

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

**TAXA DE ENTREGA DE SEDIMENTOS DA BACIA DO
RIACHO EXU - SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO**

HERMON AUGUSTO DA COSTA BRAGA JUNIOR

Orientador: Prof. PhD Dr. José Ramon Barros
Cantalice

Co-orientador: Prof. Dr. Yuri Jacques Agra Bezerra
da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Michelangelo de O. Silva

Recife - PE
Agosto, 2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

HERMON AUGUSTO DA COSTA BRAGA JUNIOR

**TAXA DE ENTREGA DE SEDIMENTOS DA BACIA DO
RIACHO EXU - SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO**

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. PhD Dr. José Ramon Barros Cantalice

Co-orientador: Prof. Dr. Yuri Jacques Agra Bezerra da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Michelangelo de O. Silva

Recife - PE

Agosto, 2015

Ficha Catalográfica

B813t Braga Junior, Hermon Augusto da Costa
Taxa de entrega de sedimentos da bacia do Riacho
Exu - semiárido Pernambucano / Hermon Augusto da Costa Braga
Junior. – Recife, 2015.
48 f.: il.

Orientador(a): José Ramon Barros Cantalice.
Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Departamento de Tecnologia Rural, Recife, 2015.
Referências.

1. Hidrologia 2. Mudanças climáticas 3. Erosão
4. Sedimentos (Geologia) 5. Serra Talhada (PE) I. Cantalice,
José Ramon Barros, orientador II. Título

CDD 620.8

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

**TAXA DE ENTREGA DE SEDIMENTOS DA BACIA DO RIACHO EXU -
SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO**

HERMON AUGUSTO DA COSTA BRAGA JUNIOR

Dissertação de mestrado apresentada em 18 de agosto de 2015

Presidente - D.Sc. José Ramon Barros Cantalice
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO / UFRPE

D.Sc. Vicente de Paula Silva
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL / UFRPE

D.Sc. Wagner Luís da Silva Souza
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO / UFRPE

"Cuide de seus pensamentos; Eles se tornam suas palavras.

Cuide de suas palavras; Elas se tornam suas ações.

Cuide de suas ações; Elas se tornam seus hábitos.

Cuide de seus hábitos; Eles criam o seu personagem.

Cuide de seu personagem, ele determina o seu destino."

- Lao-Tzu

Dedico este trabalho aos meus filhotes Thumas e Airos, a sua mãe Magda Simone, minha companheira.

Aos meus pais e irmãos, sempre presentes e pilares de minha essência.

AGRADECIMENTOS

- Agradeço ao Grande Arquiteto do Universo que de forma harmônica rege o universo, por tecer a trama de meu destino cheio de iluminação e permitir que eu realize mais uma etapa da minha vida;
- A Pós-Graduação da Engenharia Ambiental, pelo acolhimento e formação, não só profissional, mas pelo aprendizado de vida e convivência;
- A equipe de profissionais Nana e Granja, pelo carinho e empenho de tornar o curso um lugar melhor e mais humano;
- Aos Professores do Curso, principalmente a Fernando Cartaxo, Marcos Metri, Romildo Morant, Vicente de Paula e Vicente Casemiro Piscoya;
- A todos os meus companheiros de turma, em especial a Clodomon, Valeriomon, Elisamon e a Pimenta, tanto pelos momentos profissionais quanto de descontração.
- A equipe do laboratório de Manejo e Conservação de Solo, Wagner, Yuri, Cintia, Douglas, Michelangelo, Victor, Valdemir e Cristina, por me inserirem no ambiente do semiárido, possibilitando uma maior identificação e facilidade nessa trilha de conhecimentos;
- A FACEPE pelo financiamento concedido, que possibilitou o desenvolvimento do trabalho;
- Aos membros da Banca Examinadora por aceitarem compor a mesma;
- Aos Professores Yuri Jacques Agra Bezerra e Michelangelo de O. Silva pela coorientação;
- Em especial ao meu orientador, o Prof. Dr. José Ramon, pelo acompanhamento, considerações, ensinamentos, apoio e principalmente paciência, um grande ser humano de boas virtudes.

RESUMO

A taxa de entrega de sedimentos reflete a variação dos fatores geomorfológicos e ambientais envolvidos na desagregação e nos transportes de sedimentos em uma bacia hidrográfica. Dessa forma, com o objetivo de determinar-se a taxa de entrega de sedimentos (SDR) da bacia hidrográfica semiárida do Exu, Serra Talhada-PE, foi realizado neste trabalho um conjunto de experimentos de erosão em sulcos para quantificação da erosão bruta. O valor de erodibilidade em sulcos (K_r) do Neossolo Flúvico estudado foi de $0,0021 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e a tensão crítica de cisalhamento (τ_c) do mesmo foi de $1,909 \text{ Pa}$, e ocorreram nesses sulcos de erosão os regimes de escoamento transicional e turbulento, característicos de escoamento concentrado. O valor de erosão Bruta (E) de $66,30 \text{ t ha}^{-1}$ foi alto para o ambiente semiárido, que apresenta limitação de precipitação pluviométrica. A taxa de entrega de sedimentos (SDR) da Bacia Hidrográfica do Riacho Exu para o período de 2008 a 2015 teve seu valor médio de $0,00122$, refletindo com clareza a variabilidade climática do ambiente semiárido.

Palavras-chave: hidrologia; variabilidade climática; erodibilidade em sulcos; produção de sedimentos.

ABSTRACT

The sediment delivery ratio (SDR) express the geomorphologic and environments factors involved on detachment and sediment transport from a watershed. Thus, the objective this work was obtain the sediment delivery ratio of semiarid Exu River watershed, Serra Talhada, Brazil. To obtain gross erosion were installed rill erosion plots. The rill erodibility (K_r) value Aridisols the study was $0.0021 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$, and the critical shear stress (τ_c) thereof was 1.909 Pa. Occurred in these rill erosion transitional and turbulent regime of flow characteristic of concentrated runoff. The amount of gross erosion (E) 66.30 t ha^{-1} was high for the Aridisols environment that presents precipitation limitation. The sediment delivery ratio (SDR) of the Exu watershed for the period 2008-2015 had an average value of 0.00122, reflecting clearly the climatic variability of the semi-arid environment.

Keywords: hydrology; climatic variability; rill erodibility; sediment yield.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.	23
Figura 2. Mapa das classes dos solos ocorrentes na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.	26
Figura 3. Mapa de uso dos solos na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.	27
Figura 4. Parcela experimental no Neossolo litólico descoberto sob o simulador de chuvas na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.	28
Figura 5. Parcela experimental no Neossolo litólico com caatinga sob o simulador de chuvas na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.	29
Figura 6. Aspecto dos sulcos pré-formados no Neossolo Flúvico, no momento de aplicação de fluxo na cabeceira do mesmo com o auxílio do dissipador de energia.	31
Figura 7. Aspecto do levantamento da geometria dos sulcos pré-formados sobre o Neossolo Flúvico, com o uso do perfilmetro para determinação da área e perímetro molhado dos mesmos.	33
Figura 8. Relação potencial de variáveis obtidas dos sulcos pré-formados no Neossolo Flúvico. a) Velocidade média do escoamento (V_m) e vazão (Q); b) Raio Hidráulico (R_h) e Área da seção transversal (Área); c) Raio Hidráulico (R_h) e vazão (Q); d) Perímetro Molhado (P_m) e vazão (Q).	38
Figura 9. Números de Reynolds (Re) e tensões de cisalhamento obtidos nos sulcos pré-formados sobre o Neossolo Flúvico na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.	40
Figura 10. Erodibilidade do solo (K_r) em sulcos, obtida 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 no Neossolo Flúvico na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.	40
Figura 11. Precipitação anual média no Município de Serra Talhada no semiárido do estado de Pernambuco (Fonte: APAC, 2015).	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características físico-hídricas da bacia hidrográfica do Riacho Exu.	23
Tabela 2. Classes, área de abrangência e percentagem de abrangência dos solos ocorrentes na bacia hidrográfica do Riacho Exu, semiárido de Pernambuco.	25
Tabela 3. Caracterização física do Neossolo Flúvico da Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.	30
Tabela 4. Contribuição dos diferentes tipos de erosão para erosão bruta na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.	37
Tabela 5. Variáveis hidráulicas dos fluxos aplicados aos sulcos pré-formados sobre o Neossolo Flúvico na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.	37
Tabela 6. Tensão de cisalhamento e taxas de erosão obtidas para os fluxos aplicados aos sulcos pré-formados sobre o Neossolo Flúvico na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco. Medias de quatro repetições.	39
Tabela 7. Taxa de entrega de sedimentos (SDR) determinada para Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco, no período de 2008 a 2015.	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	Bacia hidrográfica como unidade de estudo.....	14
2.2	Erosão hídrica em bacias hidrográficas: produção de sedimentos	15
2.2.1	Transporte de sedimento de fundo	16
2.2.2	Transporte de sedimento suspenso	17
2.3	Erosão bruta.....	18
2.3.1	Erosão em entressulcos.....	18
2.3.2	Erosão em sulcos	19
2.3.3	Erosão em voçorocas	20
2.4	Taxa de entrega de sedimentos	21
3	OBJETIVOS	22
3.1	Objetivo Geral	22
3.2	Objetivos Específicos	22
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	22
4.1	Caracterização da área de estudo.....	22
4.2	Caracterização dos solos da bacia hidrográfica do riacho Exu	24
4.3	Uso do solo na bacia hidrográfica do riacho Exu.....	26
4.4	Determinação da Erosão Bruta	27
4.4.1	Erosão em entressulcos.....	28
4.4.2	Erosão em sulcos pré-formados.....	30
4.4.3	Erosão em voçorocas	34
4.5	Determinação da produção de sedimentos	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1	Erosão Bruta	36
5.2	Taxa de Entrega de Sedimento (SDR) da Bacia Hidrográfica do Exu	41
6	CONCLUSÕES	43
7	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

A dinâmica do sedimento é o processo natural chave do sistema terrestre, com importantes implicações para sustentabilidade dos recursos naturais. Desempenha um papel relevante para o entendimento de outras áreas do conhecimento de relevância global, como a evolução das zonas costeiras, as mudanças climáticas, a erosão e a formação do solo, o ciclo biogeoquímico de nutrientes e poluentes, bem como traz grandes implicações na produtividade das culturas agrícolas e, desta forma, na segurança alimentar.

Nas regiões áridas e semiáridas há um padrão hidrológico de chuvas caracterizado pela variabilidade, podendo ocorrer chuvas intensas, com concentração de precipitação em curtos períodos de tempo, acrescidos de larga variação temporal desses eventos, e conseqüentemente, produzindo algumas vezes picos de escoamento superficial, seguidas por uma recessão exponencial do hidrograma. Em consequência deste comportamento hidrológico, os sistemas fluviais destes ambientes são caracterizados por períodos sem fluxo (intermitentes) e o transporte de sedimentos ocorre com altas concentrações de sedimento suspenso na fase ascendente do hidrograma, o qual está associado ao sedimento prontamente disponível ao movimento, que foi depositado no ano anterior (Cantalice et al. 2013). Tais condições além de espacializar as chuvas e proporcionar temperaturas altas, resulta em redução no escoamento e no transporte de sedimentos, afetando toda a dinâmica sedimentológica na região.

A taxa de entrega de sedimentos pode ser definida como a relação da quantidade de sedimento que chega a jusante da bacia hidrográfica, ou seja, no seu exutório, com a quantidade total de sedimento desagregado e mobilizado a montante em todas áreas de vertente, sendo determinada pela relação entre a produção de sedimentos (Y) e a erosão bruta (E), na forma do somatório do sedimento desagregado pela erosão em entressulcos, sulcos e voçorocas, também conhecida como erosão total.

Todo o processo da erosão bruta se inicia com a erosão entressulcos, por meio do impacto da gota de chuva sobre o solo, promovendo a desagregação de suas partículas e transporte pelo escoamento laminar da água. A erosão em sulcos constitui a segunda fase evolutiva do processo da erosão hídrica do solo, marcada pela mudança no escoamento, de difuso para concentrar-se em pequenas depressões chamadas de sulcos de erosão. Esta concentração favorece o aumento de espessura da lâmina de escoamento, gerando maior desagregação do solo (Cantalice et al., 2005). A ação do fluxo concentrado e do aumento da

tensão de cisalhamento, têm como consequência o aprofundamento e alargamento do sulco, por sua vez atingindo horizontes inferiores do solo, quando a erosão atinge sua fase mais crítica, a de voçoroca.

O somatório dessas fontes de sedimentos, entressulcos, sulcos e voçorocas, provenientes da erosão, também conhecida como erosão bruta, resulta na movimentação de quantidades significativas de materiais que são transportadas nos cursos d'água. Contudo, quando a velocidade do fluxo é inferior a tensão de cisalhamento, as partículas tendem a permanecer depositadas. À medida que a tensão de cisalhamento é rompida, em razão do aumento da velocidade do fluxo, as partículas são transportadas inicialmente no fundo do leito, por rolamento e/ou arraste, passando gradativamente a saltação e podendo entrar em suspensão. Fatores determinantes destes processos são o tamanho e densidade do sedimento.

A magnitude da taxa de entrega de sedimentos para uma determinada bacia é influenciada pela variação dos fatores geomorfológicos e ambientais, no qual inclui a natureza, extensão e localização das fontes de sedimento, relevo, com as características do declive, padrão de drenagem e hidráulica dos canais, cobertura vegetal, uso do solo, textura e estrutura do solo, além do clima (Walling, 1983).

A compreensão e monitoramento desse processo hidrossedimentológico é um excelente instrumento de gestão de bacias hidrográficas, para elaboração de estratégias de manejo e conservação do solo, definição de modelos matemáticos de transporte de sedimentos viáveis, diagnósticos e prognósticos; podendo estar também, relacionados com as mudanças climáticas globais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Bacia hidrográfica como unidade de estudo

O conceito de bacia hidrográfica é básico para todos os projetos e abordagens hidrológicas, assim, bacia hidrográfica consiste de toda área geográfica que capta e drena todo escoamento produzido pela chuva, e converge todo escoamento para uma única saída, chamada de exutório, Chow et al. (1988) condensa o conceito, dizendo que é uma área de terra que drena para uma só saída.

O escoamento superficial é resultado da água precipitada que não foi interceptada pela cobertura vegetal ou retida sobre a superfície do terreno e não infiltrou e que, conseqüentemente, acaba escoando nos caminhos de maior declividade. As águas superficiais escoam para as partes mais baixas do terreno, formando riachos e rios. As cabeceiras são formadas por riachos que brotam em terrenos íngremes das serras e montanhas e à medida que as águas dos riachos descem, juntam-se a outros riachos, aumentando o volume e formando os primeiros rios. Esses pequenos rios continuam seus trajetos recebendo água de outros tributários, formando rios maiores até desembocarem no oceano (Barrela et al., 2001).

Segundo Santana (2003), a bacia hidrográfica se interliga a outra de maior tamanho, constituindo, em relação à última, uma sub-bacia. As bacias hidrográficas maiores são resultantes do conjunto de pequenas bacias. Logo, os trabalhos de manejo de bacias hidrográficas devem ser iniciados, preferencialmente, nas bacias de menor porte, inseridas no município.

As bacias hidrográficas constituem uma área de captação de um recurso de fundamental importância para a vida, a água. Os recursos naturais que compõem as bacias (solo, água, vegetação e o meio que a circunda) estão em constante mudança em resposta à evolução natural e às atividades humanas. Sua gestão eficiente é primordial para o uso racional e manejo sustentável de seus recursos naturais (Hollanda et al., 2015).

Os recursos fornecidos pelas bacias, principalmente a água, são atrativos para diversos tipos de atividade, como: irrigação, lazer, navegação, energia, uso doméstico e moradia. Nesta perspectiva, a disponibilidade da água enquanto recurso propicia a ocupação da bacia hidrográfica praticamente por toda sua extensão territorial. Portanto, o estudo da bacia hidrográfica permite analisar a variação dos diferentes processos que ocorrem nela. Estudos de caracterização do meio físico podem ser realizados tornando possível obter informações

específicas de diferentes áreas do conhecimento (geologia, geomorfologia, pedologia, hidrografia, climatologia, fauna e flora locais) (Albuquerque, 2012).

Com base no registro das variáveis hidrológicas envolvidas, é possível entender melhor os fenômenos e representá-los matematicamente, pois a bacia hidrográfica possui características essenciais que permitem a integração multidisciplinar entre diferentes sistemas de gerenciamento, estudo e atividades ambientais (Tucci, 1993).

Os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica possuem duas direções de fluxo: vertical, representado pela precipitação e evapotranspiração, e horizontal, representado pelo escoamento. A vegetação também tem papel fundamental no processo hidrológico da bacia, principalmente na interceptação e evapotranspiração, atuando, indiretamente, em todas as fases do ciclo (Tucci & Clarke, 1997).

2.2 Erosão hídrica em bacias hidrográficas: produção de sedimentos

A produção de sedimentos é a quantidade de solo erodido que é removido de uma determinada bacia hidrográfica pela sua rede de drenagem. A produção de sedimentos representa apenas uma parcela do total de sedimentos produzidos em uma bacia em decorrência dos processos erosivos atuantes. Sendo então, a diferença entre a erosão bruta e a quantidade de material que ficou depositado e não foi removido da bacia de drenagem (Walling, 1990).

Para Walling (2009) o processo de erosão, transporte e entrega de sedimento são componentes chaves e medidas de funcionamento do sistema terrestre. A erosão e os processos de redistribuição de sedimento são processos primários formadores no desenvolvimento da paisagem e assumem um importante papel também no desenvolvimento do solo. Igualmente, a carga de sedimentos de um rio fornece uma importante medida de sua morfodinâmica, da hidrologia da bacia hidrográfica e dos processos de erosão e entrega de sedimentos operantes dentro da bacia. Ainda segundo o autor, as magnitudes das cargas de sedimento transportadas pelos rios têm implicações para o funcionamento do sistema, por exemplo, o ciclo geoquímico, a qualidade da água, a morfologia de canais, o desenvolvimento de deltas, dos ecossistemas aquáticos e habitats que os rios suportam.

Montgomery (2007) escreveu que os processos chaves funcionais naturais do sistema terrestre, a erosão e a dinâmica do sedimento têm influência para exploração humana sobre os sistemas naturais terrestres, e conseqüente sustentabilidade dos recursos naturais. Assim, eles devem ser considerados com uma dimensão socioeconômica de alta significância. A erosão do

solo é integralmente ligada a degradação das terras agrícolas, seja pela perda de nutrientes ou mesmo pelas excessivas perdas de sedimentos, com interferência na produtividade das culturas e na segurança alimentar, afetando em cadeia a sustentabilidade do uso dos recursos naturais globais.

Em escala global mudanças na transferência de sedimentos da plataforma continental para os oceanos resultarão em mudanças dos ciclos geoquímicos globais. Desta forma, os sedimentos atuam no fluxo de muitos elementos/nutrientes chaves, particularmente interferências no ciclo do carbono (Walling, 2009). Em escalas regional e local as mudanças nas taxas de erosão e o transporte de sedimentos pelos rios em todo mundo tem papel relevante para sustentabilidade da produção agrícola e para um nível seguro de alimentos produzidos.

Por conta dos processos de erosão e transporte de sedimentos serem fortemente ligados a cobertura do solo, ao uso do solo e a hidrologia das bacias hidrográficas, os mesmos são sensíveis as mudanças climáticas, a cobertura vegetal e a uma larga variedade de atividades humanas, que incluem a expansão das áreas agrícolas, práticas de uso do solo, extração mineral, urbanização e desenvolvimento de infraestrutura, mineração de areia, construção de barragens reservatórios e programas para conservação do solo e controle de sedimentos (Walling, 2005).

Melo et al. (2009) determinaram a produção de sedimentos da bacia hidrográfica do riacho Jacu, semiárido de Pernambuco, de $4,991 \text{ t ha}^{-1}$, equivalente a uma taxa de denudação dos solos da bacia de 0,322 mm, a qual é representativa ao longo de alguns anos, por apresentar solos pouco evoluídos (rasos) com uma lenta dinâmica de formação, o que pode constituir um processo inicial de desertificação em função das atuais condições de uso e manejo do solo e água, com comprometimento da capacidade de uso agrícola e das condições de manutenção desses recursos naturais.

2.2.1 Transporte de sedimento de fundo

Define-se como sedimento de fundo o material transportado junto e ao longo do leito do rio, movendo-se por rolagem, deslizamento ou saltos (Gordon et al., 2004; Ward & Trimble, 2004). As taxas de transporte de sedimento de fundo estão diretamente associadas à composição granulométrica do leito do canal. Quando este é composto por sedimentos de tamanhos heterogêneos e não coesivos, o sedimento com maior diâmetro é deslocado mais facilmente devido a uma maior exposição às forças de elevação e de arraste, já os sedimentos

de menor tamanho sofrem o efeito do sombreamento das partículas maiores, o que acarreta menor exposição à força de arraste (Parker & Toro-Escobar, 2002).

As forças que atuam no sedimento podem mantê-lo em suspensão ou no fundo do rio, saltando ao longo do leito. Essas forças atuam em função do tamanho, peso e forma da partícula, tipo de escoamento (laminar ou turbulento), da velocidade da corrente, dos obstáculos no leito e de diversas outras funções que estão inter-relacionadas, como declividade do leito, forma do canal e temperatura da água e outras (Carvalho, 2008).

O entendimento do desenvolvimento da paisagem semiárida tem foco na dinâmica do transporte de sedimento suspenso e de fundo. Medidas diretas de sedimento de fundo são de difícil determinação e, acompanhadas de incertezas por conta da variabilidade temporal e especial das chuvas do ambiente semiárido, daí um conjunto de dados que documente a dinâmica do transporte de sedimento de fundo em rios áridos e semiáridos são limitados (Powell, 2009).

Reid and Larrone (1995) encontraram em rios efêmeros de deserto uma maior quantidade de material disponível ao movimento, no entanto estes rios não foram eficientes com o aumento da potência do escoamento (quantidade de energia de transporte), pelo fato dos mesmos não possuírem uma “*armour layer*” (camada de cascalhos) que podem suprir sedimentos fino em condições de fluxo elevado. Neste sentido Hudson e Mossa (1997), explicam que em rios de fundo de sedimentos arenosos tendem a ser mais expressivos, desde que exista energia para o transporte o fluxo.

Cantalice et al. (2013) obtiveram para o canal do riacho Exu, o qual possui fundo arenoso uma relação sedimento de fundo/ sedimento suspenso variando entre 4,00 a 12,72%, demonstrando a alta contribuição do sedimento de fundo para a produção de sedimentos e para taxa de entrega dessa bacia semiárida, e sendo maior esta contribuição no regime de fluxo alto.

2.2.2 Transporte de sedimento suspenso

Material suspenso refere-se ao sedimento que é transportado pelos componentes ascendentes das correntes turbulentas e permanece em suspensão durante um período de tempo apreciável. Na maioria dos rios naturais, os sedimentos são transportados principalmente como carga suspensa (Yang, 1996).

O transporte de sedimentos em suspensão ocorre quando o fluxo hídrico tem energia suficiente para manter determinada partícula em suspensão. Partículas finas como silte e argila são muito mais propensas ao transporte em suspensão do que sedimento de tamanho maior, sendo mantidas em suspensão pela ação de turbulência do fluido (Christofolletti, 1981). Os sedimentos que chegam ao curso d'água têm diversas granulometrias e sofrem um processo de transporte diferenciado, de acordo com as condições do local e do escoamento (Carvalho, 2008).

O transporte de sedimento do leito pode diminuir as profundidades dos canais, prejudicando a navegação e provocando enchentes, que podem ocasionar a abrasão em máquinas, obras hidráulicas, árvores e outros. Além disso, o depósito de sedimentos pode reduzir a vida útil de um reservatório, provocar enchentes e assorear canais, porém, podem trazer benefícios como obtenção de materiais e minérios, aproveitamento de depósitos, ricos de nutrientes para uso de plantações, veículo de matéria orgânica, e micro-organismos que equilibram a fauna fluvial, entre outros (Scapin, 2005).

2.3 Erosão bruta

O total de sedimento desagregado e mobilizado nas áreas vertentes de uma bacia hidrográfica é denominado de erosão bruta (E), um processo natural que se constitui da soma dos processos de erosão: erosão entressulcos, erosão em sulcos e erosão em voçorocas. Contudo, pode ser intensificado pelo mau uso.

Em uma avaliação global do estado dos recursos dos solos do planeta realizada pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura - FAO (2011) 25% estão degradados. Segundo o documento, a degradação e a escassez dos solos e da água impõem um novo desafio à tarefa de alimentar uma população mundial que deve chegar a 9 bilhões de pessoas em 2050.

2.3.1 Erosão em entressulcos

A primeira fase do processo erosivo é a erosão em entressulcos que se trata da desagregação do solo, originada do impacto das gotas de chuva e do transporte do escoamento superficial, na forma de fluxo laminar delgado, por arraste e suspensão das partículas desagregadas, seguido do escoamento em entressulcos (Mendonça, 2013; Freitas et al 2008; Cantalice et al 2009).

O fator responsável pela desagregação das partículas da massa do solo na erosão em entressulcos é o impacto das gotas de chuva, que podem desagregar grandes quantidades de partículas decorrentes da energia cinética das gotas, por meio das forças de pressão e cisalhamento no ponto de impacto (Cassol & Lima, 2003).

No horizonte superficial do solo é onde se encontram a matéria orgânica e os nutrientes fundamentais para a produção agrícola, bem como onde se estabelecem os processos microbiológicos que se refletem na fertilidade do solo. Assim, a erosão em entressulcos consiste na forma de erosão hídrica do solo com maior poder de dano para a agricultura, pois ocorre nesta camada (Cantalice et al., 2009). Bertol et al. (2007) reforçam que o processo erosivo ocorre do transporte das partículas de menor diâmetro, onde se concentram os elementos minerais, as quais são desprendidas dos agregados do solo, principalmente pelo impacto das gotas da chuva sendo as primeiras a serem transportadas, caracterizando a seletividade deste tipo de erosão.

Segundo o modelo americano de predição da erosão hídrica, *Water Erosion Prediction Project* –WEPP (Flanagan & Nearing, 1995), a taxa de desagregação do solo na erosão em entressulcos é calculada com base na seguinte equação:

$$D_i = K_i i^2 S_f$$

em que D_i é a taxa de desagregação de solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), K_i é o fator de erodibilidade em entressulcos (kg s m^{-4}), i é a intensidade da chuva (m s^{-1}) e S_f é o coeficiente do fator declividade do solo. Posteriormente, os efeitos do escoamento superficial e da infiltração de água nas taxas de desagregação também foram considerados no modelo:

$$D_i = K_i i^2 R S_f$$

no qual R corresponde ao escoamento superficial (m s^{-1}). Conforme Liebenow et al. (1990), o fator declividade do solo pode ser estimado pela seguinte equação:

$$S_f = 1,05 - 0,85 e^{-4 \text{ sen } \Theta}$$

em que S_f é o fator declividade do solo; e é a base do logaritmo natural, e Θ é o ângulo do declive.

2.3.2 Erosão em sulcos

Erosão em sulco pode ser de grande proporção em relação à erosão total em florestas degradadas, mas as medições do escoamento e erosão dos sulcos não são tão frequentes. Muitas abordagens vêm sendo utilizadas para medir a erosão das encostas, os objetivos principais são para melhorar as previsões da erosão ou comparar taxas de erosão de vários

usos da terra e degradações, incluindo diversas formas de agricultura, coleta de madeira, incêndios e construções. Experimentos de erosão sob chuva natural e simulada podem proporcionar muita informação sobre a natureza e variabilidade do processo de escoamento da água durante o processo erosivo, mas dependendo dos efeitos aleatórios do clima (ex: chuva e temperatura do ar) pode fazer a coleta de dados durar muitos anos. Métodos experimentais mais controlados incluem simulação de chuva em ambiente externo ou no laboratório, experimentos de água corrente com chuva artificial e/ou escoamento em ambiente laboratorial, e experimentos com sulcos utilizando chuva artificial e/ou escoamento em ambiente externo. Esses métodos, cada um com suas próprias limitações, podem fornecer respostas mais rápidas para questões pontuais de pesquisa (Robichaud et al. 2010).

Erosão do solo é conceituada como um processo que afeta estes sistemas de maneira crítica, especialmente quando ocorre a formação de sulcos, já que a rede de sulcos pode condicionar a disponibilidade e distribuição espacial da umidade do solo (Moreno-de las Heras et al. 2010).

A desagregação e o transporte de sedimentos nos sulcos de erosão ocorrem pela ação da tensão de cisalhamento do escoamento concentrado, de tal modo, a erosão em sulcos é a principal fonte de sedimentos nas encostas, embora seja um processo muito complexo para identificar e quantificar (Yan et al., 2008).

No modelo WEPP, Flanagan & Nearing (1995) consideram que a erodibilidade em sulcos (K_r) de um solo pode ser determinada a partir da relação entre as taxas de desagregação em sulcos e a tensão de cisalhante do fluxo, expressa pela seguinte equação:

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

em que D_r é a taxa de desagregação em sulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), K_r representa a erodibilidade do solo em sulcos ($\text{kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$ ou s m^{-1}), τ é a tensão cisalhante do fluxo (N m^{-2} ou Pa) e τ_c é a tensão crítica de cisalhamento do solo (N m^{-2} ou Pa).

2.3.3 Erosão em voçorocas

As voçorocas são canais lineares formados pela ação do fluxo concentrado, promovendo a remoção de grande quantidade de material (USDA-SCS, 1966). Recentemente, Kirkby & Brackem (2009) descreveram as voçorocas como um canal profundo em uma encosta, com fluxo de água não perene, sendo estas duas definições complementares e não conflitantes.

Kompani-Zare et al. (2011) citam que as voçorocas não podem ser desfeitas pelo cultivo tradicional do solo, e chegam a contribuir entre 10 até 90% para produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica. Fica então atestado a importância de seu conhecimento e controle para longevidade dos reservatórios e equilíbrio dos sistemas aluviais. No entanto, estes autores ainda argumentam que existe dificuldade nos estudos da erosão por voçorocas, pelo fato da pouca existência de técnicas que possibilitem a determinação dos dados acessíveis e de forma prática.

2.4 Taxa de entrega de sedimentos

Walling (1983) escreveu que a magnitude da taxa de entrega de sedimentos para uma determinada bacia é influenciada pela variação dos fatores geomorfológicos e ambientais, incluindo natureza, extensão e localização das fontes de sedimento, relevo e características do declive, padrão de drenagem e hidráulica dos canais, cobertura vegetal, uso do solo, textura e estrutura do solo.

Os processos hidrossedimentológicos estão intimamente relacionados com o ciclo hidrológico e compreendem os processos de deslocamento, transporte e depósito de partículas sólidas presentes na superfície da bacia hidrográfica. Porém, nem todo material desagregado de seu local é transportado para fora da bacia devido ao grau de seletividade de grãos que cada modalidade de erosão apresenta no processo de remoção e transporte e à dinâmica hidrológica dos canais de drenagem da bacia. O sedimento transportado para fora da área da bacia é denominado de produção de sedimentos e a razão entre a produção de sedimentos e a erosão bruta recebe a denominação de taxa de entrega de sedimentos (do inglês, *Sediment Delivery Ratio - SDR*) (Vestena, 2008).

A SDR é definida como um parâmetro de escala adimensional que representa a relação entre a produção de sedimentos no exutório da bacia (Y) e a erosão bruta (E), que considera a soma de todo o sedimento desagregado por todas as formas de erosão que ocorrem dentro da bacia e que conseguem sair da mesma (Walling, 1983):

$$SDR = Y / E$$

onde Y é a produção de sedimentos ($t \text{ km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) e E é a erosão bruta ($t \text{ km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$).

Lu et al. (2006) comentam que a taxa de entrega expressa um fator de escala relacionando a disponibilidade de sedimento ao transporte e a deposição do mesmo em duas escalas espaciais diferentes. Tal relação foi buscada no sentido de quantificar-se a fração de sedimentos erodidos dentro de uma bacia que encontram o caminho de saída da bacia.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Determinar as relações entre a produção de sedimentos e as taxas de erosão bruta, de sedimento suspenso e de fundo que determinam a magnitude da taxa de entrega de sedimentos (SDR) da semiárida bacia hidrográfica do riacho Exu, Estado de Pernambuco.

3.2 Objetivos Específicos

- Determinar as descargas sólida suspensa e de fundo, e pôr fim a produção de sedimentos da bacia hidrográfica do riacho Exu no semiárido do Estado de Pernambuco;
- Avaliar a taxa de erosão bruta (E) da bacia do Exu, na forma da erosão em entressulcos, sulcos e voçorocas;
- Determinar a taxa de entrega de sedimentos (SDR) da bacia do riacho Exu para o período de 2008 a 2015.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo encontra-se inserida na bacia hidrográfica do riacho Exu (Figura 1), que apresenta uma área total de 537,37 km², localizada na mesorregião Sertão do Alto Rio Pajeú, no município de Serra Talhada, Pernambuco. Para chegar na região do estudo, foi utilizado o acesso do km 448, na rodovia federal BR-232, pertencente ao limite municipal da cidade de Serra Talhada. De acordo com a classificação de Koöper, o clima da região enquadra-se no tipo Bwh, denominado semiárido, quente e seco, com chuvas de verão-outono com pluviosidade média anual para o período de 1911 a 2013 de 647 mm ano⁻¹ (SUDENE, 1990; INMET, 2014), e temperatura média anual superior a 30°C.

A bacia hidrográfica do riacho Exu apresenta características típicas das propriedades do semiárido brasileiro, com áreas de Caatinga e queimadas como forma de manejo de solo. Segundo Cantalice e colaboradores (2013) o comportamento hidrológico da mesma tem um padrão comum ao ambiente semiárido com alta variabilidade, caracterizado por chuvas

concentradas em breves intervalos de tempo (12 mm min^{-1}) na forma de eventos de larga variação de recorrência e de pouca abrangência espacial. As características físico-hídricas da bacia hidrográfica do Riacho Exu e sua resposta hidrológica encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Características físico-hídricas da bacia hidrográfica do Riacho Exu.

Características	Valor
Área de drenagem – A	537,37 km ²
Perímetro - P	125 km
Comprimento do curso de água - L	40 km
Coefficiente de compacidade (<i>Kc</i>)	1,52
Fator de forma (<i>Kf</i>) (Ponce, 1989)	0,34
Cota máxima	625 m
Cota mínima	587 m
Declividade média da bacia	0,095 m m ⁻¹
Densidade de drenagem do riacho	0,074 Km Km ⁻²
Ordem dos cursos de água	3ª ordem
Declividade média do leito do riacho	0,0038947 m m ⁻¹
Tempo de concentração ³	7,08 horas

MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO EXU

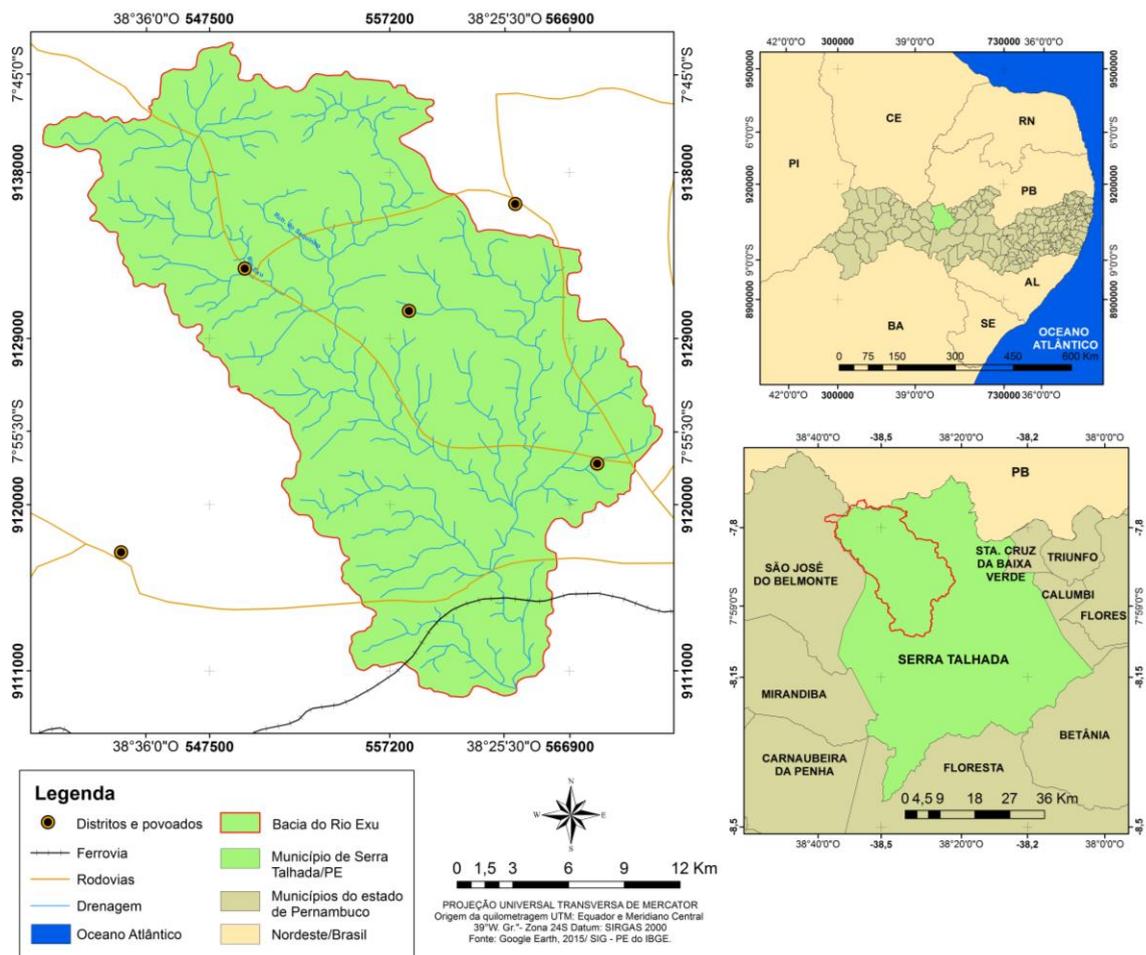


Figura 1. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.

As características de área, perímetro da bacia, comprimento do curso de água do riacho e as cotas máxima e mínima foram determinadas através da investigação de cartas planialtimétricas (escala 1:100.000). A declividade do leito do Exu foi determinada por meio do levantamento topográfico realizado com o emprego de um nivelador de precisão a laser, marca Pentax AFL-240. Os coeficientes de forma (K_f) e compacidade (K_c) foram determinados pelas respectivas relações abaixo, segundo Ponce (1989):

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (1)$$

Em que A representa a área da bacia (km^2), L é o comprimento do principal curso de água (km) e P é o perímetro da bacia hidrográfica (km). O tempo de concentração (T_c) da bacia foi calculado pela equação de Hathaway de acordo com Ponce (1989):

$$T_c = \frac{0,606(L \cdot n)^{0,467}}{S^{0,234}} \quad (2)$$

Onde T_c é o tempo de concentração (horas), L representa o comprimento da bacia (km); n é o fator de rugosidade da bacia promovido pela cobertura vegetal e S é a declividade média do principal curso d'água (m m^{-1}).

4.2 Caracterização dos solos da bacia hidrográfica do riacho Exu

Os solos que podem ser encontrados, abrangência e distribuição, na bacia do Exu estão apresentados na tabela 2. São eles Luvissole Crômico (TC); Argissolos Vermelhos-Amarelos (PVA1 e PVA2); Neossolo Regolítico (RR); Neossolo Litólico (RL); Neossolo Flúvico (RY) apresentados na Figura 2. As associações dos solos encontrados na bacia do Exu são na maioria solos pouco desenvolvidos, como a classe dos Neossolos com ocorrência total de 38%. Em ambiente semiárido os solos são pouco evoluídos por não haver alterações expressivas em relação ao material de origem devido à baixa intensidade da atuação dos processos pedogenéticos decorrente da limitação hídrica.

Tabela 2. Classes, área de abrangência e percentagem de abrangência dos solos ocorrentes na bacia hidrográfica do Riacho Exu, semiárido de Pernambuco.

SIGLA	Classe de Solos (Embrapa, 2013)	Área (km²)	%
RU6	Neossolo Flúvico e Cambissolo	3,36	0,59
RU11	Neossolo Flúvico e Neossolo Flúvico e Cambissolo	0,49	0,09
T8	Luvissolo e Neossolo Litólico e Planossolo	161,82	28,24
PVA50	Argissolo Vermelho-Amarelo e Argissolo Vermelho e Neossolo Litólico	79,77	13,92
PVA58	Argissolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Litólico e Planossolo	18,23	3,18
PVA62	Argissolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Litólico e Planossolo	9,55	1,67
PVA64	Argissolo Vermelho-Amarelo e Luvissolo e Neossolo Litólico	39,34	6,85
RL28	Neossolo Litólico e Argissolo Vermelho-Amarelo	0,71	0,12
RL40A	Neossolo Litólico e Argissolo Vermelho-Amarelo e Argissolo Vermelho	3,48	0,61
RL45	Neossolo Litólico e Argissolo Vermelho-Amarelo	26,26	4,58
RL48	Neossolo Litólico e Luvissolo e Planossolo	14,31	2,50
RL60	Neossolo Litólico e Argissolo Vermelho-Amarelo	33,02	5,76
RL66	Neossolo Litólico e Argissolo Vermelho-Amarelo e Argissolo Vermelho	118,72	20,71
RL73	Neossolo Litólico e Argissolo Vermelho-Amarelo	10,31	1,80
RL74	Neossolo Litólico e Argissolo Vermelho-Amarelo	5,77	1,01
RR25	Neossolo Regolítico e Neossolo Litólico e Planossolo	16,56	2,89
RR´5	Neossolo Regolítico e Neossolo Quartzarênico e Argissolo Amarelo e Argissolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Litólico	31,40	5,48

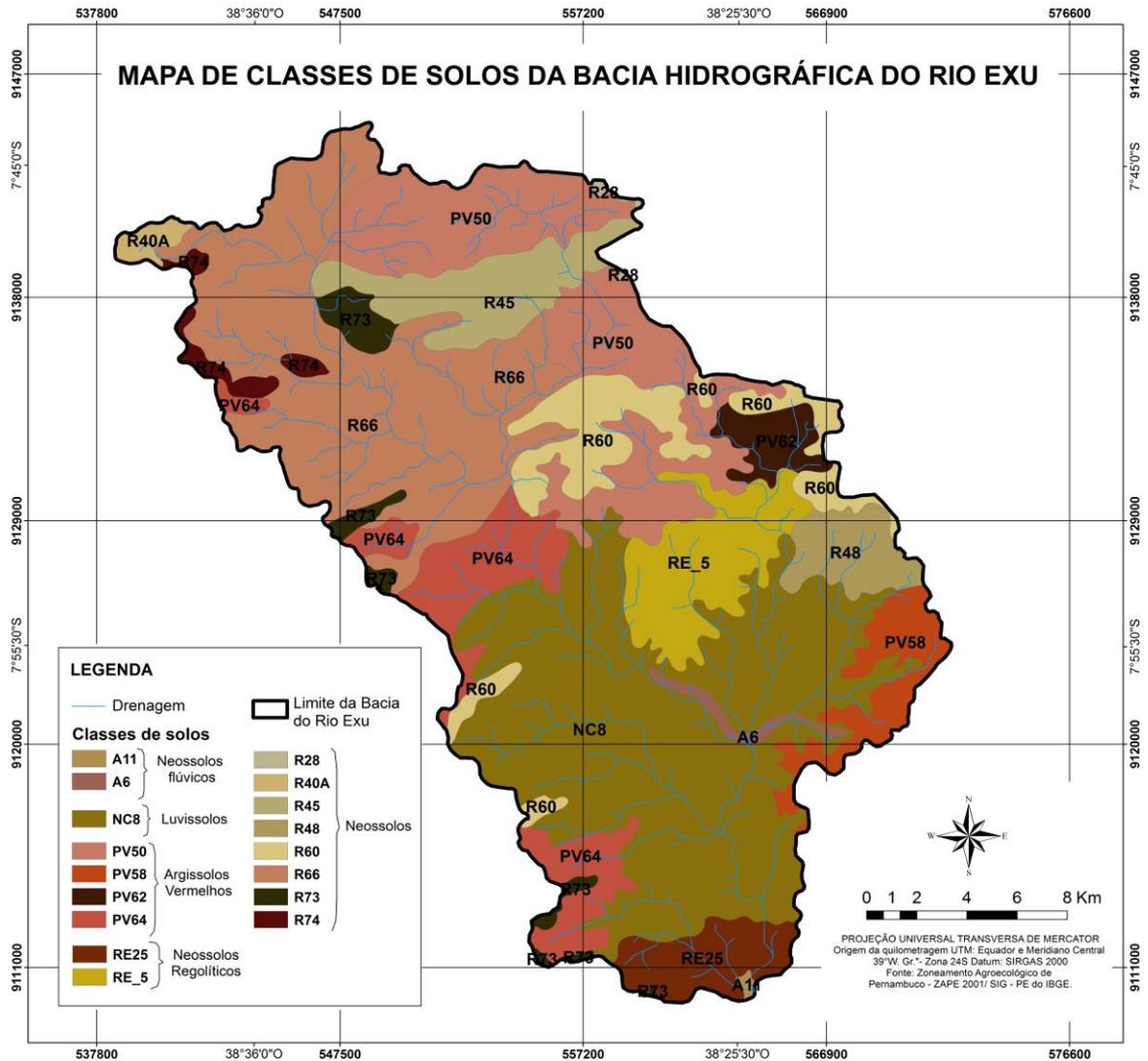


Figura 2. Mapa das classes dos solos ocorrentes na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.

4.3 Uso do solo na bacia hidrográfica do riacho Exu

Cantalice et al. (2013) descreveram que na bacia hidrográfica do Exu pratica-se a agricultura de sequeiro, com o cultivo de espécies típicas, como feijão e milho, onde se emprega baixo nível tecnológico. Não são utilizadas práticas de correção do solo, adubação e controle fitossanitário. O preparo do solo é realizado por meio das queimadas e destoca de todo tipo de vegetação, inclusive da caatinga. Também se utiliza da pecuária extensiva com caprinos, ovinos e bovinos, atividades típicas do semiárido brasileiro. Observa-se na Figura 3 o predomínio da prática da agricultura de subsistência as margens dos canais da bacia, resultando na degradação da mata ciliar.

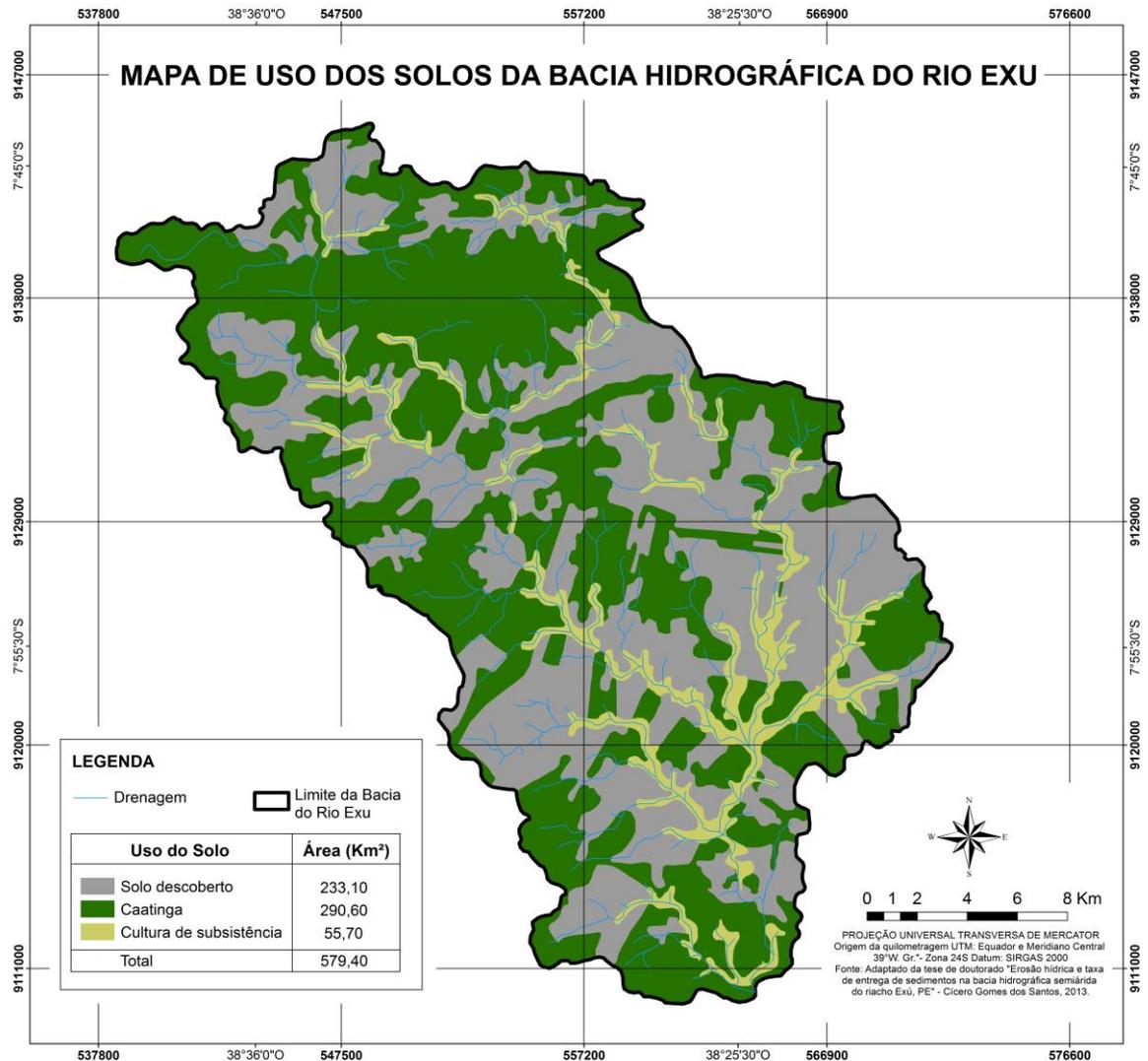


Figura 3. Mapa de uso dos solos na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.

4.4 Determinação da Erosão Bruta

A determinação da erosão foi realizada considerando-se o somatório das perdas de solo ocorridas nos processos de erosão em entressulcos, erosão em sulcos e em voçorocas obtidos em amostragens e em experimentação abaixo descritas na bacia hidrográfica do riacho Exu.

4.4.1 Erosão em entressulcos

A taxa de erosão em entressulcos foi determinada através de experimento conduzido no mês de agosto de 2012, considerando os seguintes tratamentos: caatinga (rala e arbustiva), solo descoberto/preparado, cultura de subsistência. Para tal foi utilizado um simulador de chuva (Figura 4 e Figura 5), desenvolvido no laboratório de Manejo e Conservação de Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), para geração da chuva e do escoamento superficial. O simulador de chuva foi construído de acordo com as especificações de Meyer e Harmon (1979), equipado com um bico aspersor tipo Veejet 80-150 com diâmetro interno de 12,7 mm. Este equipamento reproduz uma distribuição de tamanhos de gotas e níveis de energia cinética semelhantes aos das chuvas naturais, que correspondem a $0,294 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ e $17,64 \text{ MJ ha}^{-1}$ para os 40 minutos de testes. O simulador de chuva foi disposto numa altura de 3,1 m da superfície do solo, operando a uma pressão de serviço constante de 41 Kpa, verificada com o auxílio de manômetro. O simulador de chuva foi abastecido pelo sistema de bomba submersa colocado em um reservatório de polietileno de capacidade de 1000 l. As chuvas simuladas tiveram uma intensidade média de 90 mm h^{-1} aferido por meio de um conjunto de 10 pluviômetros colocados ao acaso fora e ao lado da área útil das parcelas experimentais.



Figura 4. Parcela experimental no Neossolo litólico descoberto sob o simulador de chuvas na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.

Foram utilizadas aleatoriamente 16 parcelas distribuídas entre áreas de caatinga (rala e arbustiva), Neossolo descoberto/preparado, cultura de subsistência. As parcelas tinham 1 m de largura e 2 m de comprimento acompanhando o declive natural do terreno. A área de 2 m² de cada parcela era delimitada por chapas metálicas galvanizadas de 30 cm de altura, cravadas no solo a aproximadamente 15 cm de profundidade, possuindo na parte inferior de sua estrutura uma calha coletora para amostragem do escoamento superficial.



Figura 5. Parcela experimental no Neossolo litólico com caatinga sob o simulador de chuvas na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.

As perdas de solo (P_s) foram calculadas segundo Bezerra & Cantalice (2006):

$$P_s = \frac{\sum(QC_s t)}{A} \quad (3)$$

em que P_s é a perda de solo (kg m⁻²), Q é a vazão (l s⁻¹), C_s é a concentração de sedimentos em (kg l⁻¹), t é o intervalo de tempo em segundos (s) e A é a área da parcela (m²). A concentração de sedimentos e a taxa de erosão foram mensuradas após a determinação da massa de sedimentos e do volume de água no laboratório de Manejo e Conservação do Solo da UFRPE. Para isto, os recipientes plásticos contendo o material coletado foram pesados e

colocados em estufa a uma temperatura de 65 ° C por um período máximo de 72 horas, ou até a secagem completa dos sedimentos. Depois de completamente secos, os recipientes foram pesados novamente para obtenção da massa de sedimentos, expressa em quilos.

Foi aplicado o delineamento inteiramente casualizado nos dados de erosão em entressulcos. A análise de variância foi realizada utilizando-se o *software* estatístico *SAS Learning Edition 2.0*.

4.4.2 Erosão em sulcos pré-formados

Os testes de erosão em sulcos foram realizados na Fazenda Cedro, com coordenadas geográficas de 38°25'51.36" de longitude Oeste e 7°58'58.55" de latitude Sul, Datum WGS84, inserida na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu, em um Neossolo Flúvico com horizonte A (0 a 20 cm) bruno escuro e uma camada de 20 a 40 cm com cor bruno escuro, pertencente a associação T8 (Tabela 2) sob um relevo suave ondulado. Algumas características físicas do Neossolo Flúvico encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3. Caracterização física do Neossolo Flúvico da Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.

Camada	Areia	Silte	Argila	Densidade
	(0,050 -2,00 mm)	(0,002 -0,050 mm)	(< 0,002 mm)	do Solo
	(g kg ⁻¹)			(g cm ⁻³)
A (0-20 cm)	590,00	210,00	200,00	1,42
20-40 cm	691,20	134,80	174,00	1,46

O desenho experimental consistiu em 16 sulcos pré-formados utilizando-se uma enxada com formato triangular na extremidade cortante e mantendo-se a inclinação natural do terreno, com as dimensões de 3 m de comprimento, no sentido da maior pendente, 0,5 m de largura e 0,10 m de profundidade, delimitados na parte inferior pela colocação de chapas metálicas de zinco com 30 cm de altura que foram enterradas até a metade (Figura 6). A declividade dos sulcos foi obtida antes da realização dos testes, com auxílio de um nível, obtendo-se a diferença de altura entre dois pontos de distância conhecida, sendo o resultado expresso em m m⁻¹.

Os tratamentos consistiram na aplicação durante 20 minutos de quatro níveis crescentes de fluxo (5,86; 12,10; 20,32 e 27,56 l min⁻¹) em quatro repetições num total de 16 parcelas experimentais.



Figura 6. Aspecto dos sulcos pré-formados no Neossolo Flúvico, no momento de aplicação de fluxo na cabeceira do mesmo com o auxílio do dissipador de energia.

A água foi conduzida aos sulcos, por gravidade através de mangueira de polietileno calibrada, proveniente de um reservatório de polietileno com capacidade de 1000 l, mantido sob carga constante, e abastecido com a água de um reservatório de água de chuva próximo à área experimental. Na extremidade superior dos sulcos foram enterrados dissipadores de energia na forma de recipientes plásticos circulares, de tal forma que a borda superior do recipiente ficasse ao nível da superfície do solo. Nestes recipientes foram introduzidas as mangueiras condutoras de água, que chegava 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. As coletas de descarga líquida e sólida foram realizadas em provetas em intervalos de tempo de cinco minutos, contados a

partir da aplicação da água até o final dos testes. Os volumes coletados foram transferidos para recipientes plásticos com capacidade de 1 l. Os materiais coletados foram transferidos para o laboratório de Manejo e Conservação do Solo da UFRPE, para determinação da concentração de sedimentos.

A velocidade superficial do escoamento foi calculada por meio da cronometragem do tempo gasto para que o corante azul de metileno percorresse a distância de 3 metros do sulco. A velocidade superficial do escoamento foi aferida de 5 em 5 minutos, a partir da formação da lâmina de escoamento, estas medições foram determinadas no mesmo intervalo das descargas líquidas e sólidas. Os valores de velocidade superficial do escoamento foram multiplicados por um fator de correção $\alpha = 2\sqrt{3}$, para obter a velocidade média do escoamento. Este valor vem sendo utilizado por diversos autores (Abrahams et al., 1986; Slattery & Bryan, 1992; Cantalice et al., 2005).

As dimensões das seções transversais dos sulcos foram mensuradas utilizando-se um perfilômetro, com o objetivo de determinar a área e o perímetro molhado (Figura 7). O perfilômetro é 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. As medições foram realizadas no início dos testes e antes 20 minutos, em uma posição fixa do sulco, a uma distância de 0,5 m da saída do sulco. As medidas foram efetuadas colocando-se o perfilômetro nivelado e na posição vertical sobre as chapas metálicas que o sustentavam. As formas da seção transversal dos sulcos foram retratadas em cartolinas.



Figura 7. Aspecto do levantamento da geometria dos sulcos pré-formados sobre o Neossolo Flúvico, com o uso do perfilometro para determinação da área e perímetro molhado dos mesmos.

A área e o perímetro molhado de cada sulco foram calculados a partir da conformação dos sulcos nas cartolinas. Para o cálculo de área, utilizou-se um planímetro e para o cálculo do perímetro molhado, um curvímetro. O raio hidráulico dos sulcos foi determinado pela área do Neossolo Flúvico (m^2) e P_m é o perímetro molhado da seção transversal do sulco (m).

A concentração de sedimentos e a taxa de erosão foram mensuradas após a determinação da massa de sedimentos e do volume de água no laboratório de Manejo e Conservação do Solo da UFRPE, como já mencionado. A taxa de desagregação de solo nos sulcos foi determinada a partir da massa de solo e da duração das coletas. Os valores obtidos foram inseridos na fórmula descrita por Cantalice et al. (2005):

$$D_r = Q C / L P_m \quad (4)$$

em que D_r é a taxa de desagregação do solo em sulcos ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$), Q é a descarga líquida ($l\ s^{-1}$), C é a concentração ($kg\ l^{-1}$), L é o comprimento do sulco (m) e P_m é o perímetro molhado (m).

Nos eventos de erosão em sulcos, a adição de vazões promove uma carga de sedimentos maior que a capacidade de desagregação do escoamento em sulcos (D_c). Para o cálculo das taxas momentâneas de desagregação do escoamento foi utilizada a seguinte fórmula expressa por Elliot et al. (1989):

$$D_c = K_r (\tau - \tau_c) \quad (5)$$

onde D_c é a capacidade de desagregação do escoamento em sulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); K_r é a erodibilidade do solo em sulcos ($\text{kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$ ou s m^{-1}), τ é a tensão cisalhante do fluxo (N m^{-2} ou Pa) e τ_c é a tensão crítica de cisalhamento do solo (N m^{-2} ou Pa). A tensão τ foi expressa pela fórmula:

$$\tau = \gamma R_h S \quad (6)$$

em que γ é o peso específico da água (N m^{-3}), R_h é o raio hidráulico (m) e S representa a declividade do sulco (m m^{-1}). A erodibilidade do solo em sulco foi estimada através da análise de regressão para o modelo linear entre os valores médios de tensão de cisalhamento (τ) e da desagregação do solo (D_c) calculado para cada vazão aplicada, de acordo com o modelo de predição WEPP, descrito por Nearing (1997). Para o cálculo das perdas totais de solo, foram utilizados os dados da concentração instantânea de sedimentos do escoamento superficial e da taxa de descarga líquida pela fórmula abaixo (Cantalice et al. 2005):

$$PS = \Sigma (Q_{in} C_{in} t) / A \quad (7)$$

em que PS representa a perda total de solo (kg m^{-2}), Q_{in} é a taxa de descarga líquida (l min^{-1}), C_{in} expressa a concentração de sedimentos (kg l^{-1}), t é o intervalo entre amostragem (min) e A é a representação da área do sulco (m^2). Para determinação das características hidráulicas do escoamento nos sulcos também se considerou o cálculo do número de Reynolds (Re) e Froude (Fr) descrito por Simons & Senturk (1992).

O delineamento experimental usado foi de blocos inteiramente casualizados com quatro repetições. Para análise da variância dos resultados foi utilizado o programa estatístico *SAS Learning Edition 2.0* e para a análise de regressão dos dados utilizou-se o programa computacional *Curve Expert 1.3*, de uso livre.

4.4.3 Erosão em voçorocas

Na determinação das taxas de erosão das voçorocas do riacho Exu, Santos (2013) e Cantalice et al. (2014) aplicaram o modelo matemático desenvolvido por Foster & Lane (1983) e descrito por Haan et al. (1993), suportando variações de fluxo e fundamentado em quatro componentes:

Modelo de largura de equilíbrio do canal;

Modelo de função de propagação;

Modelo de erosão do canal antes do processo atingir uma cama não erodível;

Modelo de erosão do canal após o processo atingir uma cama não erodível;

Para estimativa da geometria de equilíbrio do canal, o modelo admite a existir uma distribuição simétrica da tensão de cisalhamento, descrito conforme a equação abaixo:

$$\tau_* = \frac{\tau}{\tau_a} = 1,35[1 - (1 - 2x_*)^{2,9}]; \quad x < 0,5 \quad (8)$$

em que τ_* é a tensão de cisalhamento adimensional; τ é a tensão de cisalhamento real do escoamento na voçoroca; τ_a é a tensão de cisalhamento média do escoamento e X_* é descrita como distância normalizada do perímetro molhado com início na superfície da água sendo definida pela equação:

$$X_* = \frac{X}{WP} \quad (9)$$

O modelo também define a normalização do raio hidráulico e da largura do canal pelas equações:

$$R_* = \frac{R}{WP} \quad (10)$$

$$W_* = \frac{Weq}{WP} \quad (11)$$

em que Weq é a largura de equilíbrio do canal. Um parâmetro normalizado conhecido como X_{*c} , também foi definido como X_* , em que $\tau = \tau_c$, sendo τ_c a tensão crítica de cisalhamento.

Para definição da geometria do canal foi estabelecida a relação entre X_{*c} , R_* e W_* , que assume a suposição de que o canal erode verticalmente, e rapidamente ajusta-se a uma largura de equilíbrio. Maiores detalhes em Cantalice et al. (2014) e Santos (2013).

4.5 Determinação da produção de sedimentos

A determinação da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do riacho Exu foi obtida por meio de 67 campanhas de medição direta da produção de sedimento suspenso e de

sedimento de fundo durante o período compreendido entre 2008 e 2015, sendo 36 campanhas realizadas por Cunha Filho (2009) e Cantalice et al. (2013) nos anos de 2008 e 2009 e 5 entre 2010 e 2011 por Santos (2013). No período de 2012 a 2015 não se registrou escoamento superficial no riacho Exu e, desta forma, a produção de sedimentos nestes 4 anos foi zero. As amostragens e cálculos das taxas de transporte de sedimento suspenso e de sedimento de fundo estão descritas abaixo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Erosão Bruta

Na Tabela 4 consta os valores quantitativos das formas de erosão em entressulcos, sulcos e voçorocas considerados para composição da erosão bruta da Bacia Hidrográfica do Exu. Os valores de erosão em entressulcos foi obtido por Santos (2013) e aprecia o valor da erosão em entressulcos de um Neossolo litólico ponderado entre as condições de caatinga (rala e arbustiva), solo descoberto/preparado, cultura de subsistência e área de abrangência dessas condições de uso, conforme mapa de uso (Figura 3).

Os valores de erosão em sulco acatado de $15,03 \text{ t ha}^{-1}$ foi uma ponderação da erosão em sulcos obtidas em Neossolo litólico (Santos, 2013) e no Neossolo Flúvico aqui estudado, já que estas duas classes de solo representam 75 % dos solos ocorrentes na Bacia do Exu.

Os valores de erosão em voçorocas do Riacho Exu foram os de Cantalice et al. (2014) aplicando o modelo matemático desenvolvido por Foster & Lane descrito por Haan et al. (1993). Assim, o valor de erosão bruta da bacia hidrográfica semiárida do Riacho Exu foi de $66,30 \text{ t ha}^{-1}$, representando a ação erosiva das formas de erosão hídrica na bacia sob as condições de uso/cobertura vegetal e de 75 % dos solos ocorrentes da mesma.

A seguir tem-se os resultados e uma discussão das condições hidráulicas desenvolvidas e das taxas de erosão e da erodibilidade em sulcos obtidas nesse estudo para o Neossolo Flúvico, que sozinho representa 28,24 % dos solos da bacia. Assim, consta na Tabela 5 as condições hidráulicas geradas pela aplicação dos quatro níveis crescentes de fluxo ($5,86$; $12,10$; $20,32$ e $27,56 \text{ l min}^{-1}$) nos sulcos pré-formados sobre o Neossolo Flúvico.

Primeiro, observa-se que as declividades dos sulcos não apresentaram diferença significativa, confirmando o objetivo de se obter a uniformidade entre os blocos, para uma melhor análise estatística e comparação entre as demais variáveis.

Tabela 4. Contribuição dos diferentes tipos de erosão para erosão bruta na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.

Erosão Bruta	PS (t ha⁻¹)
Erosão em Entressulco	
Neosolo Litólico (Santos, 2013)	00,88
Erosão em Sulco	
Neosolo Litólico (Santos, 2013)	24,54
Neossolo Flúvico	05,53
Erosão em Sulco - Valor ponderado	15,03
Erosão em Voçorocas	
(Santos, 2013)	50,38
Erosão Bruta (E)	66,30

Também como esperado, com a aplicação dos quatro níveis crescentes de fluxo, observa-se diferenciação para a vazão de saída, velocidade e regime de escoamento para as vazões aplicadas. Os valores de Reynolds dos escoamentos produzidos variaram de 2.019,52 a 6.929,97, com características predominantes de escoamento turbulento, exceto para o menor fluxo de 5,86 (L min⁻¹) que gerou um escoamento transicional, segundo classificação de Simons & Senturk (1992). Os escoamentos gerados foram todos subcríticos ou lentos (para número de Froude (Fr) < 1) e estatisticamente não foram diferentes. Da mesma forma comportou-se a rugosidade hidráulica obtida através do coeficiente de Darcy-Wiesbach, muito provavelmente porque os leitos dos sulcos constituíram-se da estrutura e textura característica do Neossolo Flúvico, sem nenhum tipo de cobertura vegetal.

Tabela 5. Variáveis hidráulicas dos fluxos aplicados aos sulcos pré-formados sobre o Neossolo Flúvico na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.

Variáveis Hidráulicas de saída obtidas	Fluxos aplicados aos sulcos (L min⁻¹)			
	5,86	12,10	20,32	27,56
Q (L min⁻¹)	5,12 B	7,86 B	17,22 A	20,15 A
V_m (m s⁻¹)	0,18 B	0,22 B	0,30 A	0,33 A
S (m m⁻¹)	0,06 A	0,07 A	0,06 A	0,06 A
Re (adm.)	2019,52 B	3210,11 B	3210,11 B	6929,97 A
Fr (adm.)	0,48 A	0,65 A	0,80 A	0,82 A
Log f (adm.)	6,25 A	1,43 A	0,85 A	0,61 A

Medidas seguidas de letras maiúsculas na mesma linha não diferem entre si, ao nível de 5% de significância, pelo teste de Tukey. Q = Vazão; V_m = Velocidade média do escoamento; S = Declividade média; Re = Número de Reynolds; Fr = Número de Froude; Log f = Rugosidade hidráulica (coeficiente de Darcy-Wiesbach).

Para um melhor entendimento do comportamento hidráulico dos sulcos pré-formados, a seguir são apresentadas algumas relações geométricas dos sulcos por meio de análise de regressão entre variáveis geométricas e variáveis hidráulicas.

O raio hidráulico (R_h) e a área dos sulcos pré-formados obtiveram um ajuste de potência elevado, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,99. Logo, a aplicação de descargas líquidas crescentes permitiu a observação no aumento das tensões de cisalhamento do escoamento, resultando na alteração da secção transversal dos sulcos, atestada pelo aumento do raio hidráulico. Resultados com tendências semelhantes para solos do semiárido com valores potenciais para R^2 superiores a 0,92 nos estudos de Santos (2013); Piscoya (2012); Bezerra et al. (2010).

As velocidades medias obtidas nos sulcos elevaram-se potencialmente, em incrementos decrescentes para os fluxos aplicados nos sulcos, como demonstrado na equação abaixo na Figura 8.

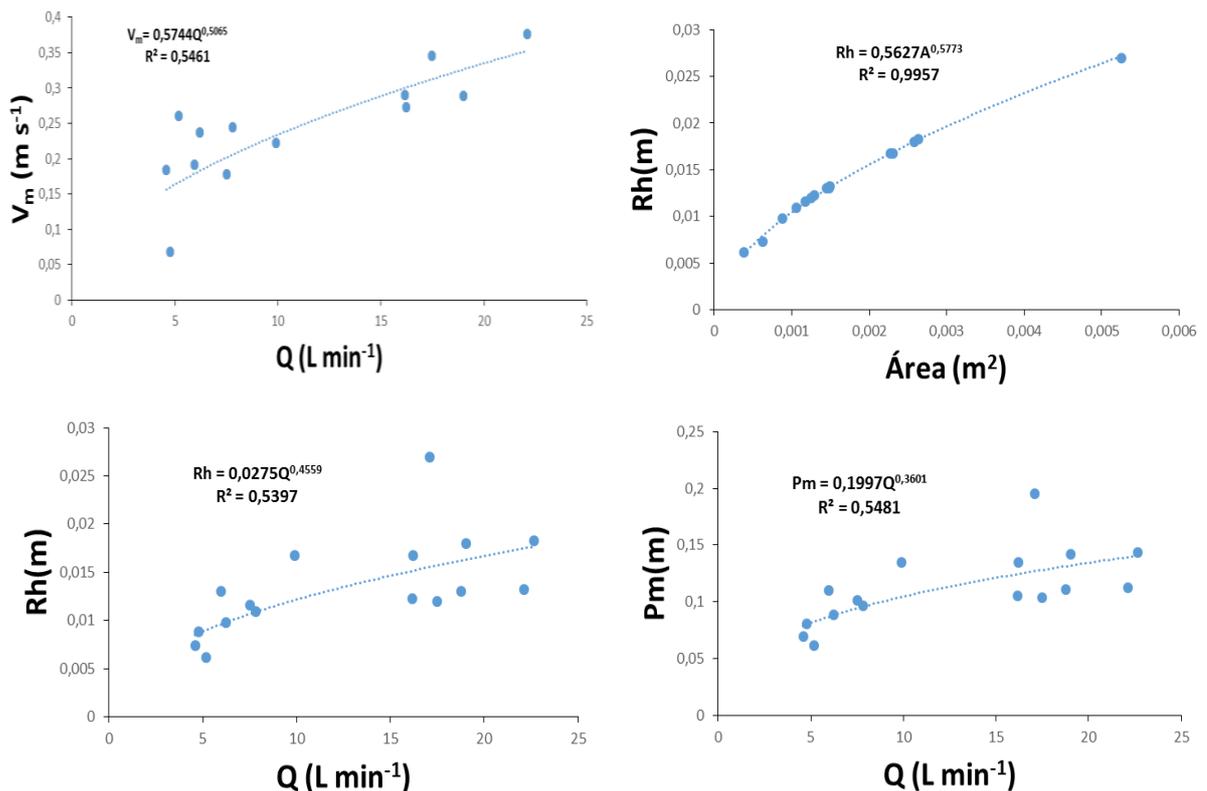


Figura 8. Relação potencial de variáveis obtidas dos sulcos pré-formados no Neossolo Flúvico. a) Velocidade média do escoamento (V_m) e vazão (Q); b) Raio Hidráulico (R_h) e Área da seção transversal (Área); c) Raio Hidráulico (R_h) e vazão (Q); d) Perímetro Molhado (P_m) e vazão (Q).

Giasson e Cassol (1996) e Bezerra et al. (2010) obtiveram valores de coeficiente de determinação mais elevados que o aqui obtido, de 0,54, o que se atribui a um possível maior erro experimental relacionado a equação abaixo.

$$V_m = 0,574 Q^{0,5065} \quad (12)$$

A Tabela 6 apresenta as tensões de cisalhamento desenvolvidas nos sulcos pré-formados, e as correspondentes taxas de erosão. As tensões de cisalhamento (τ) desenvolvidas se apresentaram no intervalo crescente de 4,49 a 11,59 Pa, sendo respondidas com taxas de desagregação significativas de 0,0027 a 0,0223 kg m⁻¹s⁻¹ e, perdas de solo, também significativas, entre 5,53 a 56,24 t ha⁻¹. A Figura 9 apresenta a interessante relação dos valores de número de Reynolds atingidos, mostrando que ocorreram os regimes transicional e turbulento nos sulcos de erosão, para as correspondentes tensões de cisalhamento desenvolvidas, demonstrando que as tensões de cisalhamento foram alcançadas em ambiente de turbulência crescente.

Tabela 6. Tensão de cisalhamento e taxas de erosão obtidas para os fluxos aplicados aos sulcos pré-formados sobre o Neossolo Flúvico na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco. Médias de quatro repetições.

Parâmetro de erosão	Fluxos aplicados aos sulcos (L min ⁻¹)			
	5,86	12,10	20,32	27,56
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

Medidas seguidas de letras maiúsculas na mesma linha não diferem entre si, ao nível de 5% de significância, pelo teste de Tukey. τ = Tensão de cisalhamento; Dr = Taxa de desagregação em sulcos.

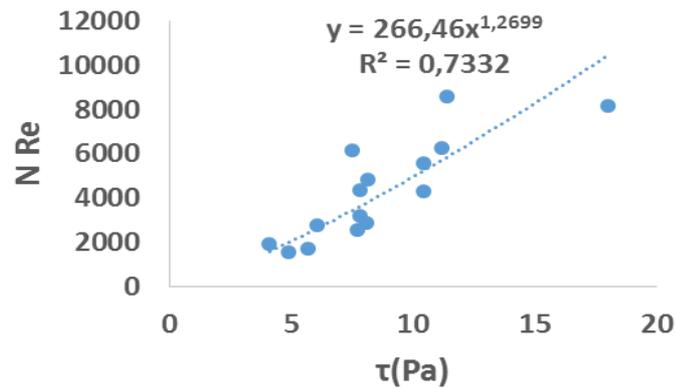


Figura 9. Números de Reynolds (Re) e tensões de cisalhamento obtidos nos sulcos pré-formados sobre o Neossolo Flúvico na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.

Consta na Figura 10, a regressão linear entre as tensões cisalhantes obtidas e as taxas de desagregação em sulcos no Neossolo Flúvico estudado a qual, segundo Flanagan & Nearing (1995) e Bulygina et al., (2007), possibilita a determinação da erodibilidade em sulcos (K_r), que consiste no coeficiente angular (b) dessa regressão linear; e além disso, o valor de tensão na equação para $Dr = 0$, representa a tensão crítica de cisalhamento (τ_c). Assim, a erodibilidade em sulcos (K_r) desse Neossolo Flúvico foi de $0,0021 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$, e a tensão crítica de cisalhamento (τ_c) de 1,909 Pa. Tanto o valor da erodibilidade em sulcos (K_r), quanto o valor da tensão crítica de cisalhamento (τ_c) obtidos para esse Neossolo Flúvico estão abaixo dos obtidos por Cantalice et al. (2005) para um Argissolo, respectivamente $0,0024 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e 2,75 Pa, pelo fato dos Neossolos Flúvicos serem pedogeneticamente menos evoluídos que os Argissolos com horizonte B textural (Bt).

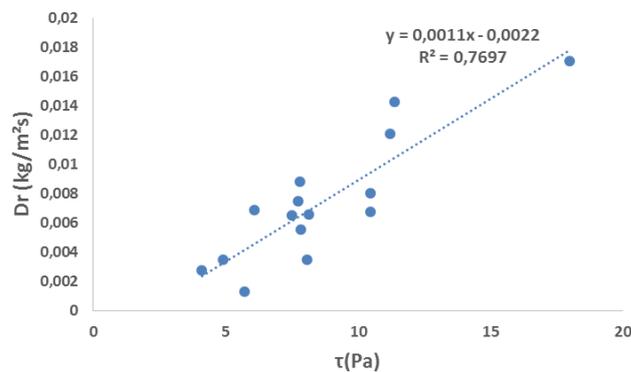


Figura 10. Erodibilidade do solo (K_r) em sulcos, obtida a partir da regressão das taxas de desagregação do solo (Dr) com as respectivas tensões de cisalhamento do escoamento superficial, gerados pelos fluxos crescentes aplicados no Neossolo Flúvico na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco.

Ainda na Figura 10, observa-se que o coeficiente de determinação da regressão ($R^2 = 0,769$) encontrado no presente estudo é considerado bom, quando comparados com os seguintes autores: Li et al, 2015; Dantas, 2014 e Pyscoia, 2012, que também desenvolveram experimentos em semelhantes condições de campo.

5.2 Taxa de Entrega de Sedimento (SDR) da Bacia Hidrográfica do Exu

Os valores de taxa de entrega de sedimentos da bacia hidrográfica do Exu de 2008 a 2015 são observados na Tabela 7. Os resultados de produção de sedimentos referentes aos anos de 2008 e 2009 foram obtidos a partir de Cunha Filho (2009) e Cantalice et al. (2013), e os de 2010 e 2011 por Santos (2013). Os dados de erosão bruta foram obtidos com o experimento neste trabalho realizado e a partir do experimento de Santos (2013).

Os valores de taxa de entrega de sedimentos (SDR) da bacia hidrográfica do Exu para o período de 2008 a 2015 foram baixos, o que é de se esperar em uma bacia hidrográfica inserida em um ambiente semiárido, mesmo para os anos em que ocorreram escoamento, o maior valor foi de 0,185 %. Em seguida, para os anos de 2012 a 2015 com poucas chuvas (Figura 11) que não foram capazes de gerar escoamento superficial concentrado na bacia, a taxa de entrega (SDR) da bacia do Exu foi a zero. Esta variabilidade interanual, tanto das chuvas como da SDR é esperada em ambiente semiárido (Tooth, 2000) conforme apresentado na figura 11.

Santos (2013) em estudo na mesma bacia, mas somente para o período de 2008 a 2012, obteve uma taxa de entrega de sedimentos (SDR) média de 0,0017. Portanto, como se observa o valor médio ainda mais baixo aqui apresentado, reflete os cinco anos com ausência de escoamento superficial concentrado na bacia. Ainda, no estudo do autor, o uso das empíricas equações de USDA-NRCS (1979), Vanoni (1975) e Williams & Berndt (1972) para estimativa da SDR da bacia do riacho Exu obteve os respectivos valores de 0,21; 0,32 e 0,28, bem acima dos valores reais contidos na Tabela 7. Assim, estes resultados até agora obtidos sugerem o monitoramento da bacia em termos de produção e taxa de entrega de sedimentos, por período mais prolongado, principalmente pelo caráter semiárido da bacia hidrográfica do Exu.

Tabela 7. Taxa de entrega de sedimentos (SDR) determinada para Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no semiárido do estado de Pernambuco, no período de 2008 a 2015.

Ano	Entressulcos	Sulcos	Voçorocas	E. Bruta	Y	SDR
	t ha ⁻¹					Adimensional
2008	0,88761	15,03500	50,38000	66,30261	0,46990	0,00709
2009	0,88761	15,03500	50,38000	66,30261	0,01350	0,00020
2010	0,88761	15,03500	50,38000	66,30261	0,04100	0,00062
2011	0,88761	15,03500	50,38000	66,30261	0,12250	0,00185
2012	0,88761	15,03500	50,38000	66,30261	0,00000	0,00000
2013	0,88761	15,03500	50,38000	66,30261	0,00000	0,00000
2014	0,88761	15,03500	50,38000	66,30261	0,00000	0,00000
2015	0,88761	15,03500	50,38000	66,30261	0,00000	0,00000
						0,00122

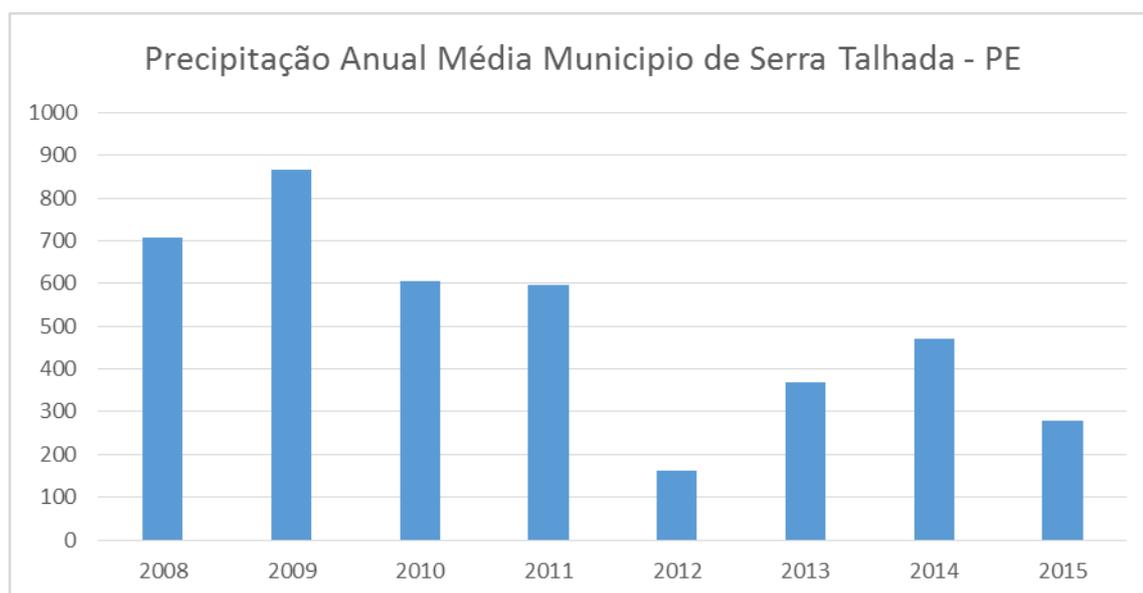


Figura 11. Precipitação anual média no Município de Serra Talhada no semiárido do estado de Pernambuco (Fonte: APAC, 2015).

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir:

- 1- A erodibilidade em sulcos (K_r) do Neossolo Flúvico estudado foi de $0,0021 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e a tensão crítica de cisalhamento (τ_c) do mesmo foi de $1,909 \text{ Pa}$;
- 2- Os valores de número de Reynolds atingidos nos sulcos de erosão atestam a ocorrência dos regimes transicional e turbulento nos mesmos;
- 3- O valor de erosão Bruta (E) de $66,30 \text{ t ha}^{-1}$ pode ser considerado alto para o ambiente semiárido, que apresenta limitação de precipitação pluviométrica;
- 4- A taxa de entrega de sedimentos (SDR) da Bacia Hidrográfica do Riacho Exu para o período de 2008 a 2015 teve seu valor médio de $0,00122$, refletindo com clareza a variabilidade climática dessa bacia semiárida.

7 REFERÊNCIAS

ABRAHAMMS, A. D.; PARSONS, A. J.; LUK, S.-H. Resistance to overland flow on desert hillslopes. **Journal of Hydrology**, v. 88, n. 3, p. 343-363, 1986

ALBUQUERQUE, A. R. C.. Bacia Hidrográfica: Unidade de Planejamento Ambiental **Revista Geonorte**, Edição Especial, V.4, N.4, p.201 – 209, 2012.

BARRELLA, W.; PETRERE JR., M.; SMITH, W.S.; MONTAG, L.F.A. As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R. & LEITÃO FILHO, H.F. **Matas ciliares: Conservação e recuperação**. EDUSP, 2ª ed., São Paulo, p.187-207, 2001.

BERTOL, O. J.; RIZZI, N. E.; BERTOL, I.; ROFOFF, G. Perdas de solo e água e qualidade do escoamento superficial associadas à erosão entre sulcos em área cultivada sob semeadura direta e submetida às adubações mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 04, p. 781-792, 2007.

BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B.. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 3, p. 565-573, 2006.

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

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.; CUNHA FILHO, M.; STOSIC, B.D.; PISCOYA, V.C.; GUERRA, S.M.S.; SINGH, V.P. Relationship between bedload and suspended sediment in the sand-bed Exu River, in the semi-arid region of Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 8, p. 1789-1802, 2013.

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

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 Ciências do Solo**, v. 29, n. 4, p. 597-607, 2005.

CANTALICE, J. R. B.; SANTOS, C. G. ; SILVA, M. O. ; CAVALCANTE, D. M. ; SILVA, Y. J. A. B. ; BRAGA JUNIOR, H. A. C. ; BARROS JUNIOR, G. ; PISCOYA, V. C. . Modelagem da erosão de voçoroca em bacia hidrografica semiarida. In: **Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, 2014, João Pessoa. XI ENES 2014. Porto Alegre. ABRH, 2014.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 372 p.

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

CHOW, V. T.; MAIDMANT, D.R.; MAYS, L. W. 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York, 722 p.

CUNHA FILHO, M. **Produção de Sedimento em Suspensão e por Carga de Fundo na Bacia Hidrográfica do Riacho Exu no Semiárido Pernambucano**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Agronomia, 2009. 215p.

CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia fluvial*. Edgar Blucher. São Paulo, 1981.

DANTAS, J. S.; MARTINS FILHO, M. V.; JÚNIOR, J. M.; AMARAL RESENDE, J. M.; TEIXEIRA, D. D. B.; BARBOSA, R. S.; SIQUEIRA, D. S. Coeficiente de erodibilidade em sulcos e entressulcos de Argissolos coesos estimado pela cor do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 9, p. 700-707, 2014.

ELLIOT, W.J.; LIEBOW, A.M.; LAFLEN, J.M.; KOHL, K.D. A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments, 1987 e 88. **West Lafayette, The Ohio State University and USDA Agricultural Research Service National Soil Erosion Research Laboratory Report**, n. 3, 1989.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2. Ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. United States Department of Agriculture-USDA: Water Erosion Prediction Project. **West Lafayette, National Soil Erosion Research Laboratory–NSERL**, 1995.

FOSTER, G.R.; LANE, L.J. Erosion by concentrated flow farm fields. In “Proceedings, D.B. Simons symposium on Erosion and Sedimentation”. Colorado State University, Ft. Collins, CO. 1983.

FREITAS, F.J.; CANTALICE, J.R.B.; BEZERRA, S.A.; SILVA, M.D.R.O.; SANTOS, P. M.; CORREA, R.M.; LIMA, P.A.; FIGUEIRA, S.B. Erosão em entressulcos sob caatinga e culturas agrícolas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1743-1751, 2008.

GIASSON, E.; CASSOL, E. A. Relações da erosão em sulcos com vazões aplicadas e doses de resíduos de trigo incorporados a um plintossolo franco-argiloarenoso. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 20, n. 1, p. 117-125, 1996.

GORDON, N.D.; FINLAYSON, B.L.; McMAHON, T.A.; GIPPEL, C.J. **Stream hydrology: an introduction for ecologists**. 2. Ed. John Wiley and Sons, 2004, 429p.

HAAN, C.T.; BARFIELD, B.J.; HAYES, J.C. **Design hydrology and sedimentology for small catchments**. Elsevier, 1993.

HOLLANDA, M. P., CECÍLIO, R. A., CAMPANHARO, W. A., ZANETTI, S. S., ANDRADE, L. N. D., & Garcia, G. D. O.. Evaluation of TOPMODEL for prediction of the runoff of a watershed under different land uses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 489-496, 2015.

HUDSON, P.F.; MOSSA, J., Suspended sediment transport effectiveness of three, large impounded rivers, U.S. Gulf Coastal Plain: **Environmental Geology**. v. 32, n. 4, p 263–273. 1997.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. Banco de Dados para Pesquisa e Ensino (BDMEP). Disponível em: <<http://inmet.gov.br>> Acesso em: fev. 2014

KIRKBY, M. J.; BRACKEN, L. J. Gully processes and gully dynamics. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, n. 14, p. 1841-1851, 2009.

KOMPANI-ZARE, M.; SOUFI, M.; HAMZEHZARGHANI, H.; DEHGHANI, M. The effect of some watershed, soil characteristics and morphometric factors on the relationship between the gully volume and length in Fars Province, Iran. **Catena**, v. 86, n. 3, p. 150-159, 2011.

LI, Z; ZHANG, G.; GENG, R.; WANG, H. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China. **Biosystems Engineering**, v. 129, p. 248-257, 2015.

LU, H.; MORAN, C. J.; PROSSER, I. P. Modelling sediment delivery ratio over the Murray Darling Basin. **Environmental Modelling & Software**, v. 21, n. 9, p. 1297-1308, 2006.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the ASAE [American Society of Agricultural Engineers]**, 1979.

MELO, R. O.; CANTALICE, J. R. B.; ARAUJO, A. M.; CUNHA FILHO, M. Produção de sedimento suspenso de uma típica bacia hidrográfica semi-árida. In: PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS, SOCIAIS ECONÔMICOS: ED: IDE, N.C; VAL, L.A.A; RIBEIRO, M.L. Campo Grande, MS. 199 – 216p. 2009.

MENDONÇA, P. G. Simulação espacial da perda de solo e nutrientes por erosão em um argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. 2013.

MONTGOMERY, D.R. Soil erosion and agricultural sustainability. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Vol. 04, No. 13. Washington D.C., PNAS, pp. 268–272, 2007.

MORENO DE LAS HERAS, M., Nicolau, J. M., Merino-Martín, L., & Wilcox, B. P. Plot-scale effects on runoff and erosion along a slope degradation gradient. **Water Resources Research**, v. 46, n. 4, 2010.

NEARING, M. A. The mechanics of soil detachment by raindrops and runoff. **Eurasian soil science**, v. 30, n. 5, p. 552-556, 1997.

PARKER, G.; TORO-ESCOBAR, C. M. Equal mobility of gravel in streams: The remains of the day. **Water Resources Research**, v. 38, n. 11, p. 46-1-46-8, 2002.

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. Tese – (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife.

PONCE, V.M. **Engineering hydrology. Principles and Practices**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA. 640p. 1989.

POWELL. D. M., Dryland Rivers: Processes and forms. In: **Geomorphology of Deserts Environments**, Eds. Parsons, A. J. and Abrahams, A. D. Springer Netherlands, second edition, 2009. p. 333-373.

REID, I.; LARRONE, J. B. Bed load sediment transport in an ephemeral stream and a comparison with seasonal and perennial counterparts. **Water Resources Research**. v. 31, n. 3, p 773–781, 1995.

ROBICHAUD, P. R.; WAGENBRENNER, J. W.; BROWN, R. E. Rill erosion in natural and disturbed forests: 1. Measurements. **Water Resources Research**, v. 46, n. 10, 2010.

SANTANA, D.P. Documentos 30. Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 63p.

SANTOS, C. G. DOS. **Erosão hídrica e taxa de entrega de sedimentos na Bacia Hidrográfica Semiárida do Riacho Exu, PE**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Agronomia, 2013. 109f.

SCAPIN, J. **Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria–RS**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

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

SLATTERY, M. C.; BRYAN, R. B. Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: a laboratory experiment. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 17, n. 2, p. 127-146, 1992.

Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE. Dados pluviométricos mensais do Nordeste. Recife: SUDENE, 1990.

TOOTH, S. Process, form and change in Dryland Rivers: a review of recent research. *Earth-Science Reviews*, v.51, pp.67-107, 2000.

TUCCI, C. E. M. Controle de Enchentes. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre, RS: ABRH-Edusp, 1993. cap. 4.

TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.2, n.1, p.135-152, 1997.

UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE - USDA - NRCS. Sediment sources, yields, and delivery ratios. National Engineering Handbook, Section 3, Sediment, Washington, 1979.

UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE SOIL CONSERVATION SERVICE - USDA - SCS. Procedure for determining rates of land damage, land depreciation, and volume of sediment produced by gully erosion. Technical Release No. 32. US GPO 1990-261-419:20727/SCS. US Government Printing Office, Washington, DC. 1966.

VANONI, V.A. (Ed). Sedimentation Engineering. ASCE Manuals & Reports on Engineering Practice n.54. American Society of Civil Engineers, New York, 1975.

VESTENA, L. R. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas eo transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem.** 2008. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

WALLING, D. E. Linking land use, erosion and sediment yields in river basins. **Hydrobiologia**, v. 410, p. 223-240, 1999.

WALLING, D.E. Linking the field to the river: sediment delivery from agricultural land. In: J. Boardman, I.D.L. Foster, and J.A. Dearing (eds.) Soil erosion on agricultural lands. Wiley, New York, NY, p. 129-152, 1990.

WALLING, D. E. The sediment delivery problem. **Journal of hydrology**, v. 65, n. 1, p. 209-237, 1983.

WALLING, D. E. 2005. Human impact on land–ocean sediment transfer by the world’s rivers. **Geomorphology**, Amsterdam, Elsevier, Vol. 79, n. 3. pp. 192–216, 2005.

WALLING, D. E. **The impact of global change on erosion and sediment transport by rivers: current progress and future challenges.** Unesco, 2009.

WARD, A. N. D.; TRIMBLE S.W. Environmental hydrology, New York: Lewis Publishers. 2004.

WILLIAMS, J.R.; BERNDT, H.D. Sediment yield computed with universal equation. Proc. of the Am. Soc. Civ. Eng., **Journal of Hydology**. Div. 98 (HY2): 2.078-2.098, 1972.

YAN, L. J.; YU, X. X.; LEI, T. W.; ZHANG, Q. W.; QU, L. Q. 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.

YANG, C.T. Bed-load transport. In: **Sediment Transport: Theory and practice.** McGraw-Hill, 1996. p. 90-121.