



**UFRPE**

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**JÚLIO CÉSAR PINHEIRO SANTOS**

**RESISTÊNCIA HIDRÁULICA EM FLUXO LAMINAR EM ENCOSTAS NA  
PRESENÇA E NA AUSÊNCIA DE VEGETAÇÃO**

**Recife, PE**  
**Outubro, 2019**

**JÚLIO CÉSAR PINHEIRO SANTOS**

**RESISTÊNCIA HIDRÁULICA EM FLUXO LAMINAR EM ENCOSTAS NA  
PRESENÇA E NA AUSÊNCIA DE VEGETAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

**Orientador:** Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice

**Co-orientador:** Prof. Dr. Genival Barros Júnior

**Recife, PE  
Outubro, 2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S237r Santos, Júlio César Pinheiro  
Resistência hidráulica em fluxo laminar em encostas na presença e  
na ausência de vegetação / Júlio César Pinheiro Santos. – 2019.  
40 f. : il.

Orientador: José Ramon Barros Cantalice.  
Coorientador: Genival Barros Júnior.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de  
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Ambiental, Recife, BR-PE, 2019.  
Inclui referências.

1. Escoamento laminar 2. Rugosidade vegetal 3. Capim elefante  
4. Solo descoberto I. Cantalice, José Ramon Barros,  
orient. II. Barros Júnior, Genival, coorient. III. Título

CDD 628

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**RESISTÊNCIA HIDRÁULICA EM FLUXO LAMINAR EM ENCOSTAS NA  
PRESENÇA E NA AUSÊNCIA DE VEGETAÇÃO**

JÚLIO CÉSAR PINHEIRO SANTOS

Aprovado em: 15 de julho de 2019.



Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice - UFRPE

Presidente e Orientador - PPEAMB



Dr. Eng. Douglas Monteiro Cavalcante

Membro externo - PNPD/UFRPE

---

Prof. Dr. Fernando Cartaxo Rolim Neto

Membro Interno - UFRPE



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me proporcionado a realização deste curso e também pelas bênçãos da minha vida.

À minha mãe Juliana Maria Cavalcanti Pinheiro, obrigado pelo apoio nos momentos mais difíceis da minha vida e também pelo incentivo dado para a conclusão do curso.

Aos demais familiares pelo apoio e incentivo para realização deste curso.

Ao Professor Dr. José Ramon Barros Cantalice, pela orientação, e oportunidades.

Aos meus amigo(a)s do Laboratório de Engenharia de Manejo e Conservação do Solo (UFRPE), José Adalberto, André Spinosa, Elvis Obede, Layane Rocha.

A Maria Graciete dos Santos Nunes e também toda família de Elves Obede e a comunidade Nova Espanha, localizado no município de Tabira-PE, pela receptividade e apoio para a realização desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (PPEAMB) e professores do (PPEAMB) que contribuíram para a realização desta pesquisa e também pelo crescimento profissional.

Aos professores Dr. Fernando Cartaxo Rolim Neto e Dr. Douglas Monteiro Cavalcante, pelo o convite de participação na defesa desta dissertação.

*“Se trabalhamos e lutamos é porque temos depositado a nossa esperança no Deus vivo, o Salvador de todos os homens, especialmente dos que creem”.*

*1 Timóteo 4:10*

## RESUMO

A aplicação das práticas agrícolas adequadas tem sido apontada nos últimos tempos como uma alternativa para garantir a sustentabilidade nos solos agrícolas. Essas alternativas englobam muitas culturas que protegem o solo contra o impacto da gota de chuva, reduzem da velocidade do fluxo e aumentam a resistência hidráulica. As características hidráulicas do fluxo superficial determinam a capacidade de desagregação do fluxo. Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho foi determinar a resistência hidráulica gerada pela presença e ausência do capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum), com 45 dias e 180 dias de crescimento, sob fluxo laminar de chuvas simuladas, no semiárido do Brasil. Parcelas de 2 m<sup>2</sup> de área com quatro repetições foram submetidas as chuvas com 50 minutos de duração. Todos os fluxos gerados foram laminares, de acordo com número de Reynolds e Froude obtidos. Observou-se que o tratamento com solo descoberto apresentou um alto valor para a velocidade média do fluxo e descarga líquida. O tratamento de capim elefante com 180 dias apresentou um alto valor referente a taxa de infiltração provocado pela atuação da resistência hidráulica do fluxo laminar na presença da vegetação. Os coeficientes de rugosidade de Darcy-Weisbach ( $\log f$ ) obtidos apresentaram diferenças, devido à resistência gerada pelo capim elefante com 45 e 180 dias de desenvolvimento, enquanto os coeficientes de arraste vegetal ( $CD'$ ) apresentaram igualdade para o solo descoberto e vegetado.

**Palavras-chave:** Escoamento laminar; rugosidade vegetal; capim elefante; solo descoberto.

## ABSTRACT

The best management practices for soil tillage have been considered to ensure sustainability in agricultural lands. The best management practices application includes many crops that protect the soil against the raindrop impact, flow velocity reduction, and hydraulic resistance increase. The overland flow hydraulic allows accessing the detachment flow capacity. Therefore, this study had objected to determine the hydraulic resistance generated by the absence and presence of the Elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum) with 45 and 180 growth days, under sheet flow generated by simulated rains on the Brazilian semiarid. Plots with 2m<sup>2</sup> area in four repetitions were submitted to rains with 50 minutes duration. All generated flows were laminar according to the Reynolds and Froude numbers. The bare soil showed a higher flow velocity and flow discharge. The Elephant grass with 180 growth days showed the higher water infiltration rate, due to the hydraulic resistance generated by Elephant grass on sheet flow. All Darcy-Weisbach roughness coefficients obtained were different due to the hydraulic resistance caused by Elephant grass with 45 and 180 growth days, while the vegetal drag coefficients (CD') were equal between bare soil and Elephant grass conditions.

**Keywords:** Laminar flow; vegetal roughness; elephant grass; bare soil.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>12</b>
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1 Formação do Escoamento Superficial.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2 O Escoamento Superficial Laminar .....</b>	<b>13</b>
<b>3.3 Abordagem Hidráulica do Escoamento Superficial Laminar.....</b>	<b>15</b>
<b>3.4 O Escoamento Superficial Laminar em Encostas Sob Cultivos Agrícolas .....</b>	<b>17</b>
<b>3.5 Resistência ao Escoamento Superficial Laminar.....</b>	<b>18</b>
<b>3.6 Resistência Criada pela Vegetação ao Escoamento Superficial Laminar.....</b>	<b>20</b>
<b>3.7 Parâmetros Hidráulicos-Vegetativos .....</b>	<b>20</b>
<b>3.8 Tensão e Coeficiente de Arraste Vegetal em Escoamento Superficial Laminar ....</b>	<b>21</b>
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1 Área Experimental .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2 Delineamento Experimental e Tratamentos .....</b>	<b>25</b>
<b>4.3 Condução do experimento em campo e características das chuvas simuladas.....</b>	<b>26</b>
<b>4.4 Características Hidráulicas do Escoamento Laminar.....</b>	<b>26</b>
<b>4.5 Resistência Hidráulica .....</b>	<b>27</b>
<b>4.6 Análise Estatística.....</b>	<b>27</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>28</b>
<b>5.1 Comportamento Hidráulico do Fluxo Laminar .....</b>	<b>28</b>
<b>5.2 Resistência Hidráulica ao Fluxo Laminar Gerado pela Vegetação .....</b>	<b>30</b>
<b>5.3 Coeficiente de Escoamento Superficial e Taxas da Erosão Entressulcos Associadas ao Fluxo Laminar .....</b>	<b>32</b>
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>34</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>35</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema de classificação dos regimes de escoamento gerados durante as simulações de chuva.....	17
<b>Figura 2.</b> Resistência hidráulica e número de Reynolds relação ao escoamento superficial.....	19
<b>Figura 3.</b> Localização do município de Tabira no estado de Pernambuco.....	23
<b>Figura 4.</b> Imagem da propriedade rural com localização da área experimental.....	24
<b>Figura 5.</b> Simulador de chuvas nas condições: (a) Capim-Elefante 45 dias; (b) Capim-Elefante 180 dias; (c) Solo descoberto.....	25
<b>Figura 6.</b> Relação entre a Velocidade média do escoamento e o número de Froude dos escoamentos laminares obtidos para os tratamentos com Capim Elefante e solo descoberto.....	30
<b>Figura 7.</b> Variação da Velocidade média do escoamento superficial em função do fator logaritmo do coeficiente de Darcy-Weisbach ( $\log f$ ) para o Capim Elefante com 45 e 180 dias de desenvolvimento e para o Neossolo descoberto.....	32
<b>Figura 8.</b> Taxa de desagregação do solo ( $D_i$ ) do escoamento superficial em função da Velocidade média do escoamento superficial para o Capim Elefante com 45 e 180 dias e para o Neossolo descoberto. ....	33

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Análise granulométrica na camada de 0 – 20 cm, média de quatro repetição, em um Neossolo Flúvico da área experimental no município de Tabira-PE.....	24
<b>Tabela 2.</b> Umidade gravimétrica inicial na camada de 0 – 20 cm do Neossolo Flúvico da área experimental no município de Tabira-PE, para os diferentes tratamentos. Média de quatro repetições.....	25
<b>Tabela 3.</b> Variáveis hidráulicas de escoamento superficial gerado por chuva simulada, sobre as condições de Solo descoberto e Capim elefante com 45 e 180 dias, em um Neossolo Flúvico.....	28
<b>Tabela 4.</b> Variáveis de resistência hidráulica gerada pela vegetação ao escoamento superficial para os Solos descobertos, Capim elefante com 45 dias e 180 dias para um solo Neossolo Flúvico.....	31
<b>Tabela 5.</b> Taxa de erosão e coeficientes de escoamento superficial obtidas nos 3 tratamentos estudados por vegetação em um solo Neossolo Flúvico.....	33

**LISTA DE SÍMBOLOS**

(°C)	Graus Celsius
(adm)	Adimensional
(cm)	Centímetros
(g kg <sup>-1</sup> )	Gramas por Quilogramas
(kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Quilogramas Metros Quadrados por segundo
(kg m <sup>-3</sup> )	Quilogramas Metros Cubico
(m m <sup>-1</sup> )	Metros por Metros
(m s <sup>-1</sup> )	Metros por Segundos
(m)	Metros
(m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	Metros Quadrados por Segundo
(m <sup>2</sup> )	Metros Quadrados
(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Metros Cúbicos por Segundo
(N m <sup>-3</sup> )	Nilton Metros Cubico
(s)	Segundo
(ton/há)	Tonelada por Hectare

**LISTA DE SIGLAS**

Adm	Adimensional
CM	Cobertura morta
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
D	Desmatadas
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
f	Perda de carga
f'	Perda de superfície
f''	Arraste vegetal
f <sub>f</sub>	Resistência de forma
f <sub>g</sub>	Resistência de grão
f <sub>t</sub>	Perda de carga
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MA	Morro abaixo
MN	Mata nativa
N 1	Nível 1
N 2	Nível 2
PC	Preparo convencional
PD	Plantio direto

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente um dos grandes problemas ocorrido no meio ambiente é a alteração do ecossistema que muitas das vezes estar relacionado com aumento da produção de alimentos devido ao crescimento da população mundial (Silva, 2016; Jardim et al., 2017). Esse fato ocorre devido ao mau planejamento ocasionado pelo homem para o aproveitamento da utilização do uso do solo, mediante o favorecimento da exploração da agricultura e da pecuária, pode-se perceber que nos últimos anos vem aumentando anualmente a transformação dos ecossistemas naturais em ambientes degradados (Jardim et al., 2017). Esses fatos são causados pela ação antrópica de modo inadequado, onde a maioria dessas terras vem sofrendo com redução a sua capacidade de produção, provocando assim danos irreversíveis devido ao crescimento da degradação do solo (Fiorio et al., 2016).

A região semiárida do nordeste do Brasil apresenta um baixo índice pluviométrico baixos (350 a 700 mm/ano), devido a péssima distribuição espacial e temporal das chuvas (Vale & Azevedo, 2013; Santos et al., 2014). Entretendo essa região é considerada como ambiente frágil devido à ausência da camada vegetal e também por possuir condições físicas limitadas para as práticas da agricultura e da pecuária, e além do mais, possui solos pedregosos ou muito arenosos que dificulta a prática da agropecuária de maneira regular e com alta produtividade (Jardim et al., 2017).

Na região do no Nordeste do Brasil, apresenta diversas espécies de forrageiras, dentre elas tem o capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schumach.) que pertencem ao grupo de espécies das forrageiras, sendo considerada uma das mais utilizadas para alimentação de bovinos. Também apresentando maior predominância na região do nordeste brasileiro, por apresenta uma boa fixação no solo e também por ter uma elevada produção de matéria fresca e ser adaptado à região (Costa et al., 2008; Lima Júnior et al., 2013; Leite et al., 2018).

Diante do aproveitamento do solo para a exploração das práticas conservacionistas em terra agrícolas, em geral, vem intensificando para controlar degradação no solo onde os fatores de chuva, solo, topografia são auxiliados para a formação desse processo (Santos et al., 2009). Carvalho et al. (2012), citam que, com a aplicação das boas práticas agrícolas que, contribuem para um manejo adequado do solo.

A cobertura vegetal no solo tem como finalidade de dissipar a energia cinética das gotas da chuva, tendo o objetivo principal de impedir o impacto das gotas das chuva na superfície do solo, por sua vez, a rugosidade gerado pela vegetação atua na retenção da lâmina do escoamento

superficial que por consequência resulta na infiltração na água no solo (Castro et al., 2006; Lima et al., 2015).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Determinar a resistência hidráulica ao fluxo laminar gerado pelo capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum) em dois estágios de desenvolvimento vegetativo (45 dias e 180 dias) em ambiente do Semiárido do nordeste do Brasil, com e sem cobertura vegetal, sob chuvas simuladas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Avaliar as variáveis hidráulicas do escoamento laminar: velocidade média do escoamento, descarga líquida por unidade de largura, altura da lâmina do escoamento, taxa de escoamento superficial, intensidade de precipitação, taxa de infiltração, números de Reynolds (Re) e Froude (Fr);
2. Avaliar a resistência ao escoamento laminar pelo emprego do coeficiente de Darcy-Weisback ( $f$ );
3. Determinar o coeficiente de arraste vegetal ( $CD'$ ) para as condições de solo, com e sem cobertura vegetal;
4. Avaliar as relações de resistência hidráulica com os números de Reynolds e de Froude.

## **3 REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1 Formação do Escoamento Superficial**

O ciclo hidrológico é um processo natural que envolve o movimento contínuo de água, por meio da evaporação da água do mar e também da precipitação da água que cai em forma de chuvas, contudo uma parte dessa precipitação poderá cair sobre a superfície do solo e outra parte poderá ser interceptada pela cobertura vegetal presente no solo, resultando numa diminuição da sua energia cinética.

Quando as gotas de chuva chegam na superfície do solo poderão ocorrer dois processos, infiltração ou retenção superficial Barcelos (2005), sendo que o processo de infiltração de água no perfil do solo vai depender da quantidade de água disponível na superfície do solo e também da quantidade de água e ar presentes nos poros do interior do solo. Por conseguinte, quando houver disponibilidade de água na cobertura do solo, o perfil de umidade do solo tenderá a ser saturado em toda a profundidade, fazendo com que, a camada superficial do solo seja a primeira camada a saturar. Deste modo, o processo de infiltração exerce um papel fundamental no controle do escoamento superficial. A retenção superficial se forma concomitantemente ao processo de infiltração, acumulando água na superfície que pode infiltrar ou escoar. Conforme a umidade do solo se expande em todo o perfil ocorrem reduções da coesão e da resistência ao cisalhamento.

Morgan (1996) afirma que à medida que ocorrem as chuvas prolongadas, aumenta o conteúdo de umidade do solo e, conseqüentemente, haverá a diminuição da capacidade de infiltração do solo provocando formação das poças de água na superfície do solo.

O escoamento superficial se inicia quando a intensidade de precipitação supera a taxa de infiltração da água no solo, após supridas as abstrações hidrológicas como a interceptação vegetal, detenção e retenção superficial, demanda matricial do solo e evaporação (Griebeler et al., 2001). Por sua vez, o escoamento superficial pode ser definido como sendo o deslocamento do fluxo de água sobre a superfície do solo (Lima et al., 2014).

### **3.2 O Escoamento Superficial Laminar**

Diversos autores buscaram propor uma descrição sobre a temática que envolve o escoamento superficial e sua terminologia. Em uma definição simples, pode-se considerar que este processo diz respeito ao fluxo de água sobre a superfície do solo antes de tornar-se concentrado (Gerits et al., 1990). Horton (1933) descreveu que o fluxo superficial é formado através da fração da chuva que se precipita sobre os solos, formando a lâmina d'água na superfície do solo e escoando por gravidade.

Embora o escoamento superficial possa ser chamado de fluxo superficial, o conceito de uma lâmina uniforme descendo uma encosta é irrealista. A precipitação da chuva pode ser distribuída uniformemente, mas ela poderá seguir com a diminuição da declividade em um fluxo subdividido (Gerits et al., 1990).

O escoamento superficial é considerado como sendo o fluxo da água que ocorre na superfície do solo, em que a taxa de precipitação excede a capacidade de infiltração do solo, e

ocorrendo também em áreas que apresentam solos impermeáveis ou saturadas. O fluxo laminar é considerado rugoso quando a superfície do solo retarda o fluxo da água (Brooks et al.,1997).

Esse tipo de escoamento ocorre em locais que tenham áreas com menor densidade de drenagem, tais como: regiões áridas, semiáridas e árticas. Essas regiões, por sua vez, apresentam vegetações menos densas. Neste contexto, o fluxo laminar pode atingir velocidades entre 10 a 500 m/h (Bravard & Petit, 2000).

Gerits et al. (1990) relacionam que o escoamento laminar pode ocorrer nas quatro formas a seguir:

- Escoamento hortoniano - ocorre em função da taxa de precipitação da chuva quando excede a taxa de infiltração, gerando na superfície do solo uma lâmina da água e também uma determinada vazão do fluido, podendo provocar o transporte de sedimentos. Acontece devido a camada da superfície do solo apresentar umidade e por consequência vai ter baixa permeabilidade;
- Escoamento hortoniano atrasado - sucede quando a precipitação da chuva excede a taxa de infiltração com atraso, devido ao tipo de solo que por sua vez, vai apresentar uma baixa permeabilidade. A ocorrência desse tipo de escoamento vai ocorrer em áreas que apresentam solos com argila expansiva (Neossolos Verticos), solos rasos e solos com contato lítico próximo à superfície, como por exemplo em ambientes semiáridos;
- Escoamento saturado - é decorrente do limite excedido da capacidade de absorção da água do solo;
- Escoamento superficial laminar saturado - também conhecido como escoamento dunniano, de Dunne & Black (1970), que é produzido quando a capacidade de armazenamento de água pelo solo é completamente preenchida, e toda subsequente adição de água na superfície do solo é forçada a fluir sobre a superfície do solo. Este escoamento frequentemente ocorre quando o solo torna-se saturado na superfície, por fluxo ascensional, provocado pela elevação do lençol freático. A ocorrência do escoamento por saturação pode ocorrer em regiões úmidas e com vegetação densa e também de acordo com as condições topográfica (declives côncavos com fundos de vale planos).

### 3.3 Abordagem Hidráulica do escoamento Superficial Laminar

A formação do escoamento superficial raso está associado à intensidade das chuvas, pois a lâmina se forma quando o volume precipitado excede a taxa de infiltração do solo, sendo consequência da superação da interceptação vegetal, da evaporação, da demanda matricial do solo, da retenção e da detenção superficial, as quais são conhecidas como interceptação vegetal, da evaporação, a demanda matricial do solo, a retenção e a detenção superficial (Bezerra et al., 2010).

Cantalice et al. (2017) afirmam que o comportamento do fluxo superficial é influenciado devido à presença de vegetação, por sua vez, gera resistência ao fluxo graças as suas características, como por exemplo as estruturas das plantas, tais como diâmetro, altura, tamanho, densidade, grau de submergência e rigidez.

Segundo Ponce (1989), o escoamento superficial laminar pode ser definido pela Equação (1):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \div \frac{\partial A}{\partial t} = ql \quad (1)$$

em que:  $ql$  = fluxo lateral por unidade de comprimento ( $m^2 s^{-1}$ );  $Q$  = descarga líquida ( $m^3 s^{-1}$ );  $X$  = comprimento na direção do fluxo (m);  $A$  = área do contorno ( $m^2$ );  $t$  = tempo (s).

Então, o mesmo autor cita que a equação unidimensional deve considerar que o escoamento que ocorre em uma superfície plana de comprimento, e uma largura infinita para o declive. Sendo assim, é sugerido uma análise por unidade de largura, conforme a Equação (2):

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

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

O escoamento superficial raso pode ser conhecido a partir dos seguintes parâmetros hidráulicos: altura da lâmina de escoamento, fator de perda de carga, e pelos números de Reynolds ( $Re$ ), conforme a Equação (3) e Froude ( $Fr$ ), conforme descrito pela Equação (4) (Govers, 1989; Morgan, 1996).

$$Re = \frac{Vh}{\nu} \quad (3)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g h}} \quad (4)$$

em que:  $V$  = velocidade do escoamento ( $m s^{-1}$ );  $g$  = gravidade ( $m s^{-2}$ );  $h$  = altura da lâmina de escoamento (m) e  $\nu$  = viscosidade cinemática da água ( $m^2 s^{-1}$ ).

Os autores Simons & Senturk (1992) afirmam que o número de Reynolds é a relação entre a magnitude das forças de inércia com as forças viscosas. Hidraulicamente, o início do fluxo superficial acontece na forma não concentrada, quando então o regime do fluxo é laminar ( $Re < 500$ ), sendo incapaz de colocar as partículas de solo em movimento. Diante dessas condições de lâmina muito rasa, o escoamento superficial inicia o transporte das partículas de solo desagregadas pela ação do impacto da chuva.

Quando a profundidade do fluxo aumenta, ocorre uma diminuição da desagregação de partículas pelo impacto das gotas de chuva, e quando a profundidade do fluxo atinge 12 mm ou mais a desagregação pelas gotas da chuva torna-se nula (Wainwright & Bracken, 2011). Wainwright et al. (2008) relatam que quando o escoamento superficial entra em regime de transição ( $500 < Re \leq 2000$ ) parece ocorrer o início do movimento de partículas pela ação de desagregação do fluxo, ou seja pela tensão de cisalhamento do escoamento. Por outro lado, Silveira (2013), Cantalice et al. (2017) relatam que quando o número de Reynolds  $> 250$  o regime fica caracterizado como sendo turbulento.

O número de Froude por sua vez, relaciona as forças de inércia com os efeitos das forças gravitacionais. Quando o número de Froude for  $Fr < 1$ , o regime se caracteriza como lento ou subcrítico, devido à ação das forças gravitacionais. Sempre que o número de Froude for  $Fr > 1,0$ , é indicado como sendo fluxo rápido ou supercrítico, em que predominam as forças de inércia, tornando-o mais erosivo.

Daí então, os números de Reynolds e Froude, tiveram os regimes de escoamento formados a partir das chuvas simuladas de acordo com o esquema da Figura 1.

Fr	Laminar/ Rápido	Transição/ Rápido	Turbulento/ Rápido
	Laminar/ Lento	Transição/ Lento	Turbulento/ Lento
1			
	250	500	Re

**Figura 1.** Esquema de classificação dos regimes de escoamento gerados durante as simulações de chuva. Fonte: Simons & Senturk (1992).

### 3.4 O Escoamento Superficial Laminar em Encostas Sob Cultivos Agrícolas

A vegetação exerce maior influência diretamente no escoamento superficial aumentando, assim, a resistência ao fluxo superficial da água na superfície no solo. De forma restrita, a presença de vegetação como cobertura do solo se constitui no fato mais relevante para a absorção da energia cinética presente na chuva (Panachuki et al., 2011).

A cobertura vegetal apresenta um alto índice de produtividade de fitomassa que propicia uma maior proteção ao solo e que reduz o impacto da gota de chuva sobre a superfície do solo consequentemente, vai haver um aumento da rugosidade ao fluxo superficial, que por sua vez vai aumentar a altura da lâmina do escoamento, reduzindo a velocidade do fluxo de escoamento superficial (Cantalice et al., 2008; Cardoso et al., 2011).

A topografia do terreno atua sobre a perda de água por escoamento superficial (Oliveira et al., 2013). Para o aumento do grau de declive, a velocidade do fluxo aumenta a potência do fluxo, e o movimento do escoamento superficial em declives, elevados aumentando o potencial erosivo (Assouline & Bem-Hur, 2006; Armstrong et al., 2011).

Pires et al. (2006) comparando o sistema de manejo de Eucalipto em nível e o sistema com Eucalipto plantado na direção do declive, com as condições de mata nativa e de pastagem em solo descoberto, constataram que entre os sistemas, o eucalipto plantado na direção do declive apresentou maior valor de escoamento superficial.

Adekalu et al. (2007) verificaram redução do escoamento superficial por conta do efeito da cobertura do solo, proporcionada por gramínea, na redução das perdas de solo.

Cantalice et al. (2017) analisando a rugosidade hidráulica gerada pela *Brachiaria decumbens*, em uma área de pasto degradado para condição de escoamento superficial em regime laminar ( $Re < 500$ ), constataram vários parâmetros hidráulicos observados como descarga unitária, velocidade média de fluxo, tensão de arraste vegetal, coeficiente de arraste vegetal e número de Reynolds, determinados para o escoamento laminar raso sobre a *Brachiaria decumbens*. Nesta situação, a velocidade média do escoamento e a taxa de infiltração apresentaram aumento significativa devido ao aumento da declividade. Com isso ocorreu uma elevação da lâmina de escoamento, resultando em maior fluxo de energia entre a massa de fluido e a estrutura da *Brachiaria*, ocasionando diminuição da tensão de arraste vegetal.

Freitas et al. (2008) investigaram a proteção com solo da cobertura vegetal da caatinga, em relação aos sistemas de cultivos de feijão-guandu (*Cajanus cajan*), batata-doce (*Ipomoea batatas Lam.*) e também com solo descoberto, na condição de fluxo laminar raso, gerado por simulador de chuvas, no município semiárido de Serra Talhada-PE. Diante dessas condições, os autores analisaram as características hidráulicas do escoamento superficial constatando que a caatinga apresentou as menores taxas de descarga líquida. O guandu, seguido da batata-doce, apresentaram os maiores valores de rugosidade hidráulica, que promovendo reduções nas velocidades médias dos escoamentos laminares.

### 3.5 Resistência ao Escoamento Superficial Laminar

Uma vez iniciado, o fluxo superficial pode sofrer interferência da rugosidade hidráulica da superfície e da taxa de infiltração de água no solo, sendo as condições de resistência da superfície do solo, importantes para a dinâmica do fluxo superficial. Essa resistência ao escoamento em regime laminar por sua vez, pode ser determinada pelo coeficiente de resistência de Darcy-Weisbach de acordo com a Equação (5).

$$f = \frac{8ghS}{V^2} \quad (5)$$

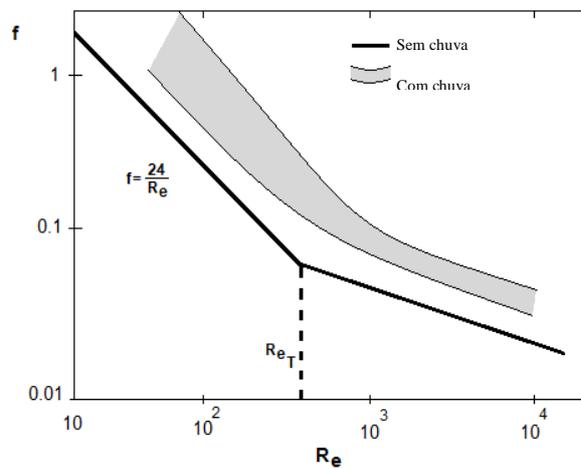
em que:  $f$  = coeficiente de Darcy-Weisbach (adm);  $g$  = aceleração da gravidade ( $m\ s^{-2}$ );  $h$  = altura da lâmina do escoamento (m);  $S$  = grau do declive ( $m\ m^{-1}$ );  $V$  = velocidade do escoamento ( $m\ s^{-1}$ ).

O coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach está relacionado ao número de Reynolds conforme mostra a Equação (6) Yoon & Wenzel (1971):

$$f = \frac{K}{Re} \quad (6)$$

em que:  $f$  = fator de atrito de Darcy-Weisbach (adm);  $Re$  = número de Reynolds (adm) e  $K$  = coeficiente empírico, em função da forma do canal e resistência ao escoamento, cujo valor teórico é de  $K = 24$  para o fluxo em superfície lisa num canal retangular.

Em 1913, Blasius sugeriu projetar dados de resistência em função do número de Reynolds. Na Figura 2, o fator de atrito Darcy-Weisbach é projetado em função do número de Reynolds para superfícies planas, com e sem impacto de chuva.



**Figura 2.** Resistência hidráulica e número de Reynolds com relação ao escoamento superficial. Fonte: Anderson & Burt (1990), apud Radojkovic & Maksimovic (1987).

Na literatura, Einstein (1950) separou a resistência total do escoamento ( $f_t$ ), conforme a Equação (7) para canais abertos em resistência de grão ( $f_g$ ) e resistência de forma ( $f_f$ ), onde:

$$f_t = f_g + f_f \quad (7)$$

Para fluxos vegetados Schoneboom et al. (2010) consideraram a necessidade de distinguir a perda de carga ( $f$ ) descrito pela Equação (8) entre perda de superfície ( $f'$ ) e arraste vegetal ( $f''$ ) usando o princípio da sobreposição segundo Yen (2002):

$$f = f' + f'' \quad (8)$$

Segundo Wainwright & Bracken (2011), as equações de resistência hidráulica ou rugosidade hidráulica de Darcy-Weisbach, Chézy e Manning são as equações empíricas mais utilizadas para o cálculo em modelos hidrológicos e de erosão.

### **3.6 Resistência Criada pela Vegetação ao escoamento Superficial Laminar**

A vegetação atua no comportamento do escoamento superficial, gerando resistência ao transporte devido a um conjunto de atributos da planta quanto à sua forma, tamanho, rigidez, diâmetro, altura, distribuição, densidade da planta e grau de submersão (Hui et al., 2010). Além disso, a presença da vegetação aumenta a rugosidade hidráulica da superfície do fluxo e também reduz a tensão de cisalhamento do fluxo, exercida sobre o solo.

A presença da vegetação também atua na redução de transporte de sedimentos a partir de três tipos de efeitos, de acordo com Panachuki et al. (2011), reduzindo a ação do impacto das gotas de chuva na camada da superfície do solo, diminuindo a capacidade de transporte do fluxo superficial através da redução de sua velocidade, e aumentando a profundidade do fluxo de escoamento, na qual a energia cinética do impacto das gotas de chuva vai ser dissipada.

Feng-Feng et al. (2007) citam que as características do fluxo são definidas pelo tipo de densidade da vegetação, altura da lâmina e velocidade do fluxo. Wu et al. (1999) afirmam que a resistência exercida pela vegetação ao escoamento superficial varia em função do grau de submersão da vegetação em relação à lâmina de escoamento. Cantalice et al. (2017) comentam que o grau de submersão pode ser identificado através de duas situações diferentes situação é quando a altura da lâmina do fluxo encontra-se em um nível abaixo da altura da vegetação, condição denominada de vegetação emersa. A outra situação é quando a altura lâmina supera por completo a altura da vegetação, recebendo dessa forma a denominação de vegetação submersa.

### **3.7 Parâmetros Hidráulicos-Vegetativos**

A vegetação exerce um papel fundamental no escoamento superficial, desta maneira, sua presença na natureza tem grande importância no controle de inundações e no transporte de sedimentos, atuando diretamente no fluxo superficial (Zhao & Fan, 2017).

Busari & Li (2016) afirmam que o aumento na resistência hidráulica é devido à tensão viscosa, que é por sua vez gerada pelas plantas. Assim o arraste é diretamente proporcional ao

quadrado da velocidade que vai resultar na constante de proporção chamada coeficiente de arraste.

Desta forma, Hua et al. (2013) citam que o coeficiente de arraste é considerado uma peça fundamental para a determinação do arraste correlacionado à vegetação, do mesmo jeito que o equivalente coeficiente de rugosidade.

### 3.8 Tensão e Coeficiente de Arraste Vegetal em escoamento Superficial Laminar

Augustijn et al. (2008) comentam que a rugosidade vegetal é utilizada como sendo um parâmetro importante para descrever o fluxo através dos sistemas fluviais, pois sua ação tem impacto direto sobre as características dos mesmos.

De acordo com Shucksmith et al. (2011) o método mais simples de se prever a resistência no fluxo vegetativo pode ser conseguido pela equação convencional de rugosidade de Manning, de onde o valor do coeficiente é estabelecido para as condições da vegetação de interesse. Já James et al. (2004), discordam dessa abordagem devido ela ser derivada para condições de fluxo em rios e canais dominados pela resistência de limites.

Nepf et al. (2007) admitem que a presença da vegetação em cursos naturais e também em áreas que contêm umidades, vai proporcionar a existência de interferência nos diversos processos: físicos, biológicos e sistemas aquáticos. Para Baptist et al. (2007), a resistência ocasionada pela vegetação, tende a exercer interação nos perfis de velocidade, diminuindo as descargas de fluxo, remediando os riscos de inundações.

O coeficiente de arraste da vegetação ( $CD'$ ) é o valor utilizado para avaliar a resistência aplicada pela vegetação ao movimento do escoamento. Sendo assim, o coeficiente de arraste da vegetação, pode ser descrito pela Equação (9), elaborada por Wu et al. (1999). Para chegar nessa fórmula, os autores fizeram um estudo em uma calha, tendo argumentado que o arraste ocorre devido à presença da vegetação, sendo igual à força gravitacional, e que o atrito gerado no fundo do canal e nas laterais, é desprezível na presença da vegetação. Dessa forma, tem-se:

$$CD' = \alpha \frac{2gS}{V_m^2} \quad (9)$$

em que:  $CD'$  = coeficiente de arraste vegetal (adm);  $g$  = aceleração da gravidade ( $m\ s^{-2}$ );  $S$  = declividade do fundo do canal ( $m\ m^{-1}$ );  $V_m$  = velocidade média do escoamento ( $m\ s^{-1}$ ) e  $\alpha = h / y$ , com  $h$  = altura da lâmina de escoamento (m) e  $y$  = espessura da vegetação (m).

Wang et al. (2015) desenvolveram nova metodologia para o cálculo do coeficiente de arraste vegetal ( $CD'$ ) para fluxo superficial raso como mostra a Equação (10).

$$Sf = \left[ \frac{CD' d}{(1 - \phi_{veg} \Delta S^2)} \right] \frac{V^2}{2g} \quad (10)$$

em que:  $Sf$  = fator de correção para o declive (adm);  $\phi_{veg}$  = Diâmetro da vegetação;  $g$  = aceleração da gravidade;  $V$  = velocidade do fluxo;  $\Delta S$  = densidade de vegetação (m/m);  $d$  = diâmetro de haste (m).

Obtendo-se todas as outras variáveis e transformando a equação chega-se ao modelo do  $CD'$  na Equação (11).

$$CD' = \frac{Sf \cdot 2g \cdot (1 - \phi_{veg}) \cdot \Delta S^2}{V^2 \cdot d} \quad (11)$$

em que: ( $CD'$ ) é o coeficiente de arraste (sem dimensões) das hastes da vegetação.

Lee et al. (2004), sugeriram o cálculo da tensão de arraste vegetal baseado em modelos descritos por vários cientistas, no qual admite o fluxo através de um segmento vertical, estando as plantas em múltiplos arranjos espaciais. Nessa expressão o atrito é desprezível no fundo do canal e isso ocorre por causa do efeito mínimo, quando comparado com as forças de resistência ao fluxo em múltiplos arranjos de plantas, conforme a Equação (12).

$$\tau_{Arraste} = \frac{CD' a \rho V^2}{2} \quad (12)$$

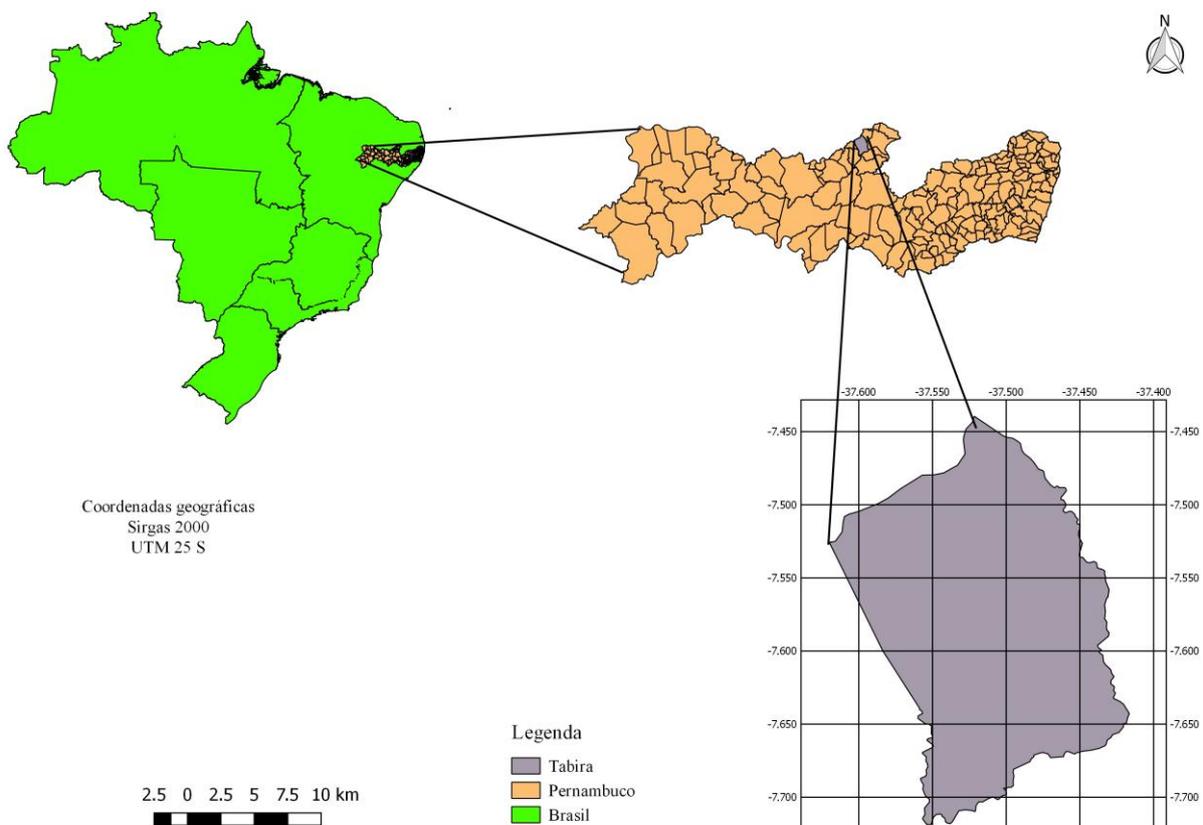
em que:  $\tau$  arraste = tensão de arraste ( $N m^{-3}$ );  $CD'$  = coeficiente de arraste vegetal (adm);  $a$  = área total projetada por plantas por unidade de volume ( $m m^{-3}$ ) considerando o comprimento das folhas da gramínea;  $\rho$  = densidade da água ( $kg m^{-3}$ ) e  $V$  = velocidade média do escoamento ( $m s^{-1}$ ).

Pode-se observar que o valor do  $CD'$  vai ser multiplicado pela largura do fluxo para torná-lo adimensional.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área Experimental

A pesquisa foi realizada no período entre 26 de fevereiro e 02 de março de 2018, em uma propriedade localizada na comunidade rural de Nova Espanha (Figura 4) no município de Tabira – PE, inserido na bacia hidrográfica do rio Pajeú, sertão de Pernambuco. Encontra-se mesma altitude de 380 metros e nas seguintes coordenadas: latitude  $7^{\circ}32'12.22''S$  e longitude  $37^{\circ}29'18.78''O$  (Figura 3). O relevo local varia de ondulado a suave-ondulado e a vegetação predominante constitui-se de Caatinga Hiperxerófila (CPRM, 2005). O clima do município é do tipo BSw<sub>h</sub>, segundo a classificação de Koeppen, caracterizando-se como semiárido quente e tropical quente (BRASIL-IBGE, 2000), com taxa pluviométrica anual de 806 mm, com período de estiagem de sete meses e uma temperatura média anual de  $27^{\circ}C$  (CPRM, 2005). O solo da área experimental é classificado como Neossolo Flúvico de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013).



**Figura 3.** Localização do município de Tabira no estado de Pernambuco. Fonte: (QGIS).



**Figura 4.** Imagem da propriedade rural com localização da área experimental. Fonte: (Google Earth Pro).

Em cada uma das quatro parcelas de repetição, de cada tratamento, foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0 a 20 cm, acondicionadas em sacos plásticos, transformadas em uma amostra composta, que foi utilizada para a determinação da distribuição granulométrica (Tabela 1) pelo método do densímetro em  $\text{g kg}^{-1}$  segundo o manual da Embrapa (1997). Ainda de cada tratamento foram coletadas amostras de solo, acondicionadas em latas de alumínio, que foram utilizadas para determinação da umidade gravimétrica inicial em percentagem (Tabela 2).

**Tabela 1.** Análise granulométrica na camada de 0 – 20 cm, média de quatro repetições, em um Neossolo Flúvico de área experimental no município de Tabira-PE.

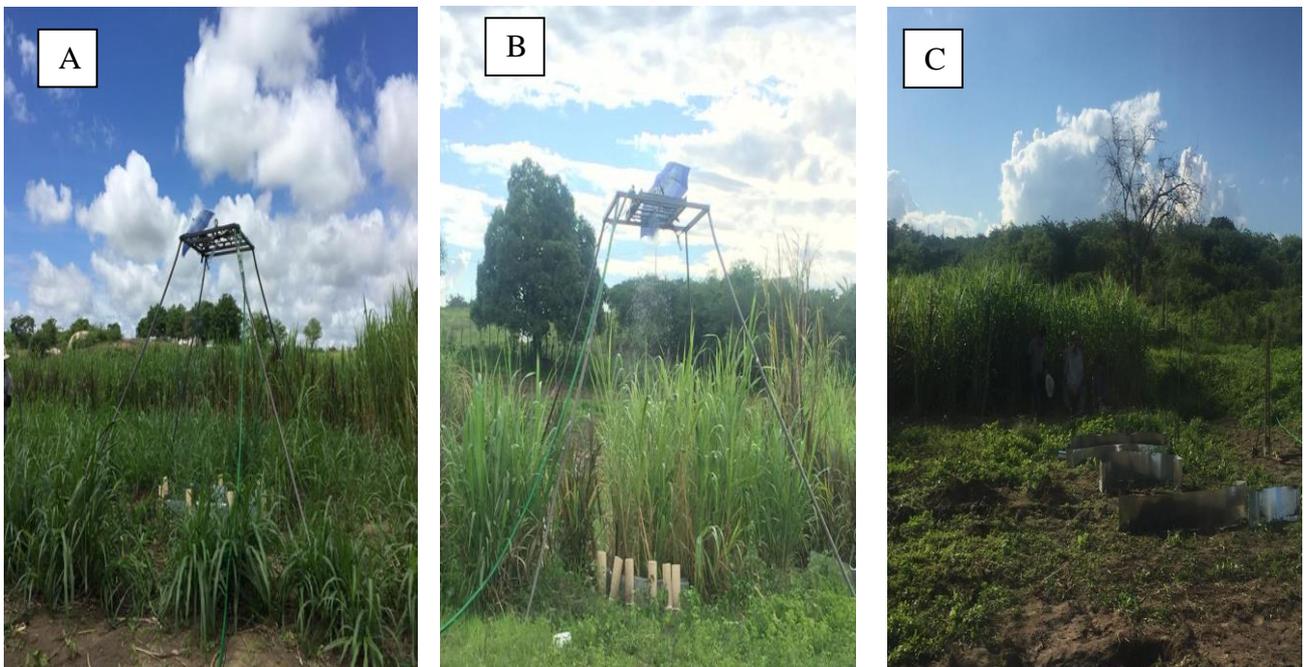
Tratamentos	Análise Granulométrica ( $\text{g kg}^{-1}$ )			Classe textural
	Areia	Silte	Argila	
Solo Descoberto	692,5	145,0	162,5	Franco arenoso
Capim Elefante 45 dias	642,4	176,2	181,2	Franco arenoso
Capim Elefante 180dias	633,5	172,7	194,0	Franco arenoso

**Tabela 2.** Umidade gravimétrica inicial na camada de 0 – 20 cm do Neossolo Flúvico da área experimental no município de Tabira-PE, para os diferentes tratamentos. Média de quatro repetições.

Tratamentos	Umidade Inicial (%)
Solo Descoberto	1,811
Capim Elefante 45 dias	2,641
Capim Elefante 180 dias	2,585

#### 4.2 Delineamento Experimental e Tratamentos

O delineamento experimental da pesquisa foi em Blocos Casualizados, com três tratamentos (Figura 5) e quatro repetições totalizando 12 ensaios, considerando as seguintes condições experimentais: área com Capim-Elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.) com 45 dias, Capim-Elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.) com 180 dias e com solo descoberto descoberto. O capim-Elefante com 45 dias de cultivo atingiu uma altura média 80 cm, em um espaçamento de 1m entre linhas e 40 cm entre touceiras. O Capim-Elefante com 180 dias de cultivo chegou a uma altura média de 1,6 m, com o mesmo espaçamento de 1m entre linhas e 40 cm entre touceiras.



**Figura 5.** Simulador de chuvas nas condições: (a) Capim-Elefante 45 dias; (b) Capim-Elefante 180 dias; (c) Solo descoberto. Fonte: Autor (2019).

### 4.3 Condução do experimento em campo e características das chuvas simuladas

As 12 chuvas simuladas foram realizadas sobre parcelas experimentais com área de 2m<sup>2</sup> (1 m de largura e 2 m de comprimento), posicionadas no sentido de 5% do declive do terreno. Cada parcela foi delimitada por chapas metálicas galvanizadas com 30 cm de altura, cravadas no solo a 20 cm de profundidade. Na parte inferior de cada parcela, no sentido do declive existia uma calha para coleta do escoamento superficial.

Cada repetição de chuva simulada teve a duração de 50 minutos por evento, geradas através do simulador de chuva desenvolvido no laboratório de Engenharia de Manejo e Conservação do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, semelhante ao modelo desenvolvido por Meyer & Harmon (1979). Este equipamento é composto por um bico aspersor tipo Veejet 80 – 150 com diâmetro interno de 1/2 polegada, instalado a uma altura de 3,1 m acima da superfície do solo, funcionando com uma pressão constante de 41k/Pa na saída da água no bico.

A intensidade de precipitação em cada teste foi determinada a partir do volume coletado de 10 pluviômetros colocados ao acaso ao lado das parcelas avaliadas. O simulador de chuva foi abastecido pela água do açude, através de uma bomba de modelo sapo instalada no açude.

### 4.4 Características Hidráulicas do Escoamento Laminar

A velocidade média do escoamento superficial foi gerada através do chuva simulada obtida pela determinação do tempo gasto para que um corante (azul de metileno) a distância entre o ponto de aplicação até o vertedor da parcela, sendo expressa em m s<sup>-1</sup>. A tomada de tempo foi realizada em intervalos de seis minutos, durante todo o decorrer do experimento. O produto das velocidades superficiais foi multiplicado por um fator de correção ( $\alpha = 2/3$ ) e então, foi obtida a velocidade média, de acordo com Woolhiser & Liggett (1967) e Singh (1983) para determinação da solução cinemática das equações de Saint-Venant:

$$h = \frac{q}{V_m} \quad (13)$$

em que: h = altura da lâmina de escoamento (m); q = descarga líquida por unidade de largura (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>) e V<sub>m</sub> = velocidade média do escoamento (m s<sup>-1</sup>).

A descarga líquida por unidade de largura ( $q$ ), foi determinada pela coleta do fluxo superficial, em provetas, do volume da enxurrada na extremidade da calha, durante o tempo cronometrado de 10 segundos, dividido pela largura da parcela, para expressão em  $m^2s^{-1}$  (Bezerra & Cantalice, 2006).

A partir da caracterização do regime hidráulico do escoamento superficial gerado, foi determinado o número de Reynolds ( $Re$ ) conforme estabelecido pela Equação (3) e o número de Froude ( $Fr$ ) descrito na Equação (4), por meio das equações encontradas em Simons & Senturk (1992).

A viscosidade da água conforme a Equação (14) foi calculada por meio da equação desenvolvida por Julien (1995):

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

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

#### 4.5 Resistência Hidráulica

A resistência ao escoamento em regime laminar foi determinada pelo coeficiente de resistência de Darcy-Weisbach, de acordo com a equação abaixo:

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

em que:  $f$  = coeficiente de Darcy-Weisbach (adimensional);  $g$  = aceleração da gravidade ( $m s^{-2}$ );  $h$  = altura da lâmina do escoamento (m);  $S$  = inclinação do declive ( $m m^{-1}$ );  $V$  = velocidade do escoamento ( $m s^{-1}$ );  $K$  = coeficiente empírico, em função da forma do canal e resistência ao escoamento, cujo valor teórico e de  $K = 24$  para o fluxo em superfície lisa num canal retangular.

Os coeficientes de arraste vegetal ( $CD'$ ) foram obtidos segundo Wu et al. (1999) pelo emprego da Equação (9) e Wang et al. (2015) conforme Equação (10).

#### 4.6 Análise Estatística

Os dados foram analisados como delineamento em blocos casualizados com 4 repetições e submetidos à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5%, utilizando o software para Microsoft Excel XLSTAT (versão 2018.5) (ADDINSOFT, 2018).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Comportamento Hidráulico do Fluxo Laminar

Na Tabela 3, encontram-se os valores das variáveis hidráulicas do escoamento gerado por chuva simulada sobre os diferentes tratamentos. Os valores referentes à velocidade média ( $V_m$ ), indicaram diferenças significativas entre os tratamentos. Observa-se para o tratamento de solo descoberto, que o fluxo superficial apresentou maior velocidade de escoamento. Esse fato, se explica devido à inexistência da cobertura vegetal no solo, que concorreu para existência de um escoamento superficial mais livre, com resistência ou rugosidade hidráulica reduzida. Então, esse escoamento superficial mais livre na superfície do Neossolo Flúvico, resultou em uma maior descarga líquida por unidade de largura para o Neossolo descoberto, conforme a descrito na Tabela 3. Oliveira et al. (2012), demonstraram em seu estudo que os tratamentos de: solo cultivado com fumo sob preparo convencional (PC); solo cultivado com fumo sob plantio direto (PD) e solo sob mata nativa (MN), apresentaram diferença estatisticamente entre os tratamentos e observou-se que o tratamento de preparo convencional (PC) obteve maior fluxo de laminar no solo.

**Tabela 3.** Variáveis hidráulicas de escoamento superficial gerado por chuva simulada, sobre as condições de solo descoberto e capim elefante com 45 e 180 dias, em um Neossolo Flúvico.

Variáveis hidráulicas	Solo Descoberto		Capim Elefante com 45 dias		Capim Elefante com 180 dias	
$V_m$ ( $m\ s^{-1}$ )	0,045	a	0,021	b	0,024	b
$q$ ( $m^3\ s^{-1}$ )	$4,83 \times 10^{-5}$	a	$3,27 \times 10^{-5}$	ab	$2,57 \times 10^{-5}$	b
$h$ (m)	$1,03 \times 10^{-3}$	a	$1,564 \times 10^{-3}$	a	$1,069 \times 10^{-3}$	a
$Q$ ( $mm\ h^{-1}$ )	87,015	a	59,028	ab	46,291	b
$I_p$ ( $mm\ h^{-1}$ )	100,274	a	94,734	a	89,356	a
$T_i$ ( $mm\ h^{-1}$ )	21,275	b	23,180	b	45,731	a
$Re$ (adm)	50,617	a	34,878	ab	26,829	b
$Fr$ (adm)	0,515	a	0,184	b	0,27	b

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem significativamente entre si pelo Teste Tukey a 10% de probabilidade.  $V_m$  = velocidade média do escoamento;  $q$  = descarga líquida por unidade de largura;  $h$  = altura da lâmina de escoamento;  $Q$  = taxa de escoamento superficial ( $mm$ );  $I_p$  = intensidade de precipitação;  $T_i$  = taxa de infiltração;  $Re$  = número de Reynolds e  $Fr$  = número de Froude.

Para os valores da descarga líquida por unidade de largura ( $q$ ), os tratamentos de Capim Elefante com 45 dias e 180 dias, diferenciaram-se do tratamento de solo descoberto e entre si. Esse fato ocorreu devido à presença da camada vegetal do solo, que conseqüentemente, retardou a velocidade de escoamento e o escoamento superficial. Freitas et al. 2008, também relataram diferenças para a descarga líquida entre caatinga semi-arbustiva, Guandu, Batata-doce e solo descoberto. Em uma área de vegetação de caatinga. Cantalice et al. (2008) obtiveram diferentes descargas líquidas, velocidades média, na presença de serrapilheira de época úmida e seca.

Em relação, à altura da lâmina do escoamento superficial ( $h$ ) todos os tratamentos não diferiram, indicando que as coberturas promovidas pelo capim Elefante com 45 dias, e mesmo com 180 dias de desenvolvimento, o capim Elefante não proporcionaram elevação significativa da espessura da lâmina do escoamento superficial. Com relação aos valores da intensidade de precipitação ( $I_p$ ), os tratamentos se apresentaram estatisticamente iguais entre si, garantindo assim condição de uniformidade experimental do fator chuva para todos os tratamentos.

Em relação às taxas de infiltração de água no solo ( $T_i$ ), observou-se diferenciação entre as condições criadas pelo capim elefante e pelo solo descoberto ao fluxo laminar, sendo iguais para os tratamentos com capim elefante de 45 e 180 dias. A cobertura vegetal no solo proporcionada pelo capim, que resultou em interceptação da chuva e em aumento da rugosidade hidráulica ao livre escoamento superficial, retardando assim o escoamento superficial formado e possibilitando maior tempo para infiltração da água no solo, resultando em maiores taxas de infiltração. Esse fato também foi observado por Ramos et al. (2014), afirmaram diante da presença das culturas presente na cobertura do solo em seu estudo, favoreceu a dissipação da energia cinética das gotas da chuvas, gerando rugosidade ao fluxo superficial, e assim, maior infiltração.

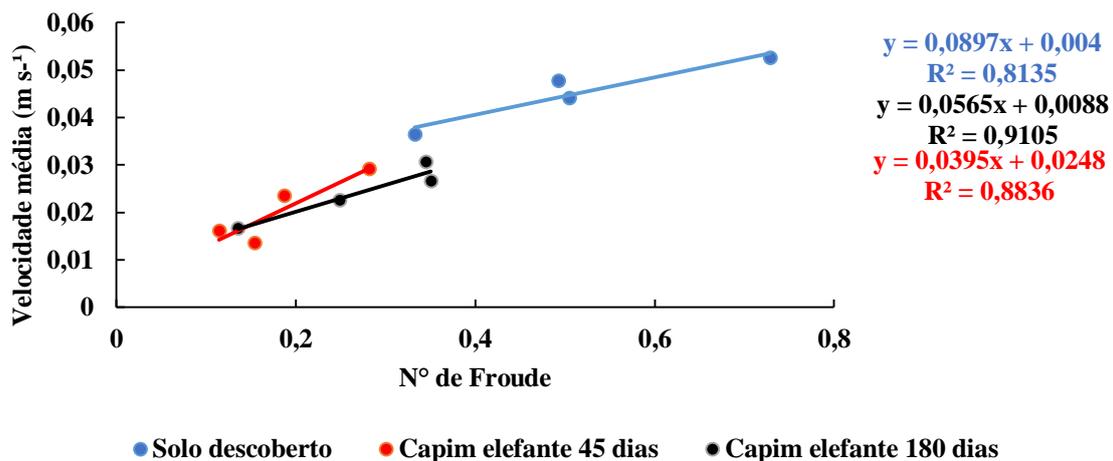
Os valores dos números de Reynolds atestam que todos os escoamentos obtidos tiveram regime de fluxo laminar ( $Reynolds < 500$ ) de acordo com Wainwright et al. (2008), no entanto, o tratamento de solo descoberto apresentou um maior valor, devido aos maiores valores de descarga líquida e velocidade média, e menor taxa de infiltração. Observou-se também que a cultura do capim elefante 45 dias e 180 dias, apresentaram diferente significativamente do tratamento do solo descoberto, devido a vegetação está em contato direto com fluxo d'água proporcionando assim um maior resistência ao livre escoamento do fluxo de forma encontrada pelo autor Santos et al. (2008).

Em relação ao número de Froude, todos os escoamentos gerados pelas chuvas simuladas foram lentos ou sub-criticos, no entanto, para o escoamento superficial na presença do capim

elefante, o número de Froude se diferenciou do escoamento no solo descoberto, demonstrando uma maior ação das forças gravitacionais nestes escoamentos.

Santos et al. 2009 em seu estudo sobre simulação de chuva em culturas feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) nível 1 (N1) com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio, no espaçamento de 0,5 m; cultivo em nível 2 (N2) com barramentos de pedra no espaçamento 1,0 m; cultivo morro abaixo (MA); cultivo em nível com cobertura morta (CM), de palha de feijão; parcelas desmatadas (D), apresentaram diferença para os valores de número de Reynolds e Froude, além do que obtiveram valores do número de Reynolds ( $< 500$ ) e de Froude ( $< 1$ ), sendo classificado como sendo de regime de escoamento laminar lento.

A Figura 6 mostra uma relação direta entre a Velocidade média do escoamento com o Número de Froude (Fr), para todas as condições de escoamentos laminares produzidos pelas chuvas simuladas, logicamente, pela não diferenciação das alturas obtidas da lâmina de escoamento obtidas.



**Figura 6.** Relação entre a Velocidade média do escoamento e o número de Froude dos escoamentos laminares obtidos para os tratamentos com Capim Elefante e Solo descoberto.

## 5.2 Resistência Hidráulica ao Fluxo Laminar Gerado pela Vegetação

Constam na Tabela 4 os valores do coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisback e dos coeficientes de arraste gerados pela vegetação ao fluxo laminar, para os diferentes usos do solo. Observa-se que os valores referentes ao coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisback ( $\log f$ ) dos tratamentos com capim Elefante diferenciaram-se do solo descoberto, sendo no entanto, iguais entre si.

**Tabela 4.** Variáveis de resistência hidráulica gerada pela vegetação ao escoamento superficial para os Solos descobertos, Capim elefante com 45 dias e 180 dias para um solo Neossolo Flúvico.

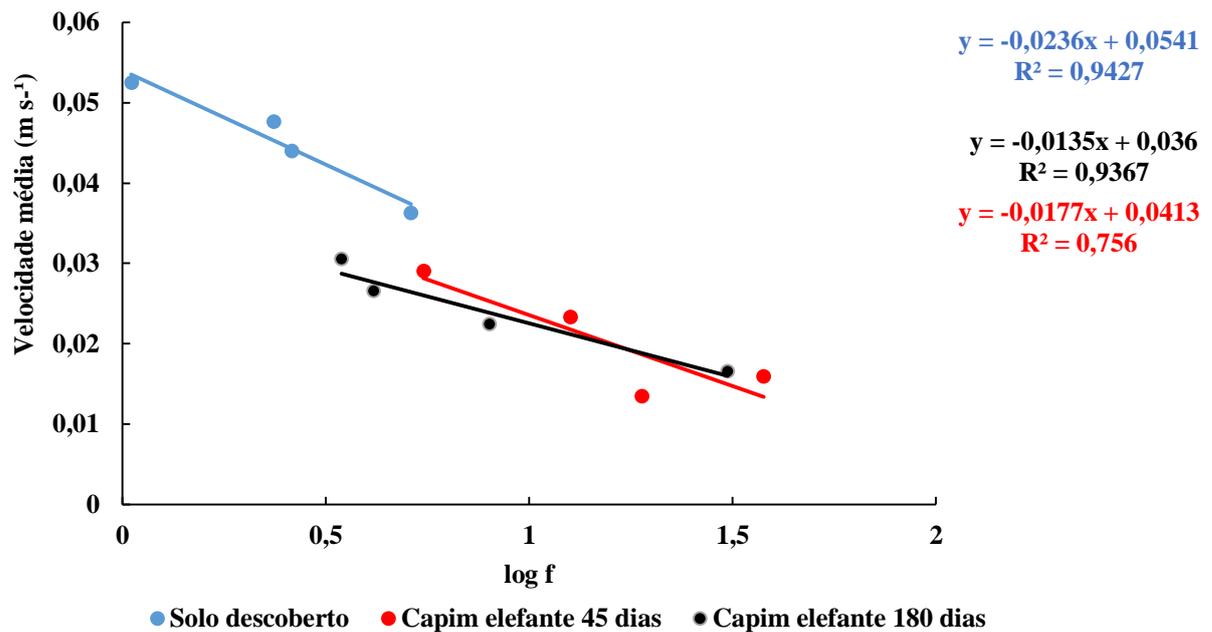
Variáveis	Solo Descoberto	Capim Elefante com 45 dias	Capim Elefante com 180 dias
$\log f$	0,369 b	1,173 a	0,911 a
$C_D$ Wu et al. (1999)	0,792 a	5,479 a	3,462 a
$C_D$ Wang et al. (2015)	1,160 a	0,888 a	0,684 a

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem significativamente entre si pelo Teste Tukey a 10% de probabilidade.  $\log f$  = logaritmo do coeficiente de Darcy-Weisbach e  $C_D$  = coeficiente de arraste vegetal (adm).

Observa-se que os maiores valores da rugosidade hidráulica para os tratamento de capim elefante 45 dias e 180 dias, devido a presença do dossel que resulta em uma resistência a chuva, e ao fluxo de caule e a drenagem de folhas que por consequência geraram retardamento do fluxo, o mesmo observado para Freitas et al (2008), em estudo utilizados nas condições tratamento de Caatinga semi-arbustiva, Guandu, Batata-doce e solo descoberto.

Os valores referentes ao coeficiente de arraste ( $C_D$ ) Wu et al. (1999), Wang et al. (2015) da Tabela 4, não apresentaram nenhuma diferença significativa. Dias (2017) e Cantalice et al. (2017), da mesma forma, não obtiveram diferença significativa para os valores de coeficiente de arraste pelas metodologias de Wu et al. (1999), Wang et al. (2015). Cantalice et al. (2019) demonstraram que os valores do coeficiente de arraste da planta ( $C_D$ ) obtidos nas condições para os tratamentos de Capim Elefante; Milho e Palma forrageira, ao contrário do esperado, não diferiram em ambos os métodos de cálculo utilizados Wu et al. (1999), Wang et al. (2015).

No entanto, a figura 7 exhibe a redução da velocidade média do escoamento superficial pela elevação da resistência hidráulica gerada pelo capim Elefante, tendo resultado no retardamento do fluxo e em mais elevado valor de Darcy-Weisbach, demonstrando assim, o efeito de proteção e controle do escoamento superficial pela vegetação, como também observado por Cassol et al. (2004), Freitas et al. (2008), Cantalice et al. (2018).



**Figura 7.** Variação da Velocidade média do escoamento superficial em função do fator logarítmico do coeficiente de Darcy-Weisbach ( $\log f$ ) para o Capim Elefante com 45 e 180 dias de desenvolvimento e para o Neossolo descoberto.

### 5.3 Coeficiente de Escoamento Superficial e Taxas da Erosão Entressulcos Associadas ao Fluxo Laminar

A Tabela 5 apresenta os resultados das taxas de erosão em entressulcos e o coeficientes de escoamento superficial, observados nos três tratamentos analisados. Observa-se que o coeficiente de escoamento superficial não apresentou diferença para os tratamentos existentes, o que se deve a condição do Neossolo Flúvico na posição mais baixa da paisagem, portanto influenciado pelo lençol freático.

Os valores referentes a taxa de desagregação do solo em entressulcos e as perdas de solo para o solo Neossolo Flúvico não apresentaram diferenças estatisticamente, apesar dos tratamentos com Capim Elefante aos 45 dias e 180 dias, demonstraram maior proteção ao solo, como demonstrado pelos seus menores valores de desagregação do solo e as perdas de solo da erosão em entressulcos. Apesar disso, o Capim Elefante interceptou a chuva, e gerou resistência do fluxo superficial. Cantalice et al. (2008) obtiveram diferenças em condições de cultura culturas diferentes, diferentemente do observado neste experimento.

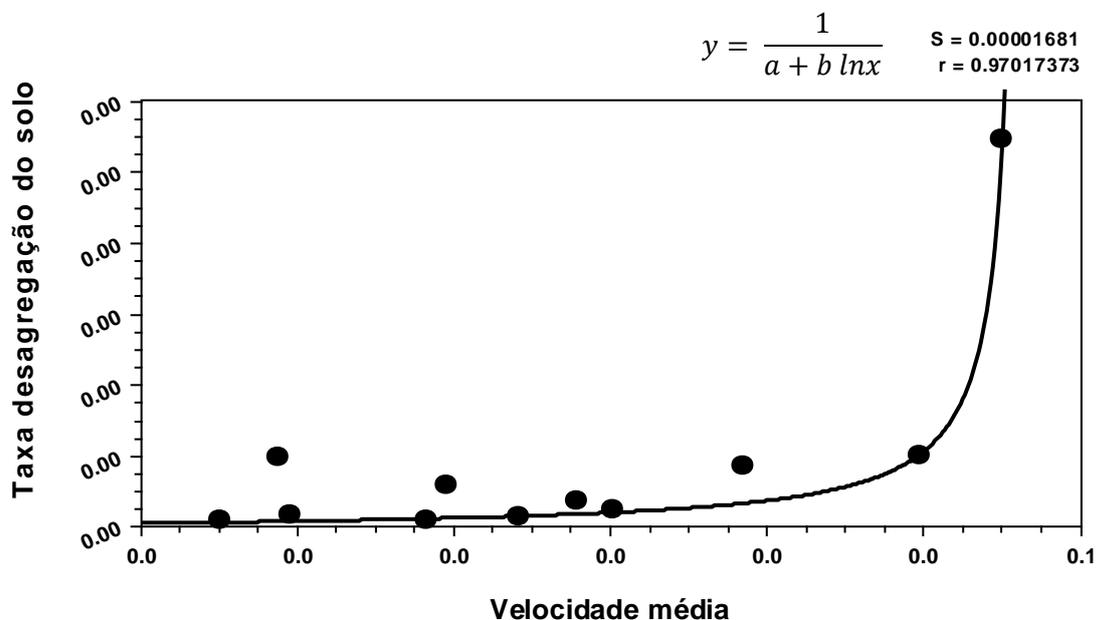
Dos resultados referentes a declividade ( $S$ ) observa-se que houve uma igualdade entre os três tratamentos, desta forma, pode-se concluir que o experimento apresentou uniformidade para o declive, bem como para intensidade da chuva, como já visto.

**Tabela 5.** Taxa de erosão e coeficientes de escoamento superficial obtidas nos 3 tratamentos estudados por vegetação em um solo Neossolo Flúvico.

Taxa de erosão e coeficiente de escoamento superficial	Solo Descoberto	Capim Elefante com 45 dias	Capim Elefante com 180 dias
C (adm)	0,866 a	0,635 a	0,533 a
Di (Kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	1,086x10 <sup>-4</sup> a	2,291x10 <sup>-5</sup> a	8,11x10 <sup>-6</sup> a
PS (t ha <sup>-1</sup> )	0,621 a	0,125 a	0,447 a
S (m m <sup>-1</sup> )	0,062 a	0,057 a	0,060 a

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem significativamente entre si pelo Teste Tukey a 10% de probabilidade. C = coeficiente de escoamento superficial; Di = taxa de desagregação e Ps = perda de solo e S = Declividade.

A Figura 8 relaciona de forma geral todas as taxas de desagregação do solo ocorridas na erosão em entressulcos, e as velocidades médias dos escoamentos laminares obtidos para as condições do Neossolo descoberto e Capim Elefante com 45 e 180 dias, constatando-se o comportamento das taxas de desagregação do solo na erosão em entressulcos menores na condição sob o capim Elefante, e mais elevadas para a condição do Neossolo descoberto, como já comentado da tabela 5.



**Figura 8.** Taxa de desagregação do solo (Di) do escoamento superficial em função da Velocidade média do escoamento superficial para o Capim Elefante com 45 e 180 dias e para o Neossolo descoberto.

## 6 CONCLUSÕES

1. A condição para o solo descoberto apresentou o maior valor de velocidade média do fluxo,  $0,045 \text{ m s}^{-1}$ , devido ao efeito de ausência da cobertura vegetal, demonstrando a importância da presença de vegetação no solo para o retardamento da velocidade do fluxo de água. Dessa forma, o solo descoberto proporcionou o maior valor de descarga líquida.
2. O Capim Elefante 180 dias proporcionou um maior valor da taxa de infiltração,  $89,356 \text{ mm h}^{-1}$ , isso ocorreu devido à atuação da camada vegetal junto ao solo, originando rugosidade hidráulica junto ao fluxo laminar, que resultou no retardamento do escoamento permitindo assim, um aumento da altura da lâmina de água do fluxo e, por consequência, um maior tempo para infiltração da água no solo.
3. Os tratamentos de Capim Elefante 45 dias e 180 dias e solo descoberto apresentaram regime de escoamento superficial como laminar lento, atestado pelos valores de Reynolds ( $Re$ ) variaram entre 26,829 a 50,617, e para os Números de Froude ( $Fr$ ) entre 0,184 a 0,515, sendo assim, todos os fluxos apresentaram efeitos da força gravitacional e foram laminares.
4. O tratamento de Capim Elefante 45 dias exibiu o maior valor do coeficiente de Darcy-Weisbach ( $\log f$ ) em relação aos demais tipos de tratamentos, constando a rugosidade hidráulica gerada pela ação das copas, galhos e ramos no escoamento laminar.
5. Os valores do coeficiente de arraste ( $CD$ ) obtidos não diferiram entre si para o Capim Elefante 45 dias e 180 dias e solo descoberto, no entanto, houve redução da velocidade média do escoamento superficial pela elevação da resistência hidráulica gerada pelo capim Elefante, tendo resultado no retardamento do fluxo e, em maior valor de Darcy-Weisbach.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDINSOFT, xlstat 2018: Data Analysis and Statistical Solution for Microsoft Excel. 2018.
- ADEKALU, K.O.; OLORUNFEMI, I.A.; OSUNBITAN, J.A. Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigéria. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 4, p. 912–917, 2007.
- ANDERSON, M.G.; BURT, T.P. Process Studies in Hillslope Hydrology. ARMSTRONG, A.; QUINTON, J. N.; HENG, B. C. P.; CHANDLER, J. H. Variability of interrill erosion at low slopes. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 36, n. 1, p. 97-106. 2011.
- ARMSTRONG, A.; QUINTON, J. N.; HENG, B. C. P.; CHANDLER, J. H. Variability of interrill erosion at low slopes. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 36, n. 1, p. 97-106, 2011.
- ASSOULINE, S.; BEN-HUR, M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. **Catena**, v. 66, n. 3, p. 211–220.
- AUGUSTIJN, D. C. M.; HUTHOFF, F.; VAN VELZEN, E. H. Comparison of vegetation roughness descriptions. Proceedings of River Flow 2008 - **Fourth International Conference on Fluvial Hydraulics**, v. 1, p. 9, 2008.
- BACELOS, A. A. **Geração de sulcos em meio coesivo e caracterização hidrossedimentométrica de sua evolução**. 2015. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2005.
- BAPTIST, M. J. “On inducing equations for vegetation resistance.” **Journal of Hydraulic Research**, v.45, n. 4, p. 435–450. 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. 1, 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 de Ciência do Solo**, vol. 34, p. 1325 – 1332, 2010.
- BRASIL. FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Mapas Base dos municípios do Estado de Pernambuco. Escalas variadas. Inédito, 2000.
- BRAVARD, J. P.; PETIT, F. **Lês cours d'eau**. Dynamique du système fluvial. Paris: Armand Colin, 2000.
- BROOKS, K.N. et al. **Hydrology and the management of watersheds**. 2. ed. Ames: Wiley-Blackwell, 1997. 502p.

- BUSARI, A. O.; LI, C. W. Bulk drag of a regular array of emergent blade-type vegetation stems under gradually varied flow. **Journal of Hydro- Environment Research**, v. 12, p. 59–69, 2016.
- CANTALICE, J. R. B.; NUNES, E. O. S.; CAVALCANTE, D. M.; BARBOSA, B.; BARROS JUNIOR, G.; GUERRA, S. M. S.; ROLIM NETO, F. C. Vegetative-hydraulic parameters generated by agricultural crops for laminar flows under a semi-arid environment of Pernambuco, Brazil. **Ecological Indicators**, v. 106. 2019. doi:10.1016/j.ecolind.2019.105496
- CANTALICE, J. R. B.; SILVA, M. D. R. O.; RODAL, M. J. N.; RODRIGUES, J. J.; PESSOA, L. M. Estrutura lenhosa e hidrodinâmica do escoamento superficial em uma área de caatinga. **Revista Caatinga**, v. 21, n. 4, p. 201–211, 2008.
- CANTALICE, J. R. B.; SILVEIRA, F. P. M.; SINGH, V. P.; SILVA, Y. J. A. B.; CAVALCANTE, D.M.; GOMES, C. Interrill erosion and roughness parameters of vegetation in rangelands. **Catena**, v. 148, p. 111-116, 2017.
- CARDOSO, D.; SILVA, M. L. N.; CARVALHO, G. J.; FREITAS, D. A. F.; AVANZI, J. C. Plantas de cobertura no controle das perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.6, p.632–638, 2012.
- CARVALHO, D. F. SOUZA, W. J.; PINTO, F.; OLIVEIRA, J. R.; GUERRA, J. G. M. Perdas de água e solo sob diferentes padrões de chuva simulada e condições de cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 4, p. 708-717, 2012.
- CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHERT, J. M.; MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 7, p. 685–690, 2004.
- CASTRO, L. G.; COGO, N. P.; VOLK, L. B. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 339-352, 2006.
- COSTA, R. G.; ALMEIDA, C. C.; PIMENTA FILHO, E. C.; HOLANDA JUNIOR, E. V.; SANTOS, N. M. Caracterização do sistema de produção caprino e ovino na região semi-árida do estado da Paraíba, Brasil. **Archivos de Zootecnia**, v.57, n. 258, p. 195-205, 2008.
- DIAS, I. C. G. M. **Erosão em entressulcos e processos de infiltração e exfiltração da água em encosta semiárida sob diferentes condições de uso do solo**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017.
- DUNNE, T.; BLACK, R. D. An experimental investigation of runoff prediction in permeable soil. **Water Resour.**, v.6, n.2, p. 478-90, 1970.
- EINSTEIN, H. A. **The bed-load function for sediment transportation in open channel flows**. Washington : USDA Technical Bulletin, 65p., 1950.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.
- FENG-FENG, G. U.; HAN-GEN, N. I.; DING-MAN, Q. I. Roughness coefficient for unsubmerged and submerged reed. **Journal of Hydrodynamics**, vol. 19, p. 421 – 428, 2007.
- FIORIO, P. R.; BARROS, P. P. S.; OLIVEIRA, J. S.; NANNI, M. R. 2016. Estimates of soil loss in a GIS environment using different sources of topographic data. **Revista Ambiente**, v. 12, n. 1, p. 203-216.
- 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.
- GERITS, J. J. P.; LIMA, J. L. P. D.; BROEK, T. M. W. V. D. Overland flow and erosion. In: ANDERSON, M.G.; BURT, T.P. **Process studies in hillslope hydrology**. Chichester: J. Willey; Sons, 1990. p. 173-214.
- GOVERS, G. Grain velocities in overland flow: a laboratory study. **Earth Surface and Landforms**, v. 14, p. 481-489, 1989.
- GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; MARTINS JÚNIOR, D.; SILVA. D. D. Avaliação de um modelo para a estimativa da lâmina máxima de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 411-417, 2001.
- HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **EOS, Transactions, American Geophysical Union**, v. 14, p. 446-60, 1933.
- HUA, Z.; WU, D.; KANG, B.; LI, Q. Flow Resistance and Velocity Structure in Shallow Lakes with Flexible Vegetation under Surface Shear Action. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. June, p. 612–620, 2013.
- HUI ER-QING, H. X. A study of drag coefficient related with vegetation based on the flume experiment. **Journal of Hydrodynamics**, v. 22, n. 3, p. 329–337, 2010.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo, 2010**. Disponível em:< <https://ww2.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 20. dez. 2018.
- JAMES C. S.; BIRKHEAD, A. L.; JORDANOVA A. A.; O’SULLIVAN, J. J. Flow resistance of emergent vegetation. **Journal of Hydraulic Research**, V. 42, N. 4, p. 390–398, 2004.
- JARDIM, A. M. R. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SILVA, M. J.; MORAIS, J. E. F.; SILVA, T. G. F. Estimativas de perda de solo por erosão hídrica para o município de Serra

- Talhada, PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 02, n. 03, p. 186-193, 2017.
- JULIEN, P.Y. **Erosion and sedimentation**. Milbourne, Cambridge University Press, 1 st ed. 280 p., 1995.
- LEE, J. K.; ROIG, L. C.; JENTER, H. L.; VISSER, H. M. Drag coefficients for modeling flow through emergent vegetation in the Florida Everglades. **Ecological Engineering**, v. 22, p. 237–248, 2004.
- LEITE, T. S.; LEITE, M. S.; TORRES, S. B. Palma forrageira: situação atual e perspectivas para o cultivo na região semiárida do Ceará, Brasil. **Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia UNIPAR**, v. 21, n. 2, p. 77-83, 2018.
- LIMA JÚNIOR, D. M.; RANGEL, A. H. N.; URBANO, S. A.; OLIVEIRA, J. P. F.; ARAÚJO, T. L. A. C. Silagem para vacas leiteiras no semiárido. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 9, n. 2, p. 33-42, 2013.
- LIMA, C. A.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M.; ANDRADE, E. M.; MONTEIRO, A. L. N. Práticas agrícolas no cultivo da mandioca e suas relações com o escoamento superficial, perdas de solo e água. **Revista Ciência Agronômica**, v. 698 46, n. 4, p. 697-706, out-dez, 2015.
- LIMA, C. A.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, R. M.; SANTOS, J. C. N.; BRASIL, P. P. Characteristics of rainfall and erosion under natural conditions of land use in semi-arid regions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 11, p. 1222-1229, 2013.
- MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 22, p. 100-103, 1979.
- MORGAN, R. P. C. Soil Conservation. England, Longman Limited, 2a edição, 198 p, 1996.
- NEPF, H.; GHISALBERTI, M.; WHITE, B.; MURPHY, E. “Retention time and dispersion associated with submerged aquatic canopies.” **Water Resour. Res.**, v.43, n. 4, p. 1–10. 2007.
- OLIVEIRA, F. P.; BUARQUE, D. C.; VIERO, A. C.; MERTEN, G. H. CASSOL, E. A.; MINELLA, J. P. G. Fatores relacionados à suscetibilidade da erosão em entressulcos sob condições de uso e manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.4, p.337–346, 2012.
- OLIVEIRA, V. P. S. **Modelo para geração de séries sintéticas de precipitação**. 2013. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- PANACHUKI, E. BERTOL, I.; SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em latossolo vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 1777–1785, 2011.

- PIRES, L.S.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; LEITE, F.P.; BRITO, L.F. Erosão hídrica pós-lantio em florestas de eucalipto na região centro-leste de Minas Gerais. **Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília**, v. 41, n. 4, p. 687-695, 2006.
- PONCE, V. M. **Engineering hydrology: principles and practices**. 1 st ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1989.
- RAMOS, J. C.; BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; MARIOTI, J.; WERNER, R. S. Influência das condições de superfície e do cultivo do solo na erosão hídrica em um cambissolo húmico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1587-1600, 2014.
- SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; PEDROSA, E. M. R. Características hidráulicas e perdas de solo e água sob cultivo do feijoeiro no semi-árido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 217-225, 2009.
- SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA JUNIOR, V. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Erosão Hídrica e Perda de Carbono Orgânico em Diferentes Tipos de Cobertura do Solo no Semi-Árido em Condições de Chuva Simulada. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 13 n. 2, p. 113-125, 2008.
- SCHONEBOOM, T.; ABERLE, J. DITTRICH, A. Hydraulic resistance of vegetated flows: Contribution of bed shear stress and vegetative drag to total hydraulic resistance. In: **Proceedings of the international conference on fluvial hydraulics river flow**, Braunschweig, 2010.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. PROJETO CADASTRO DE FONTES DE ABASTECIMENTO POR ÁGUA SUBTERRÂNEA. **Diagnóstico do município de Tabira, estado de Pernambuco** / Recife: CPRM/PRODEEM, 23p., 2005.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. **Diagnóstico do município da Tabira, estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.
- SHUCKSMITH, J. D.; BOXALL, J. B.; GUYMER, I. Bulk Flow Resistance in Vegetated Channels: Analysis of Momentum Balance Approaches Based on Data Obtained in Aging Live Vegetation. **JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING**, v. 137, n. 12, p. 1624–1635, 2011.
- SILVA, F. F. **Selamento superficial e erosão hídrica em solos representativos da bacia do Alto Ipanema, Pesqueira-PE, com e sem utilização de cobertura morta**. 2016. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia Agrícola, Recife, 2016.
- SILVEIRA, F. P. da M. **Erosão em entressulcos e parâmetros de rugosidade vegetal em área de pastagem**. 2013. 48 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2013.
- SIMONS, D. B.; SENTÜRK, F. **Sediment transport technology: Water and sediment dynamics**. Littleton: Water resources publications. 1992. 897p.

- SINGH, V.P. Analytical solutions of kinematic for erosion on a plane: II Rainfall of finite duration. **Advances in Water Resources**, v.6, p. 88-95, 1983.
- VALE, M. B.; AZEVEDO, P. V. Avaliação da produtividade e qualidade do capim elefante e do sorgo irrigados com água do lençol freático e do rejeito do dessalinizador. **Holos**, v. 3, p. 181-195, 2013.
- WAINWRIGHT, J.; BRACKEM, L. J. Runoff generation, overland flow and erosion on hillslopes. In: WILEY, J.; LTD, S. **Arid zone geomorphology: process, form and change in drylands**. 1. ed. Nova Jersey: 2011. p. 235-267.
- WAINWRIGHT, J.; PARSONS, A. J.; MÜLLER, E.N. et al., A transport-distance approach to scaling erosion rates: Background and model development. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 33, p. 813-826, 2008.
- WANG, W. J.; HUAI, W. X.; THOMPSON, S.; KATUL, G. G. Steady nonuniform shallow flow within emergent vegetation. **Water Resources Research Special Collection**, v.12, n. 51, p. 10047-10064, 2015.
- WOOLHISER, D. A.; LIGGETT, J. A. Unsteady, one-dimensional flow over a plane—The rising hydrograph, **Water Resources Research Special Collection**, v. 3, n. 3, p. 753–771, 1967.
- WU, F. C.; SHEN, H. W.; CHOU, Y. J. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, p. 934-942, 1999.
- YEN, B. C. Open channel flow resistance. **Journal of hydraulic engineering**, v. 128, n. 1, p. 20-39, 2002.
- YOON, Y. N.; WENZEL; H. G. Mechanics of sheet flow under simulated rainfall. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 97, p. 1367-86, 1971.
- ZHAO, M.; FAN, Z. Hydrodynamic characteristics of submerged vegetation flow with non-constant vertical porosity. **Plos One**, v. 12, n. 4, p. 1–16, 2017.