidade em sulcos (K_r) é determinada pela medição da suscetibilidade do solo para desagregação através do fluxo concentrado e este é frequentemente definido como o incremento na desagregação do solo pelo aumento da tensão de cisalhamento do fluxo das águas.

Modelos, como WEPP, incluem a capacidade de transporte e o parâmetro de erodibilidade dos sulcos como de grande importância na simulação de erosão em sulcos (YAN et al., 2008). Os parâmetros erodibilidade e tensão de cisalhamento são necessários para caracterizar a resistência do solo e a erosão do fluxo concentrado. Para Knapen et al. (2007) a erodibilidade é considerado um parâmetro mais adequado que a tensão de cisalhamento para representar as diferenças na resistência à erosão dos solos e das condições ambientais.

A erodibilidade depende da distribuição das partículas primárias no solo, e a forma como estão arrançadas essas partículas nos agregados; estes parâmetros devem ser facilmente medidos e relacionados com as propriedades do solo (DUIKER et al., 2001). Sendo assim, a erodibilidade e a capacidade de transporte por fluxo concentrado é maior do que a causada pelo impacto das gotas de chuva (AUERSWALD et al., 2009).

Nos sulcos a lâmina de escoamento desenvolve maior tensão de cisalhamento pelo aumento da espessura, aumentando assim, a sua capacidade do escoamento em desagregar o

solo (LAFAYETTE et al., 2011). Entretanto, a erosão em sulcos ocorre pela ação da enxurrada que através da ação da força cisalhante ocasiona a desagregação e o transporte de sedimentos (PORTELA et al., 2011).

Meyer et al. (1975) descobriram que as quantidades de erosão no solo aumentam duas vezes após o aparecimento de sulcos em alguns pontos de áreas com predominância de silte. Por outro lado, Dimoyiannis et al. (1998) afirmam que geralmente a argila diminui a erodibilidade, como observado em diferentes estudos em várias partes do mundo. A matéria orgânica aumenta a estabilidade dos agregados e a resistência ao solo em sofrer processos erosivos (KEMPER; KOCH, 1966). A erodibilidade em sulcos é influenciada pela densidade do solo (GHEBREIYESSUS et al., 1994) e também pela densidade de partículas (KNAPEN et al., 2007). Outras propriedades que podem influenciar a erodibilidade incluem o carbonato de cálcio, óxido de ferro, óxido de alumínio e o material de origem (CERDA, 1996). Conforme Cheng et al. (2005) os resultados de algumas pesquisas indicam que a crosta da superfície do solo é de significância para o início da erosão em sulcos.

O termo erosão em sulcos representa dois processos: a capacidade do fluxo de água em desagregar o solo e a sua capacidade de transporte de sedimentos. Se não houver nenhuma limitação de transporte, então o fator controle para a taxa de erosão em sulco é a desagregação do solo, que é dependente da tensão de cisalhamento que atua sobre o solo (BULGINA et al., 2007).

A desagregação das partículas do solo nos sulcos ocorre quando a força de cisalhamento excede a resistência crítica do solo ao cisalhamento e a carga de sedimentos transportados será menor que a capacidade de transporte. O desprendimento das partículas do sulco é considerado zero quando a força de cisalhamento é menor que a resistência crítica do solo (PRUSKI, 2009).

Para Flanagan e Nearing (1995) a erodibilidade do solo em sulcos no modelo WEPP é determinada a partir da relação entre as taxas de desagregação em sulcos e a tensão de cisalhamento do fluxo, que é dada pela expressão:

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \quad (2)$$

em que:

D_r – taxa de desagregação em sulco ($\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

K_r – erodibilidade do solo em sulcos ($\text{Kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$);

τ – tensão cisalhante do fluxo (Pa);

τ_c – tensão crítica de cisalhamento do solo (Pa).

A erodibilidade em sulcos é determinada pelo coeficiente angular b da reta que relaciona as taxas de desagregação (D_r) com a tensão cisalhante do fluxo. A tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c) corresponde ao valor do intercepto de τ , quando $D_r = 0$, ou a partir da relação dos coeficientes da reta: $\tau_c = -a/b$ (LAFREN; THOMAS, 1987). A expressão acima é admitida para a condição na qual a capacidade de transporte do escoamento seja muito superior à carga de sedimentos. Nesse caso, a taxa de desagregação do escoamento em sulcos é muito semelhante à capacidade de desagregação em sulcos (CANTALICE, 2002).

Knapen e Poesen (2010) observou que a tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c) está relacionada com os pontos iniciais de formação de sulcos e voçorocas e com a extensão de fluxo concentrado. Portanto, ao iniciar-se a formação de sulcos e voçorocas, a forma da seção dessas feições erosivas depende da erodibilidade do solo (K_r) ao fluxo concentrado, podendo ser estimado a partir do conteúdo de água, da densidade do solo, da densidade das raízes e dos resíduos incorporados ao solo, enquanto que a tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c) pode ser relacionada com a resistência ao cisalhamento do solo saturado, conforme equação:

$$\tau_c = 1,3\sigma_s + 3,6 \quad (3)$$

Em que σ_s é a resistência ao cisalhamento com amostras saturadas em kPa e τ_c é a tensão crítica de cisalhamento do solo em Pa.

De acordo com Yan et al. (2008) a erodibilidade em sulcos é um parâmetro chave para a predição da erosão em sulcos no modelo WEPP, como mostra a seguinte equação:

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \left(1 - \frac{cq}{T_c} \right) \quad (4)$$

em que:

D_r – taxa de desagregação em sulco ($\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

K_r – erodibilidade do solo em sulcos ($\text{Kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$);

τ – tensão cisalhante do fluxo (Pa);

τ_c – tensão crítica de cisalhamento do solo (Pa);

c_q – produção de sedimentos no sulco ($\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$);

T_c – capacidade de transporte de sedimentos ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$).

Nos processos dinâmicos na erosão do solo, os efeitos da erodibilidade do solo (K_r) desempenham um grande papel, quanto maior for o valor de K_r , mais partículas do solo são desprendidas e, portanto, mais material do solo é arrastado em água que flui a partir das secções dos sulcos. Por conseguinte, existe um aumento rápido no valor da carga dos sedimentos transportados no fluxo d'água, pela capacidade de transporte que é alcançada mais rapidamente. Quando a carga de sedimento tende de atingir a capacidade de transporte, a intensidade da erosão é reduzida a jusante (YAN et al., 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na Fazenda Cedro, inserida na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu, parte setentrional da microrregião do Pajeú, município de Serra Talhada – PE (Figura 3), limitando geograficamente, ao norte, com o Estado da Paraíba, ao sul, com o município de Floresta, ao leste com os municípios de Calumbi, Betânia e Santa Cruz da Baixa Verde e, na parte oeste, com os municípios de São José do Belmonte, Mirandiba e Carnaubeira; nas coordenadas com latitude de 7°58'58.55" sul e longitude de 38°25'51,36" oeste.

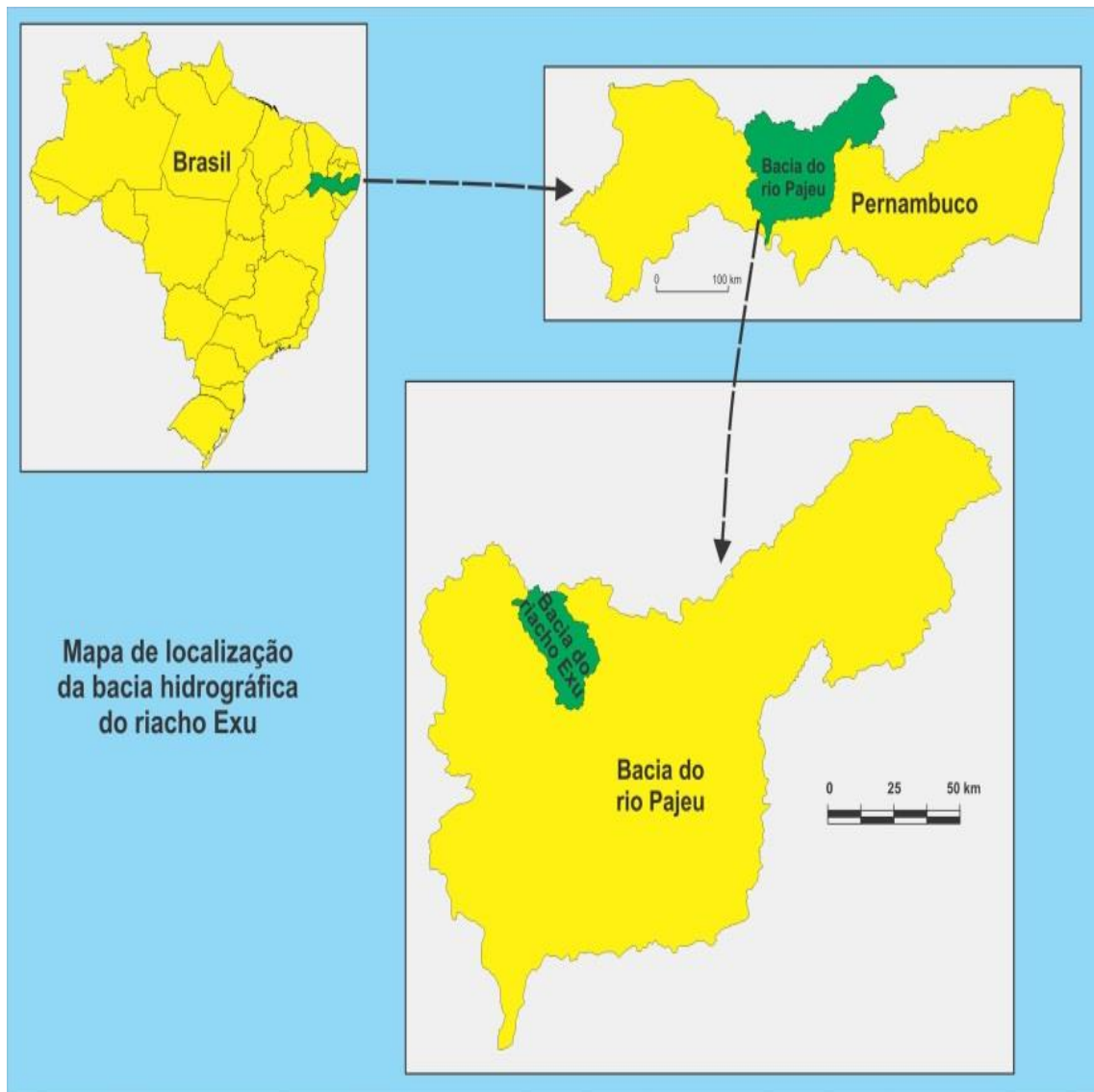


Figura 3 – Mapa de localização da área de estudo Bacia Hidrográfica do Riacho Exu (Fazenda Cedro) Serra Talhada – PE.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen é do tipo BSw_h, denominado semiárido quente e seco, com chuvas de verão-outono, com precipitação pluviométrica média anual de 484,06 mm ano⁻¹ para o período de 1992 a 2007 (PERNAMBUCO, 2015) e temperatura média anual superior a 25° C com chuva de verão que se atrasam para o outono e estende-se até abril (MASCARENHAS et al., 2005). A cobertura vegetal é composta basicamente pelo bioma caatinga, apresentando grande variedade de paisagens, grande variedade de paisagens, grande riqueza biológica e endemismo. A ocorrência de secas estacionais e periódicas estabelece regimes intermitentes aos rios e deixa a vegetação sem folhas.

3.2 PARÂMETROS FÍSICO-HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA SEMIÁRIDA DO RIACHO EXU

Foram elaborados mapas a partir de imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) SC.24-X-A com resolução espacial recalculada para 30 metros, para caracterização e determinação dos parâmetros físico-hídricos do Riacho Exu, utilizando o software ArcGis 9.1 com projeção UTM, Datum WGS-1984 (Zona 24S).

A descrição geomorfológica da bacia foi baseada e descrita em função das seguintes características físicas: 1) área da bacia, que corresponde a todo conjunto do sistema de drenagem fluvial, disposta em plano horizontal; e 2) o perímetro da bacia, que corresponde a uma representação do contorno da linha imaginária ao longo do divisor de águas.

3.2.1 Rede de drenagem e ordem dos canais da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu

A rede de drenagem foi obtida utilizando o aplicativo Hydrology. O sistema de drenagem da bacia é de 5ª ordem (Figura 4) em função da classificação e hierarquização para sistemas de drenagem proposto por Strahler, 1957.

Quanto a classe de declividade (Figura 5) foram geradas automaticamente através do processamento das imagens SRTM utilizando o aplicativo Spatial Analyst do ArcGis 9.1. As classes de declividade foram separadas em seis intervalos distintos, conforme sugeridos pela EMBRAPA (1979), como mostrado na tabela 1.

Tabela 1 – Classificação da declividade da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu.

Declividade	Discriminação
0 – 3	Relevo plano
3 – 8	Relevo suavemente ondulado
8 – 20	Relevo ondulado
20 – 45	Relevo fortemente ondulado
45 – 75	Relevo montanhoso
>75	Relevo fortemente montanhoso

Fonte: EMBRAPA (1979)

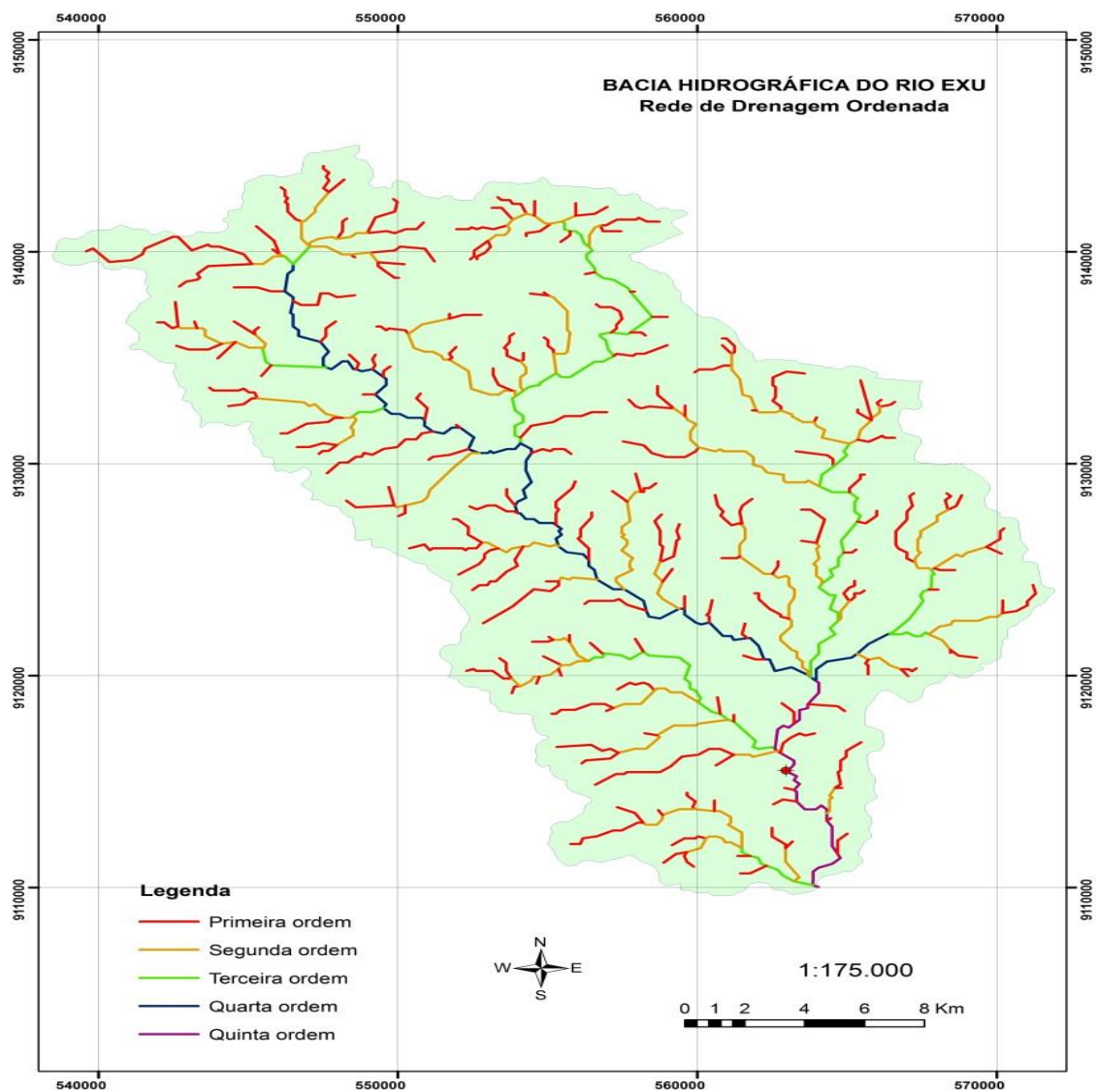


Figura 4 – Rede de drenagem mostrando a ordem dos cursos d'água da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu, Serra Talhada – PE.

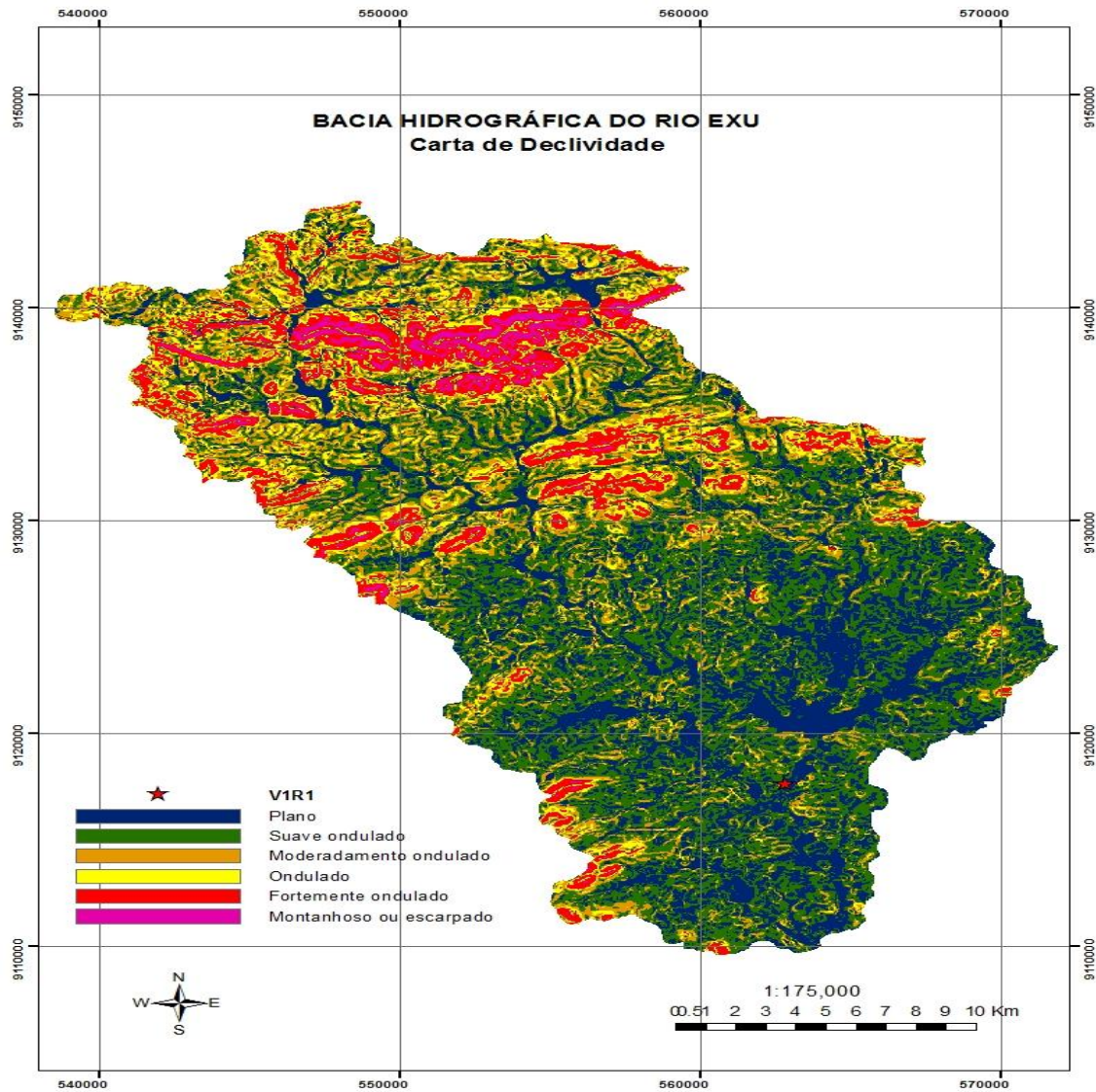


Figura 5 – Carta de declividade da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu, Serra Talhada – PE

3.2.2. Caracterização da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu

Os parâmetros físico-hídricos e morfométricos da Bacia Hidrográfica do Riacho Exu são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros físico-hídricos e morfométricos da Bacia Hidrográfica Semiárida do Riacho Exu, Serra Talhada – PE.

Parâmetros	Valor
Área	579,40 Km ²
Perímetro	138,89 Km
Comprimento do eixo da bacia	38,45 Km
Fator forma	0,3876
Comprimento do canal principal	58,09 Km
Comprimento do canal principal rebatido	38,71 Km
Número de canais da bacia	350 canais
Número de canais de 1ª ordem	176 canais
Número de canais de 2ª ordem	40 canais
Número de canais de 3ª ordem	10 canais
Número de canais de 4ª ordem	2 canais
Número de canais de 5ª ordem	1 canal
Comprimento total dos canais	443,55 Km
Comprimento médio dos canais	1,27 Km
Densidade de drenagem	0,77 Km Km ⁻²
Densidade hidrológica	0,61 canais Km ⁻²
Coeficiente de compacidade	1,62
Maior altitude da bacia	1006m
Menor altitude da bacia	400m
Amplitude altimétrica da bacia	606m
Declividade do canal principal	15,65 m /Km
Índice de sinuosidade	1,50
Tempo de concentração	7,08 horas

Fonte: Santos (2013)

3.2.3 Vegetação e uso do solo da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu

O mapa de vegetação e uso do solo da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu (Figura 6) foi elaborado a partir de uma fotointerpretação de uma composição colorida falsa cor de imagens LANSAT-TM, tornando possível detectar as extensões correspondentes a solos descobertos, cultura de subsistência, caatinga rala e vegetação arbustiva (Tabela 3).

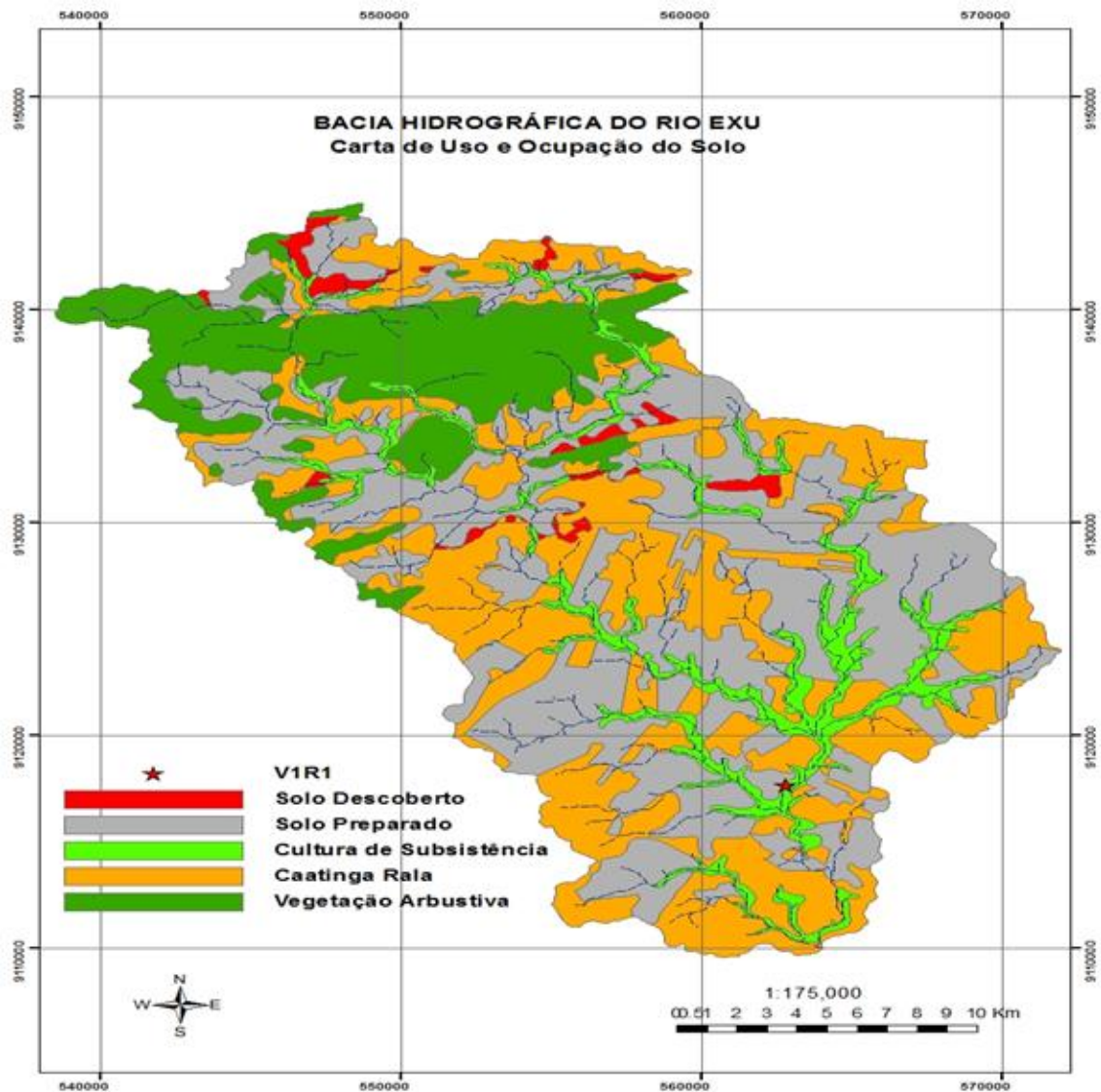


Figura 6 – Carta de vegetação e uso da Bacia Hidrográfica Semiárida do Riacho Exu, Serra Talhada – PE.

Tabela 2 – Distribuição de uso do solo da Bacia Hidrográfica do Riacho Exu, Serra Talhada – PE.

Uso do solo	Área (Km ²)	%
Solo descoberto	10,22	1,76
Solo preparado	222,88	38,47
Cultura de subsistência	55,70	9,61
Caatinga rala	187,17	34,03
Caatinga arbustiva	93,40	16,12
Total	579,40	100,00

Em função da distribuição das classes de uso do solo verifica-se que as áreas de solo preparado se constituem na maior parte da categoria (38,47%) seguido da caatinga rala (34,03%), caatinga arbustiva (16,12%), cultura de subsistência (9,61%) e solo descoberto (1,76%). O preparo do solo para as práticas agrícolas na região semiárida de Pernambuco, geralmente inicia-se com a queimada da vegetação nativa (caatinga) favorecendo de uma forma geral a diminuição da cobertura vegetal, com conseqüente diminuição da rugosidade e porosidade total da camada preparada. Deixando o solo exposto à energia cinética da chuva, diminuindo a infiltração de água e aumentando o escoamento superficial (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012) com o conseqüente aumento dos processos erosivos na erosão hídrica (COGO, 1981).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO NA ÁREA DO EXPERIMENTO DA BACIA HIDROGRÁFICA SEMIÁRIDA DO RIACHO EXU

No local do experimento ocorrem **NEOSSOLO FLÚVICO** de acordo com a classificação da EMBRAPA (2013).

Para a caracterização física e de fertilidade do Neossolo Flúvico foram coletadas amostras nas profundidades de 0-10 cm e depois de seco ao ar, destorroado, homogeneizado e passado em malha de 2mm foram submetidas as análises.

A caracterização física (Tabela 4) foi realizada de acordo com o procedimento da EMBRAPA (1997), foram determinados a densidade do solo (Ds) pelo método do torrão parafinado, a densidade de partículas (Dp) de acordo com o método balão volumétrico e a composição granulométrica pelo método do densímetro.

Tabela 3 – Características Físicas da camada de 0 – 10 cm de profundidade do Neossolo Flúvico da Bacia Hidrográfica Semiárida do Riacho Exu, Serra Talhada – PE.

Análise Granulométrica			Classificação		
Areia	Silte	Argila	Textural	Dp	Ds
.....(%).....				(g/ cm ⁻³)	
59	21	20	Franco Arenoso	2,51	1,41

As análises de fertilidade (Tabela 5) foram realizadas as determinações dos teores de cálcio e magnésio por meio da Complexometria com EDTA, o sódio e o potássio por meio de fotometria de chama, a matéria orgânica por oxidação via úmida com dicromato de potássio e o fósforo de acordo com o Manual de Análises do Solo da EMBRAPA (1997).

Tabela 4 – Características de Fertilidade da camada de 0 – 10 cm profundidade do Neossolo Flúvico da Bacia Hidrográfica Semiárida do Riacho Exu, Serra Talhada – PE.

pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	K ⁺	Na ⁺	P	Matéria Orgânica
(cmolcKg ⁻¹).....			...(cmolc ^{dm} ⁻³)....		(mg dm ⁻³)	(g Kg ⁻¹)
7,10	7,10	4,6	0,00	2,03	0,52	286	15,0

3.4 DETERMINAÇÃO DAS TAXAS DE EROÇÃO EM SULCOS PRÉ-FORMADOS

O experimento foi realizado no mês de outubro de 2014 em área experimental preparada manualmente (Figura 7) para esta finalidade, mobilizando o solo na camada superficial até 10cm. As parcelas experimentais consistiram em sulcos pré-formados (Figura 8) com o uso de uma enxada, utilizando-se da extremidade cortante e mantendo-se a inclinação natural do terreno. As dimensões dos sulcos foram de 5m de comprimento, no sentido da maior pendente, 6cm de profundidade e 5cm de largura, delimitados superior e lateralmente pela colocação de chapas metálicas de zinco com 30cm de altura, dos quais 15cm foram enterrados.



Figura 7 – Preparação dos sulcos pré-formados na área experimental para a obtenção de dados de erosão.

Os 16 sulcos pré-formados foram divididos em quatro blocos de quatro sulcos e imediatamente submetidos aos testes de erosão em sulcos, com a aplicação dos diferentes níveis de vazão de forma casualizada em cada bloco, sendo realizado um teste por vez. Os tratamentos consistiram na aplicação de diferentes níveis de vazão, conforme a seguir:

T1= 5,87 Lmin⁻¹;

T2= 12,10 Lmin⁻¹;

T3= 20,33 Lmin⁻¹;

T4= 27,57 Lmin⁻¹.

Os testes experimentais tiveram duração de 20 minutos (CANTALICE, 2002) com a aplicação de diferentes vazões em cada sulco. As vazões foram determinadas segundo dados de precipitação e período de retorno de 100 anos, de acordo com Molinier et al. (1994). A água foi conduzida aos sulcos por gravidade e através de uma mangueira de polietileno calibrada, proveniente de um reservatório com capacidade de 1000 litros, mantido sob carga constante com a água de uma cisterna próximo à área experimental.

Na extremidade superior dos sulcos foram enterrados dissipadores de energia na forma de recipientes plásticos circulares, de forma que a borda superior do recipiente ficasse no nível da superfície do solo. Nesses recipientes foram introduzidas mangueiras condutoras de água, que chegavam aos sulcos pelo transbordamento dos recipientes. Na extremidade inferior dos

sulcos foi instalada uma calha coletora metálica, para auxiliar na coleta das amostras de descargas líquida e sólida.



Figura 8 – Vista parcial de sulco pré-formado, dissipador de energia e calha de sedimentos nos testes de erosão em sulcos.

Durante a execução do experimento a água percorria o solo no sentido do declive até a parte inferior onde se encontrava a calha coletora. Na extremidade de cada calha coletora foram coletadas as amostras do escoamento a cada 5 minutos em proveta com capacidade de 1000ml a fim de verificar o volume coletado, sendo em seguida o volume transferido para potes plásticos com capacidade de 1 litro, devidamente identificados e vedados sendo posteriormente acondicionados em grades para serem transportados ao Laboratório de Manejo e Conservação do Solo e Água da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

Em fichas técnicas padronizadas foram registrados no local do experimento informações como: data, identificação do sulco, vazão, identificação da amostra, numeração de potes, velocidade de escoamento, temperatura da água, dados necessários para a determinação dos parâmetros hidráulicos a serem analisados.

3.4.1 Determinação dos parâmetros hidráulicos

O escoamento superficial em sulco foi obtido através da cronometragem do tempo gasto pelo corante azul de metileno percorrendo a distância de 3 metros centrais dos sulcos, os valores da velocidade superficial obtidos foram expressos em ms^{-1} . As velocidades superficiais (V_s) foram medidas de 3 em 3 minutos, a partir da formação da lâmina de escoamento, e no mesmo intervalo foram determinadas a descargas líquida e sólida. A velocidade média do escoamento superficial (ms^{-1}) foi obtida multiplicando-se os valores registrados durante os testes de velocidade superficial por $\alpha = 0,6$ que é um fator de correção atribuído às variações da velocidade do escoamento superficial com a profundidade do escoamento decorrente do atrito com o solo (LAFAYETTE et al., 2011).

3.5 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DE CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL NOS SULCOS DE EROSÃO

As determinações da área, perímetro molhado e raio hidráulico foram obtidas utilizando o perfilômetro (Figura 9), através das medições das seções transversais do fluxo do sulco, sendo o mesmo constituído de 30 hastes plásticas espaçadas de 0,02 m, e acopladas a uma estrutura retangular de acrílico com 0,8 m de comprimento e 0,4 m de altura. Foram realizadas duas medições a primeira com 4 minutos antes do início do teste e a segunda 4 minutos antes do termino do teste. As medições no sulco foram localizadas a 50 cm da entrada e a 50 cm da saída do sulco.

Com o perfilômetro nivelado e na posição vertical, foi transportado para junto do sulco na posição descrita acima, em seguida, soltaram-se suavemente as hastes plásticas até a superfície do solo, para depois serem fixadas as estruturas, desenhando desta maneira a forma da seção transversal do sulco retratado em cartolina colocada entre as hastes plásticas e a estrutura de acrílico, e desenhadas as dimensões dos sulcos com pincel atômico em escala real (Figura 10).

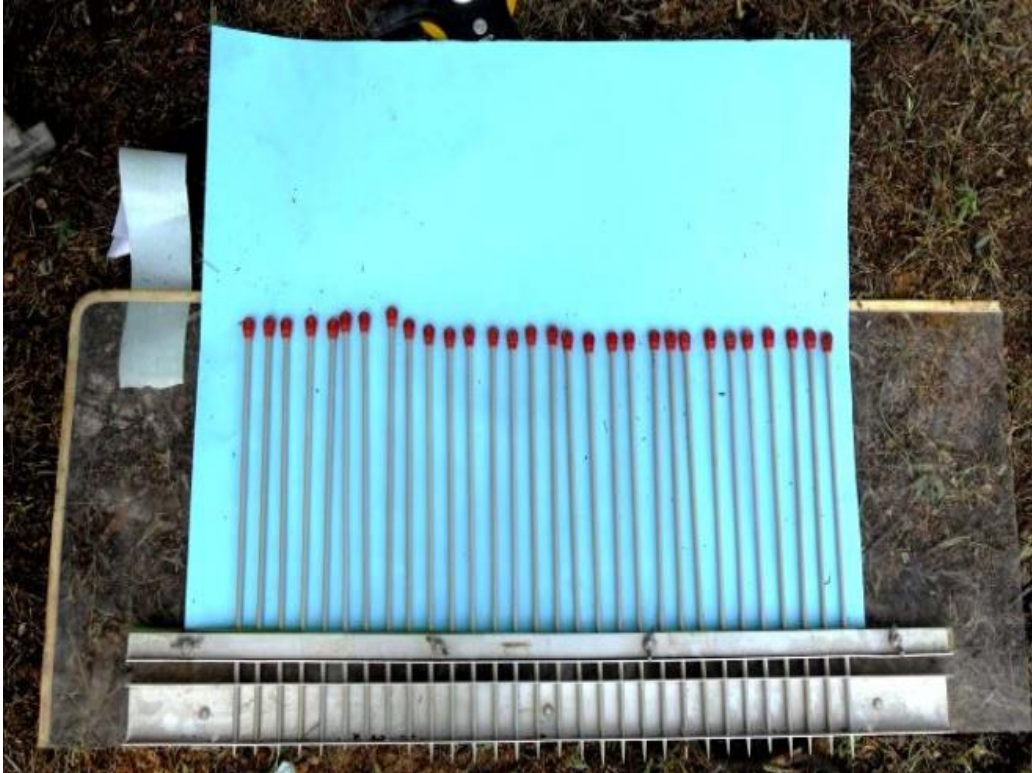


Figura 9 – Perfilômetro nivelado e na posição vertical sobre as chapas metálicas e estruturas de acrílicos que o sustentam.



Figura 10 – Formas das seções transversais dos sulcos retratadas em folhas de cartolina utilizando-se o perfilômetro.

Os cálculos das respectivas áreas dos sulcos foram realizados no Laboratório de Manejo e Conservação do Solo e Água da UFRPE, utilizando um planímetro mecânico constituído de duas hastes articuladas que percorre o contorno da figura no sentido horário voltando ao ponto de partida, para depois calcular a área através de uma relação matemática em função do valor obtido na calibragem do equipamento ao percorrer uma área de 50 cm².

Na medição do perímetro do canal foi utilizado o curvímeter analógico. O perímetro da seção quando combinado com a área da seção transversal dos sulcos, fornecem o raio hidráulico utilizado para o cálculo da tensão de cisalhamento do fluxo a partir da fórmula descrita abaixo:

$$Rh = \frac{A}{P} \quad (5)$$

em que:

Rh – raio hidráulico da seção transversal (m);

A – área da seção transversal (m²);

Pm – perímetro molhado da seção transversal (m).

A rugosidade hidráulica nos sulcos foi obtida pela determinação do coeficiente de Fricção de Darcy-Weisback (f) na forma da equação abaixo:

$$f = \frac{8gRhS}{V^2} \quad (6)$$

em que:

f – fator de perda de carga (adimensional);

g – aceleração da gravidade (ms⁻²);

Rh – raio hidráulico (m);

S – declividade do terreno (mm⁻¹);

V – velocidade média do escoamento superficial (ms⁻¹).

O número de Reynolds (Re) foi determinado conforme Simons e Senturk (1992) através da equação 7.

$$Re = \frac{V_m \cdot R_h}{\nu} \quad (7)$$

em que:

Re – número de Reynolds (adimensional);

V_m – velocidade média do escoamento superficial (ms^{-1});

R_h – raio hidráulico da seção transversal do sulco (m);

ν – viscosidade cinemática da água (m^2s^{-1}).

A velocidade cinemática foi determinada pela utilização da equação 8 segundo Julien (1995) sendo a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) aferida por meio de um termômetro em cada experimento.

$$\nu = [1,14 - 0,031 (T - 15) + 0,00068 (T - 15)^2] \times 10^{-6} (\text{m}^2\text{s}^{-1}) \quad (8)$$

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

O número de Froude (Fr) foi obtido pela expressão 9 de acordo com Simons e Senturk (1992):

$$Fr = \frac{V_m}{\sqrt{gR_h}} \quad (9)$$

em que:

Fr – número de Froude (adimensional);

V_m – velocidade média do escoamento superficial (ms^{-1});

g – aceleração da gravidade (ms^{-2});

R_h – raio hidráulico da seção transversal do sulco (m).

Os escoamentos superficiais dos fluxos dos canais abertos gerados na erosão em sulcos nos testes de experimentos com as diferentes vazões aplicadas foram classificados de acordo com o esquema abaixo (Figura 11), de acordo com a magnitude dos números de Reynolds e de Froude.

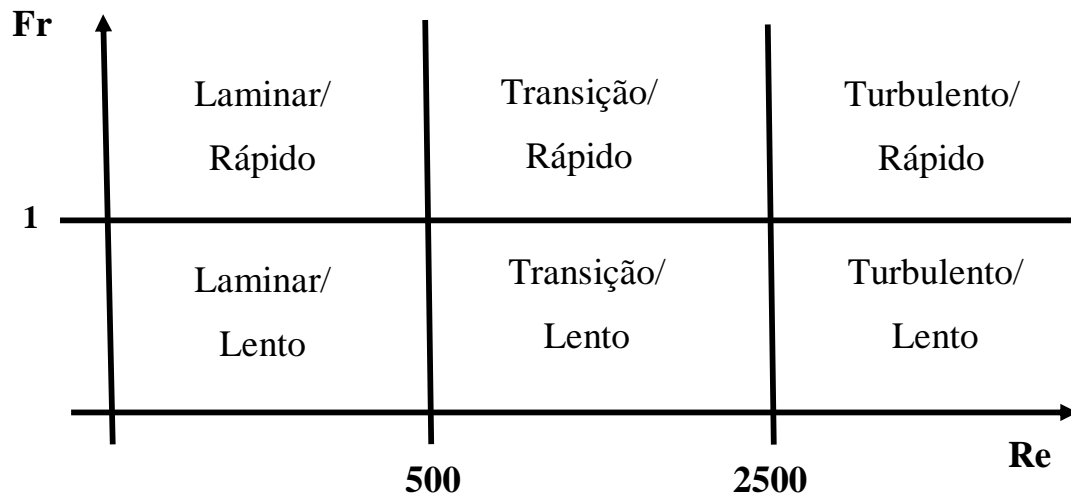


Figura 11 – Esquema de classificação dos regimes de escoamentos superficiais gerados durante os diferentes fluxos crescentes aplicados.

Fonte: Simons e Senturk, 1992.

As tensões cisalhantes do fluxo nos sulcos de erosão foram determinadas reconhecendo como verdadeiro que na erosão em sulcos com a adição de vazões, a carga de sedimentos é muito maior que a capacidade de transporte, foi por tanto, empregada a equação 10 da capacidade de desagregação do escoamento em sulcos (D_c), para a determinação das taxas de desagregação do escoamento, expressa de acordo Elliot et al. (1989).

$$D_c = K_r (\tau - \tau_c) \quad (10)$$

em que:

D_c – capacidade de desagregação do solo pelo fluxo dos sulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

K_r – erodibilidade do solo em sulcos ($\text{Kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$);

τ_c – tensão crítica de cisalhamento do solo (Pa);

τ – tensão cisalhante do escoamento (Pa) sendo obtida através da equação:

$$\tau = \gamma RhS \quad (11)$$

em que:

γ – peso específico da água (N m^{-3});

Rh – raio hidráulico do sulco (m);

S – declividade do sulco (m m^{-1}).

A expressão 12 foi utilizada para calcular as perdas totais de solo a partir dos dados de concentração instantânea de sedimentos do escoamento superficial e da taxa de descarga líquida, conforme utilizada por Cantalice (2002); Bezerra (2007) e Piscoya (2012).

$$PS = \frac{\sum Q_{in} C_{in} t}{A} \quad (12)$$

em que:

PS – perda total do solo (Kg m^{-2});

Q_{in} – taxa de descarga líquida (L m^{-1});

C_{in} – concentração do sedimento (Kg L^{-1});

t – intervalo entre as amostragens (min);

A – área do sulco (m^2).

No Laboratório de Manejo e Conservação do Solo e Água as oitenta amostras do escoamento superficial que estavam acondicionadas em potes plásticos com as descargas líquida e sólidas ficaram em repouso por aproximadamente cinco dias para que ocorresse a sedimentação das partículas, e em seguida os potes foram pesados com o sedimento depositado no fundo. Posteriormente, os potes foram levados à estufa com temperatura de 65°C , por um período de 72 horas, ou até a secagem completa dos sedimentos. Depois dos recipientes com os sedimentos totalmente seco (Figura 12) pesaram-se novamente os potes para obtenção da massa de sedimento, no qual foi expressa em grama (g).

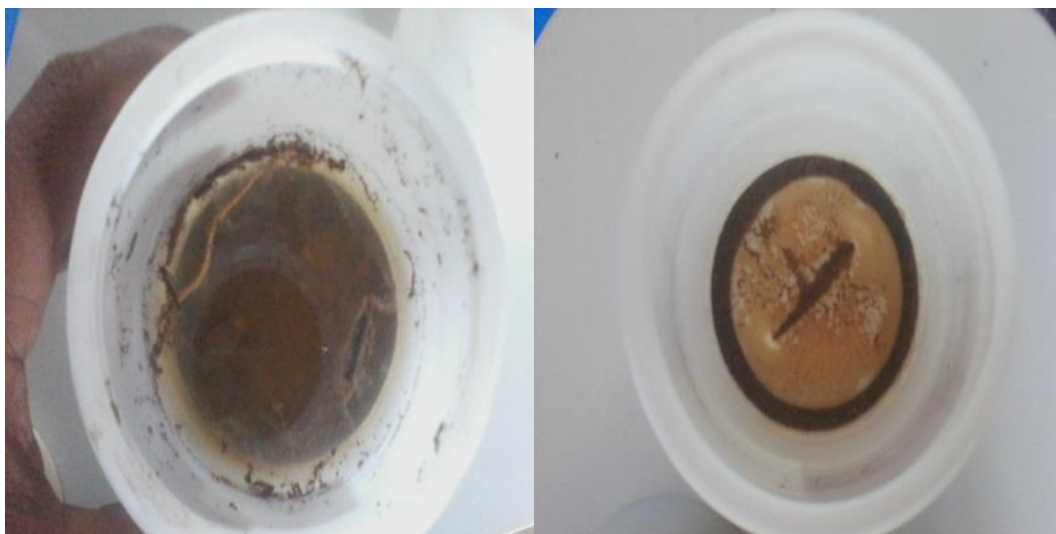


Figura 12 – Recipiente plásticos com descarga líquida e sólida antes e após a secagem completa

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO EXPERIMENTO EM SULCOS PRÉ-FORMADO

O experimental utilizado foi o de blocos casualizados no qual se utilizou as médias referentes às repetições dos tratamentos. E os resultados obtidos da erosão em sulcos foram analisados com o Programa estatístico SAS Learning edition 2.0. As comparações entre as médias obtidas foram realizadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância. Na análise de regressão dos dados utilizou-se o programa computacional Excel, onde obteve o reajuste das equações de cada regressão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DO ESCOAMENTO NOS SULCOS PRÉ-FORMADOS EM NEOSSOLO FLÚVICO

Durante a realização do experimento foram constatados os processos erosivos característicos da erosão em sulcos, como a desagregação do solo na área do perímetro molhado do sulco, os desmoronamentos das paredes laterais dos sulcos e a desagregação intensa nos pontos de maior turbulência do escoamento superficial, formando desníveis no leito do sulco. A desagregação intensa em pontos localizados, caracterizados pela formação de degraus no leito dos sulcos, foram observados ao longo de todos os testes com a aplicação das diferentes vazões. Sendo que nas maiores vazões, esse processo foi mais intenso e de melhor visualização, com formação de degraus maiores e que se deslocavam em sentido contrário ao do escoamento (Figura 13).



Figura 13 – Desmoronamento das paredes laterais dos sulcos e desagregação intensa em pontos de maior turbulência do escoamento

Considerando os dados da tabela 6 relacionados aos valores médios da descarga líquida (Q), velocidade de escoamento (V_m), declividade das parcelas (S), Número de Reynolds (Re), Número de Froude (Fr) e a rugosidade hidráulica (f) para cada vazão aplicada em fluxos

crecentes. Verifica-se, portanto, em relação aos crescentes fluxos aplicados aos sulcos, que ocorre o aumento da descarga líquida, e que de uma forma em geral averígua-se uma diferença significativa nos fluxos aplicados. Entretanto, para os menores valores (5,87 e 12,10 Lmin⁻¹) e para os maiores valores (20,33 e 27,57 Lmin⁻¹) aplicados, que estatisticamente, não apresentaram diferenças significativas entre os valores obtidos. Ainda, com os crescentes aumento dos fluxos teve-se um aumento na velocidade média do escoamento, não havendo diferença significativa entre as mesmas, ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Para todos os fluxos aplicados nos sulcos foi obtida uma relação fundamentada entre a velocidade média e a descarga líquida dos sulcos, cujos resultados estão apresentados na figura 14. Cada ponto significa a média das velocidades média do escoamento com a suas respectivas descargas líquidas médias que foram alcançadas, produzindo um assim um ajuste para o modelo de potência correspondente a:

$$V = 0,113 Q^{0,346} \quad R^2 = 0,69 \quad (013)$$

Onde V_m = velocidade média do escoamento (m s⁻¹) e Q = descarga líquida dos sulcos (L s⁻¹). Relação semelhante foi instituída por Piscoya (2012) em teste de erosão em sulcos realizado em um Cambissolo, que encontrou expoente correspondente a 0,083, e um coeficiente de 0,331. Bezerra (2007) também determinou essa mesma relação em Cambissolo na região semiárida em sulcos com expoente de 0,393 e um coeficiente de 0,150 para descarga líquida em Lmin⁻¹.

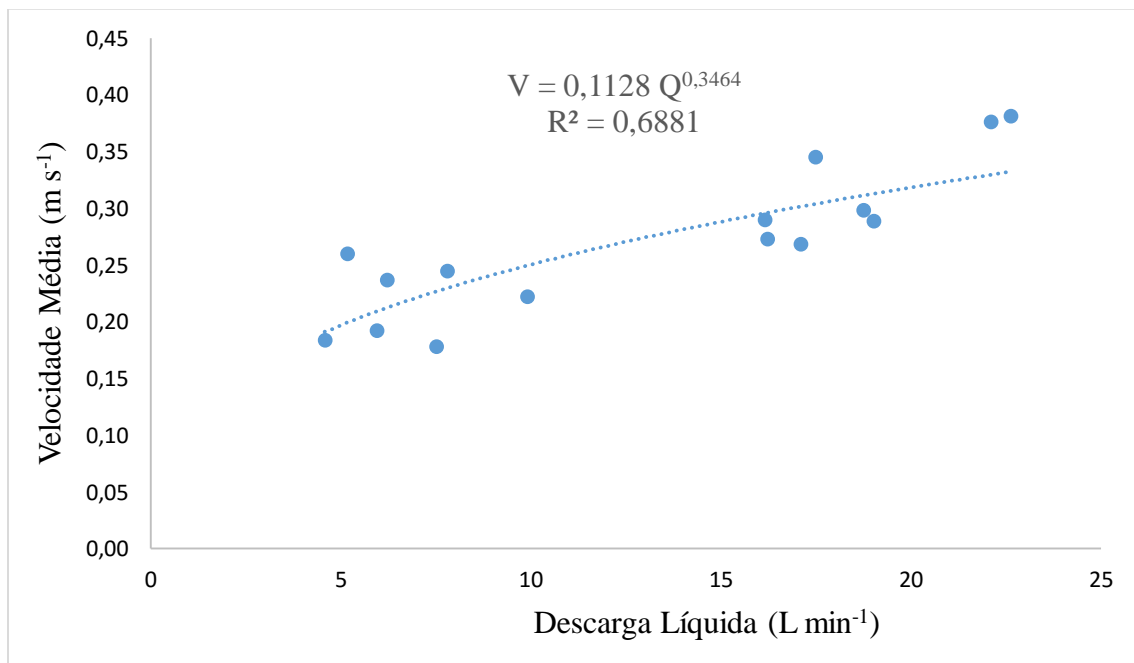


Figura 14 – Relação entre as velocidades médias e as vazões obtidas dos sulcos gerados pelos fluxos crescentes aplicados sobre o Neossolo Flúvico estudado.

O aumento crescente da vazão aplicada aos sulcos e com o aumento da velocidade média do escoamento provoca o desabamento das paredes laterais dos sulcos, e conseqüentemente, o aumento do perímetro molhado sendo que a concentração do escoamento nos canais causa um maior transporte de sedimento que é verificado no escoamento superficial.

Observa-se que os valores da rugosidade hidráulica obtidos pelo coeficiente de Darcy-Wiesbach não apresentaram diferenças significativas, mas verifica-se que nos maiores fluxos aplicados houve uma redução da rugosidade hidráulica, e que por outro lado nos menores fluxos houve aumento da rugosidade. De acordo com Trout (1992), a rugosidade dos sulcos é criada pelos agregados do solo e pelas irregularidades na forma do sulco, sendo que uma vez o tamanho, a forma e o arranjo dos aglomerados do solo poder ser alterados pelo movimento da água, e por isso, o solo poderá ter sua rugosidade modificada. Em relação a declividade, foi observado que não houve diferenciação estatística significativa, sendo que na primeira vazão e nas duas últimas aplicadas foram obtidos os mesmos valores de declividade (Tabela 6), demonstrando a homogeneidade quanto a declividade no experimento.

Tabela 6 – Variáveis hidráulicas dos fluxos aplicados aos sulcos pré-formados sobre o Neossolo Flúvico da Bacia Hidrográfica Semiárida do Riacho Exu, para a avaliação em sulcos.

Variáveis Hidráulicas	Fluxos aplicados aos sulcos (Lmin⁻¹)			
	5,87	12,10	20,33	27,57
Q (L min⁻¹)	5,12 B	7,86 B	17,22 A	20,15 A
Vm (ms⁻¹)	0,18 B	0,22 B	0,30 B	0,33 B
S (m m⁻¹)	0,06 A	0,07 A	0,06 A	0,06 A
Re (adm)	2019,52 B	3210,11 B	5324,82 A	6929,97 A
Fr (adm)	0,48 A	0,65 A	0,80 A	0,82 A
log f (adm)	1,14 A	1,43 A	0,85 A	0,61 A

Médias seguidas de letras maiúsculas na mesma linha não diferem entre si, ao nível de 5% de significância, pelo teste de Tukey. Q= descarga líquida; Vm= velocidade média do escoamento; S= declividade média das parcelas em sulcos; Re= número de Reynolds; Fr= número de Froude; log f= rugosidade hidráulica (coeficiente de Darcy-Weisbach).

Além disso na tabela 6 constam as condições hidráulicas dos escoamentos superficiais atingidos nos sulcos pré-formados. Considerando-se os valores obtidos para o número de Reynolds houve diferenças significativas, sendo para os menores fluxos (5,87 e 12,10 Lmin⁻¹) e os maiores fluxos (20,33 e 27,57 Lmin⁻¹) não apresentaram diferenças significativas ao nível de 5% do teste de Tukey. Constata-se que em relação ao número de Froude os valores registrados não apresentaram diferença significativa para os fluxos crescentes aplicados. Portanto, os regimes de escoamentos para os maiores fluxos aplicados entre 12,10 Lmin⁻¹ e 27,57 Lmin⁻¹ os valores do número de Reynolds mostram-se entre 3.210, 11 a 6.929,97, à medida que o número de Froude obtidos para todos os escoamentos estiveram abaixo de 1, desta forma, pode-se confirmar que o regime de escoamento é turbulento lento, que normalmente ocorre em erosão em sulcos (SIMONS e SENTURK, 1992; CANTALICE et al., 2005; KNAPEN; POENSEN, 2010; OLIVEIRA, 2010 e PISCOYA, 2012). Observa-se também que no menor fluxo aplicado (5,87 Lmin⁻¹) foi registrado número de Reynolds igual a 2.019,52 e número de Froude 0,48, caracterizando o regime de escoamento de transição lento (SIMONS; SENTURK, 1992; BEZERRA et al., 2010).

Pode-se observar que com as vazões crescentes aplicadas aos sulcos resultou na variação expressiva da Área (A), do Raio Hidráulico (Rh) e do Perímetro molhado (Pm) da seção transversal. Com aplicação dos fluxos crescentes foi estabelecida a área da seção transversal e perímetro molhado dos sulcos pré-formados, determinando-se uma relação através da seguinte expressão:

$$Pm = 2,090 A^{0,450} \quad R^2 = 0,99 \quad (14)$$

A equação 15 descreve a variação do raio hidráulico com a área da seção transversal dos sulcos pré-formados.

$$Rh = 0,562 A^{0,577} \quad R^2 = 0,99 \quad (15)$$

Na figura 15 observa-se que com o aumento da área da seção transversal dos sulcos ocorre uma gradual elevação do raio hidráulico, que é de necessária importância para a determinação das tensões de cisalhamento do escoamento nos sulcos. Portanto, verifica-se que o raio hidráulico e área dos sulcos pré-formados de erosão estão com uma relação altamente significativa com coeficiente de determinação de $R^2 = 0,99$. Esse valor torna-se semelhante ao encontrados por Piscoya (2012) com valor de coeficiente igual a 0,70 para um Cambissolo e Santos (2013) obteve valor de 0,92 em um Neossolo Litólico, ambos em região semiárida de Pernambuco. Sendo que esses valores citados estão acima dos registrados na literatura por outros pesquisadores que obtiveram valores com variação entre 0,51 a 0,57 (BRAIDA;

CASSOL, 1996; CANTALICE et al., 2005 e BEZERRA et al., 2010). Essas diferenças de valores podem estar relacionadas a construção dos sulcos ou a evolução da geometria dos sulcos em função principalmente, das diferenças textura do solo (GONÇALVES, 2008) e também pela erodibilidade do Neossolo que é facilmente erodido (SANTOS, 2013).

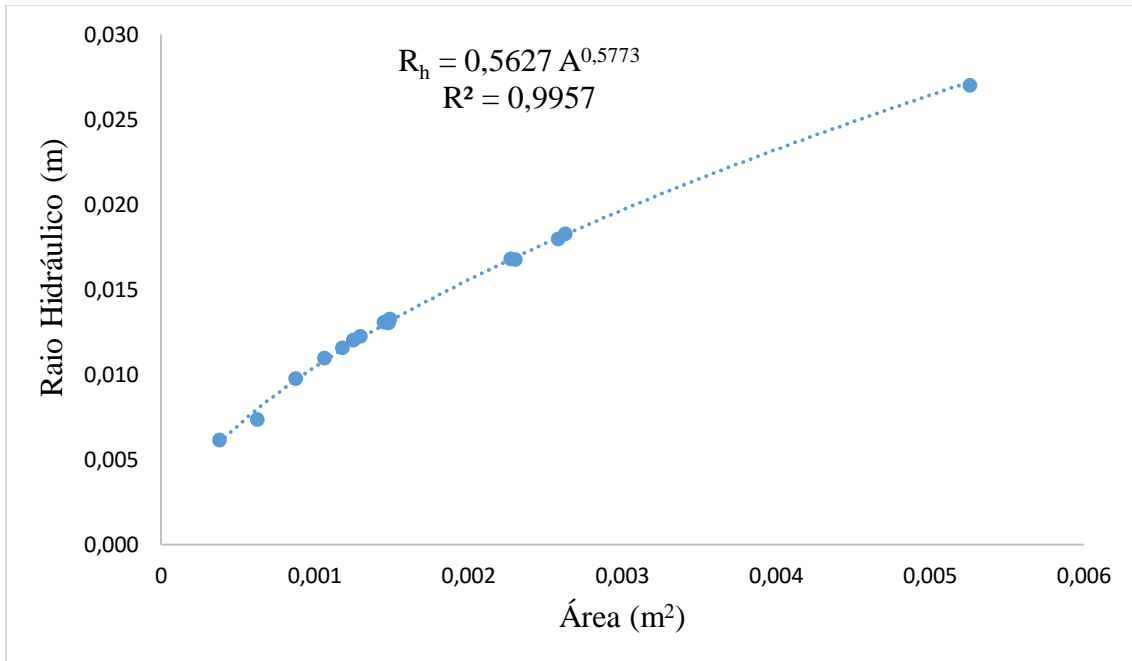


Figura 15 – Relação exponencial entre a área e o raio hidráulico dos sulcos gerados pelos fluxos crescentes aplicados na avaliação da erosão em sulcos sobre o Neossolo Flúvico estudado.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ERODIBILIDADE E TAXAS DE DESAGREGAÇÃO DO SOLO EM SULCOS PRÉ-FORMADOS EM NEOSSOLO FLÚVICO

Com as diferentes taxas crescentes de fluxos aplicados nos sulcos pré-formados verifica-se que na tabela 7 foram determinadas as médias referentes a tensão de cisalhamento (τ), taxa de desagregação do solo (D_r) e das perdas de solo. Ainda, com a observação da tabela, evidencia-se que com a aplicação das diferentes vazões ocorre o aumento da tensão cisalhante de forma significativa, sendo que entre os fluxos $12,10 \text{ Lmin}^{-1}$ a $27,57 \text{ Lmin}^{-1}$ estatisticamente não houve diferença entre si. Torna-se evidente que as tensões de cisalhamento foram responsáveis pelo aumento das taxas de desagregação do solo, esses dados podem ser constatados por outros autores como Cantalice et al. (2005); Bezerra (2007), Piscoya (2012) e Santos (2013).

Conforme Bezerra (2007) a desagregação do solo é causada pela tensão cisalhante do escoamento quando a mesma supera as condições de resistência ao início do movimento, tendo início a formação do sulco, e que a taxa de desagregação é determinada através do balanço entre a tensão de cisalhamento, a resistência da erosão das partículas e dos agregados do fundo. Constata-se ainda, que os elevados valores da taxa de desagregação ocorreram nos maiores fluxos crescentes aplicados e que não se diferenciam significativamente.

As perdas de solo foram maiores nos fluxos aplicados entre 12,10 Lmi⁻¹ a 27,57 Lmin⁻¹ e que os resultados das médias obtidas apresentam uma diferença significativa nos diferentes fluxos aplicados, como foram demonstrados através do teste de Tukey.

Tabela 7 – Parâmetros da erosão em sulcos obtidos nos sulcos pré-formados sobre o Neossolo Flúvico da Bacia Hidrográfica semiárida do Riacho Exu.

Parâmetros de erosão	Fluxos aplicados aos sulcos (Lm ⁻¹)			
	5,87	12,10	20,33	27,57
τ (Pa)	4,49 B	8,65 A	9,24 A	11,59 A
Dr (Kg m ⁻² s ⁻¹)	0,0027 B	0,0075 B	0,0080 A	0,0223 A
PS (t ha ⁻¹)	5,53 C	29,92 B	56,24 A	42,44 A

Médias seguidas de letras maiúsculas na mesma linha não diferem entre si, ao nível de 5% de significância, pelo teste de Tukey.

Em concordância com variados autores na literatura como Laflen e Thomas (1987), Flanagan et al. (2001) e Knapen e Poensen (2010) por meio da análise de regressão através das taxas de desagregação do solo (Dr) nos sulcos com as tensões cisalhante desenvolvidas pela aplicação crescentes dos fluxos foram obtidas a erodibilidade do solo (Kr) e a tensão crítica de cisalhamento (τ_c) do solo pelo escoamento superficial, dessa maneira, a erodibilidade em sulco (Kr) foi designada através do coeficiente angular de reta que define as relações entre a taxa de desagregação em sulco (Dr) e a tensão cisalhante (τ), que cujo valor obtido para o Neossolo Flúvico foi de 0,0011 kg N⁻¹s⁻¹ (Figura 16) e a tensão crítica de cisalhamento (τ_c) que representa o valor da tensão de cisalhamento quando a desagregação em sulco é igual a zero, ou seja, o intercepto da reta no eixo das abcissas ($t_c = -a/b$ ou intercepto em x para y=0) foi de 1,91 Pascal para um reajuste com R²= 0,80.

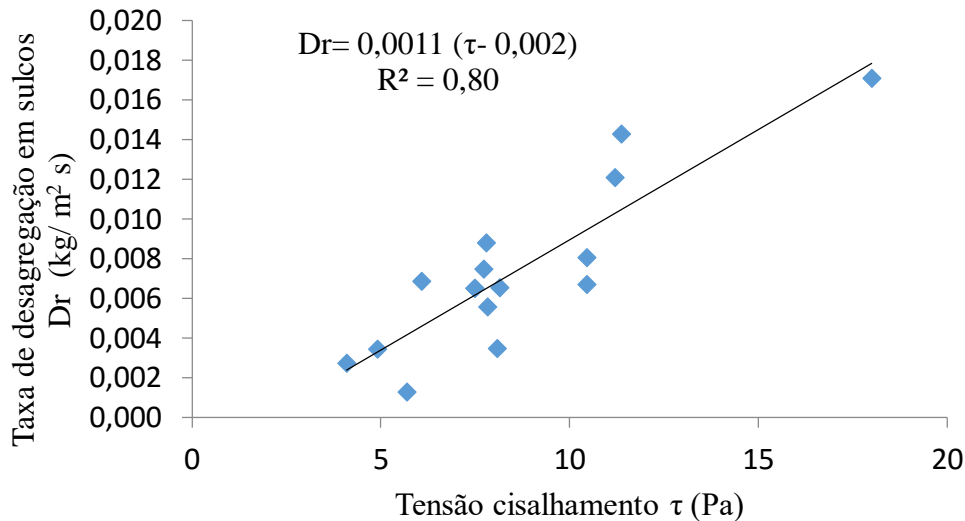


Figura 16 – Erodibilidade de um Neossolo Flúvico (Kr) em sulcos e a tensão crítica de cisalhamento (τ_c), obtidas a partir da regressão das taxas de desagregação do solo (D_r) com as respectivas tensões de cisalhamento do escoamento superficial gerados pelos fluxos crescentes aplicados.

O valor da erodibilidade em sulco obtido ($0,0011 \text{ Kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$) em Neossolo Flúvico foi considerado a metade do valor estabelecido para um Cambissolo por Piscoya (2012), que foi de $0,0021 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$, e por Bezerra (2007) que estabeleceu um valor de $0,0051 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$, valor esse mais elevado que o resultado obtido, ambos em solo da região semiárida. Valores maiores da erodibilidade em sulcos foram determinados por diversos autores em diferentes tipos de solo, Lafayette (2011) obteve valor de $0,0016 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ para um Latossolo, enquanto Braida e Cassol (1996) determinaram valores de $0,0104 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e Gonçalves (2008) obteve valor de $0,0268$, ambos para um Argissolo. O baixo valor da erodibilidade obtido explica-se pelo motivo que o solo da região semiárida serem menos desenvolvidos e mais raso do que os Latossolos e os Argissolos (Piscoya, 2012) e em virtude a restrição de água que dificulta a evolução do solo (BEZERRA, 2007).

O valor da tensão crítica de cisalhamento (τ_c) de $1,91 \text{ Pa}$ foi menor do que definido por Piscoya (2012), de $2,34 \text{ Pa}$; e sendo maior que o determinado por Bezerra (2007) com valor de $1,18 \text{ Pa}$, ambos em Cambissolo na região semiárida de Pernambuco. Valores maiores foram determinados por Shafer et al. (2001), que estabeleceram valor igual a $2,65 \text{ Pa}$; Cantalice et al. (2005), que determinaram valor de $2,75 \text{ Pa}$, ambos em Argissolos. Essas diferenças de valores são justificáveis pela composição granulométrica que o Neossolo Flúvico com bastante agregados, conferindo uma maior estrutura e resistência ao cisalhamento do escoamento superficial concentrado.

4 CONCLUSÕES

- Com o crescente fluxos aplicados nos sulcos pré-formados na área do experimento produziram escoamento superficial que caracterizou regimes de escoamento na faixa de turbulento lento, com número de Reynolds entre 3.210,11 – 6.929,97 e com número Froude abaixo de 1. No menor fluxo aplicado com número de Reynolds de 2.019,52 e número de Froude de 0,48 o regime de escoamento produzido foi de transição lento;
- O escoamento produzido no crescente fluxos aplicados nos sulcos aumentaram de forma significativa as tensões cisalhantes que foram verificadas pelas altas taxas de desagregação do solo;
- Os valores das perdas de solos variaram com o aumento dos diferentes fluxos aplicados nos sulcos, atingindo valor de 56,24 t ha⁻¹ no fluxo de 20,33 Lmin⁻¹;
- O valor da erodibilidade do solo em sulcos (Kr) foi de 0,0011 Kg N⁻¹s⁻¹ e a tensão crítica de cisalhamento (τ_c) foi de 1,91 Pa para o Neossolo Flúvico estudado.

REFERÊNCIAS

- ALBERTS, E. E. et al. Soil component. In: FLANANG, D.C.; NEARING, M. A. (Ed.). Water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation. West Lafayette: **United State Departamento of Agriculture/National Soil Erosion Research Laboratory**, 1995. p. 7.1 – 7.47 (NSERL Report, 10).
- ARAGÃO, R. et al. Parametrização do modelo KINEROS2 em uma bacia Sergipana. In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Campo Grande. Anais... Mato Grosso do Sul. 2009.p. 1- 20.
- AUERSWALD, K.; FIENER, P.; DIKAU, R. Rates of sheet and rill erosion in Germany - A meta-analysis. **Geomorphology**, v. 111, n. 3, p. 182-193, 2009.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8ª ed. São Paulo: Cone, 2012. p. 68 – 91.
- BEZERRA. S. A. **Transporte de sedimentos em sulcos de erosão experimentais no semi-árido Pernambucano**. 2007. 96 f. Tese (Doutorado em Ciência do solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife – PE, 2007.
- BEZERRA, S. A. et al. Características hidráulicas da erosão em sulcos em um cambissolo do semiárido do Brasil. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 34, p. 1325-1332, 2010.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Bookman, 2013.
- 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**, v. 20, n. 1, p. 127-134, 1996.
- BRUNO, C.; STEFANO, C. Di.; FERRO, V. Field investigation on rilling in the experimental sparacia area, South Italy. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 33, n. 2, p. 263-279, 2008.
- BULYGINA, N. S. et al. DWEPP: a dynamic soil erosion model based on WEPP source terms. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 32, n. 7, p. 998-1012, 2007.
- CANTALICE, J. R. B. **Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo**. 2002. 141f. Tese (Doutorado em Ciência do solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2002.
- 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**, 29:597-607, 2005.
- CERDA, A. Soil aggregate stability in three Mediterranean environments. **Soil technology**, v. 9, n. 3, p. 133-140, 1996.
- CERDAN, O. et al. Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. **Soil and Tillage Research**, v. 67, n. 1, p. 99-108, 2002.

CHANDRAMOHAN, T.; VENKATESH, B.; BALCHAND, A. N. Evaluation of three soil erosion models for small watersheds. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1227-1234, 2015.

CHEN, X. et al. Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method. **Catena**, 2015.

CHENG, Q.; CAI, Q.; LI, J. Summarization on study of soil surface crust or sealing and its effects on erosion [J]. **Progress In Geography**, v. 4, p. 013, 2005.

COGO, N.P. **Effect of residue cover, tillage induced roughness, and slope length on erosion and related parameters**. 1981. 346p. Tese. West Lafayette, Purdue University.

DIMOYIANNIS, D. G.; TSADILAS, C. D.; VALMIS, S. Factors affecting aggregate instability of Greek agricultural soils. **Communications in Soil Science e Plant Analysis**, v. 29, n. 9-10, p. 1239-1251, 1998.

DUIKER, S. W.; FLANAGAN, D. C.; LAL, R. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain. **Catena**, v. 45, n. 2, p. 103-121, 2001.

ELLIOT, W. J. et al. compendium of soil erodibility data from WEPP crop land soil field erodibility experiments 1987/88. West Lafayette: The Ohio State University/USDA-**Agricultural Research Service**, 1989. p. A2-A25. (NSERL Report, 3).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamentos e Conservação de solos. **Manual de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1979.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro. Ed Europa. 212 p., 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, 2013.

FILIZOLA, H. F. et al. Controle dos processos erosivos lineares (ravinas e voçorocas) em áreas de solos arenosos. Jaguariúna: **EMBRAPA Meio Ambiente**. Documento 22, 7p. 2011.

FOSTER, G.R.; FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A.; LANE, L.J.; RISSE, L.M.; FINKNER, S.C.. Hillslope erosion component. IN: **USDA. Water erosion prediction Project – WEPP**. West Lafayette: USDA – ARS – MWA – SWCS, 1995. Cap. 19, p. 11.1- 11.12. (Technical documentation NSERL, Report, 10).

FLANAGAN, D. C.; LIVINGSTON, S. J. WEPP USER summary document. NSERL Rep. No. 11. W. Lafayette. **USDA-Water Erosion Prediction Project**. 1995.

FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. **USDA-Water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation**. NSERL report, 1995.

FLANAGAN, D. C. et al. WEPP Model applications for evaluations of best management practices. **Notes**, 2010.

GELENCSEÁRA, G. et al. Comparison of the results of modelling soil loss with WEPP and USLE in the koppány valley, Hungary. In: **19th World Congress of Soil Science. 2010.**

GHEBREIYESSUS, Y. T. et al. Soil erosion by concentrated flow: shear stress and bulk density. **Transactions of the ASAE (USA)**, 1994.

GONÇALVES, F. A. Validação do modelo WEPP na predição de erosão hídrica para condição edafoclimática da região de Viçosa-MG. 2008. 116f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG, 2008.

GOVERNO DE QUEENSLAND. Prevenção e gestão de erosão/meio ambiente, terra e água/Governo de Queensland. Disponível em: <http://www.old.gov.au/environment/land/soi/management>. Acesso em: 18 de dezembro de 2013.

GOVERS, G.; GIMÉNEZ, R.; VAN OOST, K. Rill erosion: exploring the relationship between experiments, modelling and field observations. **Earth-Science Reviews**, v. 84, n. 3, p. 87-102, 2007.

GOVERS, G. et al. Evaluation of the WEPP model in a belgian agricultural watershed. **Journal of Environmental Science and Engineering**, v. 5, n. 2, 2011.

HERAS, M. M. et al. Water-related ecological impacts of rill erosion processes in Mediterranean-dry reclaimed slopes. **Catena**, v. 84, n. 3, p. 114-124, 2011.

IBÁÑEZ, J. et al. A model-based integrated assessment of land degradation by water erosion in a valuable Spanish rangeland. **Environmental Modelling e Software**, v. 55, p. 201-213, 2014.

INBAR, A. et al. Forest fire effects on soil chemical and physicochemical properties, infiltration, runoff, and erosion in a semiarid mediterranean region. **Geoderma**, v. 221, p. 131-138, 2014.

KEMPER, W.D.; KOCH, E.J. Aggregate stability of soils from the western portions of the United States and Canada. **U. S. Dep. Agric., Tech. Bull**, 1355. 1966.

KNAPEN, A.; POESEN, J. Soil erosion resistance effects on rill and gully initiation points and dimensions. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 35, n. 2, p. 217-228, 2010.

KNAPEN, A. et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 80, n. 1, p. 75-109, 2007.

LAFAYETTE, K. P. V.; CANTALICE, J. R. B.; COUTINHO, R. Q. Resistência à erosão em ravinas, em latossolo argiloarenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 2167-2174, 2011.

LAFOND, G. P. et al. Effects of tillage systems and rotations on crop production for a thin black chernozem in the Canadian prairies. **Soil and Tillage Research**, v. 89, n. 2, p. 232-245, 2006.

LAFLEN, J. M.; THOMAS, A. W.; WELCH, R. Cropland experiments for the WEPP project. **American Society of Agricultural Engineers (Microfiche collection) (USA)**. no. fiche no. 87-2544. 14 f, 1987.

LAI, Y.G. Watershed runoff and erosion modeling with a hybrid mesh model. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, n. 1, p. 15-26, 2009.

LANE, L. J. et al. Development and application of modern soil erosion prediction technology: the USDA experience. **Eurasian soil science**, v. 30, n. 5, p. 531-540, 1997.

LEI, T.W. et al. Laboratory study on sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion. **Transactions of the ASAE** V.44 n.6, p. 1537-1542. 2001.

LOPES, V. L.; CANFIELD, H. E. Effects of watershed representation on runoff and sediment yield modeling. v.40, n.2, p.311 - 319. 2004.

MANCILLA, G. A.; CHEN, S.; MCCOOL, D. K. Rill density prediction and flow velocity distributions on agricultural areas in the Pacific Northwest. **Soil and tillage Research**, v. 84, n. 1, p. 54-66, 2005.

MARIOTI, J. et al. Erosão hídrica em semeadura direta de milho e soja nas direções da pendente e em contorno ao declive, comparada ao solo sem cultivo e descoberto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1361-1371, 2013.

MASCARENHAS, J. C. et al. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do Município de Serra Talhada, Estado de Pernambuco. **CPRM - Serviço Geológico do Brasil**, Recife, 2005.

MERRITT, E. The identification of four stages during microrill development. **Earth Surface Processes Landforms**, v. 9, p.493-496, 1984.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A.J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling e Software**, v. 18, n. 8, p. 761-799, 2003.

MERTEN, G. E. **Dinâmica da erosão em sulcos alterada pelo incremento da descarga sólida**, 2000. 116p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS, 2000.

MEYER, L. D.; FOSTER, G. R.; ROMKENS, M. J. M. Source of soil eroded by water from upland slopes. **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources**, v. 177, p. 189, 1975.

MINELLA, J. P. et al. Processos e modelagem da erosão: da parcela à bacia hidrográfica. In: PRADO, R.B; TURETTA, A.P.D; ANDRADE, A. G (Org.). Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais. Rio de Janeiro: **EMBRAPA Solo**, 2010. p. 105 - 121.

MOGHADAM, B. K. et al. Effects of land use change on soil splash erosion in the semi-arid region of Iran. **Geoderma**, v. 241, p. 210-220, 2015.

MOLINIER, M.; DE ALBUQUERQUE, C.; CADIER, E. Análise da pluviometria e isoietas homogêneas do Nordeste brasileiro. 1994.

NASCIMENTO, C. E. S.; RODAL, M. J. N.; CAVALCANTI, A. C. Phytosociology of the remaining xerophytic woodland associated to an environmental gradient at banks of the São Francisco river - Petrolina, Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 26, n. 3, p. 271-287, 2003.

OLIVEIRA, F. P. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica em bacia rural em arvorezinha, RS, utilizando WEPP**. 2010. 151p. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2010.

PAIVA, F. M. L. et al. Aplicação do modelo wepp em parcelas e microbacias no semi-árido nordestino. **Associação Brasileira de Recursos Hídricos**. 2010.

PANDEY, A. et al. Runoff and sediment yield modeling from a small agricultural watershed in India using the WEPP model. **Journal of Hydrology**, v. 348, n. 3, p. 305-319, 2008.

PERNAMBUCO. Secretaria de agricultura e reforma agrária. Disponível em: <<http://www.agricultura.pe.gov.br>> acesso em: 10 de junho de 2015.

PERNAMBUCO. Secretaria de ciência, tecnologia e meio ambiente de Pernambuco (SECTMA). Programa de ação estadual de Pernambuco para o combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca – **PAE-PE**. Recife: Governo do Estado de Pernambuco. 2009.

PIMENTEL, D. et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. **Science-AAAS-Weekly Paper Edition**, v. 267, n. 5201, p. 1117-1122, 1995.

PISCOYA, V.C. **Manejo em bacia hidrográfica do riacho Jacu: Produção de sedimentos, dimensionamento de faixa de vegetação ciliar e salinidade da água em barragem subterrânea**. 2012, 140p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife – PE2012.

PORTELA, C. J. Práticas conservacionistas do solo e da água. In: TOFANELLI, M. B. D.; SILVA, T. O. (Org.). Manejo ecológico e conservação dos solos e da água no estado de Sergipe. São Cristóvão: **Editora UFS**, 2011. p. 143 – 175.

PRUSKI, F. F. Conservação de solo e água práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. In: _____. Processo físico de ocorrência da erosão hídrica. 2. ed. Viçosa: **Editora UFV**, 2009. cap. 2, p. 24 – 39.

PUIGDEFÁBREGAS, J. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, n. 2, p. 133-147, 2005.

REJMAN, J.; BRODOWSKI, R. Rill characteristics and sediment transport as a function of slope length during a storm event on loess soil. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, n. 2, p. 231-239, 2005.

ROMERO, C. C.; STROOSNIJDER, L.; BAIGORRIA, G. A. Interrill and rill erodibility in the northern andean highlands. **Catena**, v. 70, n. 2, p. 105-113, 2007.

SAFRIEL, U et al. Drylands. In: Hassan R, Scholes R, Ash N (eds) Ecosystems and human well-being: **current state and trends**, vol 1. Island Press, Washington, DC, p. 623–662. 2005.

SALLEH, K. O.; MOUSAZADEH, F. Gully erosion in semiarid regions. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 19, p. 655-661, 2011.

SHAW, J. R.; COOPER, D. J. Linkages among watersheds, stream reaches, and riparian vegetation in dryland ephemeral stream networks. **Journal of Hydrology**, v. 350, n. 1, p. 68-82, 2008.

SANTOS, A. C. N. **Análise do custo da erosão do solo na microbacia hidrográfica do Ceveiro**. 2014. Tese Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Piracicaba – SP, 2014.

SANTOS, C. G. dos. **Erosão hídrica e taxa de entrega de sedimentos na bacia hidrográfica semiárida do riacho Exu, PE**. 2013. 125f. Tese (Doutorado em Ciência do solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife – PE, 2013.

SANTOS, J.C.N. et al. Determinação do fator de cobertura e dos coeficientes da MUSLE em microbacias no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 11, p. 1157-1164, 2014.

SCHÄFER, M. J. et al. Erosão em sulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 25, p. 419-430, 2001.

SHAW, J. R.; COOPER, D. J. Linkages among watersheds, stream reaches, and riparian vegetation in dryland ephemeral stream networks. **Journal of Hydrology**, v. 350, n. 1, p. 68-82, 2008.

SHEN, Z. et al. Analysis and modeling of soil conservation measures in the Three Gorges Reservoir Area in China. **Catena**, v. 81, n. 2, p. 104-112, 2010.

SHEN, H. et al. An experimental study of rill erosion and morphology. **Geomorphology**, v. 231, p. 193-201, 2015.

SILVA, M. D. R.O. **Hidráulica do escoamento superficial e erosão numa área de caatinga no semi-árido do Brasil**. 2007. 67f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife – PE, 2007.

SIMONS, D. B.; ŞENTÜRK, F. Sediment transport technology: water and sediment dynamics. **Water Resources Publication**, 1992.

SINGH, R. K. et al. Simulation of runoff and sediment yield from a hilly watershed in the eastern Himalaya, India using the WEPP model. **Journal of hydrology**, v. 405, n. 3, p. 261-276, 2011.

SLATTERY, M.C.; BRYAN, R.B. Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: A laboratory experiment. **Earth Surface Processes and Landforms**, 17:127-146, 1992.

SMITH, D. D.; WISCHMEIER, W. H. Factors affecting sheet and rill erosion. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 38, n. 6, p. 889-896, 1957.

STRAHLER, A.N. Hypsometric analysis and erosion topography. *Geological Society of America Bulletin*, v.63, p.1117-1142, 1957.

TARTARI, D. T. et al. Perda de solo e água por erosão hídrica em argissolo sob diferentes densidades de cobertura vegetal. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 7, n. 3, 2012.

TAVARES, J. P., SUCHET, P. A. Erosão Hídrica e Degradação de Terras em Cabo Verde. In V. P. Oliveira, I. G. Gomes, I. Baptista, e L. S. Rabelo, Cabo Verde: Análise Socioambiental e Perspectivas para o Desenvolvimento Sustentável em Áreas Semiáridas. Fortaleza, Brasil, 2012.

TROUT, T.J. Farrow flow velocity effect on hydraulic roughness. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, New York, 118 (6):981-87, 1992.

TORMO, J.; BOCHET, E.; GARCÍA-FAYOS, P. Is seed availability enough to ensure colonization success? An experimental study in road embankments. *Ecological Engineering*, v. 26, n. 3, p. 224-230, 2006.

VAEZI, A. R.; BAHRAMI, H. A. Relationship between soil productivity and erodibility in rainfed wheat lands in northwestern Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, v. 16, n. 6, p. 1455-1466, 2014.

VENKATESWARLU, B.; SHANKER, A. K. Dryland agriculture: bringing resilience to crop production under changing climate. In: **Crop Stress and its Management: Perspectives and Strategies**. Springer Netherlands, 2012. p. 19-44.

VRIELING, A. Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. *Catena*, v. 65, n. 1, p. 2-18, 2006.

WAINWRIGHT, J.; PARSONS, A.J. Classics in physical geography revisited, Thornes, J. B. 1985: The ecology of erosion (*Geography* 70, 222–235). *Progress in Physical Geography*, v. 34, 399–408. 2010.

WANG, B. et al. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 38, n. 14, p. 1725-1734, 2013.

WEI, W. et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. *Journal of hydrology*, v. 335, n. 3, p. 247-258, 2007.

WILCOX, B. P.; BRESHEARS, D. D.; ALLEN, C.D. Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: effects of scale and disturbance. *Ecological Monographs*, v. 73, n. 2, p. 223-239, 2003.

WILCOX, B. P.; NEWMAN, B. D. Ecohydrology of Semiarid Landscapes 1. *Ecology*, v. 86, n. 2, p. 275-276, 2005.

WIRTZ, S.; SEEGER, M.; RIES, J. B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena*, v. 91, p. 21-34, 2012.

YAN, L. J. et al. Effects of transport capacity and erodibility on rill erosion processes: A model study using the Finite Element method. **Geoderma**, v. 146, n. 1, p. 114-120, 2008.

YAN, L. et al. Finite element method for one-dimensional rill erosion simulation on a curved slope. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 3, n. 1, p. 28-41, 2015.

ZEHE, E.; SIVAPALAN, M. Threshold behaviour in hydrological systems as (human) geoecosystems: manifestations, controls, implications. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, n. 7, p. 1273-1297, 2009.

ZHANG, X. C. et al. Evaluation of WEPP runoff and soil loss predictions using natural runoff plot data. **Transactions of the ASAE**, v. 39, n. 3, p. 855-863, 1996.

ZOCCAL, J. C. Soluções cadernos de estudos em conservação do solo e água. Presidente Prudente: **CODASP**, v. 1, n.1 2007.