



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**DANIELLE SEBASTIANA DOS SANTOS SILVA**

**MODELOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DE  
PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS**

**BELÉM-PA  
2015**

**DANIELLE SEBASTIANA DOS SANTOS SILVA**

**MODELOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DE  
PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração em Engenharia Hídrica, linha de pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

**BELÉM-PA**

**2015**

**DANIELLE SEBASTIANA DOS SANTOS SILVA**

**MODELOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DE  
PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração em Engenharia Hídrica, linha de pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

DATA DE APROVAÇÃO: \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/2015

BANCA EXAMINADORA:

\_\_\_\_\_  
– Orientador

**Professor Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.**

Doutor em *Sciences de l'eau*  
Universidade Federal do Pará

\_\_\_\_\_  
– Membro externo

**Professor Dr. Teodorico Alves Sobrinho**

Doutor em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

\_\_\_\_\_  
– Membro interno

**Professor Dr. André Augusto Azevedo Montenegro Duarte**

Doutor em Geologia e Geoquímica  
Universidade Federal do Pará

\_\_\_\_\_  
– Membro interno

**Professor Dr. Lindemberg Lima Fernandes**

Doutor em Ciências Ambientais  
Universidade Federal do Pará

Belém – PA  
2015

## AGRADECIMENTO

A Deus, meu pai que me ilumina, guia meus caminhos, proporcionando sabedoria para enfrentar as dificuldades que a vida apresenta.

À minha família, em especial a minha mãe-vó Luzia Flora dos Santos (*in memorian*), minha mãe Nazaré Flora dos Santos; e ao meu pai Cláudio dos Santos, pelo amor e incentivo.

Ao meu querido noivo, Pedro Monteiro, amigo, companheiro de todas as horas.

Ao Professor e Orientador Claudio José Cavalcante Blanco, pelo auxílio durante todo o processo de elaboração da pesquisa.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, em especial ao Professor Lindemberg Fernandes pelo apoio e conselhos.

Ao aluno de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODerna), Igor Gomide pela ajuda para realização deste trabalho.

Aos colegas e amigos do Grupo de Pesquisa em Água, Energia e Sustentabilidade da Amazônia (GAES) da Universidade Federal do Pará (UFPA), em especial ao Bolsista de Doutorado (PRODerna), Francisco Pessoa, pelas contribuições dadas ao estudo e pelos momentos de descontração.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de mestrado.

E a todos que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho. Ficam aqui meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

Os processos erosivos que ocorrem em uma bacia hidrográfica têm sido objetos de preocupações associadas ao planejamento e gestão do uso do solo e dos recursos hídricos. Nesse caso, modelos empíricos de simulação hidrossedimentológica são ferramentas importantes, e de baixo custo, na avaliação da erosão do solo em decorrência do uso e manejo da terra. Assim, o trabalho objetivou analisar o potencial de produção de sedimentos via três modelos empíricos aplicados a uma pequena bacia hidrográfica da Amazônia, a bacia do Igarapé da Prata localizada no Município de Capitão Poço-PA. Os modelos analisados e utilizados foram a USLE (*Universal Soil Loss Equation*); o modelo de Poesen; e o modelo de Langbein-Schumm. Os resultados apontam que a USLE teve produção média de sedimentos igual a 146,20 (t/Km<sup>2</sup>); o modelo de Langbein-Schumm, produção média igual a 114,25 (t/Km<sup>2</sup>); e o modelo de Poesen, produção média igual a 7,57 (t/Km<sup>2</sup>). Os resultados encontrados pelos dois modelos primeiramente mencionados são da mesma ordem de grandeza, indicando que o modelo de Langbein-Schumm, para o caso analisado, é comparável ao clássico modelo USLE. Esses resultados foram comparados a dados observados (2012-2013) de sedimentos em suspensão e o modelo de Langbein-Schumm foi o que mais se aproximou das observações.

**Palavras-Chave:** Modelos de Simulação Hídrica; Erosão do Solo; Produção de sedimentos.

## ABSTRACT

The erosive processes that occur in a watershed have been objects of concerns associated with the planning and management of land use and water resources. In this case, the empirical models of hydrosedimentological simulation are important tools, and with low cost, in the assessment of soil erosion due to the use and management of land. Thus, the study aimed to analyze the sediments yield via three empirical models applied to a small catchment of the Amazon, the catchment of Igarapé da Prata located in the municipality of Capitão Poço-PA. The analyzed and used models were the USLE (Universal Soil Loss Equation); the Poesen model; and the Langbein-Schumm model. The results showed that the USLE model had an average sediment yield equal to 146.20 (t / km<sup>2</sup>); the Langbein-Schumm model an average production equal to 114.25 (t / km<sup>2</sup>); and the Poesen model an average yield equal to 7.57 (t / km<sup>2</sup>). The results obtained by the two first-mentioned models are of the same order of magnitude, indicating that the Langbein-Schumm model, for the case analyzed, is comparable to the classical model USLE. These results were compared with observed data of suspended sediments and the Langbein-Schumm model was the one closest to the observations.

**Keywords:** Hydro Simulation Models; Soil Erosion; Sediment Yield.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01:</b>	Desagregação e transporte de sedimentos.....	16
<b>Figura 02:</b>	Nomograma de Wischemeier e Smith para obtenção do fator de erodibilidade do solo.....	21
<b>Figura 03:</b>	Produção de sedimentos anual em função da precipitação efetiva e da ocupação do solo.....	25
<b>Figura 04:</b>	Mapa de localização da área de estudo.....	27
<b>Figura 05:</b>	Mapa de caracterização do solo da bacia.....	29
<b>Figura 06:</b>	Mapa de cobertura vegetal e manejo do solo.....	30
<b>Figura 07:</b>	Imagem de satélite da bacia mostrando as matas ciliares.....	31
<b>Figura 08:</b>	Mapa de modelo digital de elevação (MDE).....	32
<b>Figura 09:</b>	Mapa de determinação do fator energético da chuva conforme as regiões brasileiras e seus respectivos autores.....	34
<b>Figura 10:</b>	Totais anuais de precipitação de Ourém.....	35
<b>Figura 11:</b>	Mapa do fator LS para a região.....	38
<b>Figura 12:</b>	Mapa do fator C (uso e manejo do solo) da bacia do Igarapé da Prata.....	39
<b>Figura 13:</b>	Diagrama representativo da USLE.....	42
<b>Figura 14:</b>	Diagrama representativo do modelo Poesen.....	42
<b>Figura 15:</b>	Classificação climática segundo Koppen-Geiger.....	43
<b>Figura 16:</b>	Precipitação anual acumulada de 2010.....	44
<b>Figura 17:</b>	Mapa de declividade da região.....	45
<b>Figura 18:</b>	Estação Hidrossedimentológica.....	50
<b>Figura 19:</b>	Local de medição no igarapé da Prata.....	51
<b>Figura 20:</b>	Estrutura da estação.....	52
<b>Figura 21:</b>	Fator R calculado via Morais <i>et al.</i> (1991) para a série pluviométrica de Ourém.....	53
<b>Figura 22:</b>	Erosão bruta e produção de sedimentos.....	55

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01:</b>	Características do latossolo amarelo na região.....	37
<b>Tabela 02:</b>	Valores de C para distintas classes de uso da terra.....	38
<b>Tabela 03:</b>	Valores de P para diferentes práticas conservacionista.....	40
<b>Tabela 04:</b>	Valores adotados para $\beta$ conforme o local.....	43
<b>Tabela 05:</b>	Valores do parâmetro CN para bacias rurais.....	48
<b>Tabela 06:</b>	Fator de erodibilidade do solo para a bacia do Igarapé da Prata.....	54
<b>Tabela 07:</b>	Parâmetros da USLE para a área de estudo.....	54
<b>Tabela 08:</b>	Fatores do modelo de Poesen.....	56
<b>Tabela 09:</b>	Precipitação anual e efetiva da bacia.....	57
<b>Tabela 10:</b>	Produção de sedimentos estimado pelos modelos USLE, Poesen e Langbein-Schumm.....	58
<b>Tabela 11:</b>	Produção de sedimentos observada e estimada pelos modelos.....	59



## LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
EI <sub>30</sub>	Índice de Erosão
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MDE	Modelo Digital de Elevação
MFI	Modified Fournier Index
MUSLE	Modified Universal Soil Loss Equation
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation
SDR	Sediment Delivery Ratio
SEPOF	Secretaria de Estado de Planejamento – PA
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USLE	Universal Soil Loss Equation

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 OBJETIVOS .....	15
1.1.1 GERAL .....	15
1.1.2 ESPECÍFICOS.....	15
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
2.1 EROÇÃO HÍDRICA PLUVIAL .....	16
2.1.1 Erosividade da Chuva .....	18
2.1.2 Conjunto Comprimento de Rampa e Declividade da Encosta .....	19
2.1.3 Uso e Manejo do Solo e Práticas Conservacionistas.....	19
2.1.4 Erodibilidade do Solo .....	20
2.2 TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE SEDIMENTOS (SEDIMENT DELIVERY RATIO – SDR).....	22
2.3 MODELOS PREDITIVOS DE EROÇÃO HÍDRICA.....	23
2.3.1 Universal Soil Loss Equation - USLE.....	23
2.3.2 Modelo de Poesen .....	24
2.3.3 Modelo Langbein-Schumm.....	24
<b>3 ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>27</b>
3.1 CLIMA .....	28
3.2 SOLO .....	28
3.3 VEGETAÇÃO E MANEJO DO SOLO.....	30
3.5 RELEVO.....	31
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>32</b>
4.1 USLE .....	32
4.1.1 Fator de Erosividade da Chuva (R) .....	33
4.1.2 Fator de Erodibilidade do Solo (K).....	36
4.1.3 Fator Conjunto de Comprimento e Grau de Declividade (LS).....	37
4.1.4 Fator de Uso e Manejo do Solo (C) .....	38
4.1.5 Fator de Práticas Conservacionistas (P).....	39
4.1.6 Taxa de Transporte de Sedimentos.....	40
4.3 MODELO DE POESEN .....	41
4.3.2 Declividade .....	44

4.4 MODELO LANGBEIN-SCHUMM.....	45
<b>4.4.1 Precipitação efetiva.....</b>	<b>46</b>
<b>4.4.2 Dados de Chuva e Sedimentos em Suspensão da Pequena Bacia .....</b>	<b>49</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>53</b>
5.1 PARÂMETROS DO MODELO USLE .....	53
5.2 PARÂMETROS DO MODELO DE POESEN .....	55
5.3 PARÂMETROS DO MODELO LANGBEIN-SCHUMM.....	56
5.4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MODELOS .....	57
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A erosão hídrica do solo, conseqüentemente, com a produção de sedimentos tem sido objeto de preocupações associadas ao planejamento e gestão do uso do solo e dos recursos hídricos devido às mudanças de uso e manejo do solo.

Os processos erosivos que ocorrem em uma bacia hidrográfica causam problemas na capacidade produtiva do solo devido à remoção dos seus nutrientes essenciais para a manutenção de espécies vegetais. Essa remoção, através do impacto das gotas de chuva e posteriormente com o escoamento superficial, transporta esses sedimentos produzidos para áreas mais baixa topograficamente, chegando aos corpos de água, ocasionando o assoreamento dos mesmos.

Outro fator importante dentro da erosão hídrica, é o desprendimento e o arraste das partículas do solo que associadas às condições do terreno sobre qual a chuva incide, determina a intensidade do processo erosivo. Dentre os fatores relacionados às condições do terreno que interferem nesse processo estão: a declividade, a capacidade de infiltração da água no solo, o escoamento superficial, a rugosidade superficial (relacionada ao uso e manejo do solo) e a resistência do solo à ação erosiva da água.

A erosão hídrica causada pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial envolve os processos de remoção, transporte e deposição das partículas do solo. Em vista disso, para uma adequada modelagem do processo erosivo, deve-se considerar a influência desses fatores.

Dessa forma, estudos das variáveis ambientais relacionadas à hidrossedimentologia, como, a investigação de produção de sedimentos em bacias hidrográficas, são fundamentais para o mapeamento de áreas vulneráveis a problemas ambientais, bem como para elaboração de políticas públicas de planejamento e ainda, a formação de instrumentos de previsão, prevenção e remediação de impactos ambientais.

Entre as ferramentas disponíveis para a avaliação da erosão do solo, os modelos de simulação são muito importantes, pois desde que utilizados de forma apropriada podem avaliar cenários, sem testes de campo dispendiosos e onerosos (PIERI, 2007).

Silva e Santos (2008) ressaltaram o aumento do número de estudos hidrossedimentológicos desenvolvidos no Brasil, devido ao fato da relevância dada a esse tema por diversos pesquisadores no país e no exterior. Os autores destacam, também, outros estudos realizados para a região semiárida do nordeste brasileiro.

Para a região amazônica, são poucos os estudos científicos nessa linha de pesquisa. Em uma região que nos últimos anos vem sendo submetida a uma diversidade de atividades

exploratórias. Maeda, Formaggio, Shimabukuru (2008) ressaltaram que estudos de modelagem das mudanças do uso e manejo do solo indicam que, no ano de 2050, seguindo-se as tendências atuais, cerca de 40% da Amazônia legal estará desflorestada dando lugar às atividades agropecuárias.

Maeda, Formaggio, Shimabukuru (2008) também descreveram que desequilíbrios naturais acarretados por mudanças na cobertura vegetal trazem diversas implicações na conservação dos solos e dos recursos hídricos. A retirada dessa cobertura vegetal original permite um maior carregamento de sedimentos e nutrientes para os córregos e rios, causando uma série de problemas ambientais, como erosão, assoreamento e eutrofização.

Dias (1991) realizou estudos da influência da erosão marginal em lagos de abastecimento de água do município de Belém, Estado do Pará, com objetivo de mensurar o arraste laminar de materiais sólidos em uma bacia hidrográfica de pequeno porte com ambiente alterado por barramento. O autor constatou a ocupação desordenada da região em torno dos lagos, com desmatamento acentuado na cabeceira dos rios, sendo este um dos fatores que ocasionaram o aumento da produção de sedimentos da referida bacia.

Gomide (2012) aplicou a Equação Universal de Perda de Solo (Universal Soil Loss Equation - USLE), em duas bacias com características distintas: uma periurbana, localizada na região Metropolitana de Belém, no Parque Ambiental do Utinga, que representa a bacia formada pelos lagos Bolonha e Água Preta; e a outra, sendo uma bacia rural, localizada no município de Capitão Poço, no Igarapé da Prata.

Santos (2013) aplicou a equação universal de perda de solo revisada (Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE) com técnicas de geoprocessamento na bacia do Igarapé da Prata para quantificar a Erosão hídrica e analisar a tolerância à perda de solo da bacia.

Em Cariello *et al.* (2014) os autores aplicaram, na mesma área de estudo de Gomide (2012) e Santos (2013), à equação universal de perda de solo modificada (Modified Universal Soil Loss Equation – MUSLE) com objetivo de mensurar o aporte de sedimento gerado através de eventos de chuva isolados.

Devido aos estudos realizados na bacia do Igarapé da Prata, o objetivo do presente estudo é comparar os modelos propostos por Poesen (1985) e Langbein-Schumm (1958) ao modelo clássico de erosão do solo, USLE, e aos dados de produção de sedimentos observados.

O modelo de Poesen vem sendo aplicado em várias regiões do mundo, por exemplo, Marrocos (HEUSCH, 1970); Nigéria (KOWAL e KASSAM, 1977); Indonésia (VAND DER

LINDEN, 1978); Zimbabwe (STOCKING, 1981); Bélgica (POESEN, 1983) Grécia (HRISSANTHOU, 2005) e Venezuela (GUEVARA-PÉREZ E MÁRQUEZ, 2007).

Já o modelo de Langbein-Schumm foi desenvolvido nos Estados Unidos a fim de compreender os efeitos das mudanças climáticas sobre a erosão e as diferenças regionais na produção de sedimentos. Langbein-Schumm foi aplicado por Pereira e Benedetti (2013) na península ibérica; e Moglen *et al.* (1998) que relacionaram a produção de sedimentos com o regime climático e a densidade de vegetação de uma área com a diminuição da erosão pelo impacto da gota da chuva.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Geral

Caracterizar modelos empíricos para estimativa de produção de sedimentos da bacia do Igarapé da Prata.

### 1.1.2 Específicos

- Avaliar a produção de sedimentos que chega ao igarapé através dos Modelos de Poesen, Langbein-Schumm e USLE;
- Comparar os modelos de Poesen, de Langbein-Schumm e USLE à dados observados de produção de sedimentos.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

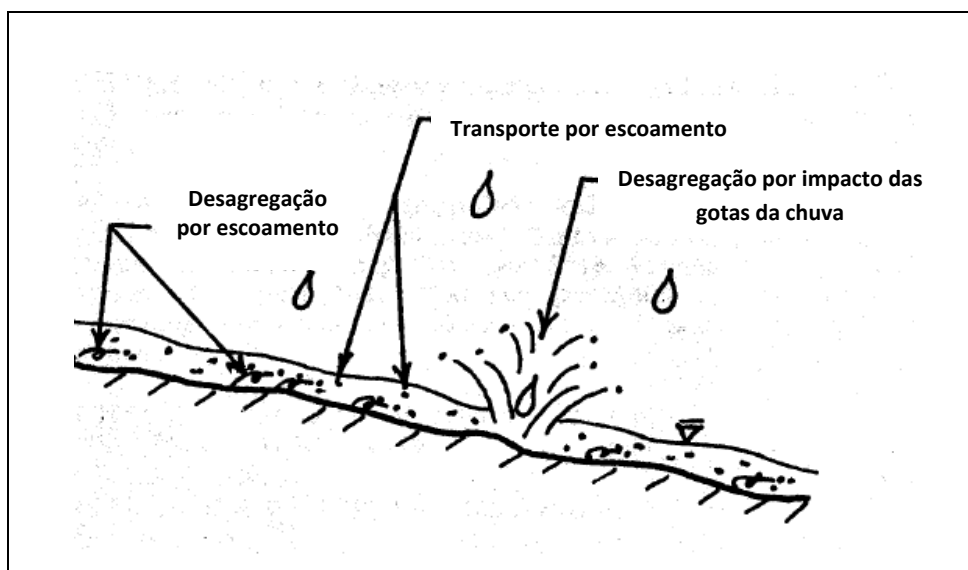
### 2.1 EROSIÃO HÍDRICA PLUVIAL

O termo "erosão" vem do latim *erodere* que significa “roer” ou “escavar”. Segundo Lal (2005) a erosão está relacionada aos fatores condicionantes do processo erosivo como o vento, a chuva, mudanças de temperaturas, ações de agentes biológicos e antrópicos, relevo do terreno e alterações na cobertura vegetal. Entre os agentes atuantes, o que mais se destaca é o processo de erosão hídrica pluvial, no qual a energia cinética das gotas de água da chuva, associada à força de cisalhamento do escoamento, desprende as partículas do solo e as arrasta para o ponto mais baixo da bacia.

A erosão hídrica pluvial é consequência de um trabalho mecânico que requer energia fornecida pelas gotas de chuva e pelo escoamento superficial da água, caracterizada por três etapas distintas: desagregação, transporte e deposição de partículas de solo (WISCHMEIER & SMITH, 1965).

A desagregação do solo pode resultar tanto das gotas de chuva que golpeiam o solo, quanto pela corrente de água que se forma na superfície, como mostra a Figura 01. E quanto maior o volume das gotas, maior será o impacto causado, e conseqüentemente maior será o volume das partículas soltas (MISRA & TEIXEIRA, 2001). A desagregação pelo impacto das gotas de chuva está relacionada com a influência do vento na direção da chuva (ângulo de incidência do vento-chuva), o qual vai determinar a intensidade de desagregação das partículas de solo.

**Figura 01:** Desagregação e transporte de sedimentos.



**Fonte:** Adaptado de BEASLEY *et al.* (1981).



O escoamento da água que flui sobre a superfície do solo também transmite tensão normal, bem como tensão de cisalhamento sobre o solo. No entanto, as tensões aplicadas pelo escoamento da água estão distribuídas por uma maior área, e menos localizadas do que as tensões transmitidas pelas gotas de chuva (MISRA & TEIXEIRA, 2001), que por isso são maiores.

O transporte ocorre em decorrência da remoção das partículas desagregadas para além do lugar de origem. Em solos mais úmidos, a vegetação geralmente impede a desagregação e o transporte pelo escoamento. No entanto, períodos chuvosos podem elevar a taxa de erosão e arraste dessas partículas desagregadas pela chuva, em virtude da cobertura do solo ser mínimo (AKSOY & KAVVAS, 2005).

Já o processo de deposição das partículas de solo ocorre quando a força de escoamento se reduz até não poder mais deslocar as mesmas. E essa deposição geralmente se dá em locais mais baixos como em depressões naturais do terreno ou então em encostas de declividade mais suave, não alcançando com isso o curso d'água (CARVALHO, 2008). Ademais, alguns sedimentos transportados podem ser depositados em determinados locais temporariamente podendo ser transportados por eventos subsequentes (FOSTER, 1975).

Além dos processos de desagregação, transporte e deposição, o impacto das gotas da chuva ocasiona liberação de partículas que obstruem os poros do solo, selando a superfície e reduzindo com isso a capacidade de infiltração da água. O acúmulo de água nas depressões da superfície do solo começa a ocorrer somente quando a intensidade de precipitação excede à velocidade de infiltração, ou então quando a capacidade de acumulação de água no solo for excedida. Esgotada a capacidade de retenção superficial, a água começa a escoar. Associado ao escoamento superficial ocorre o transporte de partículas do solo, as quais podem sofrer deposição quando a velocidade do escoamento superficial for reduzida (SILVA *et al.*, 1997).

A perda de solo associada à erosão hídrica é normalmente, descrita a partir de uma combinação de dois processos que regem o desprendimento das partículas pela ação da água: a erosão entressulcos e a erosão no sulco.

A erosão entressulcos é aquela cujo agente erosivo responsável pela desagregação é a precipitação pluvial e o transporte ocorre por uma ação combinada do efeito de salpicamento e do escoamento superficial. Já na erosão nos sulcos, o agente erosivo responsável pela desagregação e pelo transporte é o escoamento concentrado em que, sendo profundo o suficiente, protege a superfície do solo contra o impacto da gota da chuva, enquanto que a fonte de sedimentos constitui os horizontes superficiais e subsuperficiais (OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Em geral, a erosão é causada por forças ativas, relacionadas às características da chuva, da declividade e comprimento de declive da encosta e a capacidade de infiltração do solo, e por forças passivas, como a resistência do solo à ação erosiva da água e a densidade da cobertura vegetal da bacia (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2010).

### **2.1.1 Erosividade da Chuva**

A chuva é o fator climático de grande relevância dentro dos estudos da erosão hídrica. A erosão inicia-se com o processo de desagregação pelo impacto da gota de chuva. A erosividade pode ser representada como a pressão exercida sobre o solo, ou a energia cinética de uma única gota de chuva, que são todas as funções referentes a sua massa e velocidade terminal, bem como sua intensidade, duração e frequência (SHARMA, 1996).

Quando uma gota de chuva é despreendida de uma nuvem, essa gota estará sujeita a aceleração da gravidade e que, por conseguinte sua energia cinética é maior à medida que cai de maior altura. As gotas de chuvas não são corpos indeformáveis. Elas sofrem múltiplas mudanças no trajeto que percorre. O atrito do ar e a pressão resultam na diminuição da sua velocidade. Desta forma, as gotas de chuva na queda podem alcançar velocidade terminal, a partir do qual o movimento passa a ser uniforme. Essa velocidade constante é atingida quando a resistência oposta à queda é igual ao peso do corpo menos o empuxo para cima (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2010).

A erosividade da chuva é usualmente expressa como a função potencial da intensidade de precipitação. As primeiras pesquisas realizadas para obter uma equação que determinasse a energia cinética da chuva foram realizadas por Wischmeier e Smith (1965). Estes antes propuseram um índice de erosividade da chuva denominado  $EI_{30}$ , definido como o produto da energia cinética da chuva pela intensidade máxima ocorrida em qualquer período de 30 minutos consecutivos.

O índice de erosividade da chuva  $EI_{30}$  é o produto da energia cinética da chuva  $E$  com a intensidade de precipitação  $I$  durante um evento de 30 min de duração, correlacionando a capacidade de desagregação das partículas de solo com o transporte através do respingo das gotas de chuva. Esta condição, de intensidade de até 30min, representa o aumento de escoamento à medida que a taxa de infiltração do solo diminui, relacionada às características físicas das bacias rurais (NASCIMENTO E CHAVES, 1996).

### **2.1.2 Conjunto Comprimento de Rampa e Declividade da Encosta**

O conjunto comprimento de rampa e grau de declive da encosta são fatores topográficos referentes ao relevo da bacia. O comprimento de rampa está relacionado ao caminho que a água vai percorrer até o ponto em que a declividade diminui suficientemente para promover deposição, no canal ou em depressões da bacia, quanto maior sua extensão maior será velocidade de escoamento superficial. Logo, quanto maior o seu comprimento, mais enxurrada se acumula, conseqüentemente, maior será a erosão (WISCHMEIER & SMITH, 1965).

Já o volume e a velocidade das enxurradas dependem do declive das encostas, sendo expresso como a porcentagem que caracteriza a tangente do ângulo ou índice da inclinação do terreno. A erosão do solo é mais sensível à declividade do terreno do que ao comprimento da rampa (RISSE *et al.*, 1993).

Bertoni e Lombardi Neto (2010) explicam que através de alguns princípios de hidráulica, pode-se entender a relação que existe entre a velocidade da água e seu poder erosivo. A velocidade da água varia com a raiz quadrada da distância vertical que ela percorre. Assim, se o declive do terreno aumenta quatro vezes, a velocidade do escoamento aumenta duas vezes e a capacidade erosiva quadruplica, pois é proporcional a energia cinética, a qual varia com o quadrado da velocidade.

O conjunto de comprimento e grau de declive pode ser obtido através de ábacos, bases cartográficas, ou por meio de softwares em geoprocessamento. Pois os softwares possuem algoritmos de manipulação de modelo numérico, aplicando equações correlacionando a declividade com o comprimento da encosta, em virtude disso os dois fatores aparecem representados em uma única variável (LS) (BAPTISTA, 2003).

### **2.1.3 Uso e Manejo do Solo e Práticas Conservacionistas**

O processo de erosão hídrica pluvial se agrava também em decorrência do uso e manejo da terra. Solos desprotegidos serão mais erodidos do que solos com cobertura vegetal, porque a vegetação amortece o impacto das gotas da chuva e aumenta a rugosidade do terreno, portanto, aumentando a capacidade de infiltração do solo e diminuindo o escoamento superficial.

A susceptibilidade à erosão de um solo desprovido de cobertura vegetal é geralmente maior do que outro com cobertura vegetativa, sendo que o grau de proteção depende basicamente do estágio de crescimento e desenvolvimento da vegetação aliada ao manejo e práticas conservacionista (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2010).

A qualidade do solo é definida como a capacidade do solo para funcionar dentro dos limites naturais, para sustentar a produtividade animal e vegetal, para manter ou melhorar a qualidade da água e do ar, e apoiar a saúde humana e habitação (KARLEN *et al.*, 1997; GARRIGUES *et al.*, 2012; OBADE & LAL, 2014). Logo, a qualidade do solo está relacionada com possíveis usos e manejos do solo, visando à sustentabilidade das culturas agrícolas dentro de uma bacia hidrográfica (GARRIGUES *et al.*, 2012).

O fator de práticas conservacionista representa a relação que existe entre as perdas de solo de um terreno cultivado com determinada prática conservacionista e as perdas de solo quando plantado morro abaixo (WISCHMEIER & SMITH, 1965). Ou seja, são as técnicas empregadas para aumentar a resistência do solo ou diminuir a ação dos agentes erosivos.

#### **2.1.4 Erodibilidade do Solo**

Wischmeier e Smith (1965) definem a erodibilidade do solo como sendo as perdas de solo em toneladas por hectare (t/ha) por unidade do fator de erosividade sob condições padrão de declividade, comprimento de rampa, manejo e prática conservacionista. Segundo Renard *et al.* (1997) a erodibilidade do solo é a facilidade com que o solo é destacado durante um “respingo” de chuva ou pelo escoamento superficial ou por ambos. É considerada uma propriedade inerente do solo, com valor constante para um determinado tipo de solo e amplamente utilizado em modelos de previsão de erosão hídrica.

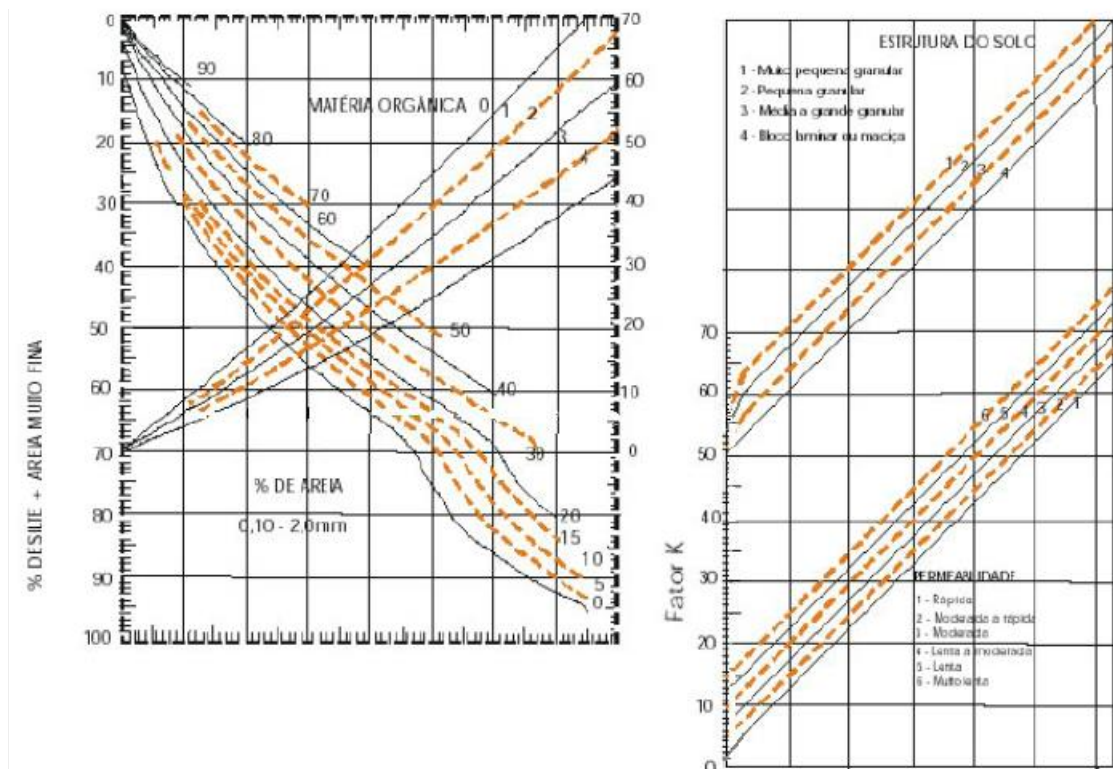
Pode-se também dizer que a suscetibilidade do solo à erosão (facilidade com que as partículas do solo tendem a se desprender e serem transportadas por ação de um agente erosivo) está diretamente relacionada às propriedades físicas, químicas, biológicas do solo e da intensidade da ação dos agentes erosivos, tais como, chuva, vento, etc.

Muitos estudos têm sido realizados com objetivo de analisar a geomorfologia do solo referente à erosão hídrica, tais como realizados por Morgan (1998), Bryan (2000), Zhang *et al.* (2008), Wang *et al.* (2013) e Auerswald *et al.* (2014), como também uma grande variedade de métodos que envolvem o tipo de solo, condições climáticas e histórico de uso e manejo do solo.

Segundo Wang *et al.* (2013) a erodibilidade do solo pode ser discutida a partir de relações entre as propriedades intrínsecas do solo e as forças motrizes da erosão (chuva, vento, calor, abalos sísmicos, etc.). Sendo a erosão governada por dois processos: a desagregação pelo impacto da gota da chuva e o transporte (pelo escoamento superficial) das partículas dos materiais inconsolidados.

A quantificação da erodibilidade do solo pode ser realizada a partir de instalação de equipamentos que monitorem a taxa de solo perdida em unidade de área em função do índice baseado na energia cinética da chuva (WISCHMEIER & SMITH, 1965). No entanto, esse tipo de tratamento demanda custos elevados. Uma alternativa é a utilização de modelos matemáticos empíricos, de baixo custo e de boa aplicabilidade, quando utilizados de maneira correta, respeitando as características do solo. Entretanto, existe uma forma indireta de estimar a erodibilidade do solo, que é o nomograma proposto por Wischmeier *et al.* (1971) que utiliza as características morfológicas, químicas e físicas do solo para quantificar a erodibilidade de solos de clima temperado (Figura 02).

**Figura 02:** Nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) para obtenção do fator de erodibilidade do solo.



Fonte: CARVALHO (2008).

Wischmeier *et al.* (1971) desenvolveram o nomograma a partir de amostras de solos de simulação de chuva de 55 solos no Centro-Oeste dos EUA, que na sua maioria (81%) eram solos de textura média, levando-se em consideração o teor de silte mais areia muito fina, argila, matéria orgânica e o perfil classe de permeabilidade. O nomograma proposto pelos autores não pode exceder 70% de teor de silte nas amostras de solo, que é característico de solos de clima temperado.

A leitura do nomograma inicia-se na escala vertical da esquerda (% de silte + areia muito fina), prosseguindo horizontalmente até interceptar a curva que representa os percentuais de areia (0,1 - 2,0 mm), e verticalmente para adequar a curva de matéria orgânica; dando continuidade horizontalmente para a seção direita até interceptar a curva de estrutura do solo analisado, descendo em seguida para a propriedade curva de permeabilidade. Concluindo, com isso, a leitura do nomograma na escala da esquerda na seção direita chegando ao valor erodibilidade do solo (K).

O nomograma é muito questionado em estudos realizado no Brasil, como Lima *et al.* (1990), Denardin (1990), Marques *et al.* (1997) e Silva *et al.* (2000) sobre sua inadequação para solos brasileiros. Assim, adaptações têm sido testadas como as de Lima *et al.* (1990); e Denardin (1990).

## 2.2 TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE SEDIMENTOS (SEDIMENT DELIVERY RATIO – SDR)

A taxa de transferência de sedimento ou aporte de sedimentos é uma relação entre a produção de sedimento que passa pelo exutório de uma bacia hidrográfica e a erosão total que ocorre a montante do ponto estabelecido.

Segundo Silva *et al.* (2009), a SDR está relacionada às características da bacia, como: forma da encosta; a distância que percorre o fluxo entre a fonte e seu exutório; porcentagem de cobertura vegetal no caminho percorrido pelo fluxo entre a área fonte e à saída da bacia; e textura do material de solo erodido.

O SDR é comumente associado à USLE, agregando o conceito de que nem todo o solo erodido chega ao curso hídrico principal da bacia e, ou até mesmo no seu exutório, onde o sedimento é coletado e analisado. Com isso, parte que é erodida, pode simplesmente encontrar uma barreira física, evitando que o sedimento alcance o corpo receptor (LU *et al.*, 2006).

A taxa de transferência de sedimentos é adimensional e pode ser expressa como:

$$SDR = \frac{Sed}{Sed_{total}} \quad (01)$$

Em que:

$Sed$  – é a produção de sedimentos médio anual no exutório;

$Sed_{total}$  – é a erosão bruta na bacia.

A taxa de transferência varia entre 0 a 1. Alguns autores estudaram a relação entre o SDR e a área, entre eles Walling (1999), concluindo que quanto maior a área de drenagem de uma bacia, menor é o valor do SDR. Logo, uma grande bacia tem maior possibilidade de possuir mais barreiras naturais, por exemplo, depressões, que propiciem a retenção de sedimentos.

Outro método, amplamente utilizado para estimar o SDR é a Equação 02 (WALLING, 1983; LU *et al.*, 2006), que relaciona o SDR com a área de drenagem da bacia.

$$SDR = \alpha \cdot Ad^{-\beta} \quad (02)$$

Em que:

$Ad$  – área de drenagem da bacia;

$\alpha$  e  $\beta$  – são parâmetros empíricos relacionados às características físicas e hidrológicas da bacia hidrográfica.

O expoente  $\beta$  contém informação física sobre os processos de transporte de sedimentos na bacia e está próximo da interligação dos processos precipitação–vazão. O sinal negativo do expoente  $\beta$  na Equação 02, indica que com o aumento da área há redução no aporte de sedimentos (CHAVES, 2010).

## 2.3 MODELOS PREDITIVOS DE EROÇÃO HÍDRICA

### 2.3.1 Universal Soil Loss Equation - USLE

A Equação Universal de Perda de Solo é um modelo de erosão hídrica que prevê a taxa média anual de perda de solo, em longo prazo, com base em séries históricas de precipitação, tipologia do solo, topografia, sistemas de cultivo e práticas de conservação do solo. Desenvolvida nas décadas de 1960 e 1970 pelo Serviço de Pesquisa Agrícola dos EUA como suporte para o planejamento e conservação do solo em bacias rurais (WISCHMEIER & SMITH, 1965). O modelo passou por várias pesquisas, modificações e extensões, como por exemplo, MUSLE (WILLIAMS, 1975) e a USLE-M (KINELL & RISSEL, 1998), dUSLE (FLACKE *et al.*, 1990), e por uma revisão, RUSLE (RENARD *et al.*, 1998) afim de aprimorar a acurácia do mesmo.

A equação é largamente utilizada em pesquisas em diversas regiões bem como em Cohen *et al.* (2005) e Irvem *et al.* (2007) que utilizam na identificação de áreas de risco à

erosão em bacias tropicais e em algumas bacias na Turquia, respectivamente; e Heung *et al.* (2013) que utilizaram a equação para desenvolver um modelo de redistribuição de uso e ocupação do solo.

### **2.3.2 Modelo de Poesen**

O Modelo de Poesen (1985), batizado com o nome de seu autor, é um modelo de previsão de erosão hídrica que possibilita calcular a massa de solo, erodido e transportado, através da energia cinética da chuva, do diâmetro médio das partículas de solo e declividade da encosta. O modelo estabelece uma relação entre a energia cinética da chuva (efeito da velocidade do vento e obliquidade no respingo da precipitação) e a quantidade de material de solo destacado. Outra relação positiva que é observado no modelo é entre a declividade da encosta e o destacamento de solo com a chuva, pois com o aumento da inclinação há uma diminuição da compactação da camada superior do solo em áreas entre sulcos, isso se deve a uma diminuição correlativa da ação de compactação das gotas de chuva, que é proporcional a declividade. Por conseguinte, a coesão da camada superior diminui quando a inclinação aumenta, resultando no aumento da desagregação do solo.

O autor desenvolveu o modelo com dados experimentais em laboratório, tendo com isso, a necessidade de validar os resultados em campo. Para isso, Poesen utilizou as séries de precipitações da bacia de Huldenberg, Bélgica, a fim de estabelecer uma estimativa confiável da ordem de grandeza do transporte de sedimento em encostas sem cobertura vegetal. Para as condições do solo com cobertura vegetativa, é necessário incluir o fator adicional, C, como da USLE, para expressar a redução da desagregação do solo pelo impacto da gota de chuva sobre a vegetação.

Comparando com o modelo USLE, o Poesen tenta detalhar a erosão hídrica através da desagregação e transporte de sedimento que ocorre a cima da encosta e no ponto mais baixo de declive do terreno. No entanto, as correlações dos parâmetros que influenciam a erosão permanecem ainda empíricas. Da mesma forma que o modelo USLE, o modelo de Poesen, também utiliza uma taxa de entrega para estimar o sedimento transportado (GUEVARA-PÉREZ E MÁRQUEZ, 2007).

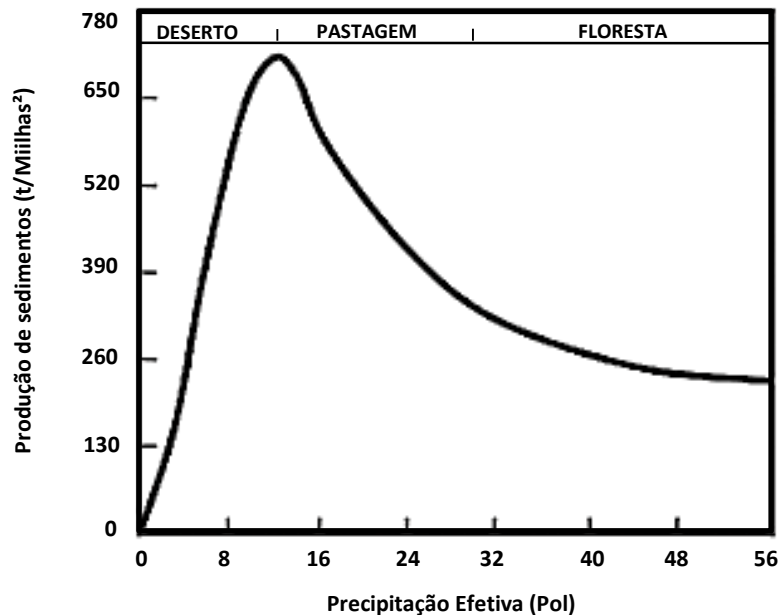
### **2.3.3 Modelo Langbein-Schumm**

Langbein-Schumm (1958) é um modelo de erosão hídrica que está associado ao clima, definido pela precipitação efetiva anual, tendo como objetivo a compreensão dos efeitos das



mudanças climáticas sobre a erosão e as diferenças regionais relacionadas à produção de sedimentos. O modelo toma como base o estudo realizado por Langbein (1949), no qual o autor examinou a relação entre produção de sedimentos e precipitação média anual via análise das paisagens e ocupação do solo e de dados de quantidade de sedimentos em suspensão, coletados em mais de 170 estações fluviométricas do Estados Unidos (Figura 03). Os autores utilizaram como referência uma bacia padrão de área de drenagem de 39 milhas<sup>2</sup> ( $\cong$  101 Km<sup>2</sup>).

**Figura 03:** Produção de sedimento anual em função da precipitação efetiva e da ocupação do solo.



Fonte: Adaptado de LORD *et al.* (2009).

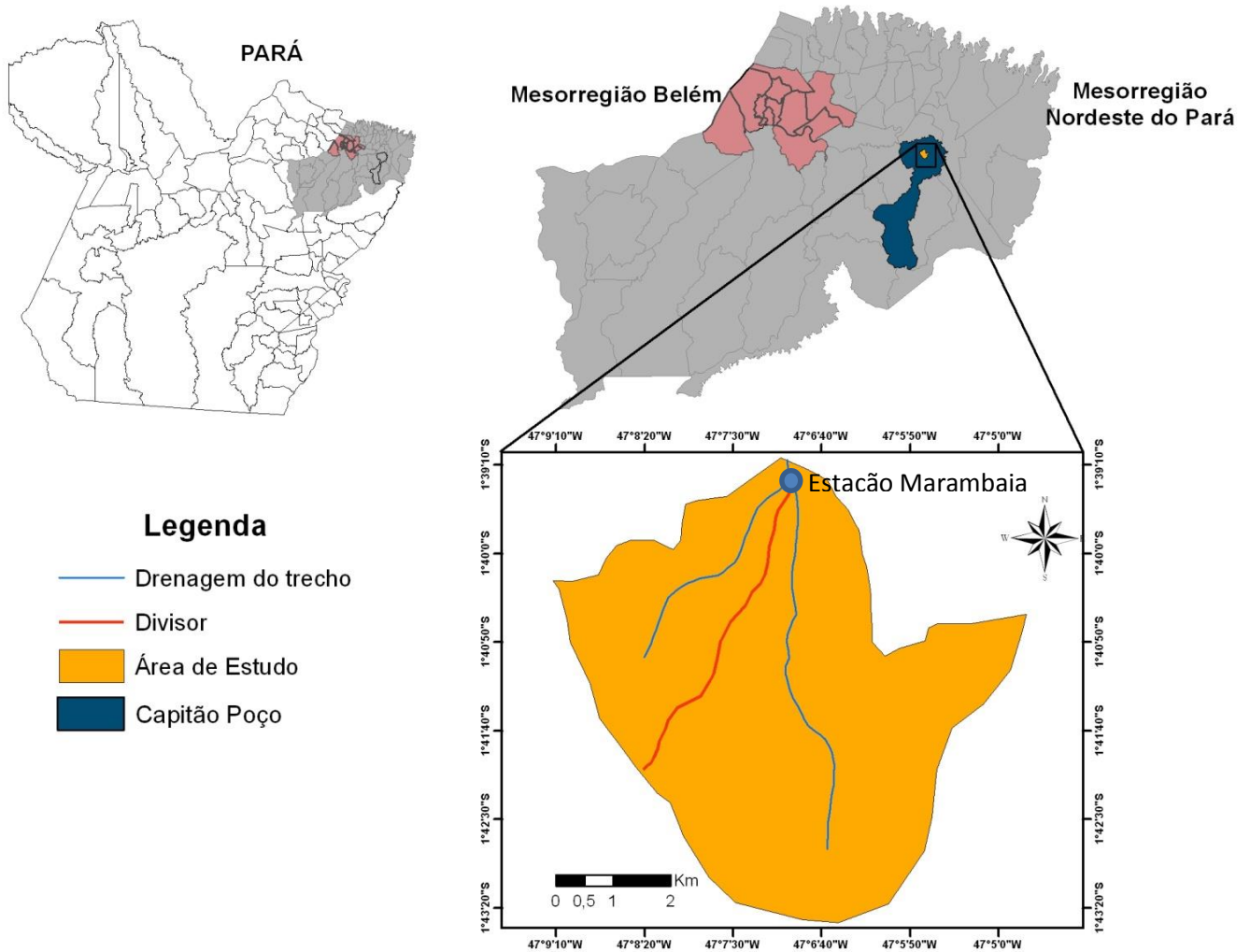
A proporção estabelecida de erosividade da chuva pela erodibilidade do solo é determinada através da taxa de produção de sedimentos (como pode ser observado na Figura 03 mostra a taxa de produção de sedimentos, como uma função da média de precipitação efetiva anual). Em climas áridos, percebe-se que a erosividade é dominante, e a taxa de produção de sedimentos aumenta com o aumento da precipitação efetiva. Já em climas úmidos, a vegetação torna-se mais densa e a erodibilidade reduz-se juntamente com a taxa de produção de sedimentos, mesmo com o aumento da precipitação efetiva (MOGLEN *et al.*, 1998). Neste caso, mesmo havendo aumento na precipitação a taxa reduz-se, devido à cobertura vegetal, que minimiza os efeitos da erosão através da diminuição do impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial.

O modelo de Langbein-Schumm (1958) tem sido utilizado em algumas regiões, por exemplo, na Bacia do Rio Caroni na Venezuela (GUEVARA-PÉREZ & MÁRQUEZ, 2007); avaliando o avanço da erosão na bacia Cottonwood Creek, no Estados Unidos (LORD *et al.*, 2009); e na bacia do Rio Glonn, na Alemanha (DIODATO *et al.*, 2015).

### 3 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em um trecho da pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata, com área de 32,7 Km<sup>2</sup>, e seu exutório sendo marcado pela Estação Fluviométrica Marambaia (Agencia Nacional das Águas, código: 31600000) de responsabilidade da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). A bacia do igarapé da Prata está localizada no município de Capitão Poço, na Mesorregião do Nordeste Paraense (Figura 04) e na Microrregião Guamá, aproximadamente 160 km em linha reta da capital Belém, sendo delimitada pelas coordenadas 9826000 N e 260000 E ao noroeste e 9810000 N e 272000 E ao sudeste.

**Figura 04:** Mapa de Localização da Área de Estudo.



**Fonte:** Autora, 2015.

A área total da bacia é de 82 km<sup>2</sup>, desaguando no Rio Guamá, um dos principais rios do estado, pois banha a capital Belém. No entanto, os dados de precipitação são provenientes da estação pluviométrica de Ourém, controlada pela ANA, distante 15 km da área de estudo, sendo seu uso justificado por Blanco *et al.* (2007). A escolha desta pequena bacia ocorreu por efeito dos trabalhos previamente realizados na área por Gomide (2012), Santos (2013) e Cariello *et al.* (2014). Os autores argumentaram as facilidades logísticas de acesso e instalação de equipamentos, assim como das séries de dados fluviométricos já existentes para o local.

### 3.1 CLIMA

A região em estudo possui clima quente e úmido, característico de floresta tropical úmida, enquadrando-se no tipo equatorial úmido, da classificação de Köppen, caracterizado como chuvoso, apresentando pequena estação seca entre setembro e novembro. As médias das temperaturas mínima, média e máxima situam-se em torno de 21,4 °C, 26,2 °C e 32,7 °C, respectivamente, enquanto a umidade relativa fica em torno de 83%, a média da velocidade do vento é de 2 m/s e o total médio anual de precipitação em torno de 2.400 mm (PACHECO *et al.*, 2001).

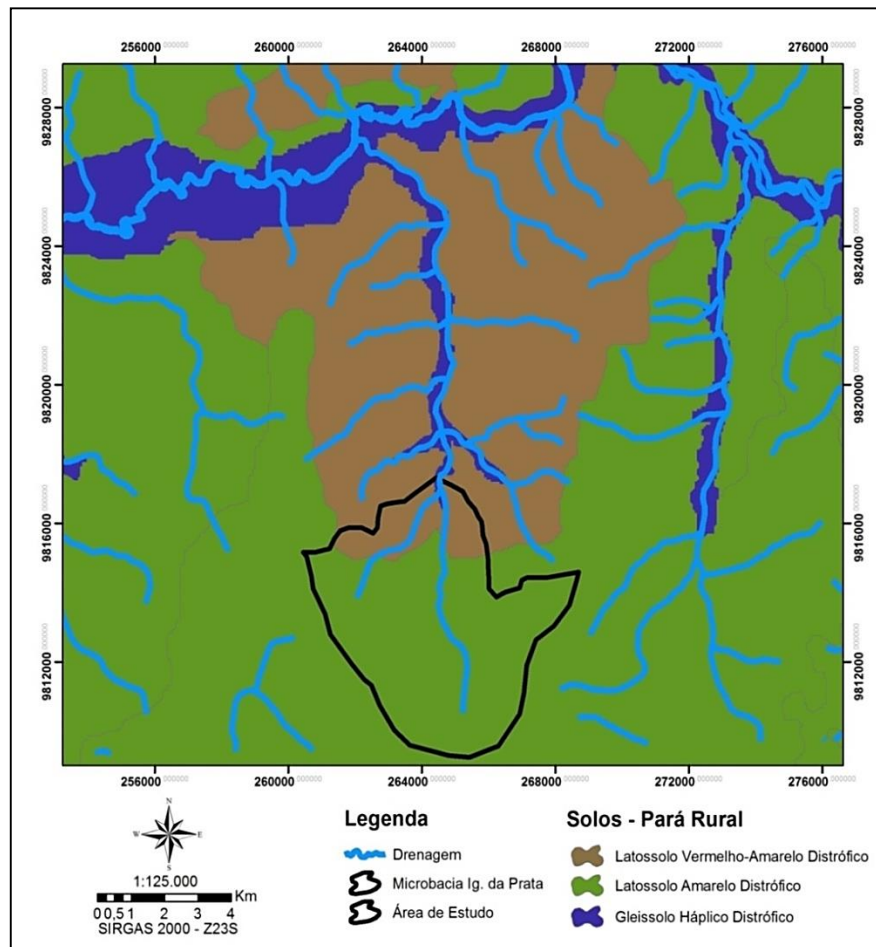
As chuvas, apesar de regulares, não se distribuem igualmente durante o ano, sendo de janeiro a junho sua maior concentração (cerca de 80%), implicando em grandes excedentes hídricos e, conseqüentemente, em grandes escoamentos superficiais e cheias dos rios. A umidade relativa do ar fica em torno de 85%.

### 3.2 SOLO

A bacia do Igarapé da Prata está localizada, geologicamente, em sub-bacias de formação cenozoicas, que segundo a CPRM, são pacotes de rochas sedimentares de natureza e espessura diversas, que recobrem as rochas mais antigas, tendo um comportamento de aquífero poroso, caracterizada por possuir uma porosidade primária.

O solo da área de estudo é predominantemente do tipo latossolo amarelo distrófico (Figura 05), que é encontrado em muitas áreas do Brasil. Sua maior expressividade e continuidade estão em áreas dos platôs litorâneos e amazônicos, onde normalmente desenvolvem-se a partir de sedimentos do Grupo Barreiras (Plio-pleistoceno) e Formação Alter do Chão (Cretáceo). São solos típicos das regiões equatoriais e tropicais, normalmente de relevos planos e ondulados, entretanto, podem também ocorrer em áreas mais acidentadas.

**Figura 05:** Mapa de caracterização do solo da bacia.



**Fonte:** SANTOS (2013).

As propriedades químicas e mineralógicas do solo influenciam na agregação entre as partículas, aumentando ou diminuindo a resistência do solo à erosão. Neste sentido, Yoshioka e Lima (2012) demonstraram em seus estudos que o modo como se arranjam as partículas do solo irá influenciar na capacidade de infiltração e de absorção da água de chuva, e na capacidade de arraste das partículas do solo. Desse modo, puderam constatar que os latossolos apresentam alta porcentagem de poros e, alta permeabilidade, favorecendo a infiltração da água; apresentam também agregação entre partículas, aumentando a resistência do solo contra ao arraste.

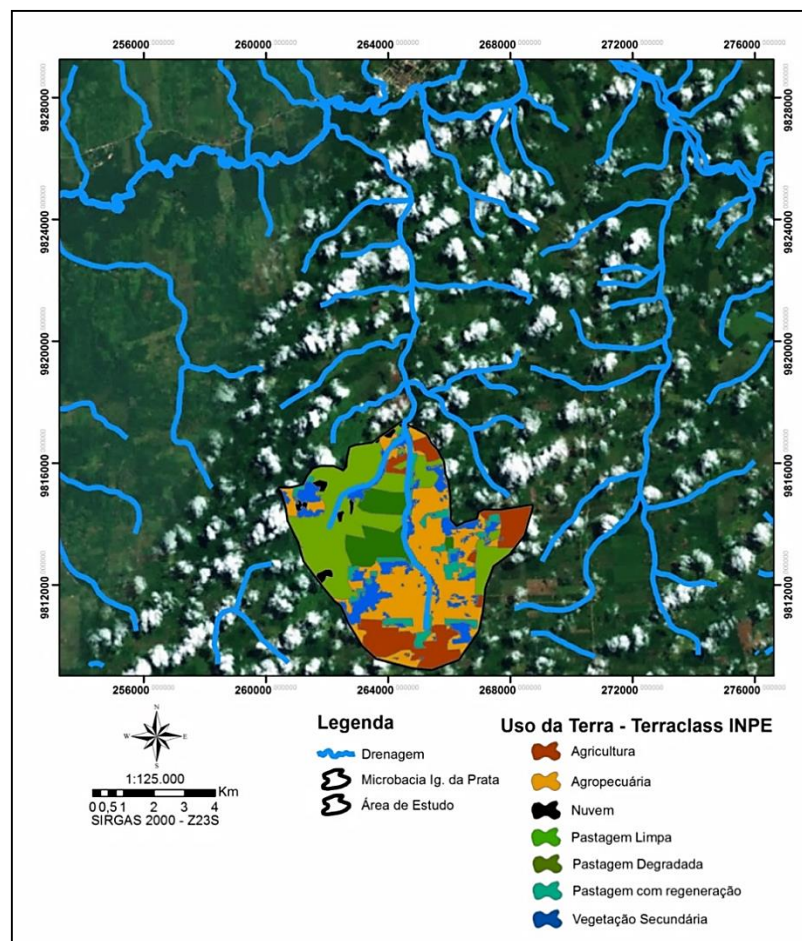
Na área de estudo são encontrados diversos usos da terra como áreas de pastagem e agricultura. Essas atividades podem afetar diretamente a erodibilidade do solo, que é um fator condicionante à erosão. Sendo assim, apesar dos latossolos amarelos representarem boas características físicas, o que lhes confere uma elevada permeabilidade e baixa susceptibilidade

à erosão, essa característica pode ser comprometida visto que grande parte da vegetação foi alterada (Figura 06).

### 3.3 VEGETAÇÃO E MANEJO DO SOLO

A vegetação é caracterizada pela cobertura de Floresta Densa Latifolhada de platô, terraços e vegetação aluvial. Estando a área inserida na condição de frente pioneira, há incidência muito grande de desmatamentos e, conseqüentemente, áreas de capoeira. Atualmente, existe uma grande área com o cultivo de citros (laranja), com fins industriais (SEPOF, 2012). A classificação do uso e manejo do solo na área de estudo foi obtida através do projeto de mapeamento da Terraclass do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2010) que mapeou áreas desflorestadas na Amazônia Legal com objetivo de quantificar o desmatamento e o manejo da terra na região (Figura 06).

**Figura 06:** Mapa de cobertura vegetal e manejo do solo.

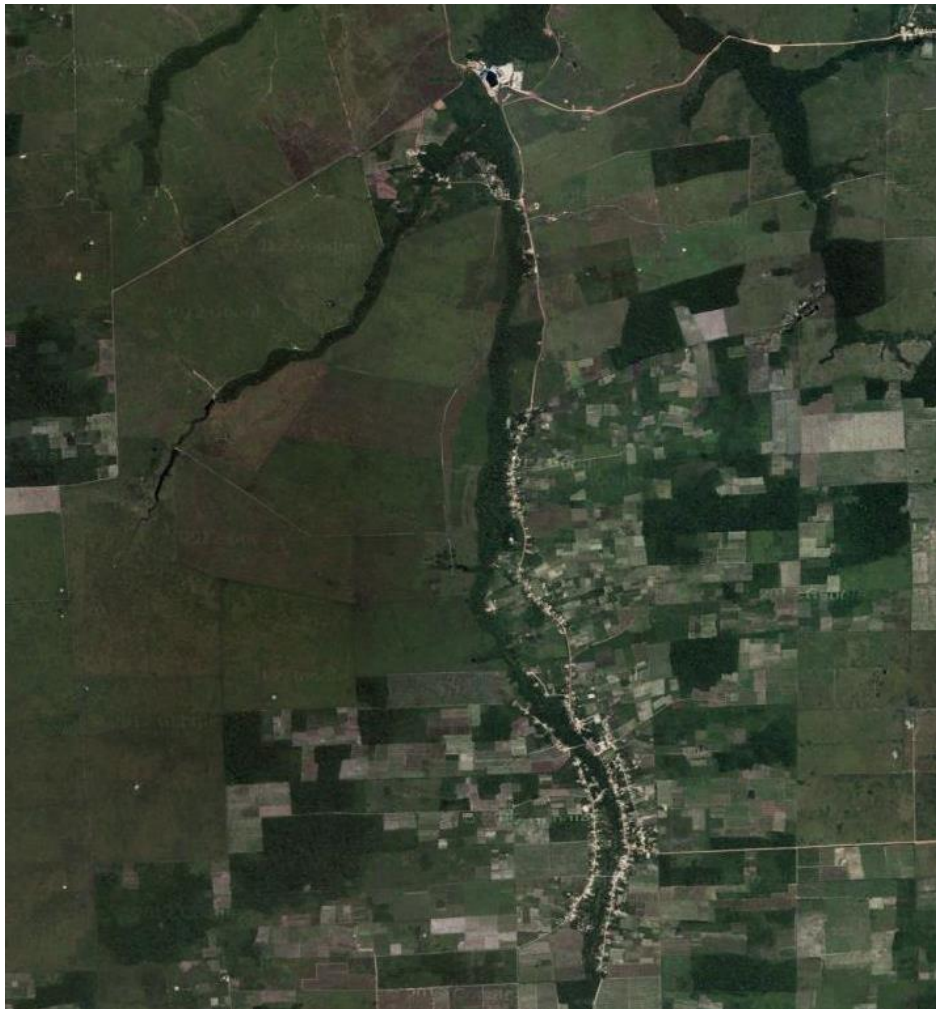


Fonte: SANTOS (2013).

A distribuição do uso da terra na área de estudo, na qual se destacam as pastagens concentradas na parte noroeste da área, observando-se três categorias de pasto que se estendem por aproximadamente 1.570 ha, ou 43% da área total, sendo: Pastagem Limpa (27%), Pastagem Degradada (9%) e Pastagem com regeneração (7%). Também se destacam as feições de Agropecuária com 1.070 ha (29%), assim como a Vegetação Secundária e Agricultura ambas entorno de 475 ha (13%) (SANTOS, 2013).

A bacia também apresenta, geralmente, preservação de sua mata ciliar, o que contribui na diminuição da erosão de suas margens e no assoreamento (Figura 07).

**Figura 07:** Imagem de satélite da bacia mostrando matas ciliares.



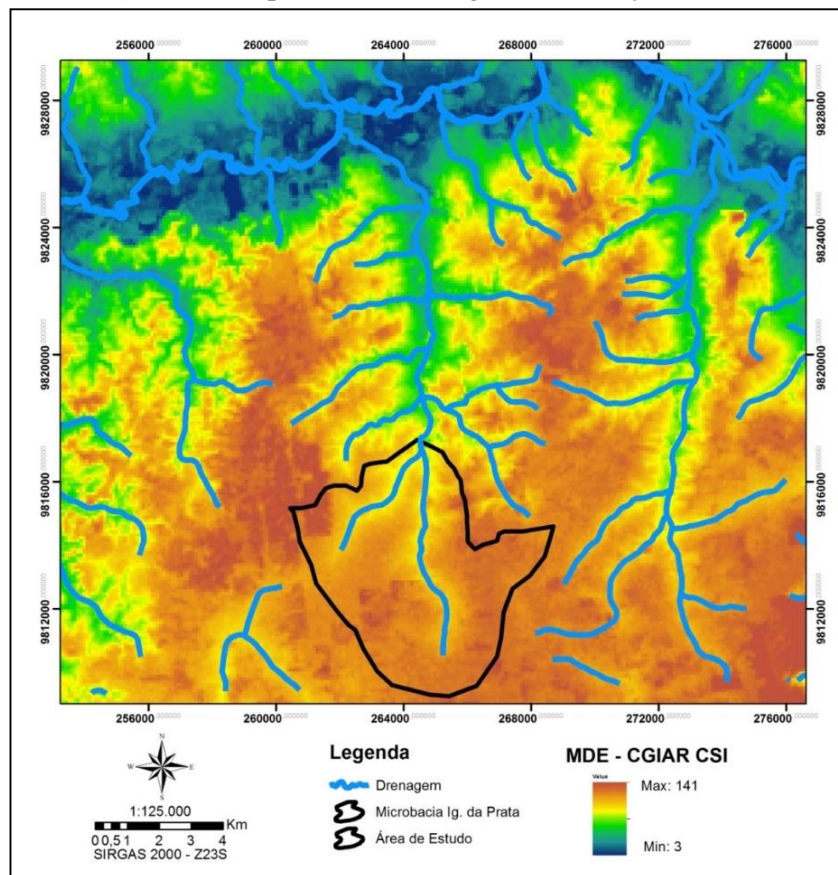
Fonte: Google Earth (2013).

### 3.5 RELEVO

O relevo na área de estudo é geralmente plano, com declividade média de 1,7%, não superior a 8,5 % nas áreas mais íngremes, e cotas que variam de 3 a 141 m. Estas análises

foram feitas a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área (Figura 08), baseado numa imagem SRTM 90 x 90 m (Shuttle Radar Topography Mission) ajustada por Jarvis *et al.* (2008). Os dados SRTM são considerados de satisfatória precisão vertical na Região Amazônica (SANTOS *et al.*, 2006). Salgado *et al.* (2012) concluíram que estes dados são melhores que os disponibilizados pelo IBGE para o cálculo dos fatores topográficos de erosão.

**Figura 08:** Mapa do Modelo Digital de Elevação (MDE).



Fonte: SANTOS (2013).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 USLE

A USLE (Eq. 03) quantifica a erosão do solo como o produto de seis fatores que representam; erosividade da chuva (R); erodibilidade do solo (K); comprimento do declive (L); declividade da encosta (S); uso e manejo do solo (C); e práticas conservacionistas (P).

$$A = R.K.LS.C.P \quad (03)$$



Em que:

$A$  – Perda de solo (t/ha.ano);

$R$  – fator de erosividade da chuva (Mj.mm/ha.h.ano)

$K$  – fator de erodibilidade do solo (t.h/Mj.mm);

$LS$  – fator conjunto de comprimento e grau de declividade da rampa (-);

$C$  – fator de uso e manejo do solo (-);

$P$  – fator de práticas conservacionistas (-);

#### 4.1.1 Fator de Erosividade da Chuva ( $R$ )

O fator energético da chuva expressa o poder erosivo de um evento de chuva através de sua energia cinética e de sua intensidade máxima de 30 min para um evento considerado. Seu valor pode ser calculado para períodos mensais ou anuais conforme a equação 04 proposta por Wischmeier e Smith (1965):

$$R = \sum_{i=1}^n E_i \cdot I_{30i} \quad (04)$$

Em que:

$E_i$  – energia cinética da chuva do evento  $i$  (Mj/ha); e

$I_{30i}$  – intensidade da chuva de 30 minutos, mais intensa, ocorrida durante o evento chuvoso  $i$  (mm/h).

Em que  $E_i$  é a energia cinética da chuva do evento  $i$  (Mj/ha);  $I_{30i}$  é a intensidade da chuva de 30 minutos, mais intensa, ocorrida durante o evento chuvoso  $i$  (mm/h); e  $n$  é número total de eventos chuvosos do mês considerado no presente estudo.

Silva (2004) realizou um mapeamento da distribuição das equações para cada região considerada homogênea no Brasil referente ao fator energético da chuva e suas respectivas equações (Figura 09).

**Figura 09:** Mapa de determinação do fator energético da chuva conforme as regiões brasileiras e seus respectivos autores.



Número	Autor	Equação
1	Oliveira e Medina, 1990	$EI_{30} = 42,77 + 3,76.MFI$
2	Morais <i>et al.</i> , 1991	$EI_{30} = 36,894.MFI^{1,0852}$
3	Oliveira Jr, 1988	$EI_{30} = 0,66.P_m + 8,88$
4	Silva (2001)	$EI_{30} = 42,307.MFI + 69,703$
5	Leprun (1981)	$EI_{30} = 0,13.P_m^{1,24}$
6	Val <i>et al.</i> (1986)	$EI_{30} = 12,592.MFI^{0,603}$
7	Lombardi Neto e Moldenhauer (1992)	$EI_{30} = 68,73.MFI^{0,841}$
8	Rufino <i>et al.</i> (1993)	$EI_{30} = 19,55 + 4,2.MFI$

\*MFI (Índice de Fournier Modificado) =  $P_m^2/P_a$ .

\* $P_m$  (precipitação média mensal);  $P_a$  (precipitação média anual)

Fonte: SILVA (2004).

Comparando-se a Figura 04 à Figura 09, observa-se que a região de Capitão Poço não está claramente definida dentro da região da Equação de Morais *et al.*, 1991 (região 2) ou dentro da região da Equação de Oliveira Jr, 1988 (região 3), principalmente pela falta de um georreferenciamento do mapa.

Entretanto, o trabalho de Lima *et al.* (2014) aplicou dados de chuva de 30 min, coletados durante 1 ano na bacia do igarapé da Prata, às duas equações supracitadas,

determinando que a equação mais adequada para obter o fator energético da chuva para a região, é a equação de Morais *et al.* (1991). Pois, os resultados calculados, usando a equação de Morais *et al.* (1991), são mais semelhantes aos resultados calculados via Equação 04, que é a equação original da USLE para cálculo do fator  $R$ . Assim, como a série de dados de chuva de 30 min da bacia ainda é curta, optou-se pelo uso da equação de Morais *et al.* (1991) (Eq. 05) com os dados de precipitação da estação pluviométrica do município de Ourém. A série coletada remete-se aos anos de 1988 a 2014 (Figura 10). Os dados pluviométricos foram utilizados não somente para a Equação Universal de Perda de Solo (USLE), como para os modelos de Poesen e Langbein-Schumm.

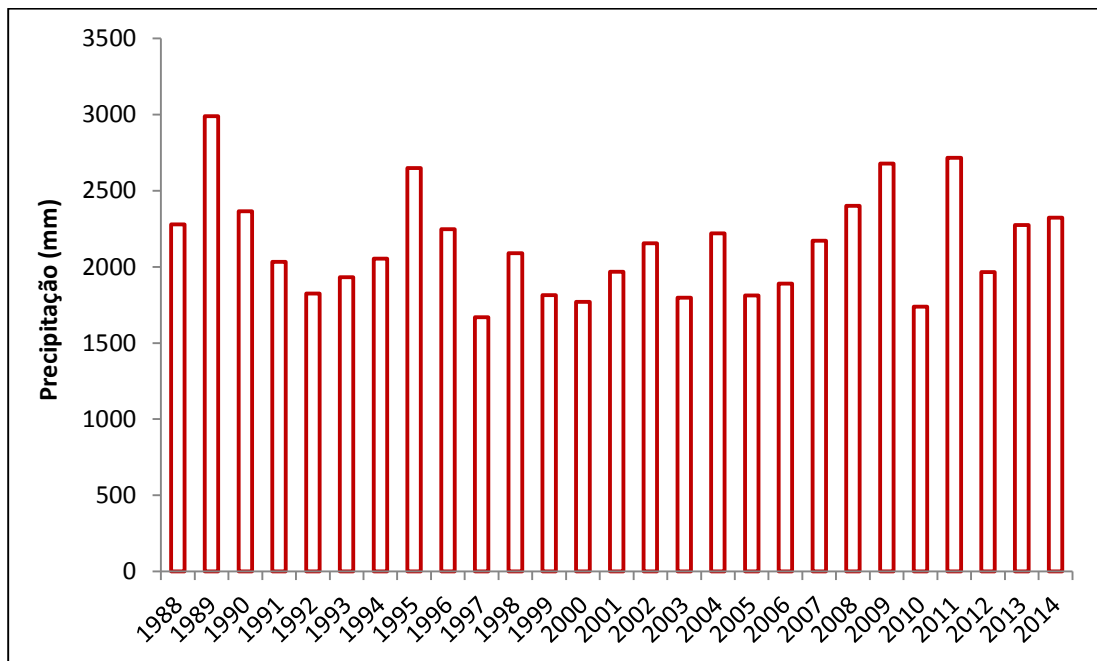
$$R = 36,894 \cdot \left( \frac{P_m^2}{P_a} \right)^{1,0852} \quad (05)$$

Em que:

$P_m$  – precipitação média mensal (mm);

$P_a$  – precipitação média anual (mm).

**Figura 10:** Totais anuais de precipitação de Ourém.



Fonte: Autora, 2015.

#### 4.1.2 Fator de Erodibilidade do Solo (K)

Para a obtenção do fator de erodibilidade do solo utilizou-se a mesma metodologia adotada por Gomide (2012), Santos (2013) e Cariello *et al.* (2014). Os autores basearam-se na equação desenvolvida por Denardin (1990), na qual o autor analisou os resultados obtidos para fator  $K$  para solos brasileiros, através do nomograma de solos (Figura 02), adaptando a equação proposta por Wischmeier e Smith (1965) a solos tropicais.

Levy (1995) ajustou a equação proposta por Denardin (1990) substituindo os dados de granulometria detalhada por dados mais simples de granulometria do solo, como areia grossa ( $> 0,2$  mm), areia fina (0,05 a 0,2 mm), silte (0,002 a 0,05 mm) e argila ( $< 0,002$  mm) (Eq. 06).

$$K = 0,00000748.M + 0,00448059.p - 0,0631175.DMP + 0,01039567.r \quad (06)$$

Em que:

$M$  – variável calculada a partir de valores granulométricos;

$p$  – permeabilidade dos solos com valores entre 1 e 5, segundo a classificação: 1 Rápida; 2 Moderada a Rápida; 3 Moderada; 4 Moderada a Lenta; e 5 Lenta;

$r$  – relação entre o teor de matéria orgânica e o teor de areia grossa (% de MO x % de areia grossa)/100;

$DMP$  – diâmetro médio ponderado das partículas.

O  $DMP$  pode ser determinado pela Equação 07 de Levy (1995):

$$DMP = \sum C_t.P_t \quad (07)$$

Em que:

$C_t$  – centro de cada classe textural (mm);

$P_t$  – proporção da classe textural (g/g).

O valor de  $M$  é obtido através da Equação 08.

$$M = (\%silte + \%areia\ fina).(\%silte + \%areia\ fina + \%areia\ grossa) \quad (08)$$

O fator  $C_t$  é caracterizado pelo centro de cada classe textural, através da escala apresentada por Milde *et al.* (2008), onde o diâmetro médio em mm da partícula é:

Areia grossa – 1,125;

Areia fina – 0,150;

Silte – 0,026;

Argila – 0,002.

Para aplicação da Equação 5 na área de estudo, foram utilizados os dados de Martins (1987), os quais descrevem as características de latossolos amarelos nas proximidades da pequena bacia de estudo (Tabela 01). Assim, o valor de  $D_{50}$  foi determinado igual a 0,00056 m.

**Tabela 01:** Características do Latossolo Amarelo na região.

<b>Permeabilidade</b>	Moderada e Rápida
<b>Textura</b>	Franco Arenosa
<b>% Areia grossa</b>	46
<b>% Areia fina</b>	29
<b>% Silte</b>	14
<b>% Argila</b>	11
<b>% Matéria Orgânica</b>	2,18

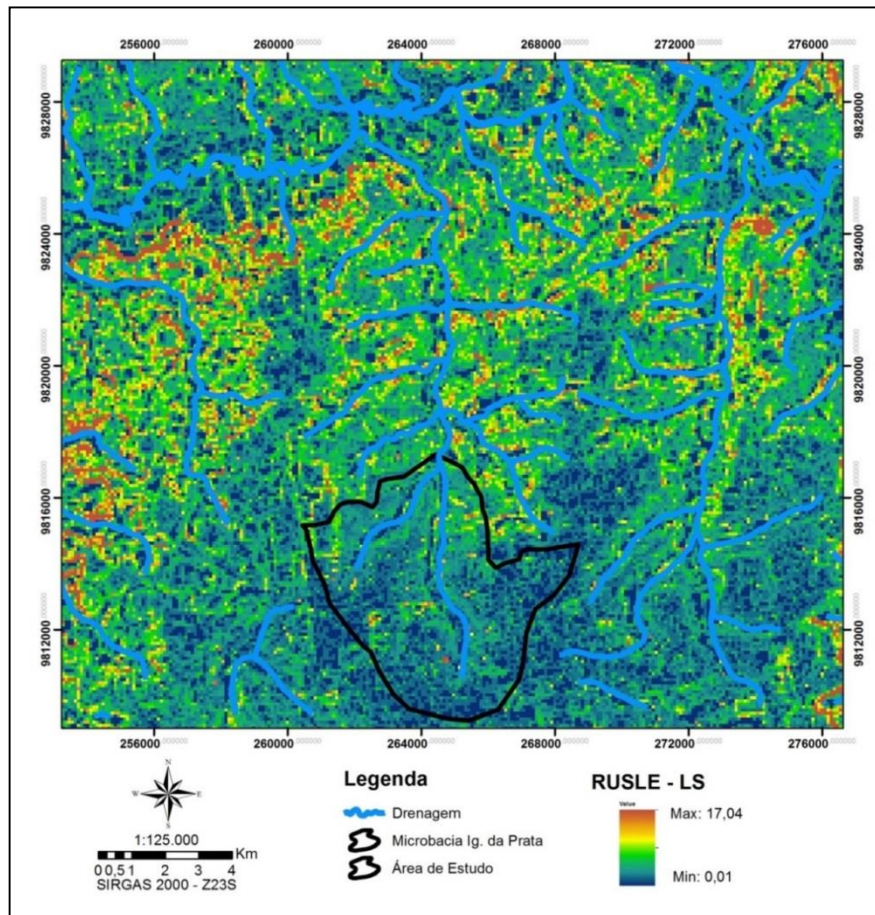
Fonte: Martins (1987).

#### 4.1.3 Fator Conjunto de Comprimento e Grau de Declividade (LS)

O fator LS reflete o efeito da topografia na erosão do solo, onde separadamente L e S representam o efeito do comprimento de declive na erosão e a influência da declividade sobre a erosão do solo.

O fator conjunto de comprimento e grau de declividade, LS, da área de estudo foi calculado por Santos (2013). O autor utilizou um Sistema de Informação Geográfica, com imagens raster, submetido a uma linguagem de programação,  $C^{++}$ , para calcular automaticamente o valor de LS. Com isso, o valor encontrado para a área da bacia do Igarapé da Prata, foi um valor médio de  $LS = 0,38$ , um valor máximo de 2,83 e um mínimo de 0,01, conforme observado na Figura 11.

**Figura 11:** Mapa do fator LS para região.



Fonte: SANTOS, 2013.

#### 4.1.4 Fator de Uso e Manejo do Solo (C)

O fator C foi determinado em função de cada classe representativa do uso e manejo do solo da área de estudo (Figura 05). Nesse caso, foram adotados valores disponíveis na literatura (Tabela 02).

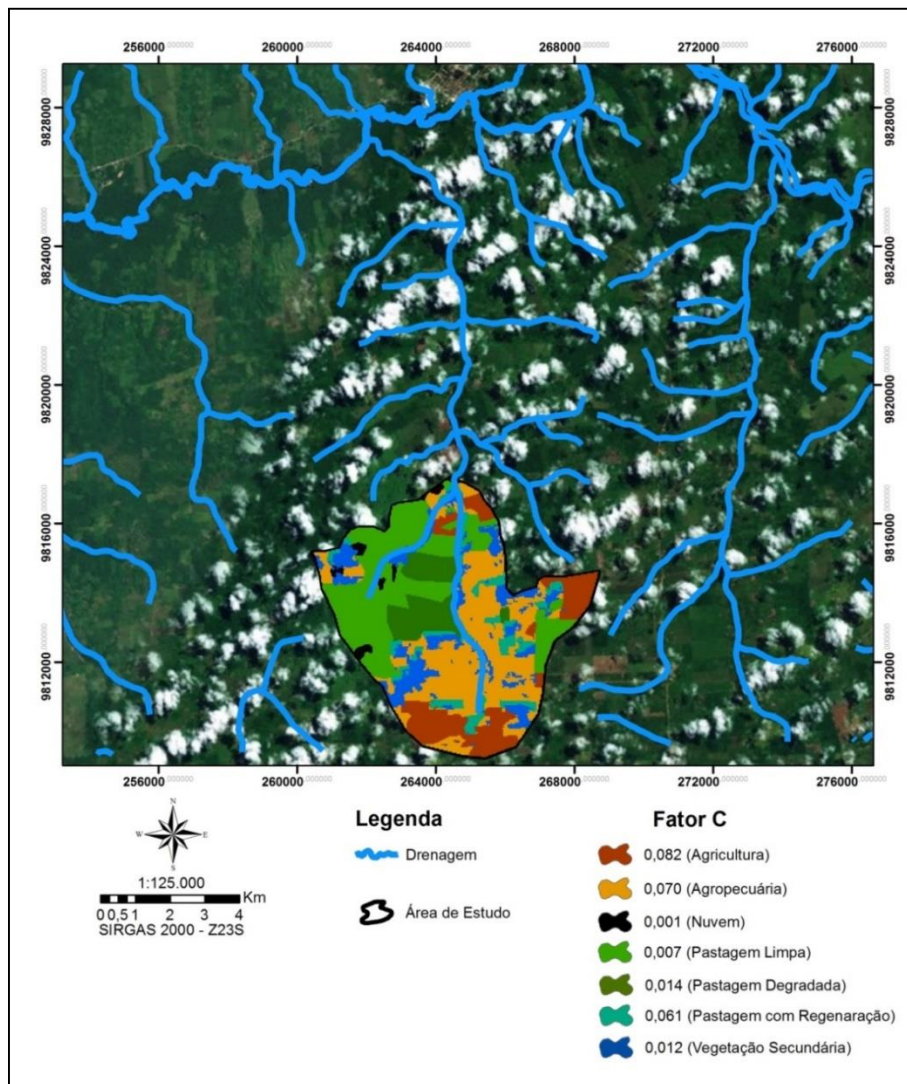
**Tabela 02:** Valores de C para distintas classes de uso da terra

Classe de uso	Fator C	Autor
Agricultura anual	0,082	Fugihara, 2002.
Agropecuária	0,070	Santos, 2013.
Nuvem	0,001	Santos, 2013.
Pasto limpo	0,007	Galdino, 2012.
Pasto degradado	0,014	Galdino, 2012.
Pasto com solo exposto	0,061	Galdino, 2012.
Vegetação secundária	0,012	Silva, 2009.

Fonte: SANTOS (2013).

A Figura 12 apresenta o fator C mapeado para a bacia do Igarapé da Prata (Santos, 2013). O menor valor de C foi de 0,007, pertencente a áreas de pasto limpo para uso da agropecuária, e o maior valor de C foi de 0,082 representando a agricultura de laranja existente no local. Com isso, o valor médio de C, ponderado pelas áreas específicas de uso e manejo do solo, é igual a 0,031.

**Figura 12:** Mapa do fator C (uso e manejo do solo) da Bacia do Igarapé da Prata.



Fonte: SANTOS, 2013.

#### 4.1.5 Fator de Práticas Conservacionistas (P)

O fator de práticas conservacionista representa a relação que existe entre as perdas de solo de um terreno cultivado com determinada prática conservacionista e as perdas de solo quando plantado morro abaixo (WISCHMEIER & SMITH, 1965). Na Tabela 03 estão alguns valores para diferentes práticas conservacionistas para bacias hidrográficas.

**Tabela 03** – Valores de *P* para diferentes práticas conservacionistas

<b>Prática conservacionista</b>	<b>Valor de P</b>
Plantio morro abaixo	1,0
Plantio em contorno	0,5
Alternância de capinas, somado de plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2
Terraço	0,1

Fonte: BERTONI & LOMBARDI NETO (1985).

O fator de práticas conservacionista foi considerado igual a 1, como observado em outros estudos realizados na bacia (GOMIDE, 2012; SANTOS, 2013; CARIELLO *et al.*, 2014), pois a mesma não apresenta nenhuma prática de manejo no uso do solo em sua área.

#### 4.1.6 Taxa de Transporte de Sedimentos

A equação universal de perda de solo, USLE, é um modelo que quantifica apenas a erosão bruta ou erosão total que ocorre no solo. Em virtude disso, os autores do modelo (WISCHMEIER & SMITH, 1965) sugerem a aplicação de uma taxa de transferência (Sediment Delivery Ratio – SDR) a fim de quantifica o solo erodido que chega ao córrego principal da bacia.

Com isso, de posse da quantidade de erosão bruta da bacia, estimada pela USLE, é necessário determinar a taxa de transferência de sedimentos (SDR), que foi estimada através da Equação 09 (Vanoni, 1975). Equação mundialmente conhecida e aplicada para estimar produção de sedimentos.

$$SDR = 0,473 \cdot A^{-0,125} \quad (09)$$

Em que:

*A* – área de drenagem da bacia (Mi<sup>2</sup>);

Vanoni (1975) foi um dos primeiros autores a relacionar a taxa de entrega com as características geomorfológicas de uma bacia hidrográfica. O autor realizou uma pesquisa em regiões semiáridas, concluindo que a concentração de sedimentos nos cursos d'água dessas regiões apresenta comportamento diferenciado quando comparados com eventos de regiões de clima úmido. Nessas regiões, a vegetação promove uma limitação na produção dos sedimentos, enquanto nas regiões mais secas a vegetação não promove uma cobertura



eficiente do solo, permitindo que o sedimento seja transportado pelo escoamento, gerando grandes volumes que chegam aos cursos de água (SANTOS, 2013).

#### 4.3 MODELO DE POESEN

Poesen (1985) desenvolveu o modelo para estimar a erosão com base nas características do solo, declividade e energia cinética da chuva. O modelo de Poesen (Eqs. 10 e 11) foi desenvolvido para solos expostos, sem cobertura vegetativa, sendo necessário incluir o fator  $C$  de cobertura e ocupação do solo, como nos modelos da família USLE (HRISSANTHOU, 2005). Diferentemente da USLE, que necessita da SDR, a Equação 11 determina diretamente o sedimento que chega ao corpo d'água.

$$q_{rs} = C \cdot (KE) \cdot r_s^{-1} \cdot \cos\alpha \quad (10)$$

$$q_s = q_{rs} \cdot [0,301 \cdot \text{sen}(\alpha) + 0,019 \cdot D_{50}^{-0,22} \cdot (1 - e^{2,42 \cdot \text{sen}(\alpha)})] \quad (11)$$

Em que:

$q_{rs}$  – massa de solo desagregado por unidade de área ( $\text{Kg/m}^2$ );

$C$  – fator de uso e cobertura do solo (-);

$KE$  – fator de energia cinética da chuva ( $\text{J/m}^2$ );

$r_s$  – resistência do solo à energia de queda da chuva ( $\text{J/Kg}$ );

$\alpha$  – declividade ( $^\circ$ );

$q_s$  – transporte das partículas sólidas por unidade de comprimento ( $\text{Kg/m}^2$ );

$D_{50}$  – diâmetro médio das partículas (m).

No modelo de Poesen, observar-se que o autor utiliza quase os mesmos fatores empregados pelo modelo USLE (Figura 13), apresentando apenas formas distintas de calculá-los (Figura 14), como por exemplo, o fator de energia cinética da chuva, no qual o autor utilizar um fator  $\beta$  da velocidade de queda da chuva referente a locais de clima distintos. No entanto, o mesmo não utiliza nenhum fator de prática conservacionista em suas simulações, de forma direta. Nesse caso, o fator  $C$  contabiliza as práticas conservacionistas.

Figura 13: Diagrama representativo da USLE.

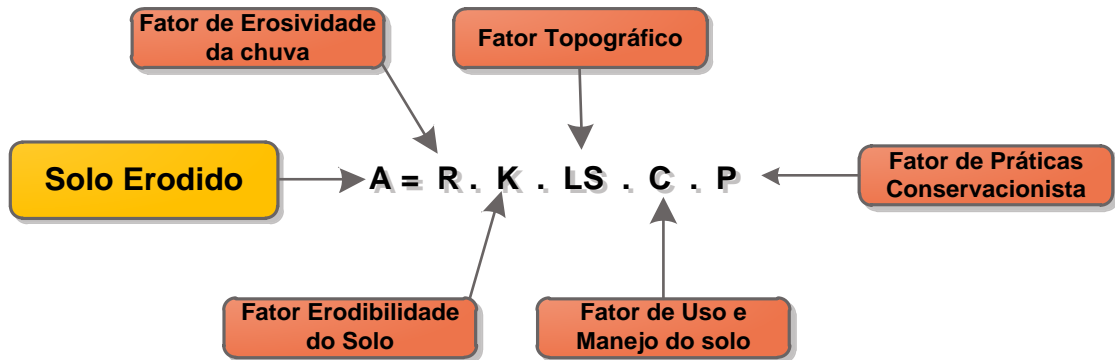
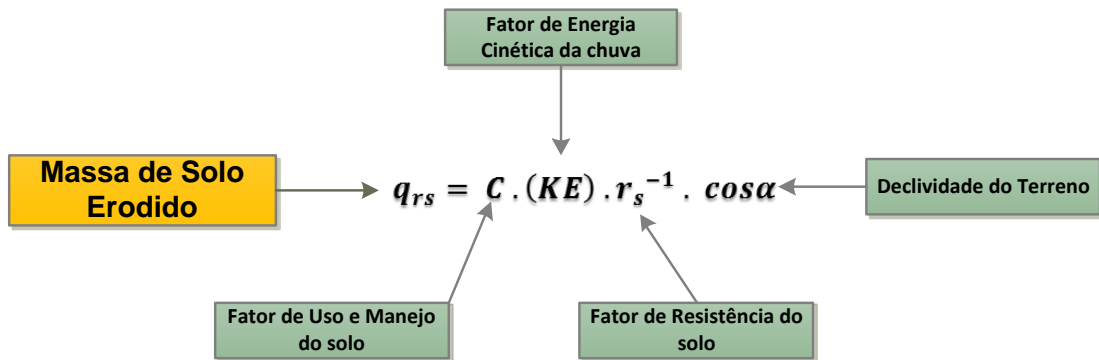


Figura 14: Diagrama representativo do modelo Poesen.



O diâmetro  $D_{50}$  foi considerado igual ao médio das partículas e calculado com auxílio da Equação 05 de Levy (1995), pois a resistência do solo,  $r_s$ , é função desse diâmetro e dada pela equação 12:

$$r_s = 1836,5 + 175,7 \ln D_{50}; \quad \text{para } 0,0001\text{m} < D_{50} < 0,0007\text{m} \quad (12)$$

A melhor maneira de se determinar o produto  $KE$  consiste em calcular a energia da chuva para cada evento. Para tanto, duração e intensidade da chuva devem ser conhecidas. Entretanto, se não existem dados de duração e intensidade das chuvas,  $KE$  pode ser calculado por um método simplificado (Eq. 13).

O fator de energia cinética da chuva,  $KE$ , é dado pela equação 13:

$$KE = \beta . N \quad (13)$$

Em que:

$\beta$  – fator proporcional ao quadrado da velocidade de queda das gotas de chuva ( $\text{J}/\text{m}^2.\text{mm}$ )

$N$  – precipitação anual ( $\text{mm}/\text{ano}$ ).

O fator  $\beta$  é um coeficiente proporcional ao quadrado da velocidade da chuva e varia de acordo com o clima de cada região. Existem alguns valores adotados para o coeficiente  $\beta$  disponíveis na literatura (Tabela 04).

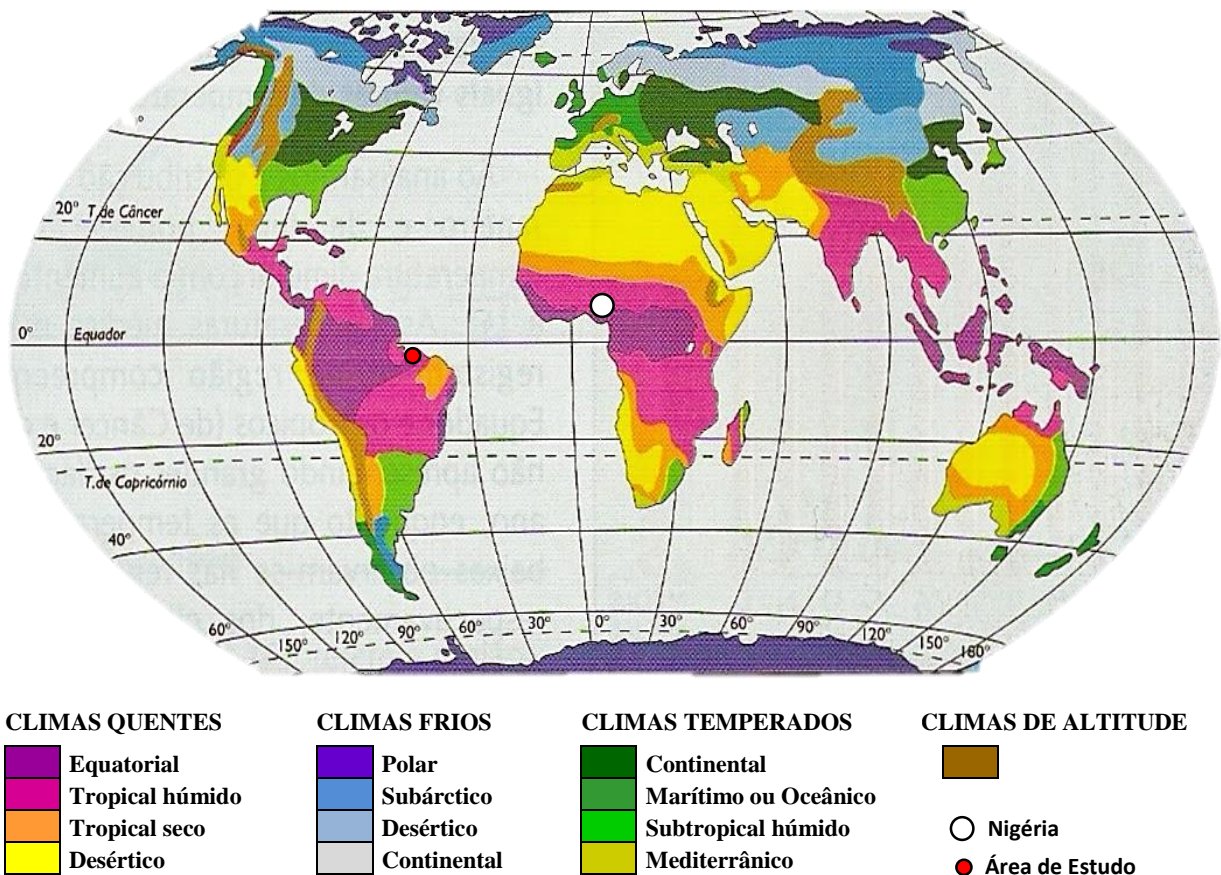
**Tabela 04:** Valores do fator  $\beta$ .

$\beta$ (J/m <sup>2</sup> .mm)	LOCAL	AUTOR
16,5	Marrocos	HEUSCH (1970)
33,0	Nigéria	KOWAL e KASSAM (1977)
25,8	Indonésia	VAND DER LINDEN (1978)
17,4 – 18,5	Zimbabwe	STOCKING (1981)
12,5	Bélgica	POESEN (1983)

Fonte: POESEN (1983).

Para a bacia do igarapé da Prata, como era de se esperar, não há estudos que determinem o valor de  $\beta$ . Assim, analisando-se a Figura 15, observa-se que o clima da região de estudo citado anteriormente, assemelha-se ao clima da Nigéria.

**Figura 15:** classificação climática segundo Köppen-Geiger.

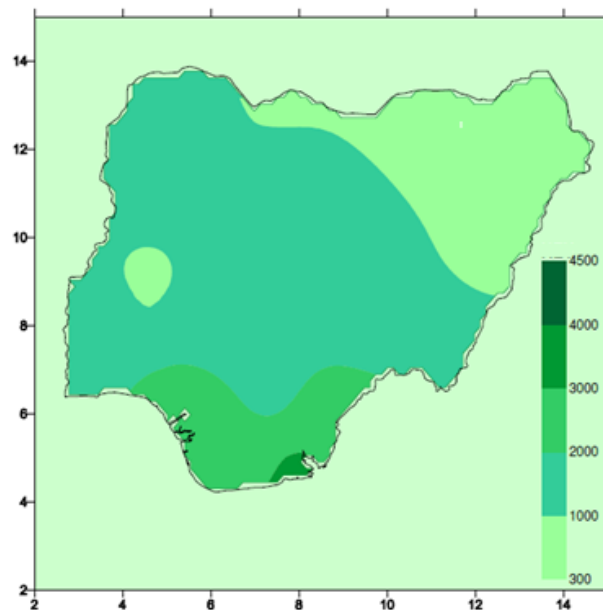


Fonte: Adaptado de Rubel e Kottek (2010).

De fato, o clima na Nigéria é caracterizado por duas estações predominantes, uma estação seca e outra chuvosa. A estação seca é acompanhada por ventos carregados de poeira do deserto do Saara, ocasionada pela massa de ar tropical, enquanto a estação chuvosa é fortemente influenciada pelo clima tropical úmido, devido à massa ar que vem do Oceano Atlântico. Logo, o país apresenta um clima tropical ao norte e equatorial ao sul conforme a classificação de Köppen. A região sul da Nigéria está próxima a linha do Equador, assim como a região do presente estudo, apresentam temperaturas mínima, média e máxima igual a 20°C, 25,5°C e 33°C, respectivamente (NIMETNG, 2010), semelhantes às da região da bacia do igarapé da Prata.

A precipitação média anual de 2010 foi igual a 3.500 mm na região Sul, nas partes noroeste e nordeste, a precipitação é inferior a 600 mm (Figura 16). A variação anual das chuvas é grande, especialmente na parte norte do país. Com isso, diante do exposto, referente às características climática da Nigéria, e em virtude das semelhanças climáticas com a região de estudo, adotou-se o coeficiente  $\beta$  proposto do Kawal e Kassam (1977), de 33,0 (J/m<sup>2</sup>.mm).

**Figura 16:** Precipitação anual acumulada de 2010.



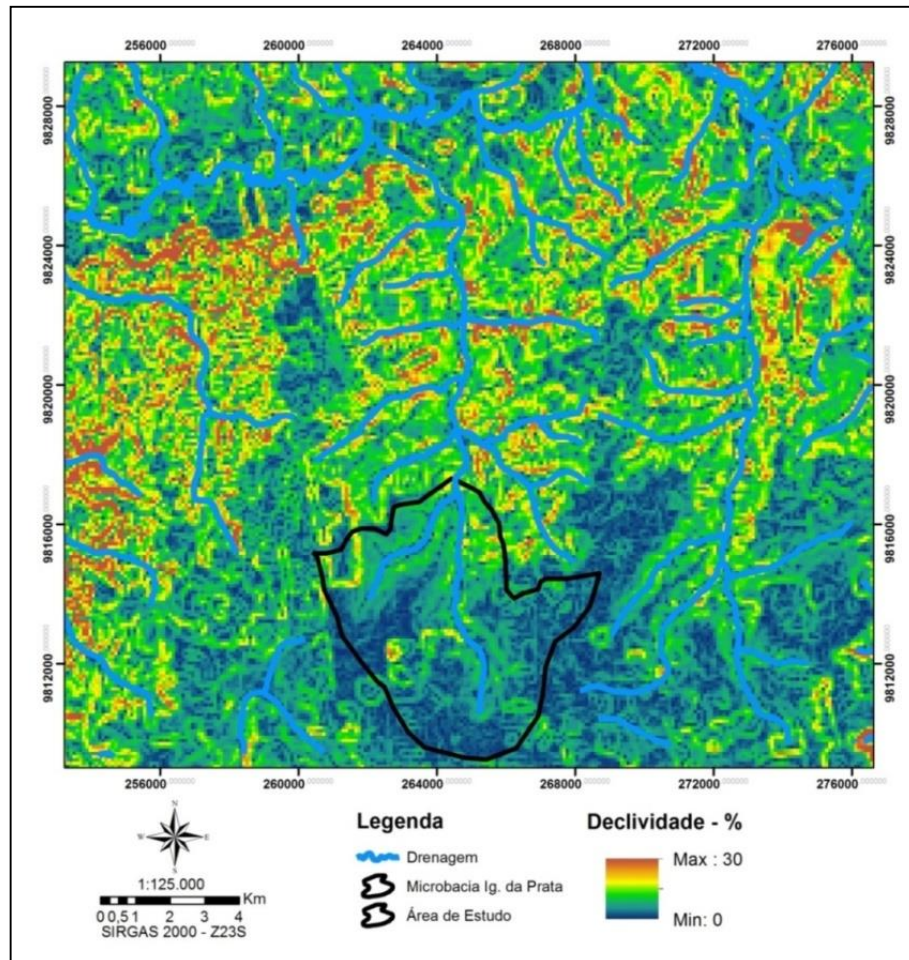
Fonte: NIMETNG (2010).

#### 4.3.2 Declividade

De acordo com o Modelo Digital de Elevação (Figura 07) e do mapa de declividade (Fig. 17), a região é em grande parte de baixa altitude com valor médio de 53 m, apresentando relevo plano com declividade em torno de 3,5%, que é equivalente a 2°. A área de estudo, por

ser o trecho superior da pequena bacia, apresentam cotas de 54 m a 102 m, porém com declividade inferior com média de 1,7% e não ultrapassando 8,5% nas áreas mais íngremes. A declividade média foi usada nas Equações 10 e 11.

**Figura 17:** Mapa de declividade da região.



**Fonte:** Santos (2013).

#### 4.4 MODELO LANGBEIN-SCHUMM

O modelo de Langbein-Schumm (1958) quantifica a produção de sedimentos a partir de dados de precipitações efetivas anuais em relação à ausência e presença de vegetação (Eq. 14). O fator  $10P^{2,3}$  descreve a ação erosiva da precipitação na ausência de vegetação. Já o fator  $[1/(1+0,0007P^{3,33})]$  representa a ação protetora da vegetação sobre o solo contra a ação erosiva da chuva. O fator,  $10P^{2,3}$ , aumenta com a intensidade da precipitação, P, enquanto que o fator  $[1/(1+0,0007P^{3,33})]$  diminui com o aumento da precipitação.

$$q_s = 10P^{2,3} \cdot \frac{1}{1 + 0,0007P^{3,33}} \quad (14)$$

Em que:

$q_s$  – produção de sedimentos anual (t/milhas<sup>2</sup>);

$P$  – precipitação efetiva anual (Pol);

O modelo também não necessita da SDR, pois a Equação 14 determina diretamente o sedimento que chega ao corpo d'água.

#### 4.4.1 Precipitação efetiva

Para determinar a precipitação efetiva da bacia de estudo, foi utilizado o método proposto pelo *Soil Conservation Service* (SCS, 1975), atual National Resources Conservation Service (NRCS). É um modelo que calcula hidrogramas de cheias e chuva excedente a partir de dados de entrada de precipitação, características do solo e uso da terra. Dessa forma, a precipitação efetiva pode ser calculada pela Equação 15.

$$P_{efetiva} = \frac{(P - 0,2.S)^2}{P + 0,8.S} \quad P > 0,2.S \quad (15)$$

Em que:

$P$  - precipitação total (mm);

$S$  - indica o potencial de infiltração ou a retenção potencial máxima do solo.

A condição estabelecida pela Equação 15 de  $P > 0,2.S$ , é devido ao potencial máximo de retenção da bacia, como, por exemplo, interceptação, evaporação, infiltração e o armazenamento superficial, pois nem toda precipitação total produzirá escoamento superficial. Caso contrário,  $P < 0,2.S$ , não gerará escoamento superficial.

Para se determinar o valor de  $S$ , foi utilizada a Equação 16, que relaciona o parâmetro  $S$  com um fator  $CN$ , que é um fator referente ao uso e manejo do solo.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (16)$$

O método indicado pelo SCS divide os tipos de solo em quatro grupos hidrológicos (TUCCI, 1993):

**Grupo A** – com um baixo potencial de escoamento superficial e elevadas taxas de infiltração, são os solos arenosos profundos com pouco silte e argila;

**Grupo B** – engloba a maioria dos solos arenosos, menos profundos ou menos compactos que o grupo A. Também são menos permeáveis que o grupo anterior e com permeabilidade superior à média;

**Grupo C** – solos com potencial de escoamento superficial acima da média e com infiltração inferior à média, com porcentagem considerável de argila;

**Grupo D** – solos essencialmente argilosos, pouco profundos, com infiltração muito baixa, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Através da Tabela 05, é possível determinar a condição média de umidade antecedente para os eventos. Para o solo da bacia do Igarapé da Prata, o grupo hidrológico que ele se enquadra será o grupo B (determinado por Cariello *et al.*, 2014).

**Tabela 05:** Valores do parâmetro CN para bacias rurais.

Uso do Solo ou Cobertura	Superfície	Grupo Hidrológico do Solo			
		A	B	C	D
Solo Lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações Regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceados em nível	64	76	84	88
Plantações de Cereais	Em fileiras retas	64	76	84	88
	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceados em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de Legumes Cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceados em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas em curvas de nível	6	35	70	79
Campos Permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas de baixa transpiração	45	66	77	83
Chácaras e Estradas de Terras	Boas	36	60	73	79
	Esparsas de alta transpiração	25	55	70	77
	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	86	89
Florestas	De superfície dura	74	84	90	92
	Muito esparsas c/ baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

**Fonte:** TUCCI (1993).



Segundo Tucci (1993), são estabelecidas ainda três condições de umidade antecedente da bacia que são:

**Condição I** – situação na qual os solos da bacia estão secos, porém não até o ponto de murchamento das plantas, é quando se ara ou se cultiva bem o solo;

**Condição II** – situação média das condições dos solos das bacias que precederam a ocorrência da cheia máxima anual em numerosas bacias;

**Condição III** – ocorre quando o solo está quase saturado, devido a precipitações intensas nos cinco dias anteriores ao temporal.

Com isso, o valor da Curva Número (CN) característico do tipo de solo, foi encontrado baseando-se na análise de classificação dos grupos hidrológico da tabela 05 e pela condição de umidade do solo. Apoiado neste método e em uma calibração feita para o solo da bacia do Igarapé da Prata, o qual foi enquadrado no grupo hidrológico B, Cariello *et al.* (2014) determinaram CN sendo igual a 54,74 para condição II de umidade do solo.

#### **4.4.2 Dados de Chuva e Sedimentos em Suspensão da Pequena Bacia**

Para determinar as precipitações efetivas e de sedimentos em suspensão, foram utilizados dados da estação instalada no exútorio da bacia (Figura 18). Essa estação está instalada às proximidades da estação fluviométrica Marambaia (Figura 04), a qual realiza a medição da altura do nível da água do curso fluvial, sob a responsabilidade da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

**Figura 18:** Estação Hidrossedimentológica.

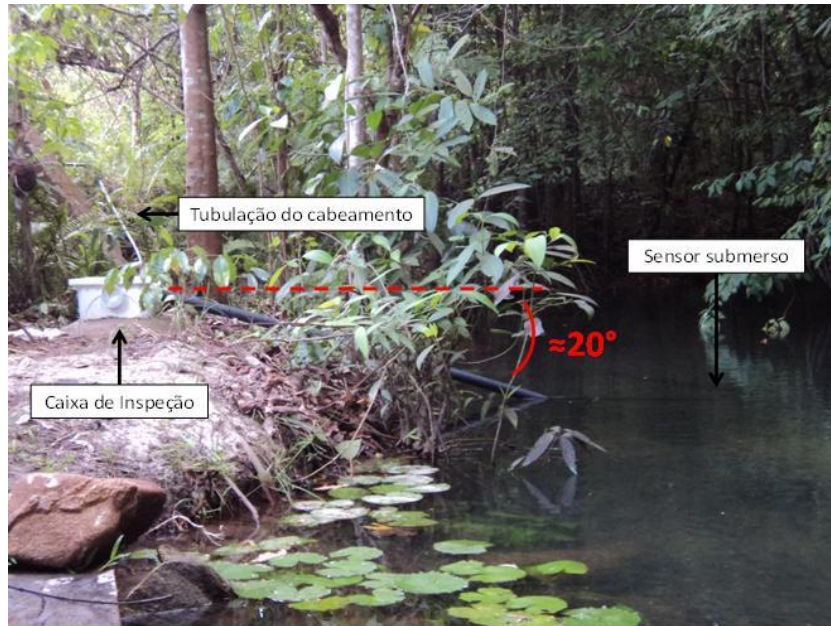


**Fonte:** GOMIDE (2012).

A instalação da estação foi realizada em dezembro de 2011 sendo composta de um sensor de precipitação (SL 2000-P); um sensor de turbidez e sedimentos (SL 2000-TS), calibrado com dados de solo da bacia; um data logger, que armazena os dados medidos pelos sensores; e um painel solar, cuja função é fornecer energia à estação (GOMIDE, 2012).

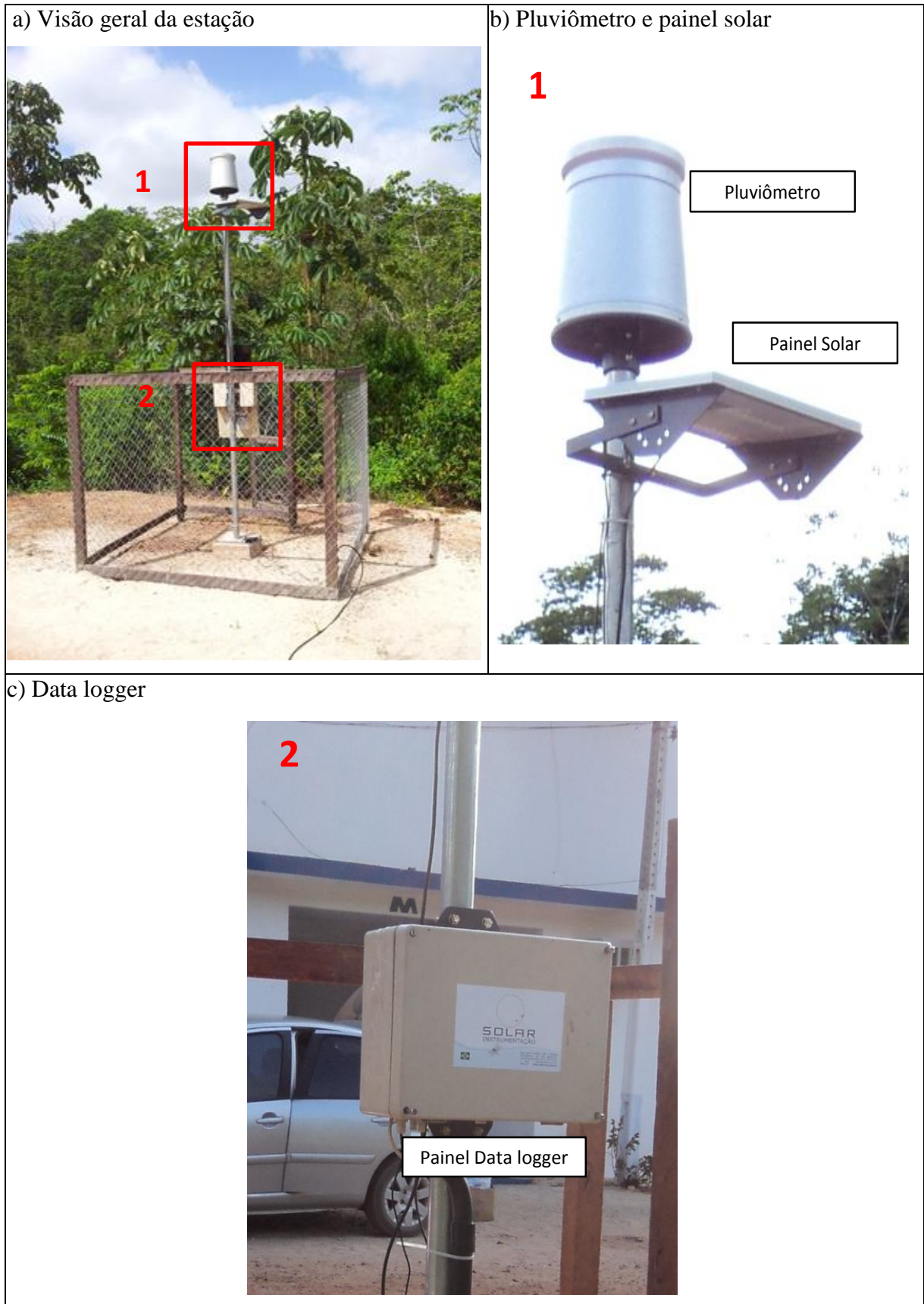
O sensor de medida de sedimentos foi instalado a certa distância da margem e a cerca de 40 centímetros do fundo do canal, para que haja maior representatividade das características do escoamento líquido e sólido neste ponto (Figura 19). O aparelho fica na extremidade de uma tubulação preta (com angulação de aproximadamente 20°), a qual é presa por dois vergalhões adaptados, com o intuito de conservar a tubulação contra choques físicos e também evitar que a mesma fique balançando com a correnteza do igarapé (GOMIDE, 2012). Os dados medidos são enviados para o data logger, localizado a cerca de 30 metros do sensor de sedimentos.

**Figura 19:** Local de medição no Igarapé da Prata.



**Fonte:** GOMIDE (2012).

O sensor de precipitação permite que o usuário escolha o intervalo de medição, possuindo uma resolução de 0,2 mm e intensidade máxima de 3 mm/min. Acoplado ao pluviômetro, existe um data logger, que é um equipamento destinado a executar a aquisição e a gravação de dados durante um período de tempo (Figura 20). O descarregamento dos dados armazenados pode ser efetuado através da conexão de um microcomputador à estação ou através de sistema de transmissão GPRS, que envia os dados para o usuário via IP Fixo (GOMIDE, 2012).

**Figura 20:** Estrutura da Estação.

Fonte: GOMIDE (2012).

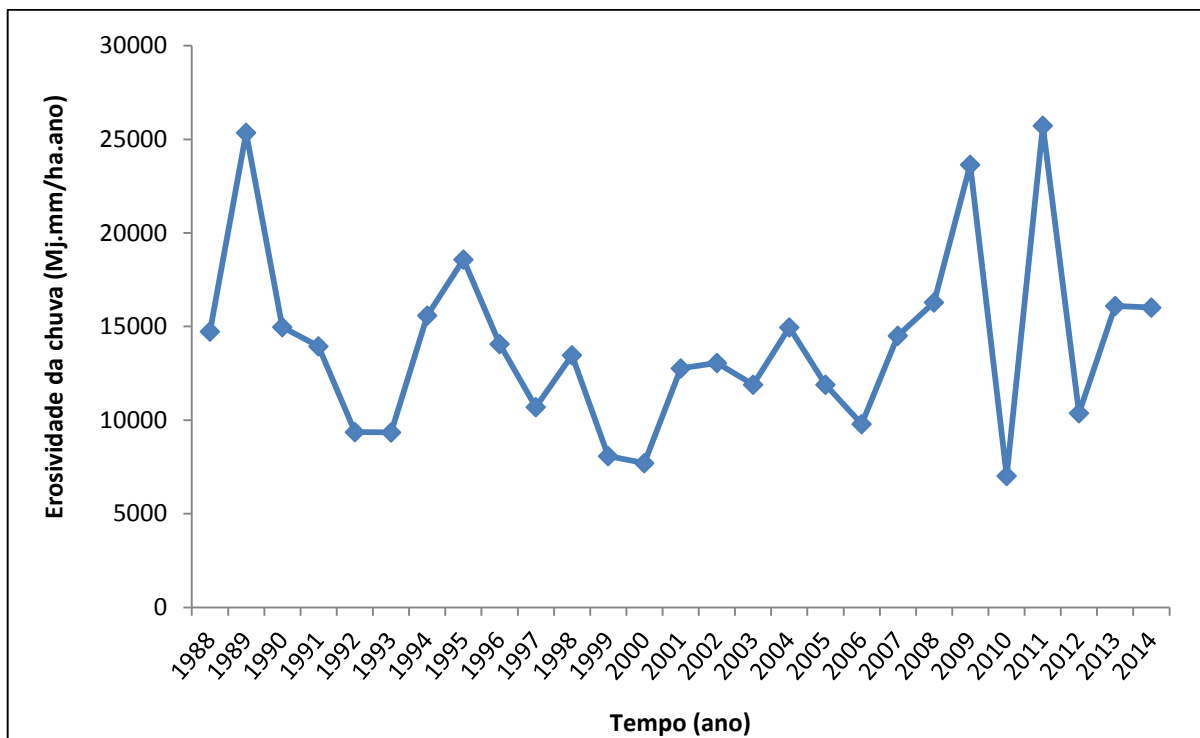
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a previsão de produção de sedimentos, via os três modelos, utilizaram-se dados de precipitação da estação pluviométrica de Ourém com uma série histórica de 27 anos de dados de chuva (1988-2014). Já para a análise comparativa dos modelos com a produção de sedimentos em suspensão observada foram utilizados dados da estação localizada no exutório da bacia de estudo, com dados de 2012 e 2013.

### 5.1 PARÂMETROS DO MODELO USLE

O fator de erosividade da chuva (R) foi estimado através da Equação 05 (Morais *et al.* 1991), a partir de dados de precipitações, médias anuais e médias mensais, da estação de Ourém. Os resultados obtidos para o fator R estão representados na Figura 21.

**Figura 21:** Fator R calculado via equação de Morais *et al.* (1991) para a série de Ourém.



**Fonte:** Autora, 2015.

O fator de erodibilidade do solo  $K$  foi estimado através das Equações 04 e 05 com auxílio da Tabela 01 e da Tabela 06, que também apresenta o valor do fator  $K$ .

**Tabela 06:** Fator de erodibilidade do solo para a bacia do Igarapé da Prata.

VARIÁVEL	Valor obtido
M	3,87
Permeabilidade do solo, p	2 (moderada e rápida)
Diâmetro médio ponderado das partículas, DMP (mm)	0,56
R	1
<b>K (t.h/MJ.mm)</b>	<b>0,026</b>

Fonte: Gomide (2012)

O solo da bacia do Igarapé da Prata é classificado como de baixa a moderada erodibilidade (0,01 – 0,03 t.h/Mj.mm) (Gomide 2012).

No caso do fator *C*, de uso e manejo do solo, foi considerado seu valor médio, que é igual a 0,031 (Santos 2013). Para o fator de práticas conservacionista *P*, foi adotado seu valor máximo ( $P = 1$ ). O fator conjunto de comprimento e grau de declividade, *LS*, foi obtido através do trabalho de Santos (2013), sendo seu valor igual a 0,38. A Tabela 07 apresenta os parâmetros utilizados na simulação com a USLE, exceto o fator *R*, que foi avaliado anualmente (Figura 20).

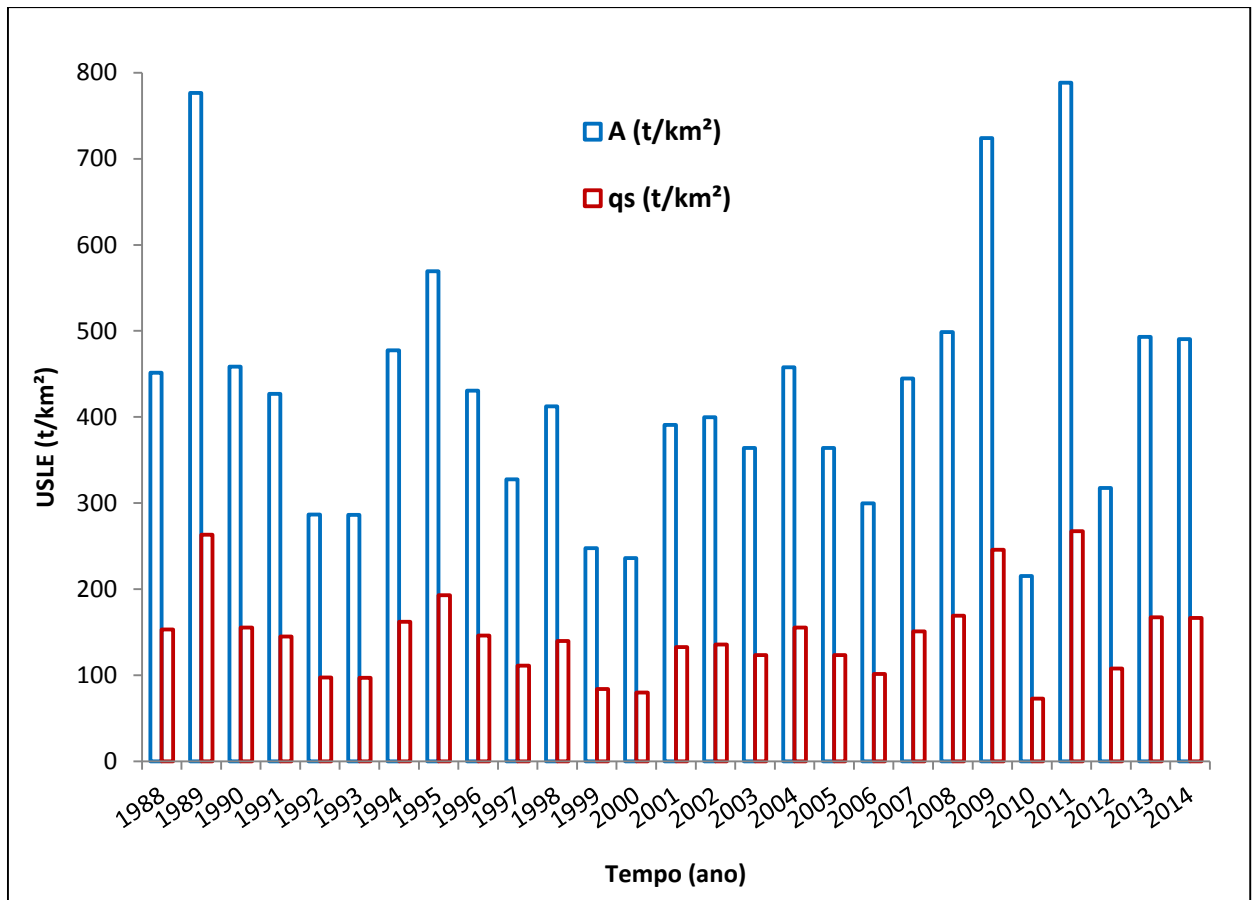
**Tabela 07:** Fatores da USLE.

FATOR	VALOR
Erodibilidade do solo (K) (t.h/Mj.mm)	<b>0,026</b>
Conjunto de Comprimento e grau de declividade (LS)	<b>0,380</b>
Uso e manejo do solo (C)	<b>0,310</b>
Práticas conservacionistas (P)	<b>1,000</b>

Fonte: Autora, 2015.

O modelo USLE simula apenas a perda de solo, contabilizando, o que foi erodido e não o que foi transportado até o corpo hídrico. Para determinação do que chega ao corpo hídrico, é necessário associar a taxa de transferência (Sediment Delivery Ratio –SDR), que traduz a diminuição da produção bruta. A SDR é uma taxa adimensional que pode ser expressa pela equação 07, proposta por Vanoni (1975). No qual o valor de  $f$  na equação foi de 0,339, que é multiplicado pela erosão bruta ( $A$ ), para obter a produção de sedimento  $q_s$  (Figura 22). Ou seja,  $q_s$  é igual a 34% de  $A$ , sendo esse o percentual de sedimentos que, teoricamente chega ao igarapé da Prata, o qual pode sedimentar no igarapé ou ser transportado até o Rio Guamá, dependendo da hidrodinâmica fluvial.

**Figura 22:** Erosão bruta e produção de sedimentos.



**Fonte:** Autora, 2015.

## 5.2 PARÂMETROS DO MODELO DE POESEN

A previsão de produção de sedimentos via modelo de Poesen foi calculada utilizando alguns parâmetros, que também são empregados na USLE como o fator de uso e cobertura do solo  $C$  e o diâmetro médio das partículas ( $D_{50}$ ) em metros.

A declividade média do terreno ( $\alpha$ ) foi determinada através dos dados do trabalho de Santos (2013), sendo a região em grande parte de baixa altitude (Figura 15). Sendo o valor de  $\alpha$  determinado igual a 1,7% ( $\cong 1^\circ$ ). A Tabela 08 apresenta os fatores do modelo de Poesen.

**Tabela 08:** Fatores do modelo de Poesen.

<b>Fator</b>	<b>Valor</b>
Velocidade específica de queda das gotas de chuva, $\beta$ (J/m <sup>2</sup> .mm)	<b>33,0000</b>
Uso e cobertura do solo, C (-)	<b>0,03100</b>
Declividade, $\alpha$ (°)	<b>1,00000</b>
Diâmetro médio ponderado das partículas, D <sub>50</sub> (m)	<b>0,00056</b>
Resistência do solo à energia de queda da chuva, $r_s$ (J/Kg)	<b>520,830</b>

**Fonte:** Autora, 2015.

### 5.3 PARÂMETROS DO MODELO LANGBEIN-SCHUMM

A estimativa da produção de sedimentos via o modelo de Langbein-Schumm, foi realizada a partir dos dados de eventos de chuva (com medição em intervalos de 30 min) da estação instalada no exutório da bacia, para isso, a precipitação efetiva para esses eventos foram calculados através da Equação 15, que estabelece uma condição de retenção de precipitação, na qual só há escoamento superficial se  $P > 0,2.S$ . As precipitações utilizadas foi referentes aos anos de 2012 e 2013.

As precipitações efetivas encontradas dessa estação foram divididas pela precipitação total anual, da mesma estação, obtendo-se um valor percentual de 5,38%. No qual, esse valor foi multiplicado ao valor total precipitado de cada ano para os dados de precipitação da estação de Ourém. Na Tabela 09 estão as precipitações anuais e efetivas anuais da bacia.

O objetivo de ter feito isso é de obter uma série maior de chuva, pois a estação do exutório da bacia apresenta apenas dois anos de registros de chuvas e sedimentos.



**Tabela 09:** Precipitação anual e efetiva da bacia.

	<b>Precipitação Anual (mm)</b>	<b>Precipitação Efetiva Anual (mm)</b>
<b>1988</b>	2278,9	122,71
<b>1989</b>	2988,93	160,95
<b>1990</b>	2365,9	127,4
<b>1991</b>	2034	109,53
<b>1992</b>	1824,9	98,27
<b>1993</b>	1931,9	104,03
<b>1994</b>	2054,8	110,65
<b>1995</b>	2648,6	142,62
<b>1996</b>	2247	121
<b>1997</b>	1668,4	89,84
<b>1998</b>	2088,9	112,48
<b>1999</b>	1813,5	97,65
<b>2000</b>	1769,7	95,29
<b>2001</b>	1967,1	105,92
<b>2002</b>	2154	115,99
<b>2003</b>	1797,9	96,81
<b>2004</b>	2219,9	119,54
<b>2005</b>	1812,8	97,62
<b>2006</b>	1891	101,83
<b>2007</b>	2172,4	116,98
<b>2008</b>	2400,89	129,28
<b>2009</b>	2678,1	144,21
<b>2010</b>	1738	93,59
<b>2011</b>	2715,9	146,25
<b>2012</b>	1965,2	105,82
<b>2013</b>	2275,6	122,54
<b>2014</b>	2323,89	125,14
<b>Média</b>	<b>2141,78</b>	<b>115,33</b>
<b>Amplitude</b>	<b>1320,53</b>	<b>71,11</b>
<b>Desvio Padrão</b>		<b>1049,66</b>

**Fonte:** Autora, 2015.

#### 5.4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MODELOS

Analisando os resultados obtidos pelos três modelos (Tabela 10), observa-se que a produção de sedimento via USLE foi a mais elevada, média de 146,20 (t/km<sup>2</sup>). Resultado semelhante ao que foi encontrado por Guevara-Perez e Márquez (2007), que analisaram a bacia do Rio Caroni, na Venezuela. Entretanto, a produção de sedimento via USLE foi mais elevada devido à bacia de Capitão Poço ter uma área de drenagem (32,7 km<sup>2</sup>) inferior ao da bacia do Rio Caroni (92.169,08 Km<sup>2</sup>).

**Tabela 10:** Produção de sedimentos observados e estimados pelos modelos USLE, Poesen e Langbein-Schumm.

	<b>Sedimentos Obs. (t/Km<sup>2</sup>)</b>	<b>USLE qs (t/Km<sup>2</sup>)</b>	<b>POESEN qs (t/km<sup>2</sup>)</b>	<b>LANGBEIN-SCHUMM qs (t/Km<sup>2</sup>)</b>
<b>1988</b>		153,14	8,06	127,80
<b>1989</b>		263,45	10,56	203,42
<b>1990</b>		155,52	8,36	137,16
<b>1991</b>		144,86	7,19	102,18
<b>1992</b>		97,28	6,45	81,68
<b>1993</b>		97,11	6,83	91,97
<b>1994</b>		161,98	7,26	104,30
<b>1995</b>		193,13	9,36	167,79
<b>1996</b>		146,06	7,94	124,39
<b>1997</b>		111,17	5,90	67,50
<b>1998</b>		139,90	7,38	107,80
<b>1999</b>		83,99	6,41	80,61
<b>2000</b>		80,08	6,26	76,56
<b>2001</b>		132,63	6,95	95,45
<b>2002</b>		135,61	7,61	114,56
<b>2003</b>		123,55	6,35	79,16
<b>2004</b>		155,30	7,85	121,51
<b>2005</b>		123,51	6,41	80,55
<b>2006</b>		101,65	6,68	87,99
<b>2007</b>		150,82	7,68	116,50
<b>2008</b>		169,17	8,49	140,95
<b>2009</b>		245,64	9,47	170,96
<b>2010</b>		72,99	6,14	73,67
<b>2011</b>		267,39	9,60	175,01
<b>2012</b>	107,5	107,73	6,95	95,26
<b>2013</b>	93,48	167,33	8,15	127,45
<b>2014</b>		166,44	8,21	132,63
<b>Média</b>		<b>146,20</b>	<b>7,57</b>	<b>114,25</b>
<b>Amplitude</b>		<b>194,40</b>	<b>4,67</b>	<b>135,92</b>
<b>Desvio Padrão</b>			<b>69,21699276</b>	

**Fonte:** Autora, 2015.

Segundo Ouyang e Bartholic (1997) bacias com grandes áreas de drenagem e comprimento de rampa muito longo, têm uma relação de baixa remoção de sedimentos. Isso ocorre, pois bacias muito extensas oferecem maior chance de apresentar barreiras, por exemplo, depressões, que impedem as partículas erodidas de chegarem ao corpo hídrico.

Além disso, os resultados para os três modelos apresentaram a mesma ordem de grandeza do trabalho realizado por Guevara-Perez e Márquez (2007) para a produção de sedimentos. Nos quais, o modelo de Poesen apresenta os menores valores de produção de

sedimento (tendo uma média de 7,57 t/Km<sup>2</sup>). Um dos motivos disso ter ocorrido pode ser explicado, segundo Geuvara-Perez e Marquez (2007), pelo fato de que o método desenvolvido por Poesen considera apenas o transporte de partículas destacadas pelo impacto da gota da chuva, desprezando as partículas que foram transportadas pelo escoamento superficial. Outro fato de grande relevância no desempenho do modelo, está no fator energético da chuva, já que no estudo foi utilizado o coeficiente proposto por Kowal e Kassam (1977) para a Nigéria.

O modelo de Langbein-Schumm teve uma média de produção de sedimentos igual a 114,25 (t/Km<sup>2</sup>) o equivalente a 296 (t/milhas<sup>2</sup>) para uma média de precipitação efetiva de 115,33 mm ( $\cong$  5 polegadas).

Os resultados obtidos anteriormente para a simulação dos modelos foram realizados com os dados da estação de Ourém, distante 15 km da área de estudo. No entanto, a estação pluviométrica e hidrossedimentológica localizada no exutório da bacia do Igarapé da Prata tem pouco tempo de operação, com apenas dois anos de dados (2012 e 2013) de chuva e sedimentos. No ano de 2014, a estação passou a maior parte do tempo em manutenção, devido, a um problema na placa solar, que teve ser enviada a seu fabricante no sul do país. Mesmo assim, foi realizada análise comparativa com os resultados obtidos pela estação para simulação de produção de sedimentos via os três modelos, como pode ser observado na Tabela 11.

**Tabela 11:** Produção de sedimentos observada e estimada pelos modelos.

<b>Estação Bacia Capitão Poço</b>					
	<b>P anual (mm)</b>	<b>Sedimentos obs. (t/Km<sup>2</sup>)</b>	<b>USLE qs (t/km<sup>2</sup>)</b>	<b>LANGBEIN-SCHUMM qs (t/Km<sup>2</sup>)</b>	<b>POESEN qs (t/km<sup>2</sup>)</b>
2012	2135,65	107,5	194,47	142,46	7,55
2013	2119,88	93,48	191,85	85,43	7,49
<b>Média</b>	<b>2127,57</b>	<b>100,49</b>	<b>193,15</b>	<b>113,95</b>	<b>7,52</b>

**Fonte:** Autora, 2015.

Os resultados obtidos com os dados da estação da bacia de Capitão Poço mostram que o modelo de Langbein-Schumm apresentou melhor desempenho, comparando seu valor aos dados de produção de sedimentos observados e ao valor obtido pelo modelo USLE. No entanto, o valor obtido pela USLE ainda permanece maior, isso pode ser justificado pela densidade de vegetação, que no caso da bacia de estudo, pode ser percebida pela mata ciliar razoavelmente preservada, como foi observado na Figura 07. Logo, a produção de sedimentos gerado pela chuva e transportado pelo escoamento superficial tende a diminuir, como tenta prever o modelo de Langbein-Schumm.

## 6 CONCLUSÃO

A relevância do estudo está em comparar os modelos Poesen e Langbein-Schumm ao modelo clássico de predição de erosão hídrica, USLE, e analisar a aplicabilidade deles na região. Para isso, a aplicação de uma taxa de transporte de sedimentos ao modelo USLE foi determinante para que houvesse um melhor desempenho na análise comparativa entre os três modelos.

A produção de sedimentos via modelo Langbein-Schumm, teve um valor médio de 114,25 (t/Km<sup>2</sup>) com precipitação efetiva média de 115 (mm), abaixo do que previsto pelo modelo para uma área que corresponde a pastagem (Figura 03). No entanto, esse resultado é o que mais se aproxima dos resultados obtidos pelo modelo USLE.

O modelo Poesen, entre os modelos analisados, apresenta valores menores de produção de sedimentos, com uma média de 7,57 (t/Km<sup>2</sup>).

O modelo USLE estimou uma produção de sedimentos média de 146,2 (t/Km<sup>2</sup>). Entre os modelos analisados, a USLE, foi o que teve seus valores mais elevados. Um dos motivos disso ter ocorrido pode ser explicado através da taxa de transporte de sedimentos, pois a equação aplicada na bacia foi a proposta por Vanoni, e desenvolvida a partir de estudos realizados em bacias de regiões semiáridas.

Os resultados de análise comparativa entre os dados das estação de Ourém e a estação localizada no exutório da bacia (com dois anos de medição de chuva e sedimentos) mostraram uma boa correlação entre as duas estações para os três modelos utilizados. Observou-se também que o modelo de Langbein-Schumm foi o que obteve melhor desempenho, comparável aos valores obtidos com a USLE, e com os dados observados de produção de sedimentos.

Para trabalhos futuros, sugere-se calcular o coeficiente  $\beta$  de energia cinética da chuva para nossa região, e calibrar os parâmetros empíricos da equação de Vanoni relacionados às características físicas e hidrológicas da bacia para a região.

## REFERÊNCIAS

- AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. **A Review of Hillslope and Watershed Scale Erosion and Sediment Transport Models**. CATANA, vol. 64, p. 247-271, 2005.
- AUERSWALD, K.; FIENER, P.; MARTIN, W.; ELHAUS, D. **Use and Misuse of the K Factor Equation in Soil Erosion Modeling: An Alternative Equation for Determining USLE Nomograph Soil Erodibility Values**. CATENA, vol. 118, p. 220-225, 2014.
- BAPTISTA, G. M. M. **Diagnóstico Ambiental de Erosão Laminar: modelo geotecnológico e aplicação**. Brasília: Universa, p. 140, 2003.
- BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L. F. **Answers User's Manual**. Chicago. United States Environmental Protection Agency. Region V., p. 51, 1981.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. Piracicaba: Livro CERES, p.392, 1985.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. São Paulo: Ícone, Ed.7, p. 355, 2010.
- BLANCO, C. J. C.; SECRETAN, Y.; FAVRE, A. **Análise, Aplicação e Transposição de um Modelo Chuva-Vazão para Simulação de Curvas de Permanência de Pequenas Bacias da Amazônia**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 12, p.205-216, 2007.
- BRYAN, R. B. **Soil Erodibility and Processes of Water Erosion on Hillslope**. Geomorphology, vol. 32, p. 385-415, 2000.
- CARIELLO, B. L.; BLANCO, C. J. C.; GOMIDE, I. S.; BARBOSA, A. J. S.; SANTOS, D. B. O. **Analysis of the Modified Universal Soil Loss Equation to estimate the sediment yield in a small Amazon catchment**. SYLWAN, vol. 158, p. 347-359, 2014.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. Editora Interciência, 2ª ed. Rio de Janeiro, p. 599, 2008.
- CHAVES, H. M. L. **Relações de Aporte de Sedimento e Implicações de sua Utilização no Pagamento por Serviço Ambiental em Bacias Hidrográficas**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 34, p. 1469-1477, 2010.
- COHEN, M. J.; SHPHERD, K. D.; WALSH, M. G. **Empirical Reformulation of the universal soil loss equation for erosion risk assessment in a tropical watershed**. Geoderma 124, p. 235-252, 2005.
- DENARDIN, J.E. **Erodibilidade de Solo Estimada por Meio de Parâmetros Físicos e Químicos**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 1990.
- DIAS, S. da F. (Coord.). **Estudo ambiental no Utinga: vida útil do sistema de abastecimento de água de Belém**. Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará, 1991.

DIODATO, N.; VENETE, J.; BELLOCCHI, G.; GUERRIERO, L.; SORIANO, M.; FIORIOLLO, F.; REVELLINO, P.; GUADAGNO, F. M. **Estimating long-term Sediment Export using a Seasonal Rainfall-dependent Hydrological Model in the Glonn River.** *Geomorphology*, vol. 228, p. 628-636, 2015.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – 2ª Ed.** – Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006

FLACKE, K. W.; AUERSWALD, F. K.; NEUFANG, M. L. **Combining a Modified Universal Soil Loss Equation with a Digital Terrain Model for Computing High Resolution Maps of Soil Loss Resulting from Rain Wash.** *CATENA*, Vol. 17, p. 383-397, 1990.

FOSTER, G. R.; MEYER, L. D. **Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources.** Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, DC: US, p.190–207, 1975.

FUJIHARA, A.K. **Predição de Erosão e Capacidade de Uso do Solo numa Microbacia do Oeste Paulista com Suporte do Geoprocessamento.** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, p. 136, 2002.

GALDINO, S. **Estimativa da Perda de Terra sob Pastagens Cultivadas em Solos Arenosos da Bacia Hidrográfica do Alto Taquari - MS/MT.** Tese de Doutorado. UNICAMP/FEAGRI, Campinas, p. 115, 2012.

GARRIGUES, E.; CORSON, M. S.; ANGERS, D. A.; VAN DR WERF, H. M. G. **Soil Quality in Life Cycle Assessment: Towards Development of an Indicator.** *Ecological Indicators*, vol. 18, p. 434-442, 2012.

GOMIDE, I. S. **Modelagem de perda de solo de pequenas bacias hidrográficas da Amazônia via modelo USLE.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Belém-PA. p. 106, 2012.

GUEVARA-PÉREZ, E. & MÁRQUEZ, A. M. **Comparison of three models to predict annual sediment yield in Caroni River Basin, Venezuela.** *Journal of Urban and Environmental Engineering*, v. 1, n. 1, p. 10-17, 2007.

HEUNG, B.; BAKKER, L.; SCHMIDT, M.; DRAGICEVIC, S. **Modelling the Dynamics of Soil Redistribution Induced by Sheet Erosion Using the Universal Soil Loss Equation and Cellular Automata.** *Geoderma*, p.112-125, 2013.

HEUSCH, B. **L'Erosion du Pré-Rif. Une etude quantitative de L'erosion hydralique cans les collines marneuses du Pré-Rif occidental.** *Annales de la Recherche Forestière au Maroc.* Vol. 12, p.9-176 , 1970.

HRISSANTHOU, V. **Simulation model for the computation of sediment yield due to upland and channel erosion from a large basin.** *Sediment Budgets (Proceedings of the Porto Alegre Symposium, December 1988).* IAHS Publ. no. 174, 1988.

HRISSANTHOU, V. **Estimate of Sediment Yield in a Basin without Sediment Data.** *Catena* vol. 64, p. 333–347, 2005.

HUDSON, N. W. **Soil Consevation.** Ithaca, Nova York, Cornell University Press, p. 320, 1973.

IRVEM, A.; TOPALOGLU, F.; UYGUR, V. **Estimating Spatial Distribution of Soil Loss over Seyhan River Basin in Turkey.** *Journal of Hydrology*, vol. 336, p. 30-37, 2007.

JARVIS, A.; H.I. REUTER; A. NELSON; E. GUEVARA. **Hole-filled SRTM for the globe** Version 4, 2008. Disponível em: CGIAR-CSI SRTM 90m Database <http://srtm.csi.cgiar.org>).

KARLEN, D. L.; GARDNER, J. C.; ROSEK, M. J. **A Soil Quality Framework for Evaluating the Impact of CRP.** *Jounal Production Agricultural*, vol. 11, p. 56-60, 1998.

KINNELL, P. I. A. **The USLE-M and Modeling Erosion With in Catchments.** USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, selected papers from the 10th international soil conservation organization meeting held, p. 924-928, 1999

KOWAL, J.; KASSAM, A. **Energy Load and Instantaneous Intensity of Rainstorms at Samaru, Northern Nigeria.** In: Greenland, D. & R. Lal (eds): *Soil Conservation and management in the humid tropics.* Chichester (Wiley),p. 57-70, 1977.

LAL, R. **Soil Erosion and Carbon Dynamics.** *Soil and Tillage Research*, vol. 81, p. 137-142, Abril 2005.

LANGEIN, W. B. **Annual Runoff in the United States.** *Geoligal Survey Circular*, vol. 52, p. 14, 1949.

LANGEIN, W. B.; SCHUMM, S. A. **Yield of Sediment in Relation to Mean Annual Precipitation.** *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 39, nº6, p. 1076-1084, 1958.

LEVY, M.C.T.C. **Avaliação de Cenários da Produção Agrícola Visando a Sustentabilidade do Uso das Terras de Piracicaba (SP).** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 104 p, 1995.

LEPRUM, J.C. **A Erosão, a Conservação e o Manejo do Solo no Nordeste Brasileiro.** Recife. Ministério do Interior. SUDENE, Brasil. 105p., 1981.

LIMA, J. M.; CURI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D. P. **Dispersão do material de Solo em Água para Avaliação indireta da erodibilidade em latossolos.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, vol. 14, p. 85-90, 1990.

LIMA, S. R. M.; BLANCO, C. J. C.; GOMIDE, I. S.; BARBOSA, A. J. S.; GONCALVES, M. F. **Análise do Fator de Erosividade da Chuva para uma Pequena Bacia Hidrográfica da Amazônia.** *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 6, p. 184-191, 2014.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. **Erosividade da Chuva: sua Distribuição e Relação com Perdas de Solo em Campinas, SP.** *Bragantia*, v.51, p 189 – 196, 1992.



LOPES, V. L. **A Numerical Model of Watershed Erosion and Sediment Yield**. Tese de Doutorado da Pós-Graduação da Universidade do Arizona, p.162, 1987.

LORD, M. L.; GERMANOSKI, D.; ALLMENDINGER, N. E. **Fluvial Geomorphology: Monitoring Stream Systems in Response to a Changing Environment**. Geological Society of America, p. 69-103, 2009.

LU, H.; MORAN, C. J.; PROSSER, I.P. **Modelling Sediment Delivery Ratio Over the Murray Darling Basin**. Environmental Modelling & Software, vol. 21, p. 1297-1308, 2006.

MAEDA, E. E.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURU, Y. E. **Análise Histórica das Transformações da Floresta Amazônica em Áreas Agrícolas na Bacia do Rio SUIA-MIÇU**. Sociedade & Natureza, Uberlândia, vol. 20(1): 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/sn/v20n1/a01v20n1.pdf>> Acesso em: 13/07/2014.

MARQUES, J. J. G. S; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; CAROLINO de SÁ, M. A. **Adequação de Métodos Indiretos para Estimativa da Erodibilidade de Solo com Horizonte B Textural no Brasil**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, vol. 21, p. 447-456, 1997.

MARTINS, P.F.S. **Propriedades de Solos sob Floresta Natural e sua Alteração em Consequência do Desmatamento e Cultivo, na Amazônia Oriental**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, p. 233, 1987.

MISRA, R. K., TEIXEIRA, P. C. **The Sensitivity of erosion and Erodibility of Forest Soils to Structure and Strength**. Soil & Tillage Research, vol.59, p.81-93, 2001.

MORAIS, L.F.B.; SILVA, V.; NASCHENVENG, T.M.C.; HARDOIN, P.C.; ALMEIDA, J.E.L.; WEBER, O.L.S.; BOEL, E.; DURIGON, V. **Índice EI30 de Chuva e sua Relação com o Coeficiente de Chuva do Sudoeste de Mato Grosso**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.15, p 339 – 344, 1991.

MOGLEN, G. E.; ELTAHIR, E. A. B.; BRAS, R. L. **On the Sensitivity of Drainage Density to Climate Change**. Water Resources Research, vol. 34, p. 855-862, 1998.

MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E.; GOVERS, G.; POESEN, J. W. A.; AUERSWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI, D.; STYCZEN, M. E. **The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments**. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 23, p. 527-544, 1998.

NASCIMENTO, C. W. A.; CHAVES, I. B. **Erosividade e Características da Chuva Correlacionadas com Perdas de Solo em Alagoinha- PB**. Ciência Rural, Santa Maria, vol. 26, p. 407-412, 1996.

**NIMETNG: NIGERIA CLIMATE REVIEW BULLETIN 2010**. Nigeria Meteorological Agency <<http://www.nimetng.org/uploads/publication/2010%20Climate%20Review.pdf>> Acesso em 23de Setembro de 2014.

OBADE, V. P. & LAL, R. **Using Meta-analyses to Assess Pedo-variability Under Different Land Uses and Soil Management in Central Ohio, USA.** *Geoderma*, 232-234, p. 56-68, 2014.

OLIVEIRA, F. P.; BUARQUE, D. C.; VIERO, A. C.; MERTEN, G. H.; CASSOL, E. A.; MINELLA, J. P. G. **Fatores Relacionados à Suscetibilidade da Erosão em Entressulcos sob Condições de uso e Manejo do Solo.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Vol 16, n4, p. 337-346, 2012.

OLIVEIRA JR., R.C.; MEDINA, B.F. **A Erosividade das Chuvas em Manaus (AM).** *Revista Brasileira Ciência do Solo*, v.14, p 235 – 239, 1990.

OLIVEIRA JR., R.C. **A Erosividade das Chuvas na Parte Leste do Pará.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, Belém, Pará, Brasil. 52p, 1988.

OUYANG, D.; BARTHOLIC, J. **Predicting Sediment Delivery Ratio in Saginaw bay Watershed.** *Proceedings of the 22nd National Association of Environmental Professionals Conference*, p.19- 23, 1997.

PACHECO, N. A.; BASTOS, T. X. **Caracterização climática do município de Capitão Poço, PA.** Embrapa Amazônia Oriental, Documentos. Belém, n.79, 2001.

PEREIRA, T.; BENEDETTI, M. M. **A Model for Raw Material Management as a Response to Local and Global Environmental Constraints.** *Quaternary International*, vol. 318, p. 19-32, 2013.

PIERI, L.; BITTELLI, M.; WU, J. Q.; DUN, S.; FLANAGAN, D. C.; SALVATORELLI, F. **Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model to Simulate Field-observed Runoff and erosion in the Apennines Mountain Range, Italy.** *Journal of Hydrology*, p.87-97, 2007.

POESEN, J. **Rainfall Erosion Mechanisms and Soil Erodibility.** Tese (Doutorado em Ciências em Geografia Física) – Catholic University Leuven, p.368, 1983.

POESEN, J. 1985. **An improved splash transport model.** *Zeitschrift fur Geomorphologie*, Vol. 29, p.193– 211, 1985.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R., WESSIES, G. A., MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. **Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).** *Agriculture Handbook*, vol. 703, USDA, Washington, 1997.

RISSE, L. M., NEARING, M. A., NICK, A. D., LAFLEN, J. M. **Error assessment in the Universal Soil Loss Equation.** *Soil Science Society of America Journal* Vol.57, p.825–833., 1993.

RUBEL, F.; KOTTEK, M: **Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification.** *Meteorol. Z.*, vol. 19, p. 135-141, 2010.

RUFINO, R.L.; BISCAIA, R.C.M.; HERTEN, G.H. **Determinação do Potencial Erosivo da Chuva do Estado do Paraná**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.17, p 439 – 444, 1993.

SALGADO, M.P.G., FORMAGGIO, A.R., RUDORFF, B.F.T. **Avaliação dos dados SRTM aplicados à modelagem do fator topográfico da USLE**. Revista Brasileira de Cartografia, Vol. 64, n. 04, p.429-442, 2012.

SANTOS, C. G. **Erosão Hídrica e Taxa de Entrega de Sedimentos na Bacia Hidrográfica Semiárida do Riacho Exú, PE**. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, p. 125, 2013.

SANTOS, D. B. O. **Aplicação da Rusle a uma Pequena Bacia Hidrográfica da Amazônia**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Belém-PA, p. 71, 2013.

SANTOS, P.R.A.; GABOARDI, C.; OLIVEIRA, L.C. **Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia**. Revista Brasileira de Cartografia, Vol. 58, n. 01, p.101-107, 2006.

SEPOF- Secretaria Executiva de Estado de Planejamento, Orçamento e Finanças. Estatística Municipal, Capitão Poço, Belém-PA, 2012.

SHAMA, P. P.. **Interrill Erosion**: in Agassi, M. (Ed.), Soil Erosion Conservation and Rehabilitation. Marcel Dekker, New York, pp. 125-152, 1996.

SILVA, A.M. **Índice de Erosividade e sua Relação com a Pluviometria e Coeficiente de Chuva em Juazeiro (BA)**. Piracicaba, São Paulo, 2001.

SILVA, A.M. **Rainfall Erosivity Map for Brazil**. Catena. n.57. p. 251-259, 2004.

SILVA, D. D., PRUSKI, F. F. **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**. Brasília, DF: MMA, SRH, ABEAS. Viçosa, MG: UFV, p. 129-171, 1997.

SILVA, M. A. **Modelagem Espacial da Erosão Hídrica no Vale do Rio Doce, Região Centro-Oeste do Estado de Minas Gerais**. Dissertação de mestrado. Lavras: Universidade Federal de Lavras, Brasil, 2009.

SILVA, R. M.; PAIVA, F. M. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. **Aplicação de Equações de Razão de Transferência de Sedimentos na Bacia do Rio Gameleira com Suporte de Sistemas de Informação Geográfica**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009.

SILVA, R. M. da; SANTOS, C. A. G. **Estimativa da produção de sedimentos mediante uso de um modelo hidrossedimentológico acoplado a um SIG**. 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v12n5/v12n05a13.pdf>> Acesso em: 13/07/ 2014.

STOCKING, M. **A working model for the estimation soil loss suitable for underdeveloped areas**. Universidade de East Anglia, Dev. Stud. Occ, Pap , p.15-54, 1981.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**: Editora da Universidade – UFRGS, Capítulo 15, p. 573 – 619, 1993.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), Editora da Universidade – UFRGS, Porto Alegre: p. 678, 2005.

VAL, L.A.; BAHIA, V.G.; FREIRE, J.C.; DIAS JÚNIOR, M.S. **Erosividade das Chuvas em Lavras, MG**. Ciência e Prática, v.10, p. 199 – 209, 1986

VAN REMORTEL, R.D.; MAICHLE, R.W.; HICKEY, R.J. **Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable**. Computers and Geosciences vol. 30, p. 1043–1053, 2004.

VAND DER LINDEN, P. **Contemporary soil erosion in the Sanggreman river basin related to the Quaternary landscape development**. Tese (Doutora em Ciências) – Univesidade de Amsterdam, p.110, 1978.

VANONI, V. A. **Sedimentation Engineering**. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, N° 54, 1975.

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

WANG, B.; ZHENG, F.; ROMKENS, M. J. M.; DARBOUX, F. **Soil Erodibility for water erosion: A Perspective and Chinese Experiences**. Geomorphology, vol. 187, p. 1-10, 2013.

WILLIAMS, J.R. **Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor**. In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. U.S. Dep. Agr. ARS-S40, p. 244-252, 1975.

WILLING, D. E. **The Sediment Delivery Problem**. Journal of hydrology, vol. 65, p. 209-237, 1983.

WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. **Predicting Rainfall-Erosion Iosses from Gopland East of the Rocky Mountains**. Agricultural Handbook 282, p. 47, 1965.

WISCHMEIER, W. H; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. **A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites**. Journal of Soil and Water Conservation, vol. 26, p. 189-193, 1971.

ZHANG, K. L.; SHU, A. P.; XU, X. L.; YANG, Q. K. ; YU, B. **Soil Erodibility and its Estimation Soils in China**. Journal of Arid Environments, Vol. 72, p. 1002-1011, 2008.