

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**INVESTIGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E  
PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA REPRESENTATIVA  
DO SEMIÁRIDO**

**VALDEMIR DE PAULA E SILVA JUNIOR**

RECIFE, PE, BRASIL

2010

VALDEMIR DE PAULA E SILVA JUNIOR

Engenheiro Agrícola e Ambiental

**INVESTIGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E  
PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA REPRESENTATIVA  
DO SEMIÁRIDO**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal Rural de  
Pernambuco, como parte das  
exigências do Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Agrícola,  
para obtenção do título de mestre.

**Orientador:** Prof. Dr. Abelardo A.  
A. Montenegro.

**Área de Concentração:**  
Engenharia de Água e Solo.

RECIFE, PE, BRASIL

2010

Ficha catalográfica

S586i Silva Junior, Valdemir de Paula e  
Investigação do escoamento superficial e produção de  
sedimentos em bacia representativa do semiárido / Valdemir  
de Paula e Silva Junior. – 2010.  
95 f. : il.

Orientador: Abelardo Antônio de Assunção Montenegro.  
Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola) –  
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de  
Tecnologia Rural, Recife, 2010.  
Inclui referências e apêndice.

1. REHISA 2. Produção de sedimentos 3. Semiárido (PE)  
I. Montenegro, Abelardo Antônio de Assunção, orientador  
II. Título

CDD 630

**INVESTIGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E  
PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA REPRESENTATIVA  
DO SEMIÁRIDO**

Valdemir de Paula e Silva Junior

Defesa de dissertação

Orientador:

---

Prof. Dr. Abelardo A.A. Montenegro

Examinadores:

---

Prof. Dr. Arthur Mattos

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Tháís Emanuelle Monteiro dos Santos

---

Prof. Dr. Marcus Metri Corrêa

**DEDICO**

A minha família

Meus pais “Valdemir e Lúcia”

Minhas irmãs “Fabíola, Sheila, Alessandra e Karinna”

A minha noiva Julliana “Ju”

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela vida iluminada, saúde e pelas oportunidades de crescer a cada dia como ser humano.

Aos meus pais que são minha referencia, pelos conselhos e ensinamentos durante toda minha vida, pela educação e confiança que sempre depositaram em mim.

À minha noiva “Julliana” pelos momentos de companheirismo, de felicidade, de amor, e compreensão durante os momentos de ausência durante essa jornada.

Às minhas irmãs Fabíola, Sheila, Alessandra e Karinna pelo apoio e confiança que sempre depositaram em mim.

Aos meus sogros, cunhados e cunhadas, pelo respeito e amizade.

À todos os funcionários do departamento de Tecnologia Rural, pela receptividade e pelo auxílio sempre prestado, principalmente aos amigos Lulinha e Júnior Granja.

Ao coordenador e professor Mário Rolim, e aos professores do programa de pós-graduação que fizeram parte da minha formação.

Ao professor Sérgio Guerra pela ajuda nas confecções dos mapas.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade oferecida.

Aos amigos de turma e colegas de pós-graduação, pelos momentos de alegria, descontração.

À FACEPE, pela bolsa concedida durante o curso.

À FINEP pelo apoio financeiro ao Projeto de Bacias Experimentais e Representativas (BEER), que custeou boa parte dos trabalhos de campo.

Às pessoas que fazem parte do grupo de pesquisa do Laboratório de Água e Solo (LABAS) que participaram direta ou indiretamente, e que representa a minha segunda família. Pelos momentos de amizade, aprendizagem e descontração. Prof<sup>o</sup> Abelardo, Thais (Thaisa), Roberto (Betinho), Júlio (Cabeção), Rogério (Remosinho), Caetano, Adriano (Baybizinho), Adriana (Dri), Carla, Robertson (Robgol), Rafael (Vassourito), Diogo, Tatiana, Tatyana Keyty e Eduardo (Pity Bull).

Agradeço em especial, ao Prof<sup>o</sup> Abelardo Montenegro pela confiança depositada para realização desse trabalho, pelas horas que poderia estar em família mas se dedicou a esse trabalho, momentos que me proporcionou crescimento pessoal e profissional e pela paciência, incentivo e pelas orientações durante o processo construtivo dessa dissertação, até a conclusão da mesma.

## SUMÁRIO

LISTAS DE FIGURAS .....	11
LISTAS DE TABELAS .....	14
LISTA DE SÍMBOLOS .....	15
RESUMO.....	17
ABSTRACT .....	18
1. INTRODUÇÃO .....	19
2. OBJETIVOS .....	22
2.1. Objetivo geral.....	22
2.2. Objetivos específicos .....	22
3. REVISÃO DE LITERATURA .....	23
3.1. Processos hidrossedimentológicos .....	23
3.1.1. <i>Sedimento e erosão</i> .....	23
3.1.2. <i>Produção de sedimentos</i> .....	24
3.1.3. <i>Transporte de sedimentos</i> .....	25
3.1.4. <i>A região semiárida no Brasil</i> .....	26
3.1.5. <i>Fluxo de sedimentos em regiões áridas e semiáridas</i> .....	27
3.2. Medidas e amostragem de sedimentos .....	28
3.2.1. <i>Granulometria dos sedimentos</i> .....	28
3.2.2. <i>Carga de Sedimento Suspenso</i> .....	29
3.2.3. <i>Amostragem de sedimentos em suspensão</i> .....	31
3.2.4. <i>Método de amostragem – escolha das verticais</i> .....	33
3.2.5. <i>Amostradores de Sedimento</i> .....	34
a) <i>Amostrador de sedimento em suspensão</i> .....	34
b) <i>Amostrador de sedimento de leito</i> .....	35
3.2.6 <i>Análise em laboratório</i> .....	35



3.2.7 Curva-chave de descarga de sedimentos .....	36
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	39
4.1. Caracterização da Área de Estudo.....	39
4.2.1. Forma e características físico-hídricas da Bacia do Mimoso .....	41
4.3. Clima.....	43
4.4. Vegetação e ocupação do solo .....	45
4.5. Solos .....	46
4.6. Medições hidrológicas .....	47
4.6.1. Instalação da estação fluviométrica .....	49
4.6.2. Sensor de Nível e Leitura Manual .....	50
4.7. Obtenção da curva-chave .....	52
4.7.1. Determinação das descargas líquida ( $Q_l$ ) e sólida ( $Q_s$ ) .....	52
4.7.2. Amostragem de sedimentos suspensos.....	52
4.7.3. Medição direta da descarga líquida ( $Q_l$ ).....	53
4.8. Produção da curva-chave .....	56
4.9. Fluxo de sedimento suspenso .....	56
4.10. Determinação da concentração de sedimentos em suspensão ( $C_{ss}$ ).....	58
4.10.1. Descarga sólida em suspensão ( $Q_{ss}$ ) e produção de sedimentos suspensos ( $Y_{SS}$ ).....	59
4.11. Curva-chave de sedimento suspenso .....	60
4.12. Sedimento de leito (Medição a vau).....	60
4.12.1. Cálculos de sedimento de leito (BLH-84) .....	62
4.12.2. Produção de sedimento de fundo (Medições indireta) .....	62
4.12.3. Determinação do diâmetro do sedimento .....	63
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	65
5.1. Resultados das características físico-hídricas da Bacia do Mimoso .....	65
5.2. Uso do solo da Bacia do Mimoso.....	66

5.3. Calibração do Sensor de nível.....	66
5.4. Resposta hidrológica da Bacia do Riacho Mimoso .....	68
5.5. Avaliação da descarga líquida (Ql) a partir das campanhas de medição direta e curvas-chave do riacho Mimoso .....	73
5.6. Avaliação sedimentométricas do Riacho Mimoso .....	76
5.6.1. Concentração (C <sub>ss</sub> ) de sedimento suspenso do Riacho Mimoso .....	76
5.7. Cálculo de descarga sólida em suspensão.....	79
5.8. Medidas de sedimento de leito .....	85
5.8.1. Granulometria .....	85
5.8.2. Medição a vau (BLH-84) .....	85
5.9. Produção total de sedimento suspenso .....	87
6. CONCLUSÕES .....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	89

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Concentração da descarga de sedimento suspenso para diferentes grupos de tamanho de partículas em uma amostragem vertical. Fonte: Carvalho (1994). .....	30
Figura 2. Diagrama da distribuição da velocidade, concentração de sedimentos e descarga sólida nos curso d'água. Fonte: Carvalho (1994).....	31
Figura 3. Zonas de amostragem, medida e não medida, numa vertical de amostragem do sedimento em suspensão. Fonte: Santos et al. (2001).....	32
Figura 4. Exemplo de amostragem pelo método do “Igual Incremento de Largura”. Fonte: Carvalho et al.(2000).....	33
Figura 5. Bacia hidrográfica do Mimoso localizada na Bacia do Ipanema.....	40
Figura 6. Declividade da Bacia do Mimoso.....	41
Figura 7. Rede de drenagem da Bacia do Mimoso quanto a sua ordem.....	41
Figura 8. Vista parcial da vegetação da região em estudo durante o período chuvoso. .	45
Figura 9. Mapa de uso e ocupação da Bacia do Mimoso.....	45
Figura 10. Mapa de solos da Bacia do Mimoso, e os tipos de solos presentes. Fonte: EMBRAPA (2000), citado por Silva et al. (2009).....	47
Figura 11. Pluviômetro automático da Campbell Scientific (A) pluviômetro automático modelo Raindatalogger (B).....	48
Figura 12. Estação total localizada na Fazenda Nossa Senhora do Rosário. ....	48
Figura 13. Disposição dos pluviômetros na Bacia do Mimoso.....	49
Figura 14. Detalhe da estação fluviométrica instalada na bacia do Riacho Mimoso, constando de Datalogger (A), célula fotoelétrica (B), pluviógrafo (C) e sensor de nível (linígrafo) (D), e poço tranquilizador (E).....	50
Figura 15. Coluna de PVC com altura de dois metros, para calibração do sensor.....	51
Figura 16. Garrafa de Mariotte instalada no sensor de nível.....	51
Figura 17. Amostrador de coleta de sedimento em suspensão DH-48. ....	52
Figura 18. Contador de pulsos marca HIDROMETRIA (A); Molinete da HIDROMEC (B). ....	53
Figura 19. Régua utilizada na determinação da largura da seção e na localização dos pontos de determinação de velocidade e profundidade do escoamento.....	54
Figura 20. Determinação da velocidade do escoamento utilizando um molinete fluviométrico e contador eletrônico de pulsos.....	55
Figura 21. Coleta para determinação da concentração de sedimento em suspensão (C <sub>ss</sub> ) utilizando o amostrador DH-48. ....	57

Figura 22. Amostrador de leito BLH-84 tipo Helley Smith.....	61
Figura 23. Equação de calibração do sensor tipo linear, instalada na Bacia Representativa do Mimoso.....	67
Figura 24. Leituras de níveis registrados pelo linígrafo e medidos na régua linimétrica para o ano de 2009.....	67
Figura 25. Leituras de níveis registrados pelo linígrafo e medidos na régua linimétrica para o ano de 2010.....	68
Figura 26. Distribuição do total mensal das chuvas para os quatros pluviômetros na Bacia do Riacho Mimoso, para o período de chuvoso do ano de 2009.....	69
Figura 27. Distribuição do total mensal das chuvas na Bacia do Riacho Mimoso, para o período de chuvoso do ano de 2010.....	69
Figura 28. Hidrograma anual do Riacho Mimoso, semiárido pernambucano, no ano de 2009.....	70
Figura 29. Hidrograma anual do Riacho Mimoso, semiárido pernambucano, no ano de 2010.....	71
Figura 30. Hidrograma do evento ocorrido entre os dias 05/05/2009 e 06/05/2009 no Riacho Mimoso, com registros a cada 5 minutos.....	71
Figura 31. Perfil da seção do Riacho Mimoso, com seu comprimento e profundidade, em relação ao nível zero.....	74
Figura 32. Relação obtida entre as lâminas e raio hidráulico e área do Riacho Mimoso.....	75
Figura 33. Reta 1:1 das vazões medidas e estimadas no Riacho Mimoso, com os dados referentes às 22 campanhas de determinação direta.....	75
Figura 34. Curva-chave obtida entre as cotas e as vazões do Riacho Mimoso, com o maior valor registrado pelo linígrafo calculado por Manning.....	76
Figura 35. Variação da concentração instantânea de sedimento suspenso (C <sub>ss</sub> ) e vazão do Riacho Mimoso, durante o período chuvoso do ano de 2009 e 2010, amostradas pelas campanhas de medição direta.....	78
Figura 36. Curva-chave de sedimento (Q <sub>ss</sub> x Q) para a seção do Riacho Mimoso.....	79
Figura 37. Descarga sólida para o mês de fevereiro de 2009, para o Riacho Mimoso.....	80
Figura 38. Descarga sólida para o mês de março de 2009 para o Riacho Mimoso.....	80
Figura 39. Descarga sólida para o mês de abril de 2009 para o Riacho Mimoso.....	80
Figura 40. Descarga sólida para o mês de maio de 2009 para o Riacho Mimoso.....	81
Figura 41. Descarga sólida para o mês de junho de 2009 para o Riacho Mimoso.....	81
Figura 42. Descarga sólida para o mês de julho de 2009 para o Riacho Mimoso.....	81

Figura 43. Descarga sólida para o mês de agosto de 2009 para o Riacho Mimoso.....	82
Figura 44. Descarga sólida para o mês de setembro de 2009 para o Riacho Mimoso....	82
Figura 45. Descarga sólida para o mês de janeiro de 2010 para o Riacho Mimoso.....	82
Figura 46. Descarga sólida para o mês de fevereiro de 2010 para o Riacho Mimoso....	83
Figura 47. Descarga sólida para o mês de março de 2010 para o Riacho Mimoso.....	83
Figura 48. Descarga sólida para o mês de abril de 2010 para o Riacho Mimoso.....	83
Figura 49. Descarga sólida para o mês de maio de 2010 para o Riacho Mimoso.....	84
Figura 50. Descarga sólida para o mês de junho de 2010 para o Riacho Mimoso.....	84
Figura 51. Curva de distribuição do diâmetro das partículas transportadas por arraste pelo Riacho Mimoso durante a coleta no dia 14/04/10, gerada pelo programa Curva Expert 13.1. ....	85
Figura 52. Relação entre os valores de sedimento de leito medidos (BLH-84) e estimados pelas equações de Shields e Kalinske.....	87

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Dados climáticos do município de Pesqueira (PE). Médias mensais de 30 anos. (P= precipitação média; T= temperatura média; ETP= evapotranspiração potencial).....	44
Tabela 2. Características físicas e hidrodinâmicas dos principais solos da Bacia do Mimoso.....	46
Tabela 3. Posição do molinete na vertical em relação à profundidade.....	55
Tabela 4. Características físico-hídricas da Bacia do Mimoso.....	65
Tabela 5. Uso do solo e vegetação característica na Bacia Experimental do Mimoso-Pesqueira – PE.....	66
Tabela 6. Dias com e sem chuva, na Bacia Representativa do Mimoso, para o ano de 2009.....	72
Tabela 7. Dias com e sem chuva, na Bacia Representativa do Mimoso, para o ano de 2009.....	73
Tabela 8. Valores de lâmina do escoamento (cm), área da seção molhada (m <sup>2</sup> ) e descarga líquida ( <i>Ql</i> ) do Riacho Mimoso, obtidos por determinação direta.....	73
Tabela 9. Vazão ( <i>Ql</i> ), concentração instantânea de sedimento suspenso ( <i>C<sub>ss</sub></i> ), e descarga de sedimento em suspensão ( <i>Q<sub>ss</sub></i> ), das campanhas de medição direta no riacho.....	77
Tabela 10. Valores medidos de descarga líquida em (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) e descarga sólida de fundo (t.dia <sup>-1</sup> ).....	86
Tabela 11. Descarga de fundo ( <i>Q<sub>sf</sub></i> ) calculada pelas equações propostas por Shields e Kalinske e sua proporção (%) em relação a descarga de sedimento em suspensão ( <i>Q<sub>ss</sub></i> ) encontradas para as 4 campanhas de avaliação direta do Riacho Mimoso, no ano de 2010.....	86

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $K_c$  = coeficiente de compacidade (-)  
 $P$  = perímetro da bacia (km)  
 $A$  = área da bacia (km<sup>2</sup>).  
 $F_f$  = fator de forma (-)  
 $L$  = comprimento axial (km).  
 $Dd$  = densidade de drenagem (km/km<sup>2</sup>)  
 $L$  = comprimento dos cursos d'água (km)  
 $T_c$  = tempo de concentração (horas)  
 $L$  = comprimento da bacia em (km)  
 $n$  = fator de rugosidade promovido pela cobertura vegetal  
 $S$  = declividade média do principal curso d'água (m m<sup>-1</sup>)  
 $Ql$  = descarga líquida total (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)  
 $Qli$  = descarga líquida de cada vertical (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)  
 $Q$  = vazão (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)  
 $A_i$  = área de influência de cada vertical (m<sup>2</sup>)  
 $V_i$  = velocidade média do escoamento de cada vertical (m s<sup>-1</sup>)  
 $Vt$  = razão ou velocidade de trânsito (m s<sup>-1</sup>)  
 $K$  = a constante de proporcionalidade, variável em função do diâmetro do bico do amostrador (0,1036 para o bico de ¼", do amostrador que foi utilizado)  
 $t$  = tempo mínimo para realização da amostragem (s)  
 $p$  = profundidade da vertical de amostragem (m)  
 $C_{ss}$  = concentração de sedimento em suspensão na vertical amostrada (mg l<sup>-1</sup>)  
 $P_{sed}$  = peso do sedimento (mg)  
 $Vol_{amostra}$  = volume da amostra (l)  
 $Q_{ss}$  = descarga sólida em suspensão (t dia<sup>-1</sup>)  
 $C_{ssl}$  = concentração de sedimento em suspensão da vertical (mg l<sup>-1</sup>)  
 $Q_{li}$  = descarga líquida da respectiva vertical (l s<sup>-1</sup>)  
 $Y_{ss}$  = produção de sedimento suspenso (t km<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup> ou t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>)  
 $X$  = número de dias do ano em que houve escoamento (dias ano<sup>-1</sup>)  
 $a$  e  $b$  = constantes de ajuste

$R_h$  = raio hidráulico (m)

$I$  = declividade da linha de energia ( $m\ m^{-1}$ )

$q_{sml}$  = descarga sólida do material do leito ( $g\ s^{-1}\ m^{-1}$ )

$m$  = massa seca de sedimentos coletada nas medições (g)

$w$  = largura do bocal do equipamento (m)

$q_s$  = descarga sólida ( $Kg\ s^{-1}$ )

$U^*$  = velocidade de cisalhamento ( $m\ s^{-1}$ )

$\tau$  = tensão de cisalhamento do escoamento sobre o leito ( $N\ m^{-2}$ )

$\tau_c$  = tensão crítica de cisalhamento ( $N\ m^{-2}$ )

$\gamma_s$  = peso específico do sedimento submerso ( $N\ m^{-3}$ )

$d_{50}$  = diâmetro característico do sedimento (m)

$q$  = descarga líquida por unidade de largura ( $m^2\ s^{-1}$ )

$d$  = diâmetro característico da mistura de sedimentos (m)

$\gamma$  = peso específico da água ( $N\ m^{-3}$ )

$\gamma_s$  = peso específico do sedimento ( $N\ m^{-3}$ )



## RESUMO

A erosão hídrica é um dos principais processos responsáveis pela degradação física do solo, uma vez que desagrega e transporta as partículas com maior facilidade. As características de quantidade dos sedimentos transportados aos rios, além de informar sobre o comportamento da bacia hidrográfica, apresentam grande relevância para a manutenção de ecossistemas, planejamento e aproveitamento dos recursos hídricos de uma região, seja para análise de viabilidade de intervenção antrópica para abastecimento ou irrigação, ou para dimensionamento de obras hidráulicas. O presente trabalho teve como objetivo avaliar as características hidrossedimentológicas da bacia hidrográfica do Riacho Mimoso, no semiárido pernambucano, no município de Pesqueira, com uma área total de 124,36 km<sup>2</sup> e um tempo de concentração de 3,49 horas. A bacia experimental e representativa do Riacho Mimoso apresentou respostas hidrológicas com altos picos de vazão, com valores de até 13,17 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. A produção de descarga sólida em suspensão do Riacho Mimoso, foi de um mínimo de 0,063 t dia<sup>-1</sup> e um máximo de 954,38 t dia<sup>-1</sup>, para o ano de 2009 e um mínimo de 0,118 t dia<sup>-1</sup> e um máximo de 908,2 t dia<sup>-1</sup>, em 2010.

**Palavras-chave:** REHISA, produção de sedimentos, semiárido de Pernambuco.

## **ABSTRACT**

Water erosion is one of the main processes responsible for soil physical degradation, since, break up and carries the particles with greater ease. The characteristics of the quantity of sediment transported to the rivers, besides informing about the behavior of the watershed, have great relevance to the maintenance of ecosystems, planning and utilization of water resources in a region, or to verify the viability of human intervention to supply or irrigation, or for design of hydraulic works. The present study was to evaluate the hydrological and sedimentological characteristics basin of the Mimoso rivulet, semiarid in Pernambuco in the city of Pesqueira, with a total area of 124.36 km<sup>2</sup> and a concentration time of 3.49 hours. The experimental watershed of the creek showed Mimoso hydrological responses with high peak flows, with values of 13.17 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. The production of suspended solid discharge Mimoso Creek, was a minimum of 0.063 t dia<sup>-1</sup> and a maximum of 954.38 t dia<sup>-1</sup> for the year 2009 and a minimum of 0.118 t dia<sup>-1</sup> and a maximum of 908.2 t dia<sup>-1</sup> in 2010.

**Keywords:** REHISA, sediment yield, semiarid Pernambuco.

## **1. INTRODUÇÃO**

O Estado de Pernambuco vem desenvolvendo, através da Secretaria de Recursos Hídricos e a Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente (SECTMA) e SRH-PE ações no sentido de implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos, a gestão das águas nas bacias hidrográficas, além da proteção dos mananciais. Para a referida política pública ser viável e sustentável, estudos básicos de potencialidade hídrica de bacias representativas do Estado de Pernambuco devem ser desenvolvidos, visando o seu monitoramento, apoiando o planejamento dos recursos hídricos.

Neste sentido, a análise das potencialidades hidrológicas das bacias contribui para ampliar o conhecimento dos processos chuva-vazão no semiárido, e para orientar a instalação de futuras seções de medição nas bacias, considerando e incluindo aquelas unidades de maior produção e significância. Este aspecto se reveste de maior importância quando se considera a política pública estadual preconizada na Lei 12.984, de 30 de Dezembro de 2005 (Lei das Águas), que considera o “monitoramento dos recursos hídricos” como um dos instrumentos da política estadual nesta área.

Visando aprofundar os estudos no assunto, no I Workshop em Recursos Hídricos do Nordeste, realizado em 2001, em João Pessoa, PB, foi criada a Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA), composta por pesquisadores das Universidades da Região, com o objetivo de desenvolver pesquisas conjuntas e manter atualizado e ordenado o conhecimento científico e tecnológico da hidrologia do semiárido nordestino. No II Workshop de Recursos Hídricos realizado em Recife, PE, em junho de 2001, decidiu-se pela realização de pesquisas em bacias experimentais nos Estados do Nordeste que possuíam Programa de Pós-graduação. Inseridas em bacias representativas do semiárido, as bacias experimentais têm por objetivo o levantamento de informações hidrológicas de interesse ao planejamento dos recursos hídricos da região, envolvendo a UFPB, UFCG, UFPE, UFRPE, UFRN, UFAL, UFBA e UFC.

Após o primeiro projeto em rede (IBESA Implantação de Bacias Experimentais do Semiárido), teve início o projeto BEER (Bacias Experimentais e Representativas), recentemente concluído, visando instrumentar e ampliar as medições hidrológicas nas bacias da região, e implementar ações de manejo e gerenciamento.

O aumento no uso do solo e o desmatamento descontrolado vêm contribuindo para a aceleração dos processos de erosão do solo, principalmente pelo escoamento superficial. O mal uso do solo, seja em áreas agrícolas ou urbanas, origina erosões

hídricas que culminam no assoreamento dos mananciais, diminuindo a vazão e a qualidade da água dos rios, além de diminuir a fertilidade do solo (FEBA et al., 2006).

Para um gerenciamento adequado dos potenciais hídricos disponíveis no mundo, é fundamental conhecer o comportamento dos rios, suas sazonalidade e vazões, assim como os regimes pluviométricos das diversas bacias hidrográficas, considerando as suas distribuições espaciais e temporais, o que exige um programa permanente de monitoramento e interpretação de dados, cuja confiabilidade torna-se maior à medida que suas séries históricas ficam mais extensas, envolvendo eventos de cheias e de secas (IBIAPINA et al., 2003).

Em uma bacia hidrográfica desprovida de qualquer tipo de proteção do solo, parte das partículas da camada superficial do solo é transportada até os leitos dos rios e córregos, por ação das chuvas, onde se depositam causando assoreamento ou são transportadas para fora da bacia pela vazão do exutório (FEBA et al., 2006).

Os sistemas fluviais das regiões áridas e semiáridas são caracterizados em sua maioria por longos períodos sem fluxo, e como consequência desse fenômeno, os estudos dos processos de escoamento em canais áridos e semiáridos são dominados pela análise dos hidrogramas de cheia (BOURKE & PICKUP, 1999).

Os sedimentos exercem grande influência nos demais parâmetros de qualidade das águas, uma vez que, ao serem transportados para os cursos d'água, os sedimentos carregam outros elementos que podem gerar impactos ao meio ambiente.

Nos locais onde ocorrem os processos erosivos, verifica-se perda da capacidade produtiva, devido à remoção dos horizontes superficiais. Por outro lado, os excedentes hídricos que chegam até a rede de drenagem da bacia hidrográfica transportam sedimentos, nutrientes e agroquímicos que contaminam as águas superficiais e subterrâneas.

As características de quantidade e qualidade dos sedimentos transportados aos rios, além de informar sobre o comportamento da bacia hidrográfica, apresentam grande relevância para a manutenção de ecossistemas, planejamento e aproveitamento dos recursos hídricos de uma região, seja para análise de viabilidade de intervenção antrópica para abastecimento ou irrigação, ou para dimensionamento de obras hidráulicas. (SOUZA et al., 2006).

A erosão hídrica é um dos principais processos de degradação física do solo, uma vez que desagrega e transporta as partículas com maior facilidade.

O monitoramento hidrológico contínuo em áreas experimentais, em diferentes escalas de produção, é essencial para o entendimento do fenômeno hidrológico, como também serve para fornecer dados para análises, tais como: identificação das culturas que provocam a menor perda do solo da região, e escolha de técnicas de cultivo que favoreçam a conservação do solo (SANTOS, 2009).

Silva Junior et al. (2008) destacam que o conhecimento do comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica é de grande importância para se adequar a gestão de seus recursos hídricos, bem como para dar suporte à decisão sobre o uso e ocupação do solo. O acompanhamento dos fluxos de sedimentos ocorridos em dado local da bacia permite o diagnóstico de eventuais impactos em sua área de drenagem ao longo do tempo, podendo tornar-se importante indicador ambiental.

Espera-se que esse estudo possa contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico da hidrologia em bacias hidrográficas de regiões semiáridas. Serão fornecidos subsídios físicos para análises de processos chuva-vazão, e futura modelagem numérica.

A presente pesquisa tem como objetivo a caracterização hidrológica da Bacia Experimental do Riacho Mimoso, e estimar a produção de sedimentos, para suporte aos usos múltiplos dos recursos hídricos e aumento da oferta, bem como à gestão da produção agrícola.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Caracterização hidrológica e sedimentológica da Bacia Experimental do Riacho Mimoso, e avaliação de eventos hidrológicos, com medição direta de escoamento e sedimentos, em resposta a eventos de chuva nos anos de 2009 e 2010.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Caracterização fluviométrica do Riacho Mimoso na Bacia do Alto Ipanema, no Agreste de Pernambuco;
- Monitorar, através de campanhas de medição direta de descarga líquida (vazão) e sólida (sedimentos), a bacia hidrográfica do Riacho Mimoso, município de Pesqueira;
- Estimar e caracterizar as precipitações médias na bacia representativa, investigando a relação chuva-vazão.
- Determinar uma curva-chave de escoamento e de sedimento suspenso para uma seção localizada no exutório da Bacia

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. Processos hidrossedimentológicos

##### 3.1.1. Sedimento e erosão

O termo sedimento se refere ao material derivado da fragmentação das rochas, por processo físico ou químico, transportado pela água ou pelo vento até os rios, ficando em suspensão na água ou depositado no leito (CARVALHO, 1994). Sedimentos fluviais são aqueles que após erodirem, atingem os cursos d'água.

Nos rios, o movimento dos sedimentos apresenta-se de duas formas: o transporte de sedimentos em suspensão e transporte no leito. O transporte em suspensão é constituído por partículas mais finas, mantidas distantes do leito do canal pelo movimento da água (turbulência) e somente se depositam quando a velocidade do fluido diminui. O transporte no leito caracteriza-se por ser governado basicamente pela gravidade o que faz com que os sedimentos rolem, saltitem e sejam arrastados pelo fluxo. Por isso, este é o modo de transporte das partículas mais graduadas (CAMPOS, 2007).

Carvalho (2008) define erosão como sendo o fenômeno do desgaste das rochas e solos, com desagregação, deslocamento ou arraste das partículas por ação da água ou outros agentes. Sendo assim, os agentes erosivos são os elementos do meio físico que causam ou afetam diretamente a erosão e podem ser considerados: agentes ativos (água, temperatura, insolação, vento, gelo, neve, microrganismos e homem) ou agentes passivos (topografia, gravidade, tipo de solo, cobertura vegetal e formações superficiais).

Os principais agentes causadores da erosão, segundo Carvalho (2001), são a água, o vento e outros eventos naturais (tremores de terra e etc.) causadores de deslocamento de massas. A degradação dos solos é considerada como a alteração do seu arranjo estrutural e físico-químico, reduzindo a sua ou desta de suportar um determinado uso sendo este um dos maiores problemas da atualidade.

Beskow et al. (2009) descreveram que água é um dos mais significantes agentes causadores do processo de degradação ambiental, promovendo a erosão laminar e entre sulcos. A primeira ocorre quando as partículas do solo são impactadas pelas gotas da

chuva, transportando o solo em pequenas lâminas, enquanto a segunda promove o transporte dos sedimentos através de um fluxo concentrado. Com isso diminui-se a produtividade do solo, promovendo o transporte de nutrientes e agrotóxicos contaminando os corpos de água. A forma de erosão mais comum no Brasil é a hídrica, principalmente devido às chuvas, dependendo da sua intensidade, duração e frequência.

### 3.1.2. *Produção de sedimentos*

O conhecimento da produção de sedimentos em bacias hidrográficas é extremamente importante no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Tais informações são fundamentais no dimensionamento e operação de obras hidráulicas, interferindo decisivamente nos custos de implantação e manutenção de tais sistemas (BELLINASSO, 2007).

Produção de sedimentos, segundo Vanoni (1975), pode ser definida como o total de sedimentos saído de uma bacia hidrográfica, mensuráveis em um ponto de referência e por um período de tempo especificado. Pode ser expressa em termos absolutos ( $t \text{ ano}^{-1}$ ), ou em termos de área específica ( $t \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ ).

A produção de sedimentos é o resultado da erosão e deposição desses processos e, portanto, dependente de todas as variáveis de controle de erosão e transporte de sedimentos. A erosão depende da topografia do terreno, solo, cobertura vegetal e do clima, enquanto o transporte dos sedimentos depende da morfologia da bacia e do uso e ocupação solo (VERSTRAETEN, 2001).

Os sedimentos transportados representa apenas uma parcela do total de sedimentos produzidos em uma bacia hidrográfica em decorrência dos processos erosivos atuantes, pois grandes massas de sedimento são depositadas antes de alcançarem o seu exutório.

É então, a diferença entre a erosão bruta e a quantidade de material que ficou depositado e não foi removido da bacia de drenagem (WALLING, 1990).

O sedimento presente no curso d'água é originado da produção de sedimentos da bacia hidrográfica. Em ocasiões de chuva, o escoamento superficial decorrente transporta muitas partículas para o rio. Em suspensão no meio líquido encontram-se em maior quantidade partículas finas, como argila e silte, correspondendo em média 70 a 95% da carga sólida total (CARVALHO, 2000).



### 3.1.3. *Transporte de sedimentos*

O transporte de sedimentos em rios pode ocorrer em diferentes modalidades, dependendo das condições hidrodinâmicas do escoamento e das propriedades dos sedimentos. Os sedimentos são deslocados da superfície das bacias hidrográficas na direção dos rios que, além dos sedimentos dos seus próprios leitos, recebem também esta carga adicional.

O transporte de sedimentos é um fenômeno natural e faz parte da evolução da paisagem, originando as formas geomorfológicas. Porém, as atividades humanas interferem profundamente nos processos erosivos, podendo elevar em até 100 vezes os processos erosivos naturais (do que seria considerado em tempos geológicos), o que pode acontecer tanto devido a práticas agrícolas ou a obras de engenharia (ARAÚJO et al., 2003 e SIMÕES & COIADO, 2001).

O processo de transporte do material erodido pela água pode se dar de várias maneiras. As partículas mais pesadas deslocam-se sobre (ou junto ao) o fundo por rolamento, deslizamento ou, eventualmente, por saltos curtos (fenômeno de saltação). Constituem a chamada descarga sólida de fundo ou arraste. As mais leves deslocam-se no sentido do escoamento e constituem a descarga sólida em suspensão. Estas podem provir da bacia vertente. Neste caso constituem o que se costuma chamar de deflúvio (wash-load), ou de fundo e paredes de calha, enquanto o arraste é exclusivamente constituído de material encontrado no fundo (TUCCI, 2007).

Segundo Medeiros et al. (2005), a hidráulica fluvial possui dois tipos básicos de transporte sólido: suspensão e arraste. O primeiro, como se verá, é relativamente fácil de ser medido e o arraste, difícil, incerto e pouco acessível. Este último geralmente é calculado através de fórmulas de capacidade de transporte desenvolvidas em laboratórios de hidráulica. A suspensão inclui tanto partículas provenientes do próprio leito como a chamada carga de lavagem, ou carga de finos, proveniente da bacia a montante.

Os rios com correntes turbulentas em geral transportam os sedimentos mantendo as partículas com menor densidade suspensas, e as com maior densidade saltando ou rolando ao longo do fundo. Geralmente, os sedimentos mais finos a jusante se movem mais ou menos na mesma velocidade da água, enquanto os sedimentos mais grosseiros podem mover-se apenas ocasionalmente (EDWARDS & GLYSSON, 1999).

Diante desses processos, Restrepo et al. (2006) relatam que é de fundamental importância conhecer a estimativa da produção de sedimentos e a relação entre a variabilidade natural e as mudanças antropogênicas, avaliando o quanto esses fatores influenciam o transporte de água e sedimentos. Segundo Minella et al. (2007), existem várias fontes de sedimento em uma bacia hidrográfica, como lavouras, rede fluvial, pastagens, entre outros. Os autores destacam a importância de se conhecer as fontes de produção de sedimentos para se avaliar as taxas de sedimentos produzidos em escala de bacia hidrográfica. Os autores verificaram que os sedimentos transportados em suspensão apresentavam como fonte de origem a erosão laminar nas lavouras (34 e 65 %), erosão nos drenos (27 e 55 %) e erosão na rede fluvial (menos de 10 %); Lopes et al. (2006) descreveram que no Rio Paraná, devido às grandes transformações sofridas nos últimos anos com os desmatamentos e o crescimento dos centros urbanos vem aumentando o fluxo de sedimentos nos principais rios da bacia.

#### *3.1.4. A região semiárida no Brasil*

Por se tratar de um país de grande extensão territorial, o Brasil possui diferentes regimes pluviométricos. De norte a sul se encontra uma grande variedade de climas com distintas características regionais; na região Norte se verifica um clima equatorial chuvoso, com chuvas de primavera, verão e outono, sendo que na parte noroeste da região praticamente não se observa estação seca. No Nordeste, a estação chuvosa do semiárido, com índices pluviométricos relativamente baixos, restringe-se há poucos meses, em geral três a quatro meses. As regiões Sudeste e Centro-Oeste sofrem influência tanto de sistemas tropicais quanto de latitudes médias, com estação seca bem definida no inverno e estação chuvosa no verão, com chuvas convectivas. O Sul do Brasil, devido à sua localização latitudinal, sofre mais influência dos sistemas baroclínicos de latitudes médias, em que os sistemas frontais são os principais causadores de chuvas durante todo o ano (Menezes et al., 2008).

No Brasil a região semiárida ocupa uma vasta área, entre 750.000 a 850.000 km<sup>2</sup>, o equivalente a 48% da área total da região Nordeste e cerca de 10% do território nacional (Ab'Saber, 1996; Barbosa, 2000), sendo um dos maiores e mais populosos. O semiárido brasileiro é um dos mais úmidos do planeta, com média anual de 700 mm ano<sup>-1</sup>, enquanto na maioria das zonas áridas de outros países a média anual é de 80 a 250 mm ano<sup>-1</sup> (MELO FILHO & SOUZA, 2006).

Nesse contexto, vale destacar alguns trabalhos no que diz respeito à região semiárida do Brasil. Menezes et al. (2010) descreveram a grande variabilidade anual e interanual da precipitação são características marcantes na região Nordeste do Brasil (NEB); uma outra característica do Nordeste é a variabilidade espacial, pois há regiões que apresentam precipitação acumulada inferior a  $350 \text{ mm ano}^{-1}$ , a exemplo do Cariri Paraibano. De acordo com Silva et al. (2009), o problema da irregularidade pluviométrica no Nordeste do Brasil (NEB) resulta não só da variação dos totais pluviométricos mas, principalmente, da duração e intensidade dessas precipitações.

Farias et al. (2008) destacam que o déficit hídrico no semiárido afeta vários aspectos do crescimento vegetal: os efeitos mais evidentes do estresse hídrico se referem à redução do tamanho das plantas, de sua área foliar e da sua produtividade.

Braga et al. (2002) em áreas do Brejo Pernambucano as precipitações, como o Brejo da Madre de Deus ( $805,7 \text{ mm ano}^{-1}$ ) e a Barra de Guabiraba ( $1.125,5 \text{ mm ano}^{-1}$ ), Brejo dos Cavalos ( $335,3 \text{ mm}$ ).

Segundo Achite & Ouillon (2007), a erosão do solo que ocorre nas vertentes das bacias hidrográficas constitui o principal aspecto de degradação do solo no ambiente semiárido. A produção de sedimentos em áreas de semiárido é altamente variável devido à precipitação e aos escoamentos serem altamente variáveis.

Para estimar o transporte de sedimentos mensal ou anual e para analisar a sua variabilidade, podem ser construídas curvas-chave de sedimentos baseados em dados de medições de concentração e descarga líquida. O alto potencial erosivo em ambientes semiáridos induz a repercussões tanto nas vertentes erodidas, bem como nas áreas receptoras de sedimentos. Dessa forma, fica claro a necessidade do direcionamento de estratégias de manejo do sedimento em regiões de semiárido devido à erosão em eventos rápidos, e aos limitados recursos naturais disponíveis.

### *3.1.5. Fluxo de sedimentos em regiões áridas e semiáridas*

Uma característica intrínseca do semiárido é a alta intensidade de precipitação, acarretando um processo acentuado de erosão. Os processos erosivos do semiárido são majorados devido a uma parcela considerável de solo com pouca ou nenhuma cobertura vegetal. A erosão nessa região interfere diretamente no dia-a-dia da população local, pois o arraste de partículas do solo contribui para diminuição de sua camada mais fértil,

utilizada na agricultura. Para suprir a deficiência de nutrientes no solo, e com o intuito de aumentar a produção agrícola, é cada vez mais comum a utilização de fertilizantes, que por sua vez são carregados, aumentando os riscos de impactos ambientais.

As regiões áridas são caracterizadas por uma combinação de alta variabilidade temporal de chuva e heterogeneidade espacial das propriedades da superfície do solo.

No que diz respeito a estas condições ambientais, as fontes receptoras de água e sedimentos tendem a ser organizados em mosaicos com atributos de espaço distintos. Estes padrões podem ser identificados a várias escalas, cada um com uma predominância de um jogo diferente de processos. As relações dinâmicas entre estes padrões e processos são um aspecto essencial de conectividade de espaço em paisagens áridas (PUIGDEFABREGAS et al., 1999).

Segundo Nichol (2006), os dados que descrevem taxas de rendimento de sedimento a longo prazo em bacias com relação ao semiárido são relativamente raros. O autor descreve que existe uma grande dependência na taxa de produção de sedimentos no semiárido em decorrência do tipo de cobertura do solo, que são rasos e a grande variabilidade espaço temporal características dessas regiões.

O transporte de sedimento é bem relatado em rios perenes em climas temperados ou úmidos, mas é menos estudado nos riachos de regiões áridas, também chamado de “Wadis”, apesar do conhecimento de sua alta eficiência de transporte (REID & LARONNE, 1995).

Geralmente, a taxa de transporte de carga de fundo de um rio é cerca de 5 a 25% da carga de sedimento em suspensão (YANG, 1996). Nos rios efêmeros de regiões áridas, o sedimento suspenso tem se mostrado como constituinte de mais de 90% das cargas totais (POWEEL et al., 1996). No entanto, a carga de fundo pode ser 18 vezes maior que a estimada para bacias de área semelhante em ambientes temperado úmidos na produção de sedimentos total (REID et al., 1999).

### **3.2. Medidas e amostragem de sedimentos**

#### *3.2.1. Granulometria dos sedimentos*

O tamanho do grão do sedimento em suspensão é uma das importantes propriedades do sedimento fluvial e tem influência nos processos de sedimentação, no

gasto energético relacionado ao seu transporte e na formação das calhas dos rios (XU, 2002).

O tamanho da partícula de sedimento suspenso é uma das mais importantes propriedades do sedimento fluvial. Ele influencia os processos de sedimentação, o gasto de energia, e a forma do leito dos rios (VANONI, 1975). O tamanho do sedimento suspenso também reflete a composição do material da superfície do solo da bacia de drenagem. Por essa razão, variações temporais no tamanho das partículas de sedimento suspenso nos rios são consideradas como reflexo do processo da erosão na vertente, transferência e deposição de sedimentos na bacia de drenagem e no leito do rio (XU, 2000).

Durante a estação seca, a maior parte do sedimento em suspensão no rio provém da erosão no canal, gerando sedimentos com maior granulometria. Na estação chuvosa, a erosão do solo das encostas causada pelo escoamento superficial gera um sedimento relativamente mais fino, que é transportado até as calhas dos rios (XU, 2002).

No sentido longitudinal do curso d'água observa-se geralmente uma maior produção de sedimentos na parte alta da bacia, com maior erosão e transporte de sedimentos, sendo esses de granulométrica maior, e observa-se que no sentido de jusante esses materiais vão se fracionando, tornando-se sedimentos de granulométrica cada vez menor, sendo que a erosão vai diminuindo e a tendência de sedimentação do material vai aumentando (CARVALHO, 1994).

### 3.2.2. *Carga de Sedimento Suspenso*

Existem diversos métodos em sedimentometria, que podem ser classificados como métodos diretos e indiretos. A sedimentometria no país tem sido realizada por amostragem de sedimento, análise no laboratório e cálculos de obtenção da descarga sólida, sendo este procedimento considerado um dos métodos indiretos. Uma das razões da utilização dessa metodologia é o uso dos equipamentos para amostragem de sedimento da série norte-americana, adotados também em muitos outros países, que proporcionam relativa facilidade, alguns da série fabricados no Brasil (CARVALHO et al., 2000).

As medições sedimentométricas visam à determinação da descarga sólida total transportada pelo curso d'água, definida como a soma da descarga sólida transportada

por arrasto de fundo com a descarga sólida em suspensão. A descarga sólida em suspensão é composta pela descarga de material em suspensão proveniente do leito do rio e pela descarga de material em suspensão proveniente da bacia hidrográfica (PAIVA, 2001).

A distribuição vertical no tamanho de partícula de sedimento suspenso pode variar entre rios e entre seções transversais de um mesmo rio (Figura 1), porém, como regra geral as partículas mais finas são distribuídas uniformemente ao longo da vertical, e as partículas mais grossas estão concentradas junto ao fundo do rio (CARVALHO, 1994).

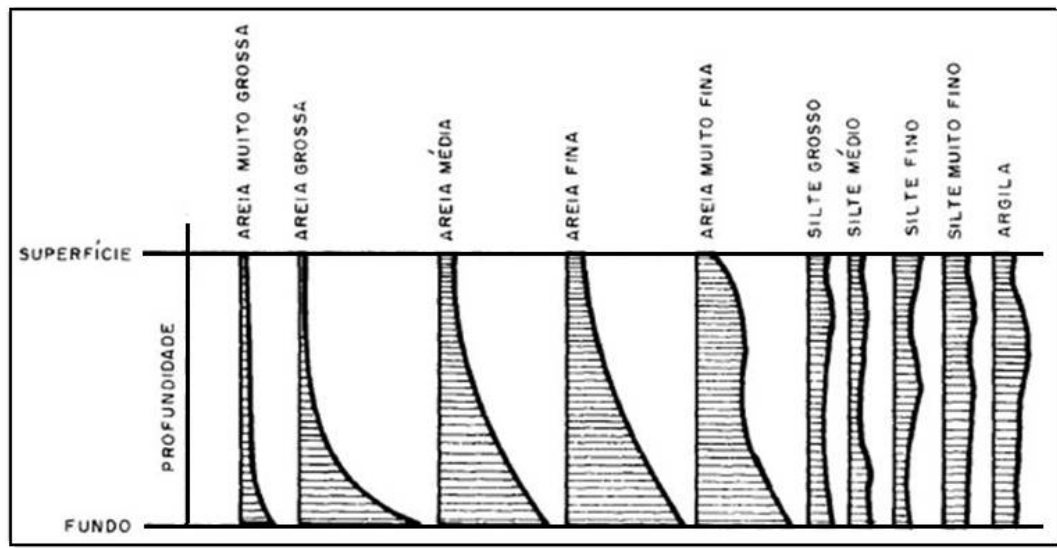


Figura 1. Concentração da descarga de sedimento suspenso para diferentes grupos de tamanho de partículas em uma amostragem vertical. Fonte: Carvalho (1994).

As amostragens pontuais são utilizadas somente em trabalhos específicos ou científicos, sendo a mais rotineira a integração na vertical, porque permite a obtenção da concentração e da granulometria média na vertical. Na amostragem por integração a amostra é coletada em um certo tempo, normalmente superior a 10 s, o que permite a determinação da concentração média mais representativa do que a pontual instantânea (CARVALHO, 2000).

A distribuição dos sedimentos ao longo da seção transversal é variável em função da velocidade de corrente, considerando que as velocidades são menores perto das margens, além da disponibilidade de sedimentos e sua granulometria. A amostragem é feita em várias verticais para permitir a obtenção de valores médios em toda a seção, uma vez que a distribuição de sedimentos é variável em toda a largura do rio e em profundidade, de acordo com o que ilustra a Figura 2.

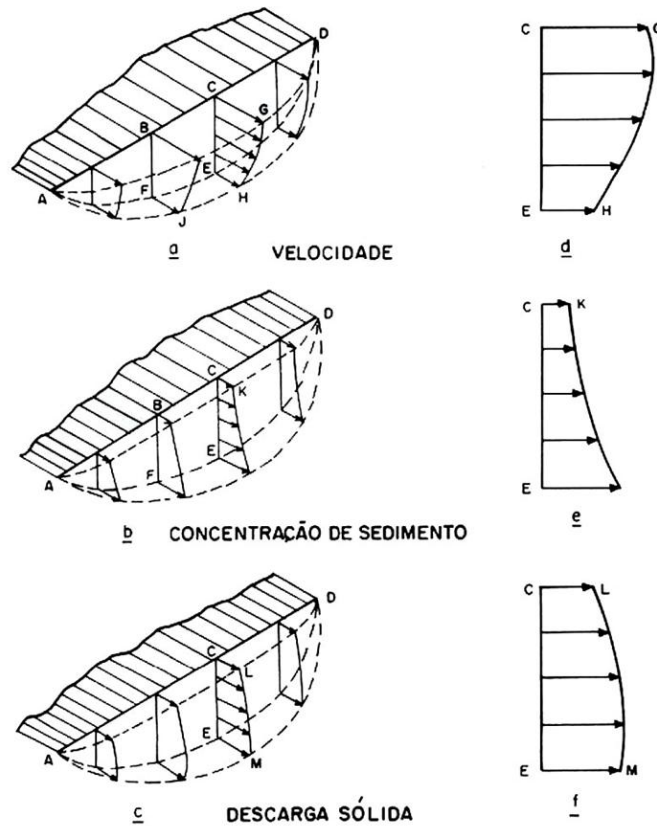


Figura 2. Diagrama da distribuição da velocidade, concentração de sedimentos e descarga sólida nos curso d'água. Fonte: Carvalho (1994).

### 3.2.3. Amostragem de sedimentos em suspensão

A finalidade da amostragem é definir a tipologia e a concentração do material transportado no momento da medição, de forma a se obter amostras representativas na seção transversal do curso d'água (SANTOS et al., 2001).

Na amostragem de sedimento em suspensão por integração de profundidade ou pontual, a amostra obtida geralmente contém uma variação do tamanho de partículas representativa da descarga de sedimento suspenso da vertical amostrada (EDWARDS & GLYSSON, 1999).

A vertical é dividida em duas zonas (Figura 3), devido ao desenho do amostrador que limita a efetiva amostragem da profundidade. A amostragem da profundidade inteira não é possível por causa da localização física do bico do amostrador em relação ao fundo do amostrador, que impede a passagem do bico pela zona perto do fundo do

canal. Essa porção da profundidade é chamada de zona não-amostrada, ocorrendo na mesma a mais alta concentração de partículas de maior diâmetro.

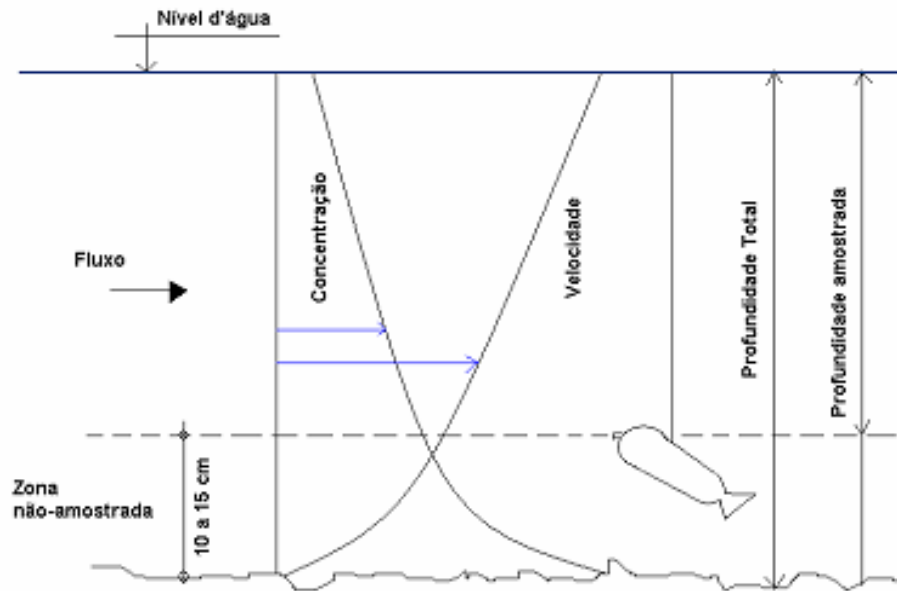


Figura 3. Zonas de amostragem, medida e não medida, numa vertical de amostragem do sedimento em suspensão. Fonte: Santos et al. (2001).

Na amostragem por integração na vertical, a mistura água-sedimento é acumulada continuamente no recipiente, e o amostrador se move verticalmente em uma velocidade de trânsito constante entre a superfície e um ponto a poucos centímetros acima do leito, entrando a mistura numa velocidade quase igual à velocidade instantânea da corrente em cada ponto na vertical. Esse procedimento é conhecido como IVT, “Igual Velocidade de Trânsito”. Normalmente, o amostrador não deve tocar o leito para não correr o risco de coletar sedimento de arrasto.

Os amostradores utilizados possuem bicos calibrados com exigências em relação à velocidade de trânsito, que deve ser dada ao amostrador, sendo que cada bico tem valores máximos e mínimos para a mesma. Entende-se por “velocidade de trânsito” ou “velocidade de percurso”, a velocidade de descida ou de subida do equipamento em uma amostragem por integração na vertical. (CARVALHO, 2000).



### 3.2.4. Método de amostragem – escolha das verticais

Existem vários tipos de amostragens utilizadas em uma seção de controle, sendo as amostragens por igual incremento de largura (IIL) e igual incremento de descarga (IID) os métodos mais usados e recomendados. Vale ressaltar que o método utilizado neste estudo foi igual incremento de largura (IIL), por isso apenas esse método vai ser destacado.

No método de amostragem por igual incremento de largura (Figura 4) a seção transversal é dividida numa série de segmentos de igual largura, para obtenção de uma série de sub-amostras. Em seguida procura-se, entre as verticais escolhidas, a vertical de maior produto velocidade x profundidade, de onde obtém-se a primeira amostra e realiza-se o cálculo do tempo mínimo de amostragem. As outras subamostras são coletadas à mesma velocidade de trânsito, portanto serão compostas por volumes diferentes, e poderão ser reunidas numa só, composta em laboratório, para uma só análise (CARVALHO, 1994; CARVALHO et al., 2000; e SANTOS et al., 2001)

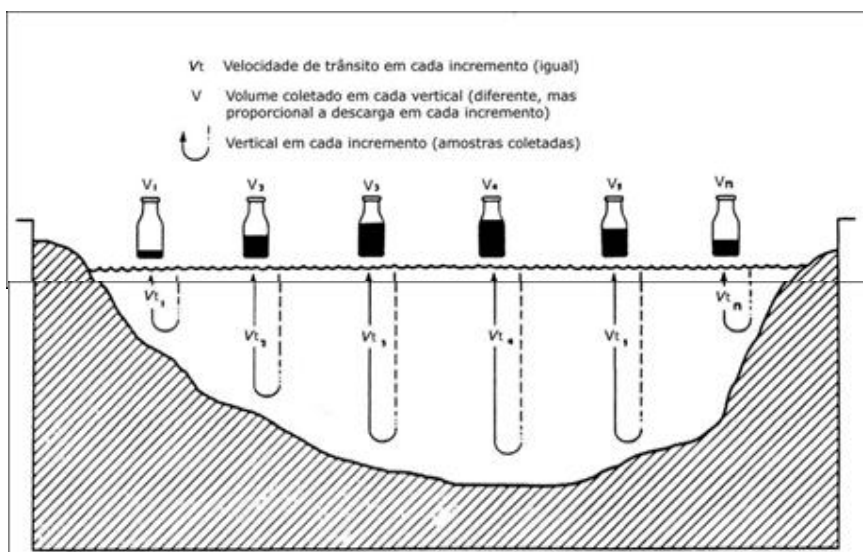


Figura 4. Exemplo de amostragem pelo método do “Igual Incremento de Largura”.  
Fonte: Carvalho et al.(2000).

O número de verticais recomendado para amostragem no método equivale à metade do número de verticais utilizadas para medição de vazão (CARVALHO et al., 2000), mas observa-se que na prática essa escolha irá variar de acordo com a seção, pois no caso de rios de pequeno porte, a escolha pode não seguir essa recomendação, não sendo viável a utilização de tantas verticais na amostragem. Em rios com fortes

declividades, a quantidade de amostras necessárias também pode ser menor, pois o sedimento em suspensão é provavelmente bem misturado e as amostras coletadas às margens podem ser consideradas representativas para a seção transversal (OLD et al., 2003).

### 3.2.5. Amostradores de Sedimento

#### a) Amostrador de sedimento em suspensão

Existem variados tipos de amostradores que se adequam às características do transporte de sedimentos em suspensão e ao tipo de medição, sendo que a maioria desses é feita com equipamento baseados nos modelos americanos, (CARVALHO, 1994).

Existem basicamente três tipos de amostradores que possibilitam medir a descarga sólida do leito (Kuhnle, 2008): aqueles que compreendem estruturas construídas sobre o leito com a finalidade de capturar os sedimentos durante o transporte desses; amostradores portáteis; amostradores considerados não invasivos. Entre esses amostradores, considera-se que as estruturas de captura de sedimentos como o mais eficiente para medições de descarga sólida, porém, os custos de instalação dessa estrutura são muito elevados e a estrutura é de difícil instalação. Determinações não invasivas ainda não estão completamente confiáveis para serem utilizadas, enquanto que o uso de amostradores portáteis apresenta como vantagens o baixo custo e facilidade de uso. Por outro lado, esse método envolve um considerável esforço de campo, devido à elevada variabilidade espaço-temporal do fluxo de sedimentos.

Segundo Coiado (2001), a escolha do equipamento deve considerar os seguintes critérios:

- O aparelho não deve perturbar o escoamento, permitindo que a coleta da amostra seja realizada na mesma velocidade do escoamento, para que a amostra coletada seja representativa;
- O aparelho deve ser hidrodinâmico e pesado, para evitar o desvio do mesmo.

Os amostradores USDH-48 ou AMS-1, de acordo com a denominação nacional, é integrado na vertical para coletas de amostras em suspensão para profundidades de até 1,5m, sendo calibrado para um bico de  $\frac{1}{4}$ . Quando comparado a outros da mesma categoria, é considerado um equipamento leve, sendo feito de alumínio em forma hidrodinâmica que usa uma garrafa presa por mola. Seu conjunto pesa cerca de 3 kg, podendo ser operado a vau, de canoa ou de ponte de pequena altura em rios rasos (CARVALHO, 1994; CARVALHO et al., 2000; e SANTOS et al., 2001).

*b) Amostrador de sedimento de leito*

Existe uma versão para medição a vau da série norte-americana denominada BLM-84, Modelos 8010 e 8015 (CARVALHO, 2000). O equipamento consiste de peças conjugadas fabricadas em chapa de alumínio, sendo a da frente um paralelepípedo de 3"x3" soldado a um tronco de pirâmide com razão de expansão de 1,4; na parte posterior deste é ajustada uma saca fabricada com tela de malha #270 que retém o sedimento grosso. É operado com haste que fica ajustada no topo.

*3.2.6 Análise em laboratório*

A escolha do método é feita em função da análise a se realizar, da quantidade de sedimentos presentes na amostra e da qualidade dos sedimentos. O método da filtração é o mais indicado para amostras com baixas concentrações, e o método da evaporação é preferido para altas concentrações, ou para quando o teor de argila na amostra for grande, dificultando a filtração. Caso o objetivo seja realizar somente a análise de concentração, deve-se optar pelo método de evaporação ou de filtração. Se a análise granulométrica também for efetuada, deve optar-se pelo método do tubo de retirada pelo fundo (CARVALHO, 1994).

Em se tratando das amostras de sedimento de leito, estas podem ser analisadas granulometricamente pelo método de peneiramento (CARVALHO et al., 2000 e CARVALHO, 2008).

### 3.2.7 *Curva-chave de descarga de sedimentos*

Vários fatores devem ser conhecidos e considerados ao aplicar-se o método da curva-chave de sedimentos em estudos sedimentométricos. Essa curva-chave correlaciona a descarga de sólidos em suspensão unicamente à vazão, mas na realidade esse transporte não depende somente da capacidade do fluxo em transportar os sólidos, mas também de outros fatores, tais como a disponibilidade de material mobilizado, que irá depender de eventos anteriores, usos do solo, e presença de reservatórios na bacia.

Portanto, além da grande dispersão normalmente observada nas curvas-chave de sedimentos, há ainda a não estacionaridade da curva, já que esta muda periodicamente, para uma seção. Todos esses fatores impõem restrições e precauções quanto à aplicação da curva-chave de sedimentos, que devem ser atentamente observadas para que se conheçam as limitações na aplicação do método (BICALHO, 2006).

O leito do rio define as condições do escoamento por meio da sua forma e pela rugosidade. Um dos problemas essenciais para a definição da relação cota-descarga é o desconhecimento da variabilidade ao longo do tempo dessas duas características (CHEVALLIER, 2007). Ainda segundo descrito Verstraeten & Poesen (2001), as medições de cargas de sedimentos podem ser feitas por vários métodos como, por exemplo, monitorando cargas de sedimentos em suspensão e descargas volumétricas.

A curva-chave de sedimentos será tanto mais representativa quanto maior o número de pontos medidos e maior variação de vazão alcançada entre os valores mínimos e máximos. Um mesmo posto com grande quantidade de dados pode apresentar curvas distintas, uma para o período de estiagem e outra para o período de chuvas (CARVALHO, 1994).

Para tanto é necessário dispor de uma série temporal longa e contínua da descarga sólida em suspensão.

Para evitar as superestimativas das concentrações a altas vazões, o que pode levar a erros significativos nos cálculos da carga anual e da descarga efetiva, Simon et al. (2003) sugerem o ajuste de um segundo segmento linear para as vazões mais altas.

De acordo com Merten et al. (2006), a eficácia desse método depende, fundamentalmente, da qualidade dos dados utilizados para compor a curva. Com isso, os valores da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) devem representar uma ampla faixa de vazões (Q), especialmente dos eventos de maior magnitude.

Avaliando as descargas diárias de sedimentos em suspensão que foram geradas a partir da série de dados diários de vazão líquida, utilizando curvas-chaves de sedimentos traçadas para cada estação, Lopes et al. (2009) mostram que a descarga sólida média em suspensão na estação mais a jusante do Rio Iguaçu, estação Salto Cataratas, para o período de 1990 a 2002, é de  $5.516 \text{ t dia}^{-1}$ , o que corresponde a um valor de descarga sólida específica em suspensão de  $29,9 \text{ t/ano/km}^2$ . Já a concentração média de sedimentos em suspensão foi de  $33 \text{ mg l}^{-1}$ , para essa estação.

Silva Junior et al. (2008) realizaram observações de campo no Agreste de Pernambuco, entre março e maio de 2008, para determinação da curva-chave em uma seção de controle natural inserida no Rio Mimoso. Os autores verificaram que para o período em estudo o ajuste da curva-chave de descarga sólida em suspensão foi adequado, apresentando um elevado coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,99$ ) entre as variáveis analisadas.

Segundo Medeiros et al. (2008), quanto às curvas chave de sedimentos em suspensão para as estações Indaial e Brusque em Santa Catarina, estas não apresentaram grandes problemas e o ajuste foi compacto. Os coeficientes de correlação foram, respectivamente, 0,811 e 0,950.

Alexandrov et al. (2007) avaliaram no norte de Israel as concentrações de sedimento suspensos em enchentes repentinas (tipicamente  $104\text{--}105 \text{ mg l}^{-1}$ ), apresentando correlação com descarga de água é baixa ( $R^2 = 0,57$ ). em contraste, o escoamento produzido por tempestade direta leva a níveis baixos de concentrações de sedimento suspensos (tipicamente  $103\text{--}104 \text{ mg l}^{-1}$ ), a correlação com a descarga de água é melhor ( $R^2 = 0,78$ ).

Avaliando as descargas sólidas Rio Barigüi, na região urbana de Curitiba, Chela et al. (2005) obtiveram diferentes curvas chaves, apresentando correlações que variaram de  $R^2 = 0,28$ , até uma correlação, com coeficiente  $R^2 = 0,93$ .

Monitorando a produção de sedimentos em um rio tributário do Sho-Shui localizado em uma bacia em Taiwan durante seis anos, Chen et al. (2006) obtiveram correlações de descarga de sedimento em suspensão e de descarga líquida, com varias faixas de concentrações, com coeficiente de correlação variando de 0,54 a 0,95.

Existem vários métodos a serem utilizados no traçado da curva-chave, sendo o mais utilizado o método do traçado visual e o método da regressão linear, e a relação mais comum é a curva-chave de sedimentos em forma de potência (PICOUET et al., 2001 e CARVALHO, 1994).

Um dos problemas mais frequentes na hidrologia é a determinação da relação cota x descarga e a definição dos seus ramos de extrapolação inferior e superior.

A curva-chave exige, em geral, para a sua definição, uma série de medidas abrangendo distintos níveis de águas mais ou menos igualmente distribuídos entre as estiagens e cheias. Portanto para definir a expressão matemática da curva-chave, precisamos ter em mãos uma série de medições de vazões e seus respectivos níveis. Tais pares de pontos podem ser interpolados, definindo assim expressão matemática dessa curva (CORDEIRO & MEDEIROS, 2003).

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1. Caracterização da Área de Estudo**

O município de Pesqueira está localizado na mesorregião Agreste e na Microrregião Vale do Ipojuca do Estado de Pernambuco, limitando-se ao norte com Estado da Paraíba e o município de Poção, ao sul com os municípios de Venturosa e Alagoinha, a leste com os municípios de Sanharó, Capoeira, São Bento do Una e Belo Jardim, e a oeste com os municípios de Arcoverde e Pedra. A área municipal ocupa 1.031,6 km<sup>2</sup> e representa 1,05% do Estado de Pernambuco. Está inserido nas Folhas SUDENE de Pesqueira e Venturosa na escala 1:100.000. A sede do município tem uma altitude aproximada de 654 metros e coordenadas geográficas de 8°21'28'' de latitude sul e 36°41'47'' de longitude oeste, distando 213,7 km da capital do Estado de Pernambuco.

A Bacia Experimental do Mimoso encontra-se inseridas na Bacia Representativa do Alto Ipanema, que é uma das sub-bacias investigadas pela Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA), pertencente ao sistema do Rio Ipanema, em sua porção Ocidental mais a montante. Abrange parte dos municípios de Arcoverde e de Pesqueira, do Estado de Pernambuco, numa área de 194,82 km<sup>2</sup>. Localiza-se entre 8° 34' 17" e 8° 18' 11" de Latitude Sul, e 37° 1' 35" e 36° 47' 20" de Longitude Oeste. Ao Norte faz limite com a bacia do Rio Ipojuca, e ao Oeste com a bacia do Rio Moxotó (Figura 5).

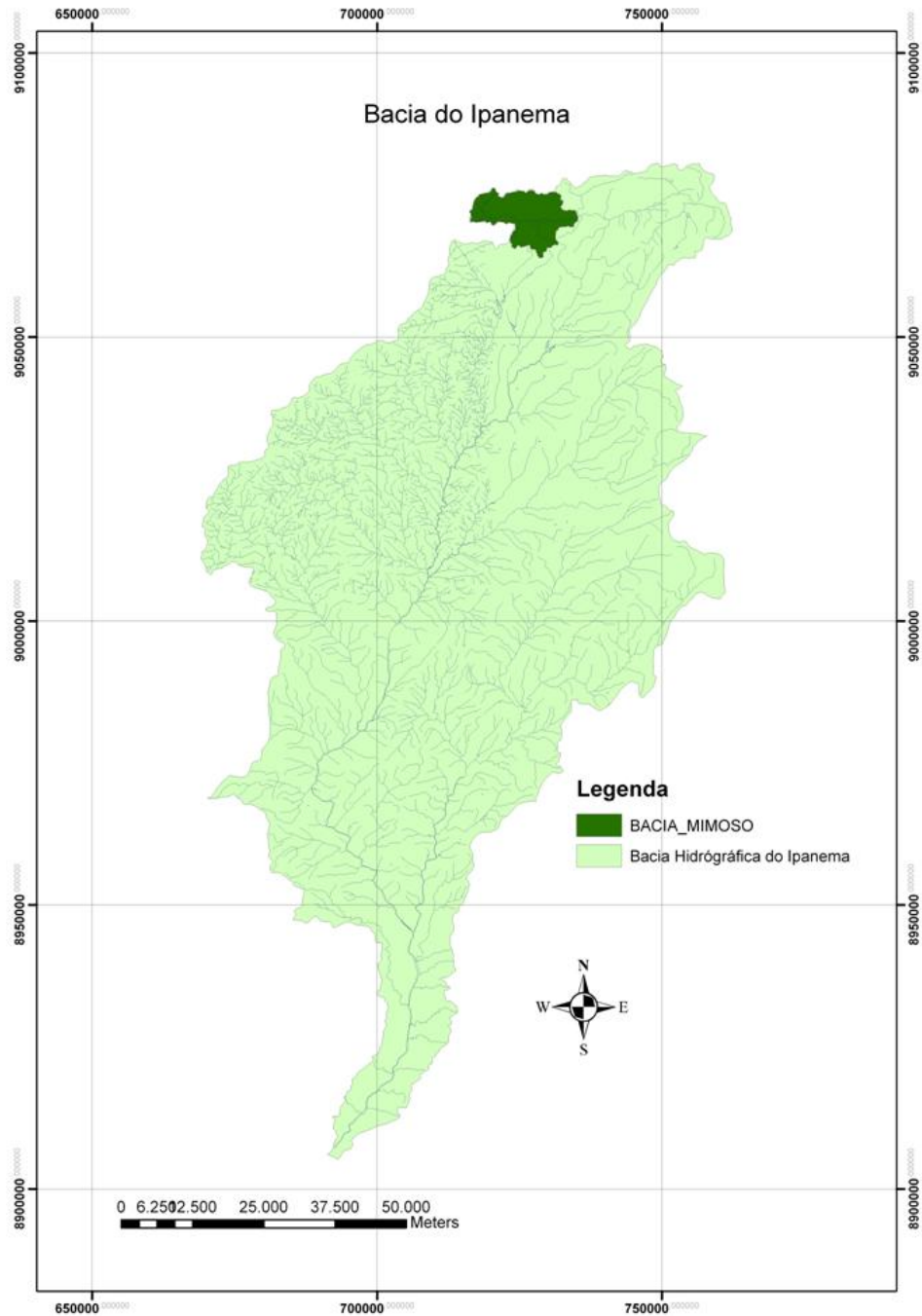


Figura 5. Bacia hidrográfica do Mimoso localizada na Bacia do Ipanema.

A Figuras 6 e 7 apresentam, respectivamente, a declividade e a rede de drenagem da Bacia do Mimoso. Os mapas de declividade representam as medidas do gradiente de declividade do terreno e auxiliam no estudo das condições de susceptibilidade a elevação aos processos erosivos.



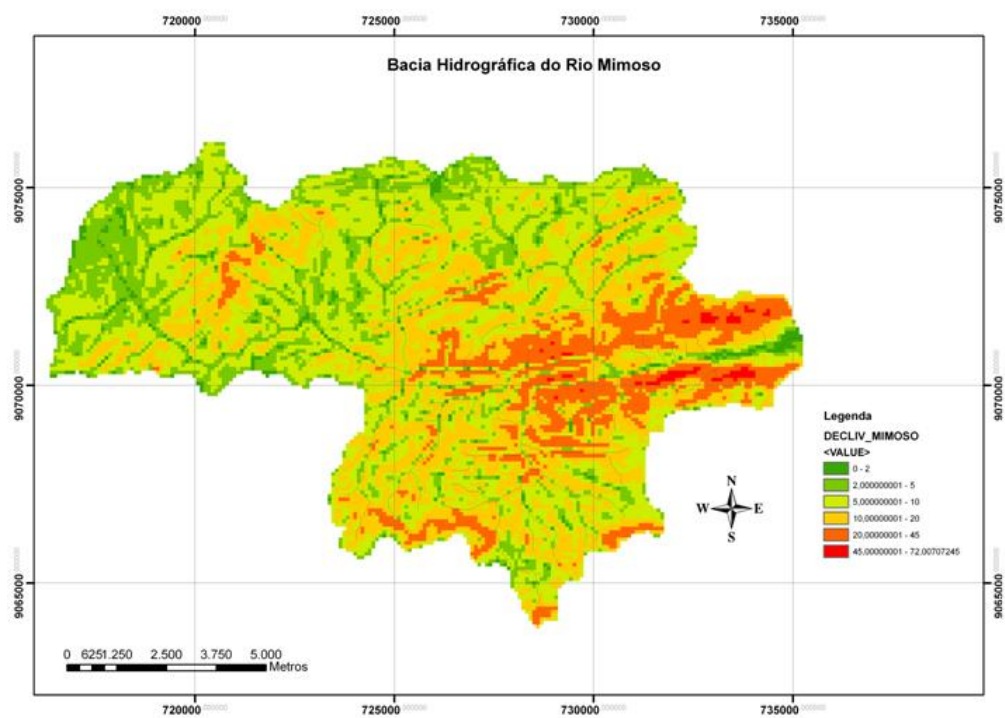


Figura 6. Declividade da Bacia do Mimoso.

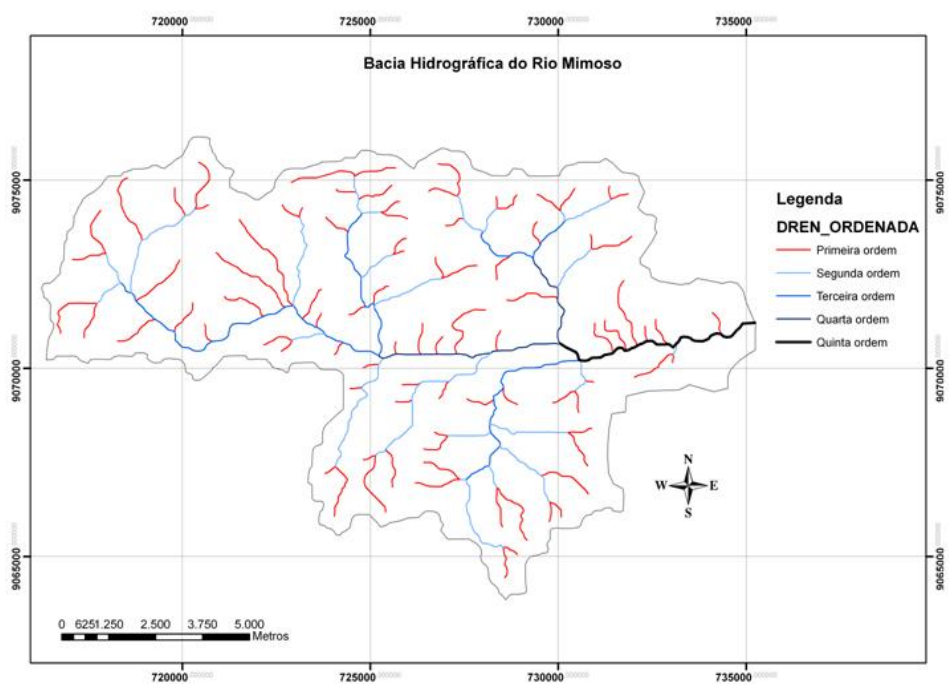


Figura 7. Rede de drenagem da Bacia do Mimoso quanto a sua ordem.

#### 4.2.1. Forma e características físico-hídricas da Bacia do Mimoso

As características de área, perímetro da bacia, comprimento do curso de água, as cotas máxima e mínima, a declividade do riacho, e a declividade da Bacia do Mimoso foram determinadas através do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), utilizando o programa ArcGis 13.1.

Para esse estudo foram avaliados os índices para caracterizar a bacia. A forma da bacia influencia o escoamento superficial e, conseqüentemente, o hidrograma resultante de uma determinada chuva.

O coeficiente de Compacidade ( $K_c$ ) é relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia (Equação 1)

$$k_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

em que:  $K_c$  = coeficiente de compacidade (-);  $P$  = perímetro da bacia (km);  $A$  = área da bacia (km<sup>2</sup>).

Caso não existam fatores que interfiram, os menores valores de  $K_c$  indicam maior potencialidade de produção de picos elevados de enchentes. Um coeficiente mínimo igual à unidade correspondente a uma bacia circular.

Para obter o Índice de conformação (Fator de forma), foi utilizada a Equação 2. Esse índice corresponde à relação entre a área da bacia e o quadrado de seu comprimento axial, medido ao longo do curso d'água desde a desembocadura até a cabeceira mais distante do divisor de água.

Esse é um índice da maior ou menor tendência para enchentes de uma bacia. Um valor de fator de forma muito baixo é menos sujeita a enchente que outra de mesmo tamanho, porém com maior fator de forma.

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

em que:  $F_f$  = fator de forma (-);  $A$  = área da bacia (km<sup>2</sup>);  $L$  = comprimento axial (km).

Para o cálculo da densidade de drenagem, que indica a eficiência da drenagem na Bacia, foi utilizada a Equação 3. Ela é definida como a relação entre o comprimento total dos cursos d'água e a área de drenagem.

$$Dd = \frac{L}{A} \quad (3)$$

em que:  $Dd$  = densidade de drenagem (km/km<sup>2</sup>);  $L$  = comprimento dos cursos d'água (km);  $A$  = área de drenagem (km<sup>2</sup>).

A bacia tem maior eficiência de drenagem quanto maior for essa relação. Embora existam poucas informações sobre a densidade de drenagem de bacias hidrográficas, pode-se afirmar que este índice varia de 0,5 km/km<sup>2</sup>, para bacias com drenagem pobre, a 3,5 ou mais, para bacias excepcionalmente bem drenadas.

O tempo de concentração ( $T_c$ ) da bacia foi calculado pela Equação 4, de Hathaway, de acordo com Ponce (1989):

$$T_c = \frac{0,606(L \cdot n)^{0,467}}{S^{0,234}} \quad (4)$$

em que:  $T_c$  = tempo de concentração (horas);  $L$  = comprimento da bacia em (km);  $n$  = fator de rugosidade promovido pela cobertura vegetal e  $S$  = declividade média do principal curso d'água (m m<sup>-1</sup>).

Segundo Melo (2008) recomenda-se o valor de rugosidade de 0,2 para bacia com cobertura vegetal escassa, com pequenas áreas de caatinga arbustiva arbórea (moderadamente descoberta), e com culturas de sequeiro no restante da área, e criação extensiva de pequenos animais.

### 4.3. Clima

De acordo com a classificação de Köppen, o clima na região é do tipo BSs'h' (extremamente quente, semiárido), com precipitação total anual média de 730 mm e

evapotranspiração potencial anual média de 1683 mm (Montenegro & Montenegro, 2006). A Tabela 1 apresenta os dados climatológicos da área.

Tabela 1. Dados climáticos do município de Pesqueira (PE). Médias mensais de 30 anos. (P= precipitação média; T= temperatura média; ETP= evapotranspiração potencial).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
<b>P (mm)</b>	51	91	86	121	101	81	72	37	23	19	18	29	730
<b>T (°C)</b>	25	24	24	23	22	21	20	20	22	23	24	24	23
<b>ETP (mm)</b>	164	147	153	133	122	106	110	125	140	159	160	163	1683

Fonte: Hargreaves (1974), citado por Montenegro et al. (2003).

Particularmente para a região semiárida, a precipitação tem caráter extremamente variável tanto no aspecto temporal como espacial. O clima da região semiárida é caracterizado pela insuficiência de chuvas e pela extrema irregularidade quanto à sua distribuição temporal. Essas chuvas são concentradas em uma única estação, com cerca de 90% dos totais anuais acontecendo em seis meses, e uma variação em torno de 30% dos totais pluviométricos anuais (CIDREIRA et al., 2006).

Os eventos chuvosos ocorrem durante os meses de Abril a Agosto, salientando que os eventos extremos usualmente ocorrem de Janeiro a Março, ao final da estação seca, com chuvas de alta intensidade e de curta duração, resultando em elevado risco de perda de solo.

A região apresenta um período seco que ocorre de setembro a março, e um período chuvoso com chuvas de baixa intensidade. As atividades de agricultura de sequeiro, na região, iniciam-se com as primeiras chuvas do ano, coincidindo com os maiores percentuais de chuvas erosivas (SANTOS et al., 2006). Segundo Bastos et al. (2009), a região semiárida nordestina, embora possua alto potencial para agricultura, apresenta regime irregular de chuvas e elevada taxa de evaporação.

Lira et al. (2006), analisando as variações da precipitação nos municípios de Cabrobó, Garanhuns e Triunfo em Pernambuco, notaram que as chuvas são bastante irregulares no tempo e com grande variabilidade temporal. Verificou-se que o mês de julho apresenta a maior média histórica com 130,9 mm, e que contribui significativamente na precipitação da região.

#### 4.4. Vegetação e ocupação do solo

A vegetação predominante é a caatinga hipoxerófila, com presença de cactáceas e bromeliáceas (MONTENEGRO et al., 2009b).

As Figuras 8 e 9 ilustram e apresentam, respectivamente a vegetação típica da região em estudo e no que diz respeito a ocupação do solo bacia do Mimoso.



Figura 8. Vista parcial da vegetação da região em estudo durante o período chuvoso.

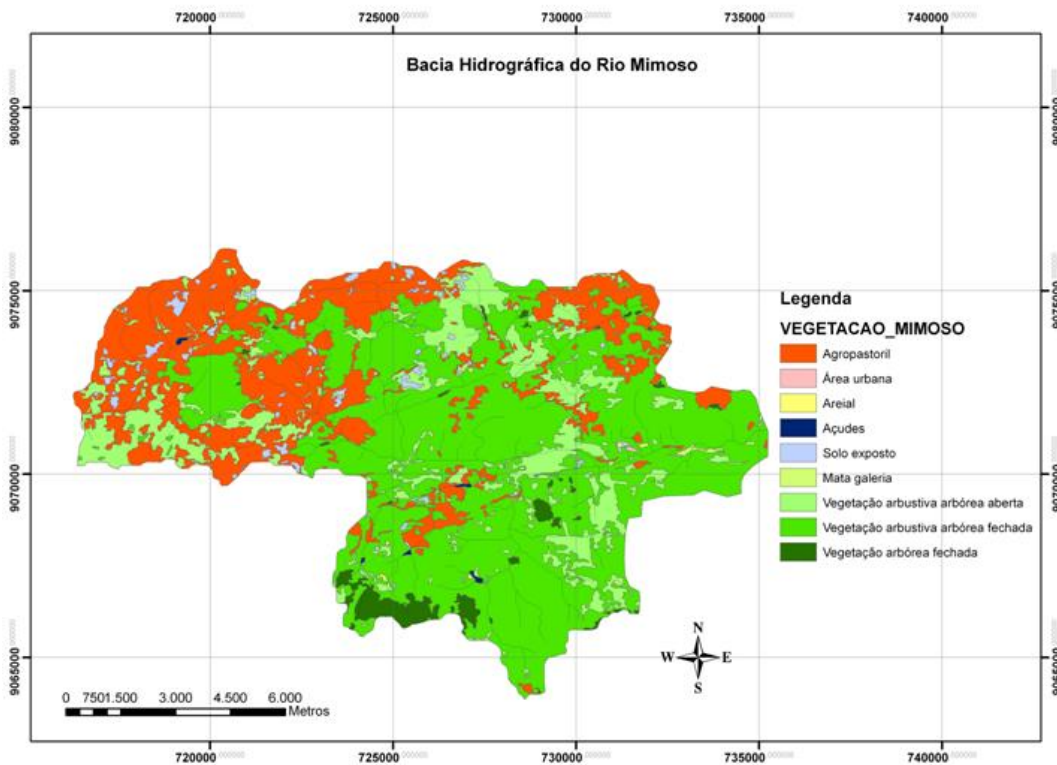


Figura 9. Mapa de uso e ocupação da Bacia do Mimoso.

#### 4.5. Solos

O Estado de Pernambuco possui uma grande diversidade de tipos de solos. Isso acontece porque o Estado ocupa uma ampla faixa no sentido leste-oeste (cerca de 700 km), estendendo-se desde regiões mais úmidas a leste, até regiões mais secas a oeste. Associadas às variações de clima, ocorrem, também, expressivas variações de geologia e relevo em todo o território, contribuindo para a diversificação dos solos, em termos de profundidade, cor, textura, estrutura, consistência, drenagem, pedregosidade e fertilidade natural. Essa diversidade de características confere aos ambientes variações nas potencialidades e condições de uso, manejo e conservação dos solos (IPA, 2008).

Com base no Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado de Pernambuco (EMBRAPA, 1973), observa-se a ocorrência de diversas classes de solos como: Latossolos, Argissolos, Nitossolos, Chernossolos, Luvisolos, Planossolos, Cambissolos, Vertissolos, Gleissolos, Espodossolos, Neossolos Flúvicos, Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos, e Neossolos Quartzarênicos.

Com base em mapa de reconhecimento de baixa e média intensidade de solos do município de Pesqueira-PE (EMBRAPA, 2000) (Figura 10), verifica-se a predominância de Argissolos, Planossolos, Neossolos e Cambissolos no município. Os solos característicos e/ou representativos da Bacia Experimental do Mimoso, que está inserida no município de Pesqueira-PE, são: Argissolos Vermelho-Amarelos, Argissolos Amarelos, Neossolos Flúvicos, Neossolos Regolíticos e Neossolos Litólicos.

Na Tabela 2 a apresentada às características físicas e hidrodinâmicas dos principais solos da Bacia do Mimoso das camadas superficiais do solo.

Tabela 2. Características físicas e hidrodinâmicas dos principais solos da Bacia do Mimoso.

Solos	Horizontes	Areia g/kg	Silte g/kg	Argila g/kg	C.C.	P.M.P
Neossolo Flúvico	0-16	223	465	232	22,69	9,58
Neossolo Flúvico	16-49	318	390	217	18,54	7,92
Neossolo Regolítico	0-17	81	8	11	6,03	2,19
Neossolo Regolítico	17-45	71	16	13	5,92	2,02

Fonte: CORRÊA & RIBEIRO, (2001).

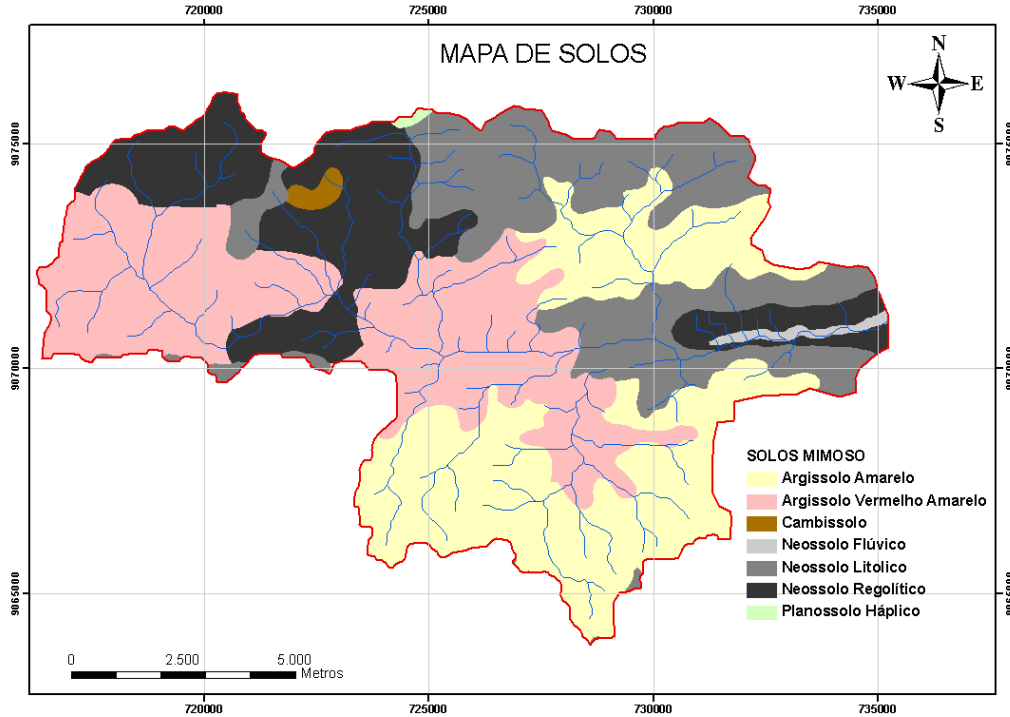


Figura 10. Mapa de solos da Bacia do Mimoso, e os tipos de solos presentes. Fonte: EMBRAPA (2000), citado por Silva et al. (2009).

#### 4.6. Medições hidrológicas

A Bacia do Rio Mimoso está equipada com dois pluviômetros automáticos, modelo TB4-L Rain Gauge da Campbell Scientific, com resolução de 0,254 mm (Figura 11a), e um pluviômetro automático, modelo Raindatlogger (Figura 11b). No limite de jusante, estação automática registra informações climatológicas tais como precipitação, umidade, radiação solar, velocidade e direção do vento, e temperatura (Figura 12). Na Figura 13 é apresentada a disposição dos pluviômetros na Bacia do Mimoso. Nota-se que o número de pluviômetros na Bacia ainda é insuficiente para uma plena caracterização de sua precipitação média. Entretanto, para os objetivos deste estudo, assume-se que os eventos registrados nas estações como representativos da bacia.

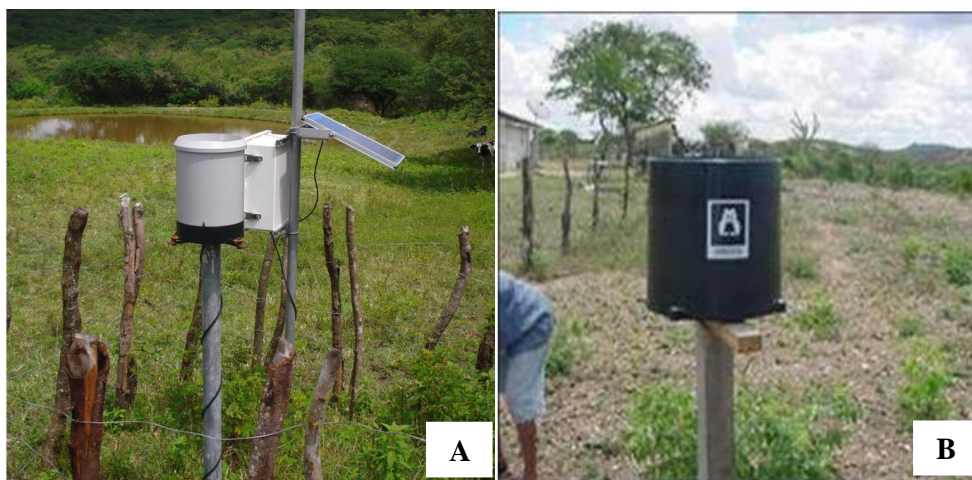


Figura 11. Pluviômetro automático da Campbell Scientific (A) pluviômetro automático modelo Raindata logger (B).



Figura 12. Estação total localizada na Fazenda Nossa Senhora do Rosário.



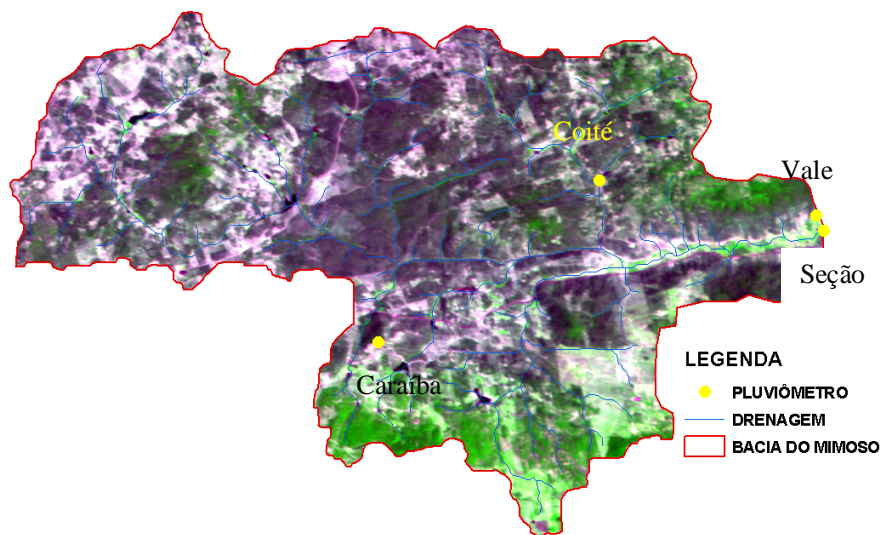


Figura 13. Disposição dos pluviômetros na Bacia do Mimoso

#### 4.6.1. *Instalação da estação fluviométrica*

Para caracterização do escoamento superficial da bacia hidrográfica do Riacho Mimoso, foi montada uma estação fluviométrica automática (Figura 14). A estação foi instalada em um trecho retilíneo, sem perturbações de pedras ou outro tipo de barreiras que pude-se interferir nos registros da estação. A estação constitui-se de um sensor de nível de pressão (linígrafo), colocado no leito do riacho, onde foi instalado em poço tranquilizador em sua seção de controle, para conhecimento dos regimes de nível e vazão, e de um pluviômetro automático para registro dos valores de precipitação e de sua duração. Os dados coletados por esses instrumentos são registrados automaticamente em um Datalogger (Hidromec), que também compõe a estação, e que é alimentado por uma célula fotoelétrica e por bateria auxiliar de 12 volts.



Figura 14. Detalhe da estação fluviométrica instalada na bacia do Riacho Mimoso, constando de Datalogger (A), célula fotoelétrica (B), pluviógrafo (C) e sensor de nível (linígrafo) (D), e poço tranqüilizador (E).

#### 4.6.2. *Sensor de Nível e Leitura Manual*

Para verificar a precisão das medições de nível da seção do Mimoso, foi realizada calibração do sensor.

Para a realização do teste foi utilizado uma coluna de PVC de 2m de altura (Figura 15), onde o sensor foi imerso a cada 10 cm, com um tempo de dez minutos em cada nível, tendo em vista que o datalogger está programado para armazenar dados a cada cinco minutos. Com isso, pode-se obter duas leituras em cada ponto. Foram realizadas um total de dez repetições em diferentes dias e horários, tendo em vista que o efeito barométrico é maior em períodos mais quentes.

Com a finalidade de eliminar o efeito barométrico na estação de medição, foi instalada uma garrafa de Mariotte (Figura 16), interligando o equipamento com o meio externo.

Foram feitas, quase que diariamente, pelo técnico de campo, leituras de lâminas em régua linimétrica localizada a jusante do linígrafo automático, para conferência dos valores registrados pelo linígrafo de pressão.

A comunicação do poço tranquilizador com a água do Riacho Mimoso foi estabelecida através de um tubo de 100 mm localizado no leito do rio, com uma tela fixada na entrada do tubo, para diminuir a entrada de sedimento, evitando com isso erros nos registros do sensor.



Figura 15. Coluna de PVC com altura de dois metros, para calibração do sensor.



Figura 16. Garrafa de Mariotte instalada no sensor de nível.

#### 4.7. Obtenção da curva-chave

##### 4.7.1. Determinação das descargas líquida ( $Q_l$ ) e sólida ( $Q_s$ )

Para determinação das variáveis hidráulicas de altura, vazão e velocidade do escoamento do Riacho Mimoso, foram realizadas campanhas de medição direta, durante o período chuvoso do ano de 2009 e 2010, contabilizando 22 campanhas de medição de descarga líquida. De maneira concomitante, foram realizadas amostragens para determinação do fluxo de sedimento suspenso, baseado na concentração de sedimento suspenso ( $C_{ss}$ ).

Em seguida serão descritos, em dois tópicos, os procedimentos adotados nas campanhas de medição das Descargas Líquida e Sólida do riacho Mimoso.

##### 4.7.2. Amostragem de sedimentos suspensos

As coletas de amostras de sedimentos em suspensão foram realizadas com o emprego de um amostrador de sedimentos (modelo DH-48) (Figura 17), o mais adequado para as características do escoamento no Riacho do Mimoso, por ocasião dos eventos de descarga a vau, devido às pequenas dimensões do riacho. Essas coletas foram feitas de maneira concomitante ao processo de determinação da descarga líquida.



Figura 17. Amostrador de coleta de sedimento em suspensão DH-48.

#### 4.7.3. Medição direta da descarga líquida ( $Q_l$ )

Para o cálculo da velocidade e da vazão líquida na seção do Riacho Mimoso foi utilizado um molinete HIDROMEC em conjunto com um contador de pulsos da HIDROMETRIA (Figura 18).

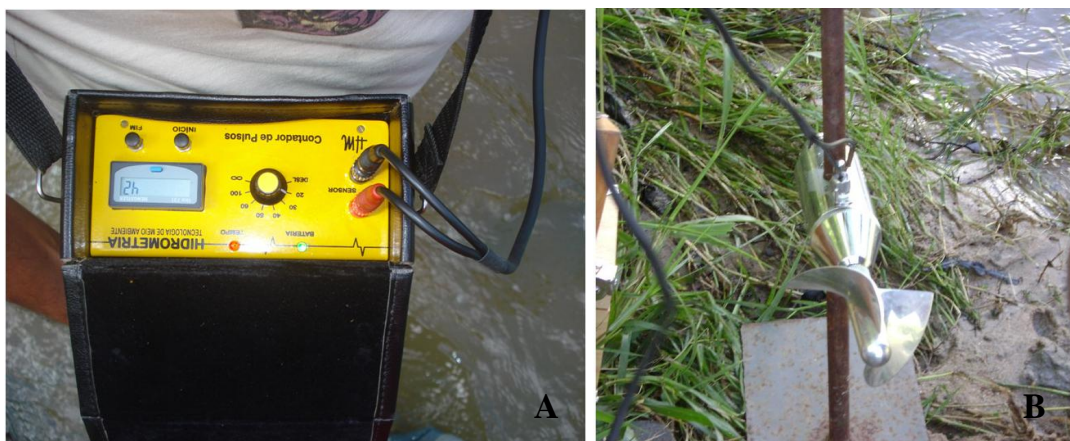


Figura 18. Contador de pulsos marca HIDROMETRIA (A); Molinete da HIDROMEC (B).

Durante as campanhas de avaliação da descarga líquida do Riacho Mimoso, a seção foi dividida em verticais de mesma largura, com 50 ou 100 cm, variável em função da largura total da superfície livre no instante da avaliação, de acordo com os critérios propostos por Edwards & Glysson (1999).

Para auxiliar na divisão da seção e identificação dos pontos de tomada de profundidade, e determinação de velocidade (Figura 19), foi fixada uma trena na margem esquerda do riacho, onde o ponto zero da escala era o início da lâmina d'água.



Figura 19. Régua utilizada na determinação da largura da seção e na localização dos pontos de determinação de velocidade e profundidade do escoamento.

Considerando cada vertical como uma parte distinta da seção, a profundidade da lâmina d'água foi determinada no seu início e fim (para obtenção das arestas perpendiculares à superfície do escoamento, utilizadas na determinação da área de cada vertical), além da profundidade no seu centro a qual foi utilizada para determinar o ponto (profundidade) no qual deveria ser posicionado o molinete, para determinação da velocidade do escoamento na área de influência de cada vertical.

A velocidade média do escoamento ( $\text{m s}^{-1}$ ), para cada vertical, foi determinada através do emprego do molinete fluviométrico (Figura 20), posicionado em pontos distintos entre as verticais que compunham uma mesma seção, de acordo com a Tabela 3. O número de pontos onde deve ser posicionado o molinete depende da profundidade do escoamento em cada vertical avaliada. O intervalo de tempo para contagem do número de rotações da hélice do molinete, necessário para calcular a velocidade média utilizando a equação de calibração do instrumento, foi de 20 segundos, sendo realizadas cinco leituras para cada ponto amostrado na vertical. A contagem do número de rotações da hélice foi realizada pelo contador eletrônico de pulso.

Tabela 3. Posição do molinete na vertical em relação à profundidade.

Profundidade (m)	Posição
0,15 a 0,60	0,6P
0,60 a 1,20	0,2P e 0,8P
1,20 a 2,00	0,2P; 0,6P e 0,8P
2,00 a 4,00	S; 0,2P; 0,4P; 0,6P e 0,8P
Acima de 4,00	S; 0,2P; 0,4P; 0,6P; 0,8P e F

A posição S (superfície) corresponde à profundidade de 0,10m, e a posição F (fundo) corresponde àquela determinada pelo comprimento da haste de sustentação do lastro.



Figura 20. Determinação da velocidade do escoamento utilizando um molinete fluviométrico e contador eletrônico de pulsos.

As vazões ou descargas líquidas (Ql) do Riacho Mimoso foram determinadas pela soma do produto entre os valores de velocidade média do escoamento ( $m s^{-1}$ ) para cada vertical que compõe a seção, e sua respectiva área de influencia ( $m^2$ ) (Equação 5). A área de influência de cada vertical foi determinada por equivalência a retângulos, onde as arestas foram definidas como sendo a largura da vertical e a sua profundidade, e por

semelhança com triângulo retângulo para as verticais das margens (primeira e última verticais).

$$Ql = \sum Ql_i = \sum \left( A_i \cdot \bar{V}_i \right) \quad (5)$$

em que:  $Ql$  = descarga líquida total ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ),  $Ql_i$  = descarga líquida de cada vertical ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ),  $A_i$  = área de influência de cada vertical ( $\text{m}^2$ ) e  $\bar{V}_i$  = velocidade média do escoamento em cada vertical ( $\text{m s}^{-1}$ ).

#### 4.8. Produção da curva-chave

A partir dos dados obtidos durante as campanhas de medição direta referentes à altura do escoamento por evento, e de sua respectiva descarga líquida, podem ser desenvolvidas as relações entre altura e vazão locais (curva-chave). Uma segunda relação entre vazão e a descarga sólida em suspensão foi obtida utilizando o maior dado registrado pelo linígrafo e armazenados no datalogger que compõe a estação fluviométrica.

Para determinação da vazão através do maior registro do linígrafo foi utilizada a equação de Manning (Equação 6). Onde se estimou o coeficiente de rugosidade, pela equação, conhecendo-se os parâmetros geométricos ( $A$ ,  $R_h$  e  $I$ ) e hidráulicos ( $Q$ ) de cada medição, das vinte e duas campanhas realizadas na seção do Riacho Mimoso.

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (6)$$

em que:  $Q$  = vazão ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ),  $n$  = coeficiente de rugosidade de Manning ( $\text{s m}^{-1/3}$ ),  $A$  = área da seção transversal ( $\text{m}^2$ ),  $R$  = raio hidráulico ( $\text{m}$ ) e  $I$  = declividade da linha de energia ( $\text{m m}^{-1}$ ).

#### 4.9. Fluxo de sedimento suspenso

O método de amostragem adotado foi o de obtenção de uma amostra simples por vertical, onde o objetivo é representar a concentração de sedimentos em suspensão ( $C_{ss}$ ) média para cada vertical, realizada pelo método de locação de verticais chamado “Igual Incremento de Largura (IIL)”. A amostragem foi realizada no ponto central de cada



vertical (Figura 21). Como a coleta de sedimentos em suspensão foi realizada juntamente com a determinação da descarga líquida, o seccionamento da seção de controle foi o mesmo, e o ponto de coleta com o amostrador foi o mesmo no qual foi tomada a velocidade média do escoamento ( $\bar{v}_i$ ) das verticais.

Segundo Carvalho et al. (2005) a utilização, deste método garante que o volume da amostra individual coletada em cada vertical seja proporcional à velocidade média onde foi realizada a amostragem. Dessa forma, deve-se utilizar o mesmo bico do amostrador para as amostragens em todas as verticais.



Figura 21. Coleta para determinação da concentração de sedimento em suspensão ( $C_{ss}$ ) utilizando o amostrador DH-48.

Durante a amostragem, o amostrador de sedimentos (DH-48) foi submergido no centro da seção vertical, com o posicionamento da haste completamente perpendicular a lâmina do escoamento, em um trajeto de velocidade constante de descida e subida por toda vertical.

A velocidade de trânsito foi calculada a partir do ajuste proposto pelo Edwards & Glysson (1999) (Equação 7):

$$V_t = \bar{V}_i \cdot k \quad (7)$$

em que:  $Vt$  = razão ou velocidade de trânsito ( $m\ s^{-1}$ );  $\bar{V}i$  = velocidade média do escoamento na vertical amostrada ( $m\ s^{-1}$ ) e  $K$  = a constante de proporcionalidade, variável em função do diâmetro do bico do amostrador (0,1036 para o bico de  $\frac{1}{4}$ ", do amostrador que foi utilizado).

Entretanto, pelo fato da velocidade de trânsito ser de difícil percepção, a partir da mesma foi obtido o tempo de percurso de ida e volta do amostrador da superfície da lâmina até o fundo do leito do riacho, pela seguinte expressão (Equação 8) (CARVALHO et al., 2000; MERTEN & POLETO, 2006):

$$t = \frac{2 \cdot p}{Vt} \quad (8)$$

em que:  $t$  = tempo mínimo para realização da amostragem (s);  $p$  = profundidade da vertical de amostragem (m) e  $Vt$  = velocidade de trânsito ( $m\ s^{-1}$ ).

#### **4.10. Determinação da concentração de sedimentos em suspensão (C<sub>ss</sub>)**

O volume coletado em cada vertical foi armazenado em potes plásticos, identificados e pesados no laboratório. Cada pote foi pesado com todo o volume de água e sedimento coletados, em uma balança semianalítica com precisão 0,001 g.

Após pesagem, foram adicionados 2,5 a 5 ml de sulfato de alumínio por pote, de acordo com o volume que variavam de 500 a 1000 ml respectivamente, permanecendo em repouso por vinte e quatro horas para ocorrer à decantação. Em seguida, foi retirado o excesso de água e os potes foram colocados em estufa, regulada em 65°C, onde permaneceram até evaporar toda água. Quando secos, contendo apenas o sedimento, os potes foram então novamente pesados.

Os valores de concentração, em cada uma vertical que compõe a seção, foram determinados pela relação entre a massa do sedimento e o volume da amostra coletado, como mostra a expressão (Equação 9).

$$C_{ss} = \frac{P_{sed}}{Vol_{amostra}} \quad (9)$$

em que:  $C_{ss}$  = concentração de sedimento em suspensão na vertical amostrada ( $\text{mg L}^{-1}$ );

$P_{sed}$  = peso do sedimento (mg) e  $Vol_{amostra}$  = volume da amostra (L).

4.10.1. *Descarga sólida em suspensão ( $Q_{ss}$ ) e produção de sedimentos suspenso ( $Y_{ss}$ ).*

Os valores de descarga sólida em suspensão ( $Q_{ss}$ ) foram determinados pelo somatório do produto entre a concentração de sedimento suspenso ( $C_{ss}$ ) e a respectiva descarga líquida ( $Q_l$ ) de cada vertical, utilizando a mesma equação proposta por Carvalho (2008) (Equação 10).

$$Q_{ss} = \sum \left( C_{ss_i} \cdot Q_{l_i} \right) \cdot 0,0864 \quad (10)$$

em que:  $Q_{ss}$  = descarga sólida em suspensão ( $\text{t dia}^{-1}$ );  $C_{ss_i}$  = concentração de sedimento em suspensão da vertical ( $\text{mg L}^{-1}$ ) e  $Q_{l_i}$  = descarga líquida da respectiva vertical ( $\text{L s}^{-1}$ ).

A produção de sedimento suspenso ( $Y_{ss}$ ), que representa todo sedimento suspenso que saiu da Bacia do Mimoso em todo ano, foi obtida pela expressão proposta por Melo (2008) na equação 11.

$$Y_{ss} = \frac{Q_{ss} \cdot X}{A} \quad (11)$$

em que:  $Y_{ss}$  = produção de sedimento suspenso ( $\text{t km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$  ou  $\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ );  $Q_{ss}$  = descarga sólida em suspensão ( $\text{t dia}^{-1}$ );  $X$  = número de dias do ano em que houve escoamento no Riacho Mimoso, registrados pelo linígrafo ( $\text{dias ano}^{-1}$ ) e  $A$  = área da bacia ( $\text{km}^2$  ou ha).

#### 4.11. Curva-chave de sedimento suspenso

A relação entre os valores de descarga sólida em suspensão ( $Q_{ss}$ ) e os valores de descarga líquida ( $Q_l$ ) por evento amostrado, chamada de curva-chave de sedimento suspenso, pode ser obtida através do ajuste de curvas, utilizando-se os valores referentes às medições de avaliação direta do Riacho Mimoso.

Com os valores de descarga sólida de cada campanha de medição, foram traçadas as curvas-chave de sedimentos ( $Q_{ss}$  x  $Q_l$ ) para a seção do Mimoso. Segundo Carvalho et al. (2000), as curvas-chave têm comumente a forma de potência, como mostra a equação (12).

$$Q_{ss} = a \cdot Q^b \quad (12)$$

em que:  $a$  e  $b$  são constantes de ajuste.

Como não foram realizadas medidas acima das cotas registradas pelo linígrafo, houve a necessidade de extrapolar a curva-chave de sedimento em suspensão, para que fosse possível a quantificação desses valores.

#### 4.12. Sedimento de leito (Medição a vau)

A medição de sedimento de leito foi realizada utilizando-se um amostrador portátil BLH-84 do tipo Helley Smith (Figura 22).





Figura 22. Amostrador de leite BLH-84 tipo Helley Smith.

Foi confeccionado o amostrador de chapa de ferro no Laboratório de Água e Solo (UFRPR), tipo “diferencial de pressão”. Consiste de duas caixas abertas nas extremidades, de fundo plano, soldadas, sendo uma delas um paralelogramo de 7,5 x 7,5 cm de boca, com 9 cm de comprimento, encaixado na segunda caixa em formato de tronco de cone, tendo 13 cm de comprimento, expandida lateralmente e na vertical, com expansão final na saída de 1,5 vezes à de entrada. Presa ao cone, na boca expandida, fica uma saca de náilon com malha de 250  $\mu$ , tendo cerca de 60 cm de comprimento. O amostrador possui quatro hastes de 50 cm, com roscas em sua extremidade, possibilitando assim o uso a vácuo em diferentes situações.

Conforme Carvalho et al. (2005), para a realização da medição de descarga de leite foi adotado o processo de amostragem por integração, assim denominado pela colocação do amostrador no leite em diversas posições, por determinado tempo iguais e acúmulo do sedimento na saca; nesse caso, é conveniente que seja recolhido material suficiente para permitir análise. Na seção, optou-se pelas coletas nos mesmos pontos onde foram feitas as medições de sedimentos suspenso, sendo determinado um tempo de 1 min em cada ponto, o mesmo proposto por Wiegand (2009).

Depois de realizar as coletas em cada ponto, a saca foi amarrada em sua extremidade, e em seguida foi colocada dentro de um saco plástico por completo, formando assim uma única amostra. Foram realizadas quatro coletas de sedimento de leite durante o mês abril de 2010.

As amostras coletadas foram encaminhadas para o laboratório de água e solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, onde foram expostas para secagem, em

seguida foram pesadas, e feita a análise granulométrica por peneiramento, no laboratório de mecânica do solo da mesma Instituição.

#### 4.12.1. Cálculos de sedimento de leito (BLH-84)

Nesse processo por integração as sub-amostras foram reunidas na saca à medida que era feita a medição. A análise foi realizada pela determinação do peso seco de toda a amostra, e determinada a granulometria por peneiramento. A descarga e o material do leito foram calculados pela Equação (13), segundo Merten et al. (2008).

$$q_{sml} = \frac{m}{wt} \quad (13)$$

em que:  $q_{sml}$  = descarga sólida do material do leito ( $\text{g s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ),  $m$  = massa seca de sedimentos coletada nas medições (g),  $w$  = largura do bocal do equipamento (m) e  $t$  = tempo total de amostragem referente às amostras (s).

#### 4.12.2. Produção de sedimento de fundo (Medições indireta)

Para determinar a descarga do leito foram realizadas quatro coletas de amostras do material do leito.

As cargas de fundo foram estimadas através da aplicação de duas equações de transporte de sedimentos por arraste; a de Kalinske e a de Shields, apresentadas em Simons & Senturk (1992).

A equação de Kalinske, que é baseada em turbulência, é determinada pela seguinte expressão:

$$\frac{q_s}{U^* \cdot d} = f\left(\frac{\tau_c}{\tau}\right) \quad (14)$$

em que:  $q_s$  = descarga sólida ( $\text{Kg s}^{-1}$ );  $d$  = diâmetro da partícula do sedimento,  $d_{50}$  (m),  $U^*$  = velocidade de cisalhamento ( $\text{m s}^{-1}$ );  $\tau$  = tensão de cisalhamento do escoamento

sobre o leito ( $\text{N m}^{-2}$ ), e  $\tau_c$  = tensão crítica de cisalhamento, abaixo da qual não existe erosão ( $\text{N m}^{-2}$ ), obtida pela relação proposta pelo autor:

$$\tau_c = 0,12 \cdot \gamma_s \cdot d_{50} \quad (15)$$

em que:  $\gamma_s$  = peso específico do sedimento submerso ( $\text{N m}^{-3}$ ) e  $d_{50}$  = diâmetro característico do sedimento (m).

Já a equação semi-empírica de Shields, para o transporte sólido de fundo tem a seguinte expressão:

$$\frac{q_s \cdot \gamma_s}{q \cdot \gamma \cdot S} = 10 \cdot \frac{\tau - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d} \quad (16)$$

em que:  $q_s$  = descarga sólida ( $\text{kg s}^{-1}$ );  $q$  = descarga líquida por unidade de largura ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ );  $d$  = diâmetro característico da mistura de sedimentos,  $d_{50}$  (m);  $\gamma$  e  $\gamma_s$  = peso específico da água e do sedimento ( $\text{N m}^{-3}$ );  $S$  = declividade do curso d'água ( $\text{m m}^{-1}$ );  $\tau$  = tensão de cisalhamento do escoamento sobre o leito ( $\text{N m}^{-2}$ ) e  $\tau_c$  = tensão crítica de cisalhamento, abaixo da qual não existe erosão, obtida no diagrama de Shields.

#### 4.12.3. *Determinação do diâmetro do sedimento*

O diâmetro dos sedimentos do Riacho Mimoso e sua curva de distribuição granulométrica foram determinados através de coletas de amostras no fundo do leito. Foram realizadas quatro coletas com material de aproximadamente 1 cm de espessura. No laboratório de Água e Solo – UFRPE, as amostras foram colocadas em estufa a  $105^\circ\text{C}$  até perder completamente a umidade, e em seguida foram retiradas sub-amostras de 100 g, para posterior peneiramento. O peneiramento seco das amostras foi realizado em 12 classes de tamanho, utilizando-se um agitador eletromagnético, equipado com um conjunto de peneiras com os seguintes diâmetros de abertura de malha: 2,00; 1,7; 0,85; 0,60; 0,425; 0,30; 0,212; 0,150; 0,106; 0,076; e 0,053 mm, a uma intensidade de 90 vibrações por segundo, por 10 minutos.

A fração de partículas em cada classe foi obtida dividindo-se a massa de partículas secas em uma determinada classe pela massa total de solo seco da amostra peneirada. Os resultados foram expressos em porcentagem. Com a distribuição de tamanho de partículas foi calculado o índice, que é um indicador do diâmetro médio de partículas. O índice foi calculado por computador através do programa Curva Expert, a partir do fornecimento da massa de partículas sólidas em cada classe de tamanho, em cada amostra.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Resultados das características físico-hídricas da Bacia do Mimoso

As características físico-hídricas da bacia para o presente estudo, obtidos através de sua delimitação, a partir do software Arc Gis 13.1, estão apresentados na Tabela 4. A bacia em estudo apresenta uma área equivalente a 63% da área da Bacia Representativa do Alto Ipanema, e 15,88 % da área da Bacia do Mimoso (Tabela 4).

Tabela 4. Características físico-hídricas da Bacia do Mimoso.

Características	Valor
Área	124,36 km <sup>2</sup>
Perímetro	65,10 km
Comprimento do curso de água	24,07 km
Coefficiente de compacidade ( $k_c$ )	1,63
Índice de conformação ( $F_f$ )	0,214
Cota máxima	995 m
Cota mínima	608 m
Declividade média da bacia	0,1109 m m <sup>-1</sup>
Declividade média do riacho principal	0,0129 m m <sup>-1</sup>
Densidade de drenagem	1,23 km/km <sup>2</sup>
Ordem dos cursos de água	5 <sup>a</sup> ordem
Tempo de concentração: Fórmula de Hathaway	3,49 h

De acordo com os valores obtidos, pode-se verificar que a bacia hidrográfica do Rio Mimoso mostra-se pouco susceptível a cheias em condições normais de precipitação, excluindo-se eventos de intensidades anormais, pelo fato do coeficiente de compacidade apresentar o valor afastado da unidade (1,63) e, quanto ao seu índice de conformação, exibir um valor baixo (0,214). Isso indica que a bacia não possui uma forma circular, mas sim aproximadamente alongada. Cardoso et al.(2006) obtiveram valores bem próximos para uma bacia hidrográfica do Rio Debossan, no Estado do Rio de Janeiro, com coeficiente de compacidade (1,58) e fator de forma (0,328).

A densidade de drenagem encontrada foi de 1,23 km/km<sup>2</sup>. De acordo com Villela & Mattos (1975), esse índice pode variar de 0,5 km/km<sup>2</sup> em bacias com drenagem pobre

a 3,5 km/km<sup>2</sup>, ou mais, em bacias bem drenadas, indicando que a bacia do Rio Mimoso possui uma baixa capacidade drenagem.

Christofolletti (1974) destaca que valores menores que 7,5 km/km<sup>2</sup> indicam baixa densidade de drenagem. Valores entre 7,5 e 10,0 km/km<sup>2</sup> significam média densidade. Já valores acima de 10,0 km/km<sup>2</sup>, representam alta densidade hidrográfica.

## 5.2. Uso do solo da Bacia do Mimoso

A cobertura vegetal possui um papel muito importante para a proteção e conservação dos recursos naturais, principalmente dos solos, e influencia a geração de escoamentos.

A Tabela 5 apresenta o uso do solo, em relação ao percentual total da Bacia do Mimoso.

Tabela 5. Uso do solo e vegetação característica na Bacia Experimental do Mimoso-Pesqueira – PE.

Segmento de uso	Área (km <sup>2</sup> )	%
Açudes	0,000154	0,0001
Agropastoril	32,80	26,4
Área urbana	0,0295	0,03
Areial	0,0853	0,08
Mata de galeria	0,186	0,15
Solo exposto	1,915	1,5
Caatinga Arbórea fechada	3,006	2,5
Caatinga Arbustiva arbórea aberta	19,277	15,6
Caatinga Arbustiva arbórea fechada	66,90	53,8
Total	124,21	100,0

## 5.3. Calibração do Sensor de nível

Foram realizadas oito calibrações do sensor de nível em dias e horários diferentes, tendo-se utilizado a média dessas leituras para obtenção da reta de regressão e da equação de calibração do nível da seção fluviométrica (Figura 23).

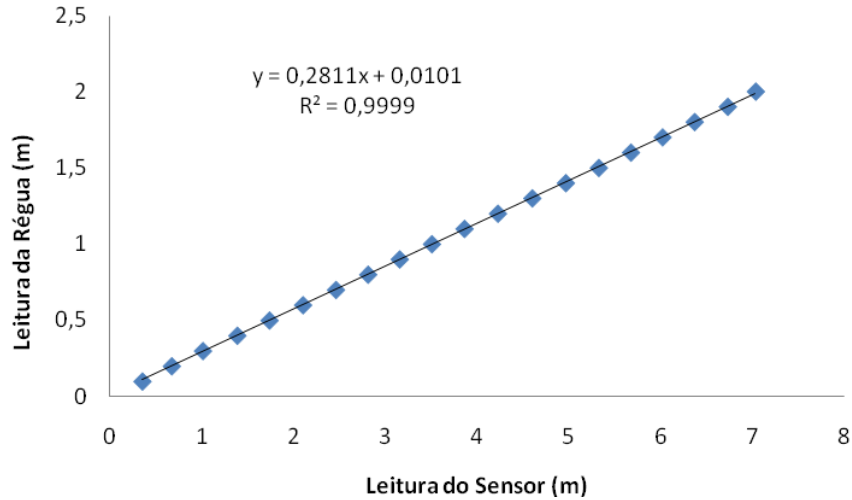


Figura 23. Equação de calibração do sensor tipo linear, instalada na Bacia Representativa do Mimoso.

Nas Figuras 24 e 25 encontram-se os valores registrados pelo sensor de nível e leituras medidas na régua linimétrica, para o ano de 2009 e 2010 respectivamente.

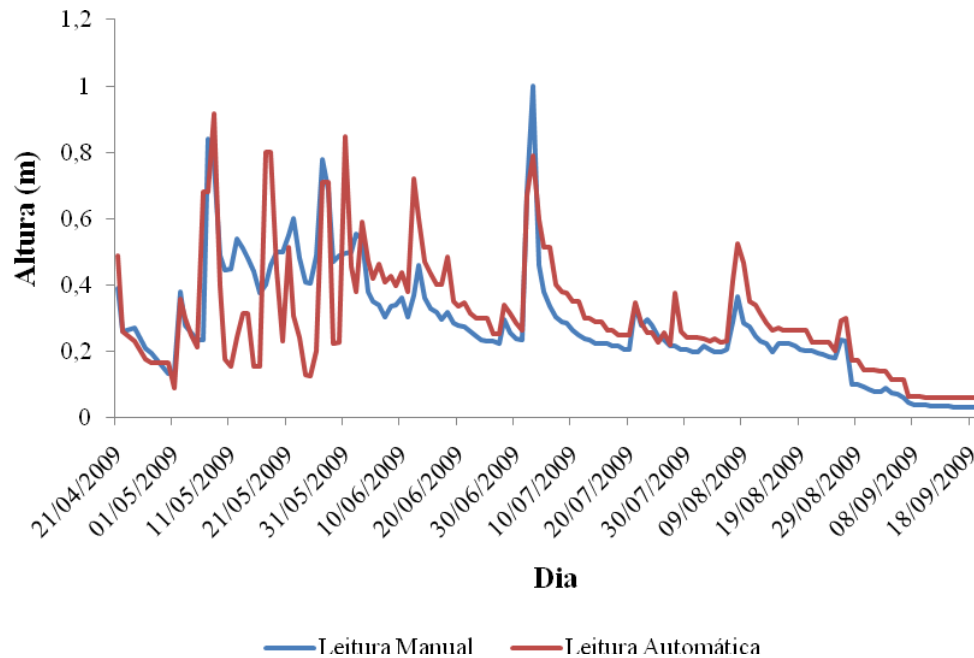


Figura 24. Leituras de níveis registrados pelo linígrafo e medidos na régua linimétrica para o ano de 2009.

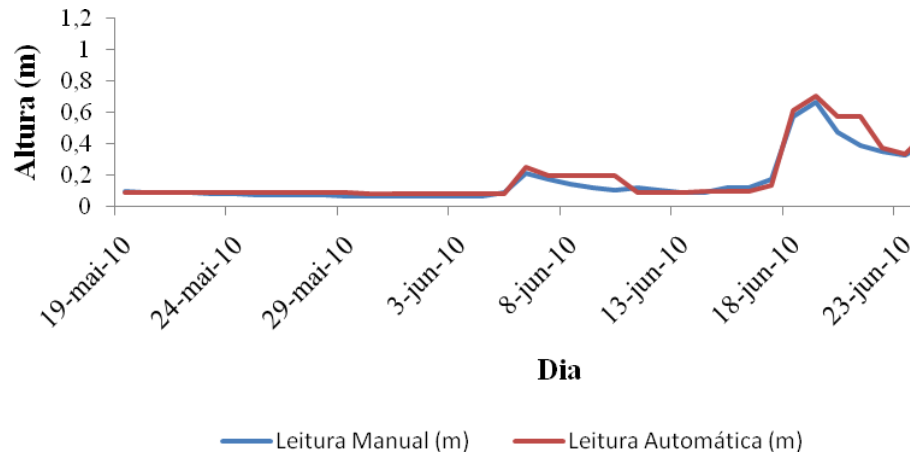


Figura 25. Leituras de níveis registrados pelo linígrafo e medidos na régua linimétrica para o ano de 2010.

Pode-se observar nas figuras supracitadas que as leituras automáticas possuem valores superiores as leituras manuais e leituras constantes nos postos de recessão das leituras manuais. Isso pode ser explicado pelo fato que, no ano de 2009 ocorreu acúmulo de sedimentos no poço tranquilizador, retardando a recessão do nível de água.

Para o ano de 2010 no início do escoamento as leituras manuais ficaram bem próximas aos registrados pelo linígrafo. Com o aumento da altura da lâmina durante o mês de junho, os valores registrados pelo linígrafo apresentaram-se constantes, o mesmo ocorrido em 2009. Verificando com isso a presença de sedimentos no poço tranquilizador para esse período.

#### 5.4. Resposta hidrológica da Bacia do Riacho Mimoso

Nessa seção será discutido o comportamento hidrológico da Bacia do Riacho Mimoso, a partir dos dados pluviométricos e de escoamento superficial do riacho, registrados na estação fluviométrica, durante os meses de março a agosto de 2009, e de janeiro a junho de 2010, período em que o Riacho Mimoso apresentou uma perenização temporária.

A distribuição mensal da precipitação pluviométrica registrada nos quatro pluviômetros na Bacia do Mimoso, para o período chuvoso do ano de 2009 e 2010, estão apresentadas nas Figuras 26 e 27, respectivamente. Nota-se que, para o ano de 2010, o período chuvoso não se encerrou no mês de junho, sendo este o último mês de

coleta, neste estudo. Para análise dos escoamentos na seção de controle, adotou-se a média aritmética das chuvas registradas.

Na Figura 26 observa-se o início das chuvas a partir de janeiro, e uma grande concentração de eventos entre os meses de abril a agosto de 2009.

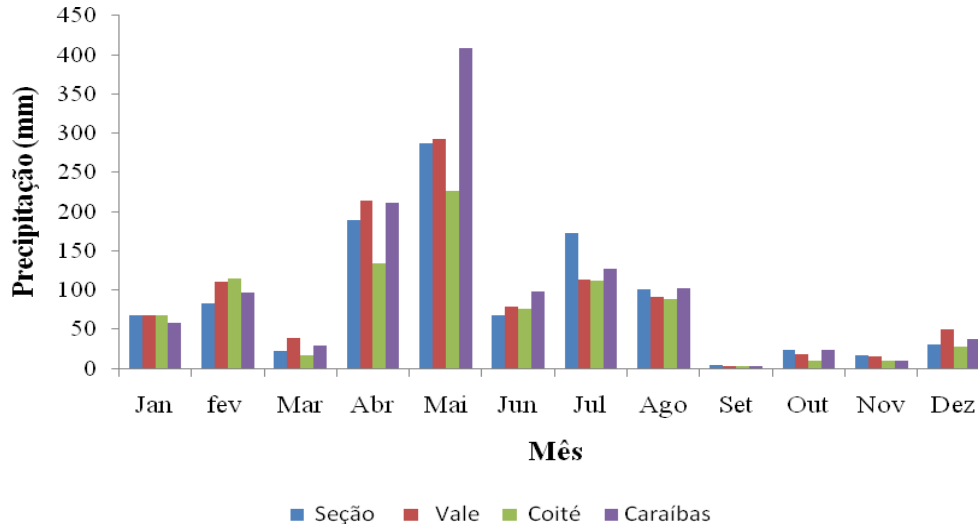


Figura 26. Distribuição do total mensal das chuvas para os quatros pluviômetros na Bacia do Riacho Mimoso, para o período de chuvoso do ano de 2009.

Já para o ano de 2010 (Figura 27), o índice pluviométrico foi menor na região, com uma grande variação entre os meses de abril a junho, que na região deveriam ser os meses com maior precipitação.

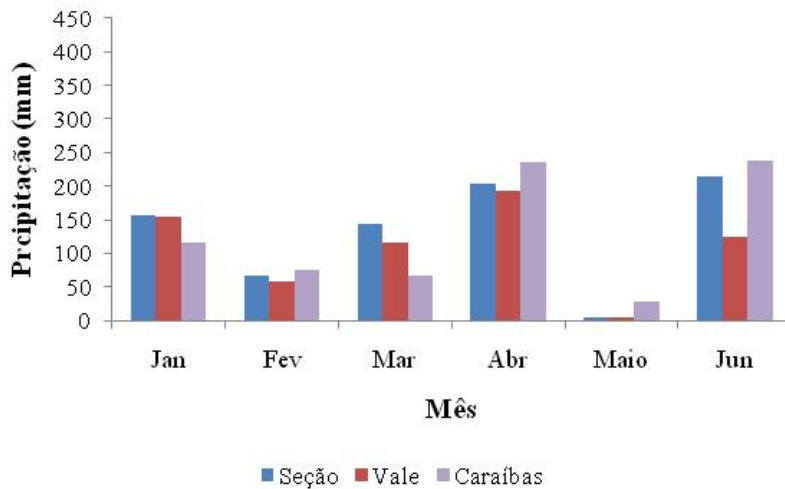


Figura 27. Distribuição do total mensal das chuvas na Bacia do Riacho Mimoso, para o período de chuvoso do ano de 2010.

Houve concentração dos maiores picos de escoamento entre os meses de abril e junho de 2009, de maneira consistente com a distribuição das chuvas.

Para o ano de 2010 (Figura 27) não ocorreram registros no pluviômetro Coité devido a problemas com o datalogger, para esse período.

Para o ano de 2009, o escoamento no Riacho do Mimoso só veio ocorrer no mês de março. As chuvas anteriores foram interceptadas pela vegetação e infiltraram no solo. Após o seu umedecimento, ocorre o escoamento, que permanece até o mês de agosto.

Nas Figuras 28 e 29, é representado o hidrograma do Riacho Mimoso para picos de vazão em intervalos de registro diários. Verifica-se uma distribuição dos escoamentos do tipo seqüência de picos simples e rápidos de vazão (Graff, 1988), entre abril e setembro de 2009, com um longo período do ano sem escoamento, característica dos rios de regiões áridas e semiáridas. O mesmo pode ser observado para o período de 2010, onde devido à grande variabilidade da chuva, só ocorrem picos de vazão nos meses de abril e junho.

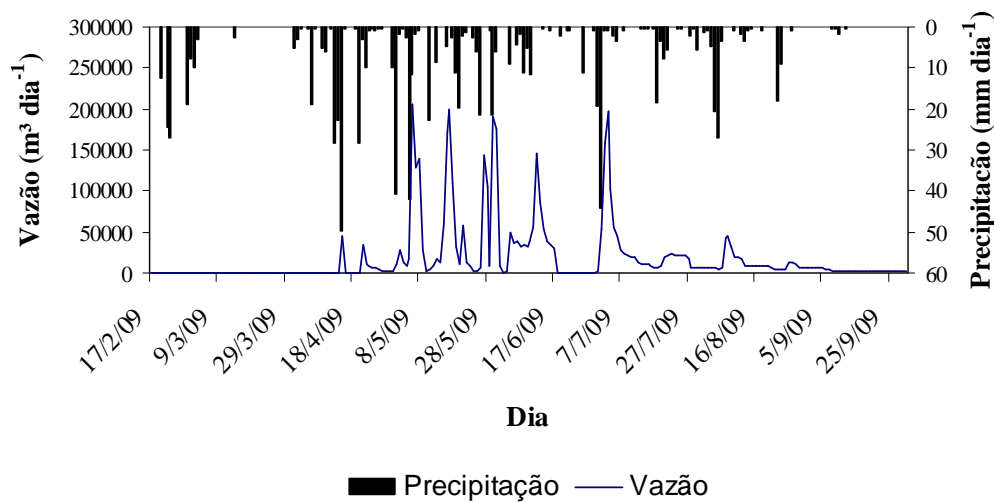


Figura 28. Hidrograma anual do Riacho Mimoso, semiárido pernambucano, no ano de 2009.

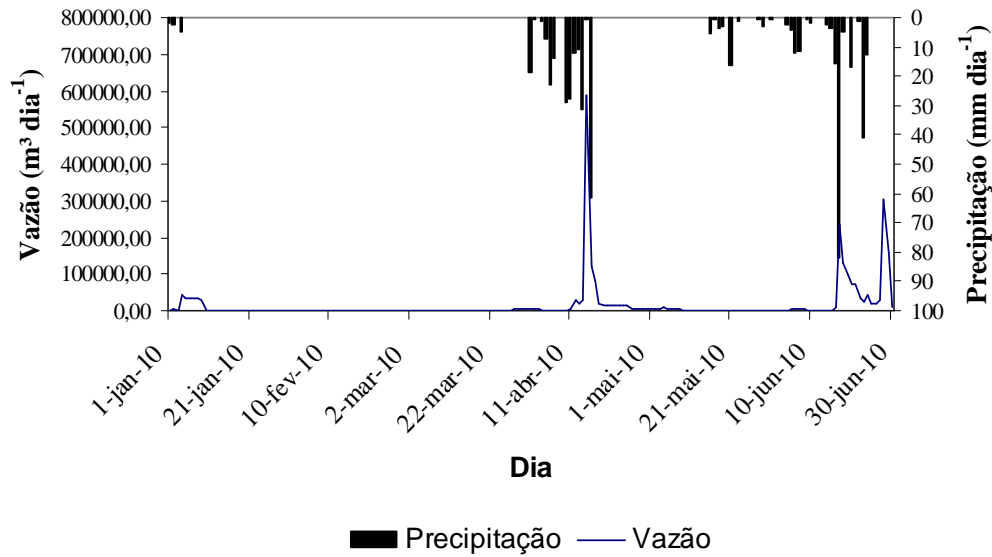


Figura 29. Hidrograma anual do Riacho Mimoso, semiárido pernambucano, no ano de 2010.

A precipitação média anual na Bacia do Mimoso foi de 1061,88 mm, produzindo um volume total de escoamento de  $4,2 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, para o ano de 2009. Para os seis primeiros meses do ano de 2010, a precipitação total foi de 489,8 mm, e uma vazão de  $2,5 \times 10^6$  m<sup>3</sup> foi produzida. Vale ressaltar que, para o ano de 2010, a precipitação e vazão referidas nesse estudo corresponde aos meses de janeiro a junho.

Para melhor visualização da resposta hidrológica na Bacia do Mimoso, foi examinado um hidrograma para um evento (Figura 30), com uma precipitação de 54,102 mm e uma vazão de pico de  $14,095$  m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, registrados pelo linígrafo, programado com intervalos de 5 minutos.

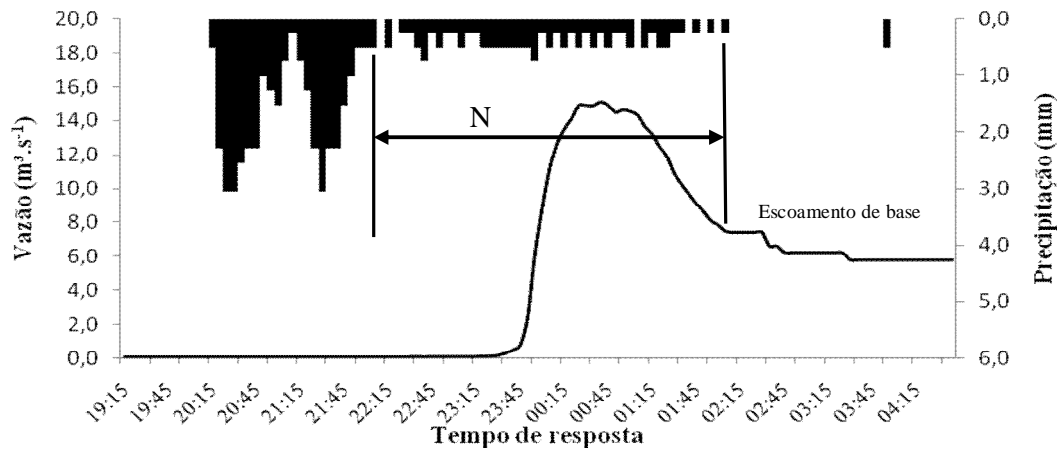


Figura 30. Hidrograma do evento ocorrido entre os dias 05/05/2009 e 06/05/2009 no Riacho Mimoso, com registros a cada 5 minutos.

Analisando ainda o hidrograma para o evento do dia 05 à 06/05/2009 (Figura 30), é possível verificar relações entre as características físico-hídricas da bacia com sua resposta hidrológica.

O tempo de concentração da bacia ( $T_c$ ), calculado pela equação (04) proposta por Hathaway, encontrada em Ponce (1989), foi de 3,49 horas. Pela aplicação do método de divisão do escoamento denominado base fixa (Chow et al., 1988), o tempo de concentração ( $T_c$ ) é dado pelo intervalo de tempo entre o fim da chuva e o ponto de inflexão na recessão do hidrograma, representado pela reta N na Figura 30. Com isso temos um tempo de concentração da bacia do Riacho Mimoso de 3,35 horas. Este valor de tempo de concentração está próximo ao valor obtido pela equação de Hathaway, um pouco maior que 3,49 horas (Tabela 4).

Ainda no que diz respeito à Figura 30, após o fim da chuva que é representada pelo início da reta N, observa-se ainda um escoamento após a recessão da curva. Esse evento é devido ao escoamento de base (fluxo do solo saturado para o riacho). Isto pode explicar a vazão estável que permaneceu logo após o ponto de inflexão na recessão do hidrograma.

Devido à variabilidade espacial das chuvas na região e à disposição dos pluviômetros na bacia do Riacho Mimoso, alguns eventos de chuva não são registrados em todos os pluviômetros. Na Tabela 6 e 7 pode-se observar os dias de ocorrência de chuvas registrados nos pluviômetros para os anos de 2009 e 2010 respectivamente na Bacia do Riacho Mimoso, com isso mostrando a variabilidade no local de estudo.

Tabela 6. Dias com e sem chuva, na Bacia Representativa do Mimoso, para o ano de 2009.

Pluviômetros	Dias com Chuva	%	Dias sem chuva	%	Total (mm)
Vale	92	24	273	76	1067
Seção	73	20	292	80	1091,3
Caraibás	94	25	271	75	886,17
Coité	110	30	255	70	1203,06



Tabela 7. Dias com e sem chuva, na Bacia Representativa do Mimoso, para o ano de 2010.

Pluviômetros	Dias com Chuva	%	Dias sem chuva	%	Total (mm)
Vale	42	24	130	76	650
Seção	46	25	135	75	788,8
Caraibás	52	29	129	71	760,2

Os valores na Tabela 6 mostram que, mesmo para pluviômetros do vale e da seção (que são os mais próximos estando à uma distância de 397 metros) há diferenças na ocorrência de chuvas diárias

### 5.5. Avaliação da descarga líquida (Ql) a partir das campanhas de medição direta e curvas-chave do riacho Mimoso

Os valores de descarga líquida (Ql) obtidos por determinação direta, através dos dados de velocidade média do escoamento e profundidade de lâmina d'água das verticais, durante as 22 campanhas de avaliação no Riacho Mimoso, são apresentados na Tabela 8, juntamente com os valores de área da seção molhada em cada avaliação.

Tabela 8. Valores de lâmina do escoamento (cm), área da seção molhada (m<sup>2</sup>) e descarga líquida (Ql) do Riacho Mimoso, obtidos por determinação direta.

Dia	Lâmina do escoamento (cm)	Área da seção molhada (m <sup>2</sup> )	Ql (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
01-jun-09	71,00	2,614	2,668
02-jun-09	74,00	2,794	2,319
22-jun-09	44,00	1,226	0,316
23-jun-09	42,00	1,139	0,316
23-jun-09	41,00	1,096	0,296
14-jul-09	40,00	1,054	0,315
15-jul-09	33,00	0,777	0,299
15-jul-09	32,00	0,739	0,363
16-jul-09	35,00	0,854	0,349
28-jul-09	32,00	0,739	0,187
28-jul-09	32,00	0,739	0,183
29-jul-09	30,00	0,665	0,162
12-ago-09	38,00	0,973	0,443
13-ago-09	40,00	1,054	0,411
26-ago-09	49,00	1,455	0,739
27-ago-09	32,00	0,739	0,376
08-set-09	16,00	0,147	0,049
09-set-09	18,00	0,179	0,065

19-abr-10	31,00	0,702	0,284
20-abr-10	31,00	0,702	0,299
28-jun-10	130,00	7,024	11,590
30-jun-10	68,00	2,441	1,799

Na Figura 31 encontra-se a representação gráfica do perfil da seção do Riacho Mimoso, onde foi realizada a batimetria, tomando como ponto de referência um ponto de nível zero, situado na margem direita da seção de estudo.

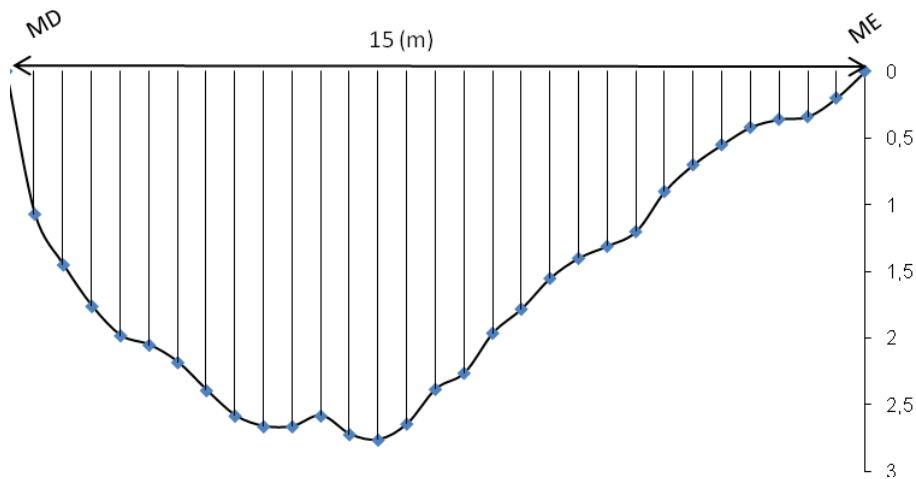


Figura 31. Perfil da seção do Riacho Mimoso, com seu comprimento e profundidade, em relação ao nível zero.

Na Figura 32 pode-se observar as relações de lâmina-área e lâmina-raio hidráulico do Riacho Mimoso. Para uma lâmina mínima de 0,1 m e uma máxima de 2,76 m tem-se uma área e raio hidráulico variando de 0,056 m<sup>2</sup> e 0,049 m a 24,93 m<sup>2</sup> e 1,5 m, respectivamente.

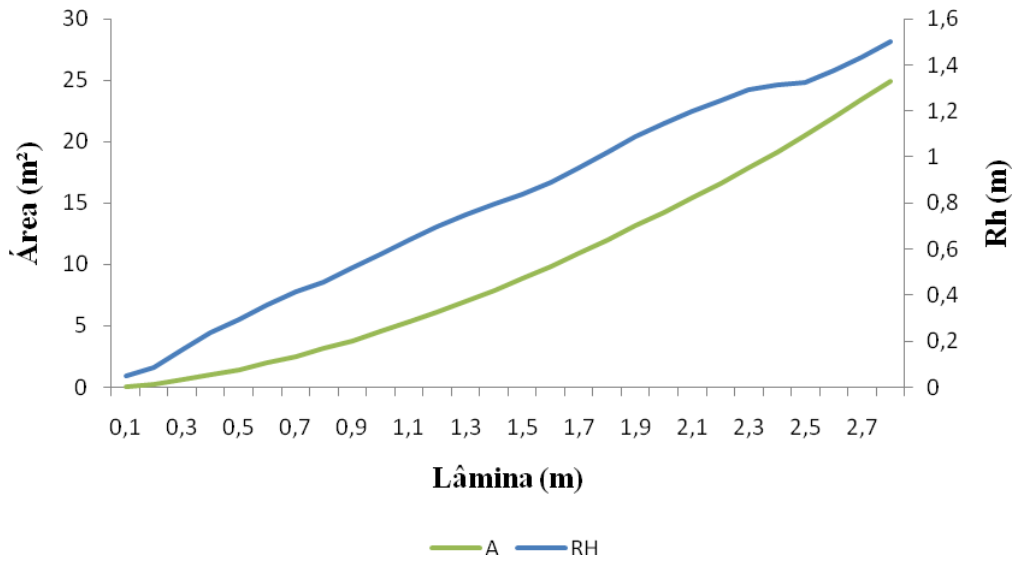


Figura 32. Relação obtida entre as lâminas e raio hidráulico e área do Riacho Mimoso

Na Figura 33 podem ser observados através da reta 1:1, a relação entre a vazão medida e a vazão estimada por Manning, com valor de rugosidade médio de 0,042 adotado, que proporciona adequado ajuste dos dados experimentais, com  $R^2 = 0,98$ .

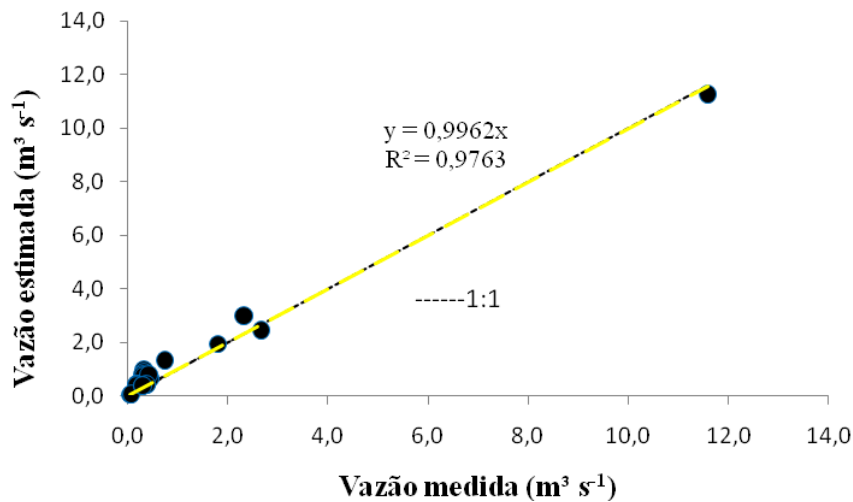


Figura 33. Reta 1:1 das vazões medidas e estimadas no Riacho Mimoso, com os dados referentes às 22 campanhas de determinação direta.

Na Figura 34 é apresentada a curva-chave da seção, tendo-se estimado a maior vazão através da aplicação da equação de Manning, para a maior lâmina registrada pela

estação fluviométrica, que foi de 190 cm. Através do perfil levantado para seção de controle foram calculados a área e perímetro da seção. O valor ajustado para a rugosidade de Manning, é coerente com o valor proposto por Chow (1959), para características físicas da seção de estudo.

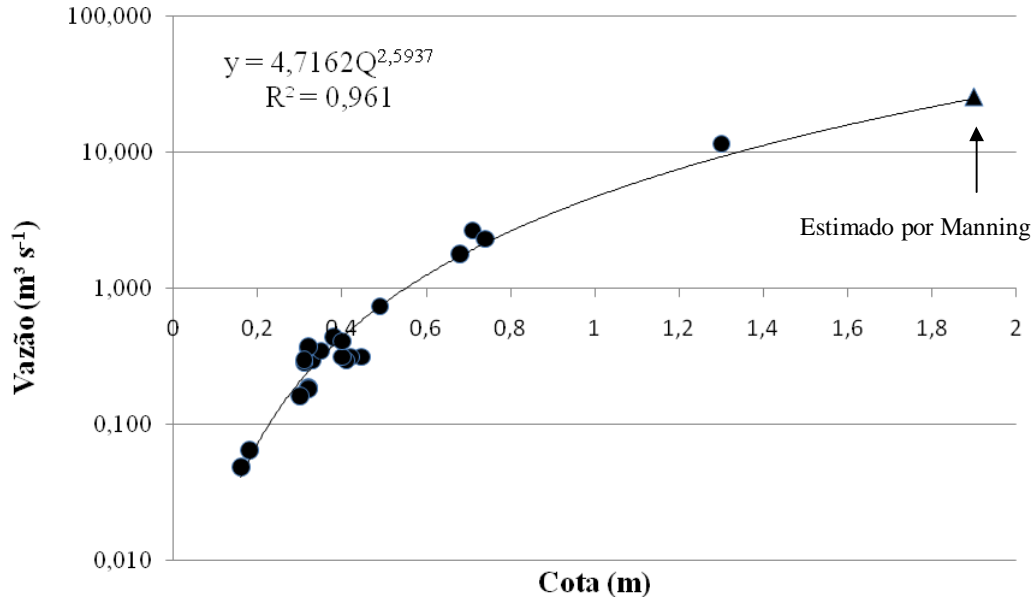


Figura 34. Curva-chave obtida entre as cotas e as vazões do Riacho Mimoso, com o maior valor registrado pelo linígrafo calculado por Manning.

## 5.6. Avaliação sedimentométricas do Riacho Mimoso

### 5.6.1. Concentração ( $C_{ss}$ ) de sedimento suspenso do Riacho Mimoso

Na Tabela 9 são exibidos os valores de concentração instantânea de sedimento suspenso ( $C_{ss}$ ) e descarga de sedimento em suspensão ( $Q_{ss}$ ), com as respectivas vazões ( $Q$ ) das amostragens realizadas, durante as campanhas de medição direta, nos anos de 2009 e 2010.

Tabela 9. Vazão ( $Ql$ ), concentração instantânea de sedimento suspenso ( $C_{ss}$ ), e descarga de sedimento em suspensão ( $Q_{ss}$ ), das campanhas de medição direta no riacho.

Dia	Vazão ( $m^3 s^{-1}$ )	$C_{ss}$ ( $mg L^{-1}$ )	$Q_{ss}$ ( $t dia^{-1}$ )
01-jun-09	2,668	444,53	102,48
02-jun-09	2,319	282,66	56,62
22-jun-09	0,316	178,96	4,88
23-jun-09	0,316	167,06	4,56
23-jun-09	0,296	154,05	3,95
14-jul-09	0,315	172,08	4,68
15-jul-09	0,299	63,85	1,65
15-jul-09	0,363	292,06	9,16
16-jul-09	0,349	65,84	1,99
28-jul-09	0,187	134,78	2,17
28-jul-09	0,183	159,94	2,53
29-jul-09	0,162	135,50	1,90
12-ago-09	0,443	64,83	2,48
13-ago-09	0,411	58,97	2,10
26-ago-09	0,739	59,16	3,78
27-ago-09	0,376	351,85	11,43
08-set-09	0,049	108,93	0,46
09-set-09	0,065	168,67	0,94
19-abr-10	0,284	149,04	3,66
20-abr-10	0,299	150,21	3,89
28-jun-10	11,590	550,10	550,84
30-jun-10	1,799	335,63	52,17

Os valores de concentração instantânea de sedimento suspenso dos eventos de descarga, amostrados no ano de 2009 e 2010, variaram entre 58,97 e 550,10  $mg L^{-1}$ , com um valor médio de 212,43  $mg L^{-1}$ . As vazões escoadas, nesses períodos, foram de 0,049  $m^3 s^{-1}$  a 11,59  $m^3 s^{-1}$ . Com isso as concentrações de sedimento em suspensão são consideradas de baixa a muito alta, com uma concentração média sendo considerada alta.

Segunda Lima et al. (2003), relatam que a concentração de sedimento em suspensão inferior a 50  $mg L^{-1}$  são considerados muito baixo, de 50 a 100  $mg L^{-1}$ , baixa, de 100 a 150  $mg L^{-1}$ , moderada, de 150 a 300  $mg L^{-1}$ , alta, e acima de 300  $mg L^{-1}$ , muito alta.

A Figura 35 mostra o comportamento da concentração instantânea de sedimento suspenso e vazão nos períodos amostrados, durante a estação chuvosa de 2009 e 2010, demonstrando a variação em função das vazões e provavelmente entre as variações do uso do solo, cobertura vegetal e as características físicas da bacia. De todo modo, a maioria das amostragens foi realizada em períodos em que a vazão estava com valores inferiores aos máximos registrados pelo linígrafo. Foi amostrado apenas um evento com um valor de máxima.

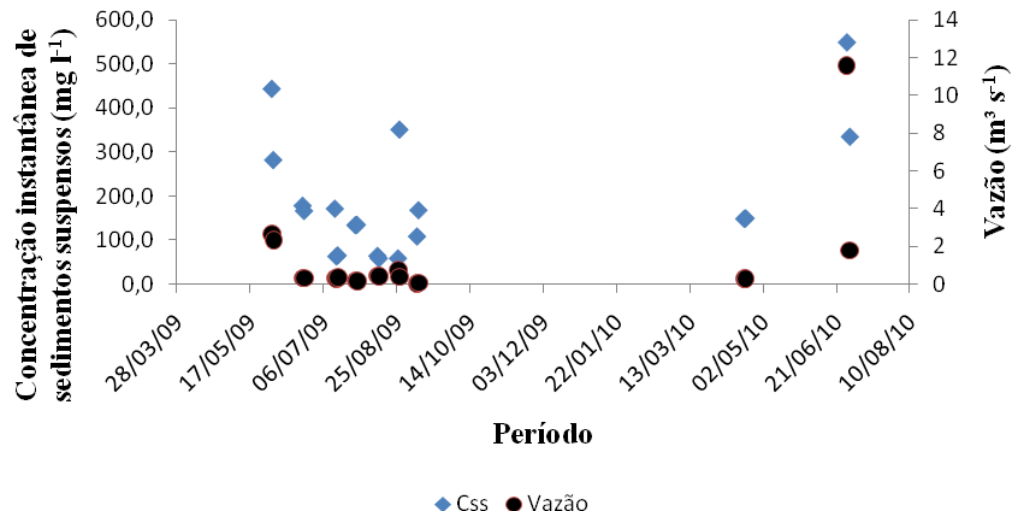


Figura 35. Variação da concentração instantânea de sedimento suspenso (C<sub>ss</sub>) e vazão do Riacho Mimoso, durante o período chuvoso do ano de 2009 e 2010, amostradas pelas campanhas de medição direta.

Com isso, verifica-se a necessidade de ampliar as amostragens, para permitir uma melhor compreensão do comportamento da concentração de sedimentos, e de sua variação. Alexandrov et al. (2003) em uma região árida, obtiveram valores de concentração de sedimentos suspenso variando de 15,50 até 187,00 mg l<sup>-1</sup>, para vazões de 0,24 até 84,4 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Monitorando uma bacia de 112 km<sup>2</sup> assim, obteve-se uma ampla variação envolvendo valores superiores e inferiores de descarga líquida, com altos valores de concentração de sedimentos, sendo características de regiões áridas e semiáridas.

A partir de valores medidos de vazão líquida e concentração de sedimentos para um total de 22 eventos (Tabela 8), e o maior ponto registrado pelo linígrafo, obteve-se a equação da curva-chave de sedimentos (Q<sub>ss</sub>) para a seção em estudo (Figura 36).

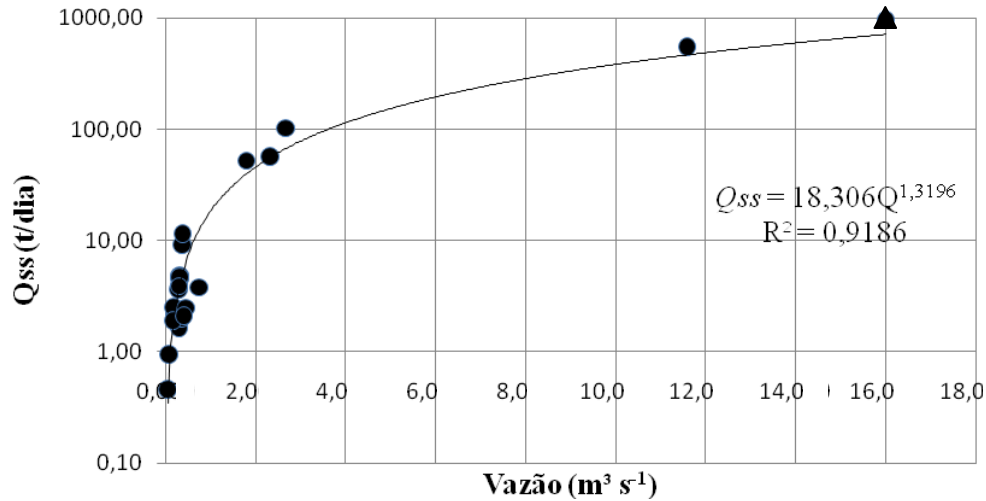


Figura 36. Curva-chave de sedimento ( $Q_{ss}$  x  $Q$ ) para a seção do Riacho Mimoso

Conforme Carvalho (2008), quanto maior o número de pontos medidos e a variação entre os valores alcançados entre mínimos e máximos, maior será a representatividade da curva-chave. No caso em análise, o elevado valor de  $R^2$  possibilita concluir que as estimativas obtidas são adequadas.

### 5.7. Cálculo de descarga sólida em suspensão

Com a equação da curva-chave de sedimentos suspensos, fez-se a transformação da série de vazão do período em estudo de 2009 (Figuras 37 a 44) e 2010 (Figuras 45 a 50) em descarga de sedimento em suspensão, com intervalos a cada cinco minutos. Foram estimados valores de descarga sólida em suspensão, entre um mínimo de 0,063 t dia<sup>-1</sup> e um máximo de 954,38 t dia<sup>-1</sup>, para o ano de 2009 e um mínimo de 0,118 t dia<sup>-1</sup> e um máximo de 908,2 t dia<sup>-1</sup>, em 2010.

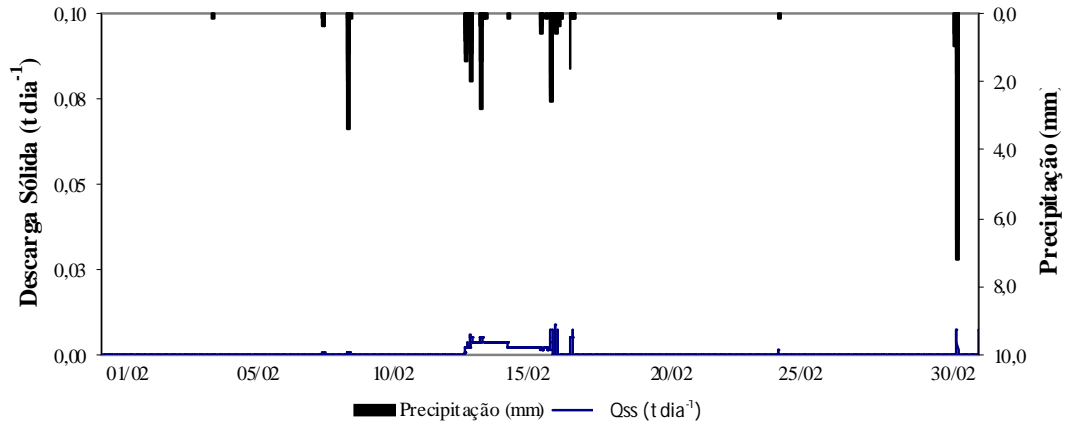


Figura 37. Descarga sólida para o mês de fevereiro de 2009, para o Riacho Mimoso

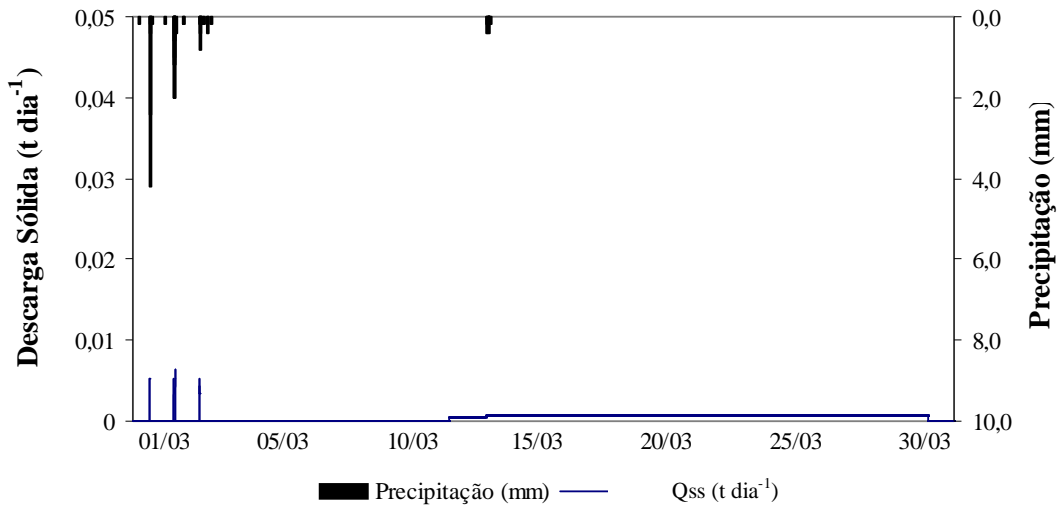


Figura 38. Descarga sólida para o mês de março de 2009 para o Riacho Mimoso

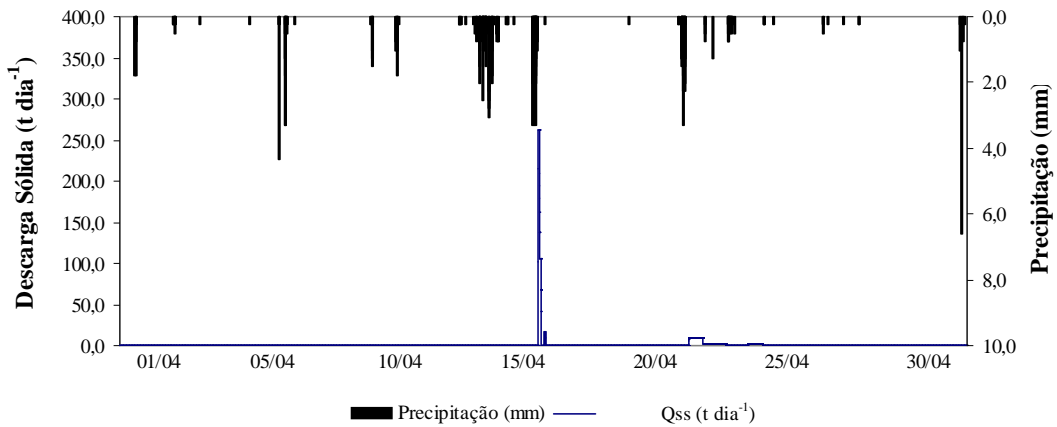


Figura 39. Descarga sólida para o mês de abril de 2009 para o Riacho Mimoso



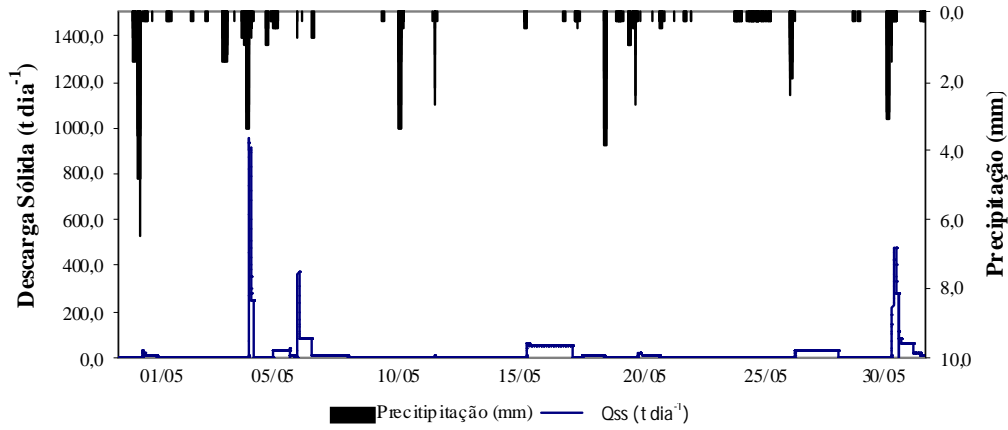


Figura 40. Descarga sólida para o mês de maio de 2009 para o Riacho Mimoso

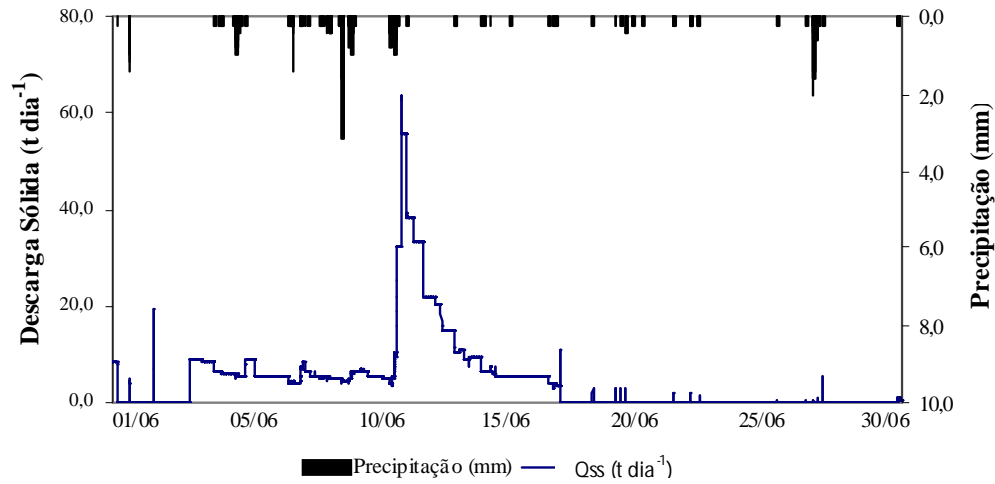


Figura 41. Descarga sólida para o mês de junho de 2009 para o Riacho Mimoso

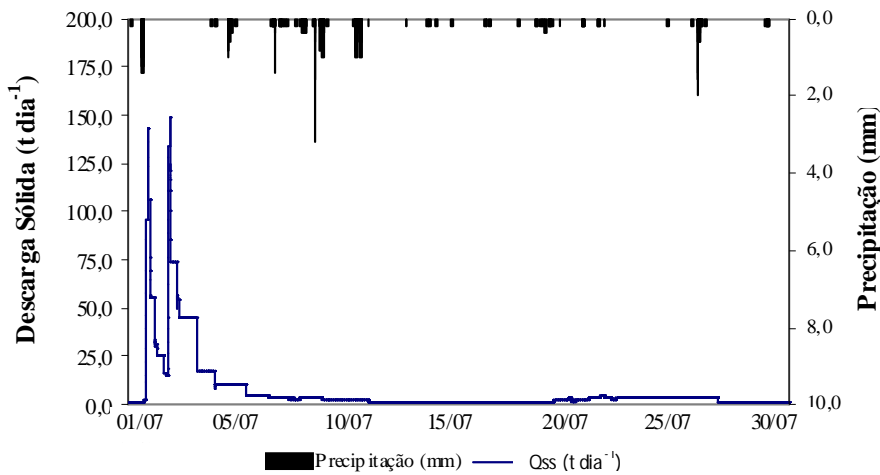


Figura 42. Descarga sólida para o mês de julho de 2009 para o Riacho Mimoso

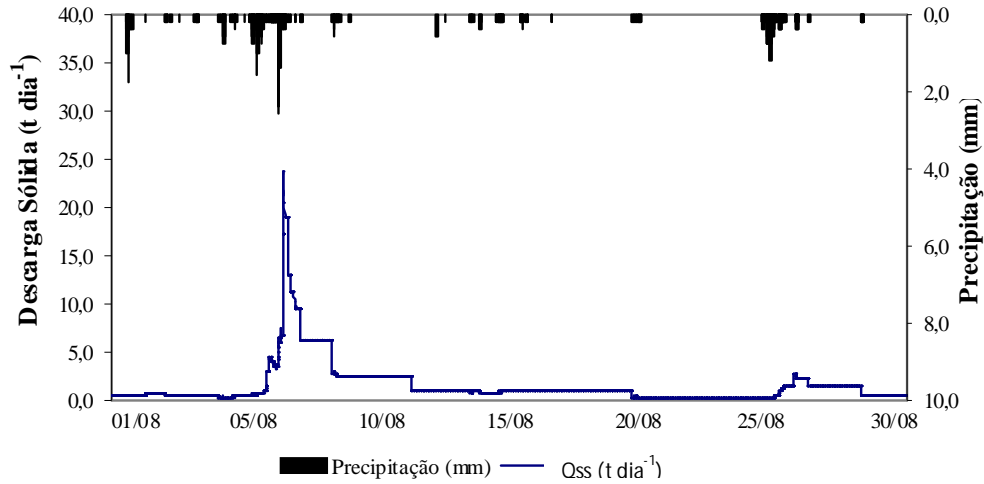


Figura 43. Descarga sólida para o mês de agosto de 2009 para o Riacho Mimoso

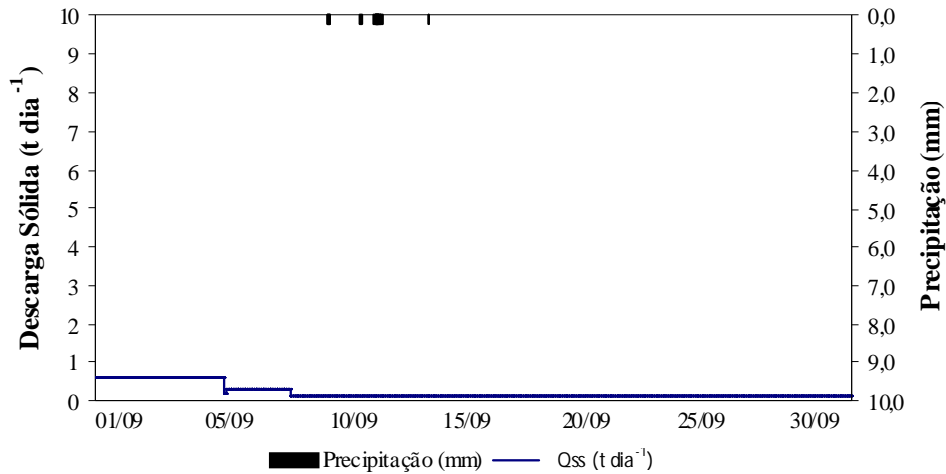


Figura 44. Descarga sólida para o mês de setembro de 2009 para o Riacho Mimoso

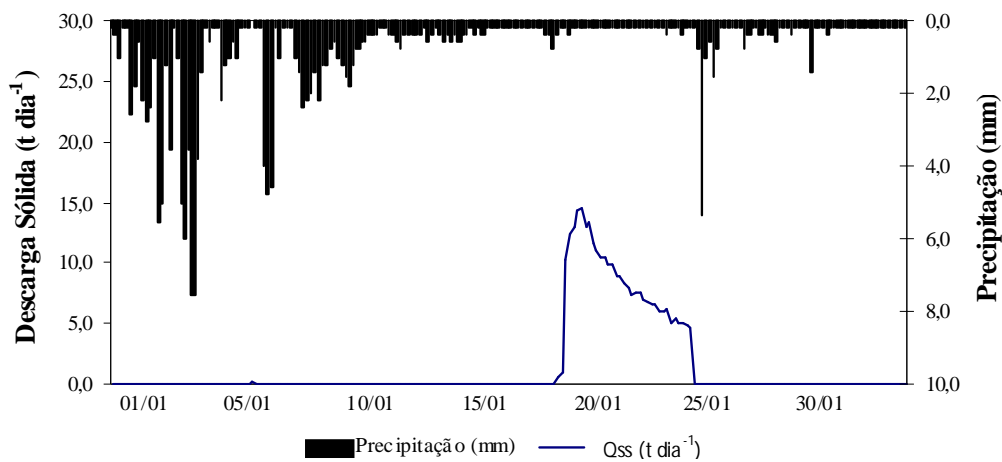


Figura 45. Descarga sólida para o mês de janeiro de 2010 para o Riacho Mimoso

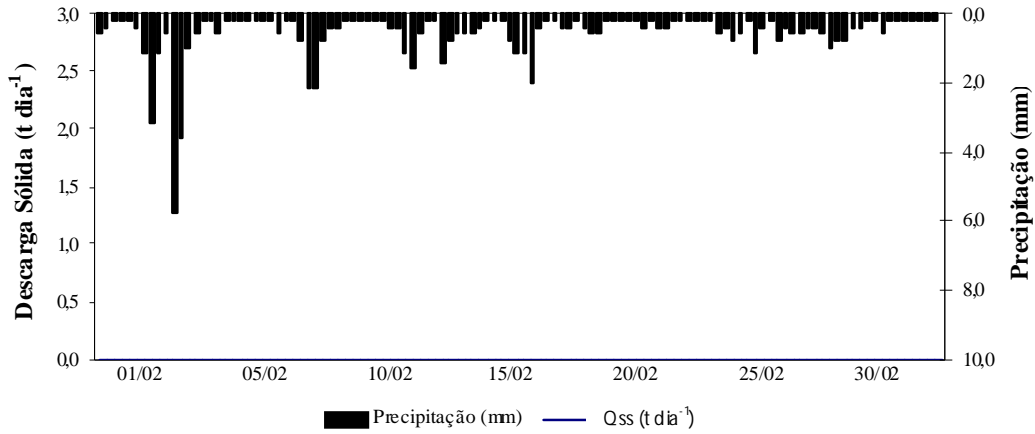


Figura 46. Descarga sólida para o mês de fevereiro de 2010 para o Riacho Mimoso

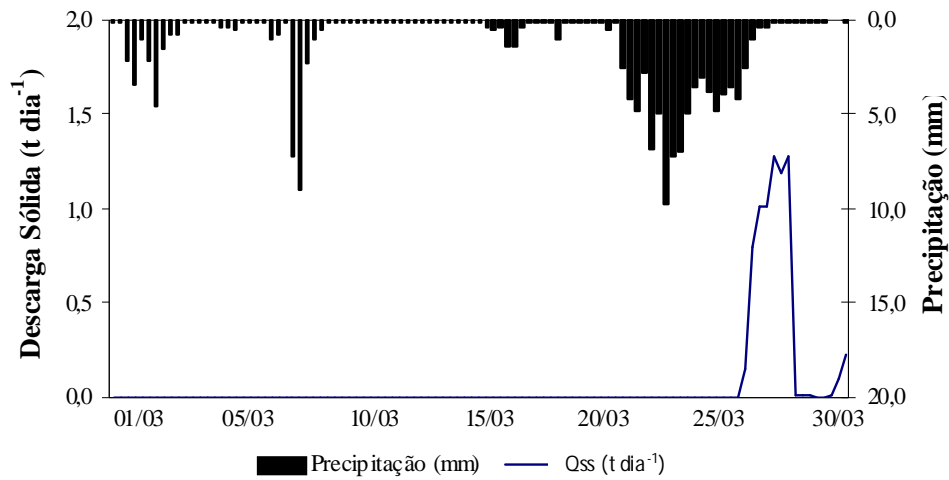


Figura 47. Descarga sólida para o mês de março de 2010 para o Riacho Mimoso

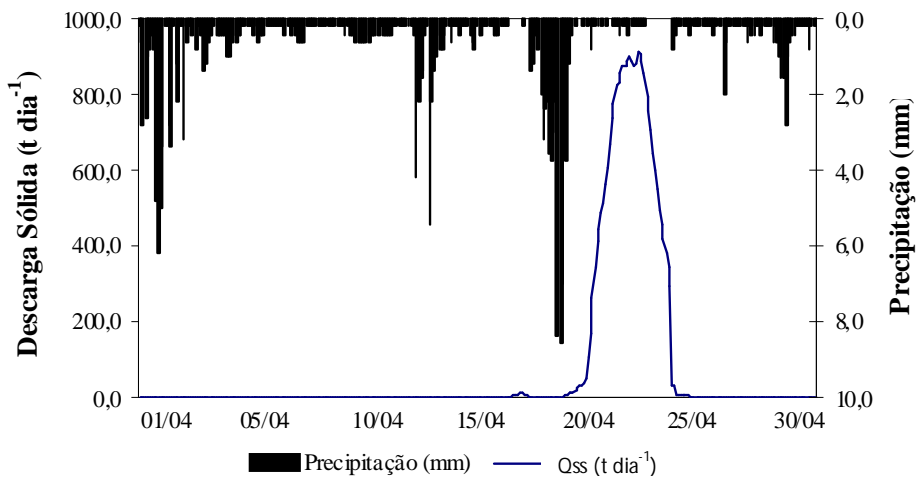


Figura 48. Descarga sólida para o mês de abril de 2010 para o Riacho Mimoso

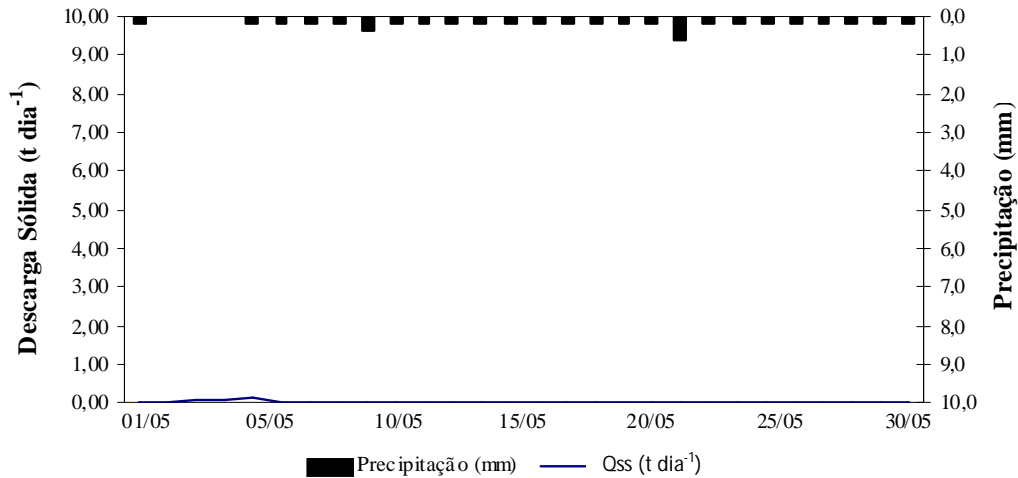


Figura 49. Descarga sólida para o mês de maio de 2010 para o Riacho Mimoso

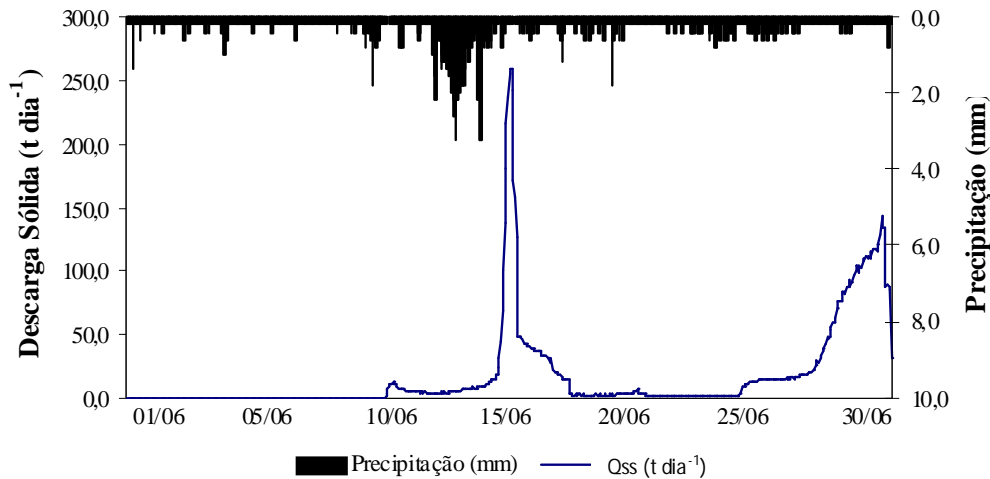


Figura 50. Descarga sólida para o mês de junho de 2010 para o Riacho Mimoso

As Figuras supra-apresentadas permitem observar a ocorrência de trovoadas nos primeiros meses do ano, de janeiro a fevereiro. Pode-se verificar a concentração de chuvas entre os meses de março a julho para o ano de 2009, o que ocorre também para o ano de 2010. Com isso pode ser verificado a grande variação entre os meses chuvosos e os de estiagens.

Estimando a produção de sedimentos em suspensão em grandes bacias no Brasil, Lima et al. (2006) apresentaram valores mensais médios de 12,481 t dia<sup>-1</sup>, estimados pela curva-chave. Lopes et al. (2006), analisando o fluxo de sedimentos em suspensão em uma bacia hidrográfica do Rio Paraná, apresentaram valores médios de 4 à 6,708 t

dia<sup>-1</sup> correspondendo a valores de descarga sólida específica em suspensão entre 1,7 e 475 t/ano/km<sup>2</sup>.

## 5.8. Medidas de sedimento de leito

### 5.8.1. Granulometria

Na Figura 51 é apresentada a curva de distribuição granulométrica para o material de leito do Riacho Mimoso, relativo à coleta realizada no dia 14 de abril de 2010, com um diâmetro médio característico ( $d_{50}$ ) de 0,737 mm.

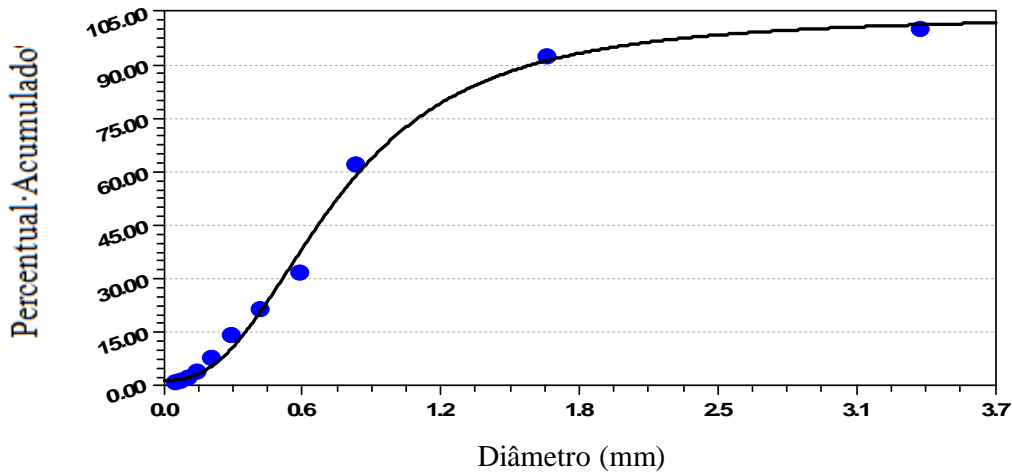


Figura 51. Curva de distribuição do diâmetro das partículas transportadas por arraste pelo Riacho Mimoso durante a coleta no dia 14/04/10, gerada pelo programa Curva Expert 13.1.

### 5.8.2. Medição a vau (BLH-84)

Utilizando-se o amostrador de sedimento de fundo BLH-84, foram realizadas quatro coletas entre os meses de março e abril de 2010 na seção do riacho Mimoso. Em conformidade com Merten et al. (2007), aplicou-se a equação (12) e os resultados obtidos para a descarga sólida de leito estão dispostos na Tabela 10.

Os resultados obtidos para a descarga sólida de leito variaram de um mínimo de 0,634 t dia<sup>-1</sup> para uma vazão de 0,314 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, até um máximo de 15,953 t dia<sup>-1</sup>, para uma vazão de 11,59 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> e, em média, a descarga sólida de fundo foi em torno de 6,280 t dia<sup>-1</sup>, para uma vazão média de 3,505 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

Tabela 10. Valores medidos de descarga líquida em (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) e descarga sólida de fundo (t.dia<sup>-1</sup>)

Dia	Ql (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Qsf (t dia <sup>-1</sup> )
19/04/2010	0,284	0,634
20/04/2010	0,299	0,781
28/06/2010	11,59	15,953
30/06/2010	1,80	7,752

Os valores de descarga de fundo ( $Q_{sf}$ ), calculados a partir das equações de descarga de fundo propostas por Shields e Kalinske, apresentaram diferenças de dez a vinte vezes (Tabela 11).

De acordo com Yang (1996), citado por Melo (2008), a descarga de fundo pode variar entre 5% e 25 % da carga de sedimento transportado. Valores de descarga de fundo obtidos pela equação de Shields para a seção do Riacho Mimoso. Por outro lado, a equação de Kalinsk apresentou valores subestimados para o mesmo local.

Rovira et al.(2005), no rio Tordera na Espanha, obtiveram valores de carga de leito e em suspensão de 80% e 20% respectivamente.

Tabela 11. Descarga de fundo ( $Q_{sf}$ ) calculada pelas equações propostas por Shields e Kalinske e sua proporção (%) em relação a descarga de sedimento em suspensão ( $Q_{ss}$ ) encontradas para as 4 campanhas de avaliação direta do Riacho Mimoso, no ano de 2010

Dia	$Q_{sf}$ (t dia <sup>-1</sup> )		$\left(\frac{Q_{sf}}{Q_{ss}}\right) \times 100$	
	Shields	Kalinske	Shields	Kalinske
19/04/2010	0,779	0,049	21,279	1,335
20/04/2010	0,803	0,044	20,651	1,142
28/06/2010	60,104	0,420	10,911	0,076
30/06/2010	6,952	0,813	13,325	0,156

Ainda sobre os resultados apresentados acima, foi investigada uma relação com as medições diretas realizadas com o amostrador BLH-84, e os valores encontrados pelos métodos de Shields e Kalinsk (Figura 52).

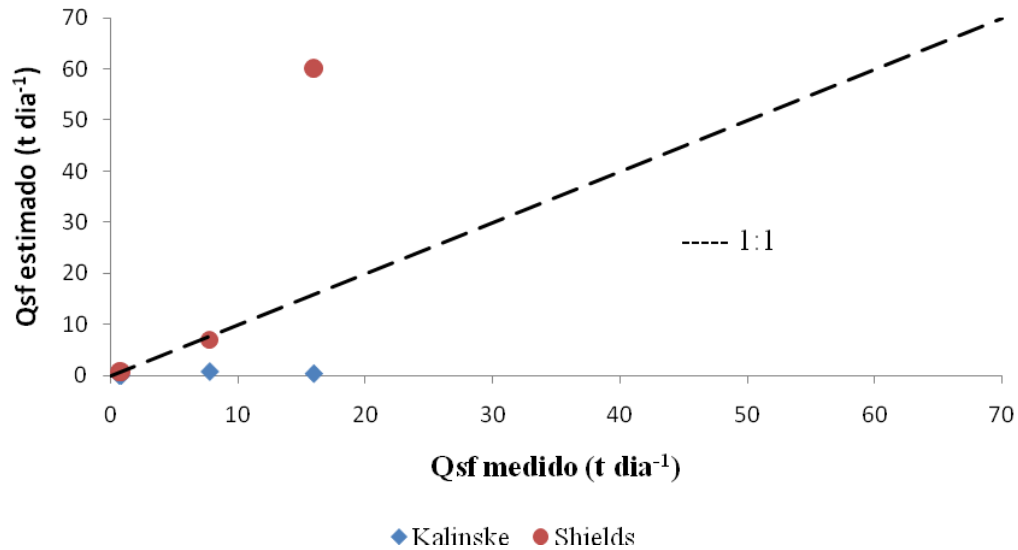


Figura 52. Relação entre os valores de sedimento de leito medidos (BLH-84) e estimados pelas equações de Shields e Kalinske.

### 5.9. Produção total de sedimento suspenso

A produção de sedimentos suspenso para a Bacia do Riacho Mimoso, para o ano de 2009, foi de  $0,2354 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  ( $23,540 \text{ t km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ), sendo considerada baixa. Para o período de 2010, não foi calculada essa produção, devido aos poucos pontos amostrados nesse ano, para esses cálculos.

Segundo Lima et al.(2003) quando a produção de sedimentos é  $< 70 \text{ t km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$  baixa,  $70 \text{ à } 175 \text{ t km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$  moderada,  $175 \text{ à } 300 \text{ t km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ , alta, acima de  $300 \text{ t km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ , muito alta.

## 6. CONCLUSÕES

1. A Bacia do Mimoso apresentou um tempo de concentração de 3,49 horas, com vários eventos de escoamento e picos de vazão e hidrogramas com elevados pico de vazão, com valor mínimos de  $0,162 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e máximo de  $11,59 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , que correspondente à produção de sedimento de  $550,84 \text{ t dia}^{-1}$  e  $1,9 \text{ t dia}^{-1}$ .
2. O bom ajuste das curvas-chave entre a relação de cota e vazão, e entre a descarga sólida em suspensão com descarga líquida, permite a obtenção de dados gerados a partir dessas relações, com base na observação e registros de altura do escoamento do Riacho Mimoso nos anos de 2009 e 2010.
3. A produção média de sedimentos de  $0,2354 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  da bacia hidrográfica do Riacho Mimoso para o ano de 2009, indica a grande necessidade de adoção de práticas conservacionistas para a região.
4. Por estar localizada em uma região semiárida, onde as chuvas torrenciais e os eventos de cheia ocorrem durante curto período e a distância da área de estudo, há necessidade de instalação de um amostrador automático de sedimento para a realização dessas coletas também durante o período noturno.
5. Mesmo sendo realizadas limpezas frequentes no poço tranquilizador, para a retirada de sedimentos acumulados e substituindo a tela de entrada do tubo com uma malha menor, onde ocorreram registros próximos tanto na régua quanto no sensor para o ano de 2010, a presença de sedimentos era frequente. Tais sedimentos são capazes de introduzir erros nos registros.
6. A caracterização e estimativa da precipitação média da Bacia do Mimoso, em relação a chuva-vazão foi de 1061,88 mm, produzindo um volume total de escoamento de  $4,2 \times 10^6 \text{ m}^3$ , para o ano de 2009. Para o ano de 2010, a precipitação total foi de 489,8 mm, e uma vazão de  $2,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ .



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. Domínios morfoclimáticos e solos do Brasil. In: ALVAREZ V, V.H.; FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa: SBCS; UFV, DPS, p.1-18, 1996.

ACHITE, M. & OUILLO, S. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). *Journal of hydrology*. v. 343, p.187– 202, 2007.

ALEXANDROV, Y.; LARONNE, J. B.; REID, I. Intra-event and inter-seasonal behaviour of suspended sediment in flash floods of the semi-arid northern Negev, Israel. *Geomorphology*. v.85, p.85-97, 2007.

ALEXANDROV, Y.; LARONNE, J. B.; REID, I. Suspended sediment concentration and its variation with water discharge in a dryland ephemeral channel, northern Negev, Israel. *Journal of Arid Environments*, v.53, p.73-84, 2003.

ARAÚJO, J. C. Assoreamento em Reservatórios do Semiárido: Modelagem e Validação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, n.2, p.39- 56, 2003.

BASTOS, D. C. O.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. Avaliação de Alternativa de irrigação suplementar com água moderadamente salina em vale aluvial no semi-árido: experimentação e modelagem. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n 3, p.27-36, 2009

BARBOSA, D. V. N. Os impactos da seca de 1993 no Semi-Árido Baiano: caso de Irecê. Salvador: SEI, (Série estudos e pesquisa, 51). 2000.

BELLINASSO, T. B; PAIVA, J. B. D. Avaliação da Produção de Sedimentos em Eventos Chuvosos em uma Pequena Bacia Hidrográfica Semi-Urbana de Encosta. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.12, n.4, p.169-181, 2007.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J. C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. *Catena*, v.4, p.49-59, 2009.

BICALHO, C. C. Estudo do Transporte de sedimentos em suspensão na Bacia do rio Descoberto. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos)- Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, p.123, 2006.

BOURKE, M.C.; PICKUP, G. Fluvial form variability in arid central Australia. In: MILLER, A.J., GUPTA, A. (Eds.), *Varieties of Fluvial Form*. Wiley, Chichester, pp. 249–271. 1999.

BRAGA, R. A . P.; CABRAL, J. J. S. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; PERRIER JÚNIOR, G. S. Conservação dos recursos hídricos em brejos de altitude-O caso de Brejo dos Cavalos, Caruaru, PE. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.3, p.539-546, 2002.

CAMPOS, R.; FREITAS, P. R. de F. Características granulométricas e descarga de sedimentos em uma bacia urbana: O Rio Maranguapinho no Ceará. In: I Simpósio de recursos hídricos do Norte e Centro-Oeste, 2007, Cuiabá. Anais do I Simpósio de recursos hídricos do Norte e Centro-Oeste Cuiabá, 2007.

CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. Revista *Árvore*, Viçosa-MG, v.30, n.2, p.241-248, 2006.

CARVALHO, N. O. Hidrossedimentologia prática. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 599p, 2008.

CARVALHO, N. de O.; DE AQUINO, R. F.; RIBEIRO, J. I. O.; SANTOS, S. de S.; OLIVEIRA, M. Q.; FONSECA, L. L.; ARAÚJO, L. A.; GENZ, F. Descarga sólida do leito de um rio por medições diretas: estudo de caso. In: XVI simpósio brasileiro de recursos hídricos, 2005, João Pessoa. Anais do XVI simpósio brasileiro de recursos hídricos, 2005.

CARVALHO, N.O., COIMBRA, A.R.S.R., PAYOLLA, B.L., CASTRO, T.L.C., MENDES, A.B. "Causas e efeitos do aumento da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia." Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju, SE, 2001.

CARVALHO, N. O. Guia de Práticas Sedimentométricas. Brasília: ANEEL, 116p., 2000.

CARVALHO, N. O.; FIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, 2000. Superintendência e Avaliações Hidrológicas. 106p, 2000.

CARVALHO, N. O. Hidrossedimentologia Prática. CPRM-ELETROBRÁS. Rio de Janeiro. (1994).

CIDREIRA, M. A. S; FONTES, A. S.; ALMEIDA, R.B.; MEDEIROS, Y. D. P. Análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação na bacia experimental do rio do cedro – BA. In: VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2006, Gravatá/PE. Anais do VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2006.

COIADO, E. M. Assoreamento de reservatórios. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. (Orgs.). Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, p.395-426, 2001.

CORDERO, A.; MEDEIROS, P. A. Estimativa da curva-chave de Blumenau. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba/PR, 2003. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003.

CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R. Levantamento detalhado de solos da fazenda Nossa Senhora do Rosário. Relatório Técnico, (2001).

CHEVALLIER, P. Aquisição e processamento de dados. In: Hidrologia (ciência e aplicação). Org. TUCCI, C.E.M. 4 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, p.485-525, 2007.

CHEN, C. N.; TSAI, C. H.; TSAI, C. T. Simulation of sediment yield from watershed by physiographic soil erosion-deposition model. Journal of Hydrology, n.327, p.293-303, 2006.

CHELLA, M. R.; FERNANDES, C. V. S.; FERMIANO G. A.; FILL, H. D.; SANTOS, I. Avaliação do Transporte de Sedimentos no Rio Barigüi. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.10, n.3, p.105-111, 2005.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R. & MAYS, L.W. Applied hydrology. New York, McGraw-Hill, 572p. 1988.

CHOW, V. T. Open channel hydraulics. McGraw-Hill College, 608p. 1959.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia Fluvial. In: CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. Ed. da Universidade de São Paulo: São Paulo, p.52-78, 1974.

EDWARDS, T. K. & GLYSSON, G. D. Field Methods for Measurement of Fluvial Sediment. In: Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey (USGS). Reston, Virginia, 1999.

EMBRAPA. Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco. Recife: Embrapa Solos - UEP Recife; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p.252, 2000. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa, 11). CD-ROM.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos (Rio de Janeiro, RJ). Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco. Recife: SUDENE-DRN/Ministério da Agricultura – DNPEA-DDP, 1973. 1v. (Brasil. Ministério da Agricultura. DNPEA-DPP. Boletim Técnico, 26, SUDENE – DRN. Série Pedologia, 14), 1973.

FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M.; NETO, J. N. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.12, n.4, p.356-362, 2008.

FEBA, L.G.T.; MOLINA P.M.; HERNANDEZ F.B.T. Diagnóstico hidrossedimentológico da microbacia do córrego Água da bomba no município de regente feijó – SP. XVI Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, Goiânia/GO, 2006.

GRAF, W.L. Fluvial Processes in Dryland Rivers. Springer-Verlag, Berlin, 1988.

IBIAPINA, A.V., et al. (2003). “Evolução da hidrometria no Brasil.”Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/srh/acervo/publica/doc/oestado/texto/121-138.html>>. Acesso em:25/06/2008.

IPA. Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2ª aproximação. 3. ed. revisada. Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco, 2008.

LIMA, J. E. F. W.; LOPES, W. T. A.; CARVALHO, N. de O.; DA SILVA, E. M.; VIEIRA, M. R. Fluxo de sedimentos em suspensão no exutório de grandes bacias hidrográficas em território brasileiro. In: VII encontro nacional de engenharia de sedimentos, 2006. Poro Alegre. Anais do VII encontro nacional de engenharia de sedimentos, 2006.

LIMA, J. E. F. W. ; SANTOS, P. M. C.; CARVALHO, N. O. ; Silva, E.M. . Fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia Araguaia-Tocantins. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, Curitiba. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba : ABRH, 2003.

LIRA, V. M.; OLIVEIRA, F. M.; DANTAS, R. T.; SOUZA, W. M. Alteração da precipitação em municípios do estado de Pernambuco. Revista Engenharia Ambiental, v.3, n.1, p.52-61, 2006.

LOPES, W. T. A.; LIMA, J. E. F. W.; VIEIRA, M. R.; DIAS, S. F. Análise do fluxo de sedimentos em suspensão na bacia do Rio Iguaçu. In: XVIII Simpósio brasileiro de recursos hídricos – Campo Grande/MS, 2009.

LOPES, W. T. A.; LIMA, J. E. F. W.; VIEIRA, M. R.; DIAS, S. F. Análise do fluxo de sedimentos em suspensão na bacia do Rio Paraná. In: Anais do 7º Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos-Porto Alegre/RS: ABRH, 2006.

MEDEIROS, P. A.; KOBAYAMA, M.; CORDERO, A. Deflúvios sólidos em suspensão em estações fluviométricas da bacia do Rio Itajaí-Açú. In: II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste – Rio de Janeiro/RJ, 2008.

MEDEIROS, P.A.; KOBAYAMA, M.; CORDERO, A. Deflúvios sólidos em suspensão em estações fluviométricas da bacia do Rio Itajaí-Açú. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa/PB, 2005.

MELO, R. O. Caracterização da produção de sedimentos de uma microbacia no semi-árido pernambucano. Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação de Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco , 2008.

MELO FILHO, J. F. & SOUZA A. L. V. O manejo e a conservação do solo no Semi-árido baiano: desafios para a sustentabilidade. Bahia Agríc. v.7, n.3, p.11, 2006.

MENEZES, H. E. A.; BRITO, J. I. B.; LIMA, R. A. F. A. Veranico e a produção agrícola no Estado da Paraíba, Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.2, p.181-186, 2010.

MENEZES, H. E. A.; BRITO, J. I. B.; SANTOS, C. A. C.; SILVA, L. L. A relação entre a temperatura da superfície dos oceanos tropicais e a duração dos veranicos no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.23, n.2, p.152-161, 2008.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G.; CUNHA, R. B.; GOMES, S. T. Avaliação da descarga sólida do leito em rio de Montanha com uso do amostrador BLH-84. In: *Anais do VIII Encontro nacional de engenharia de sedimentos – Porto Alegre: ABRH, 2008.*

MERTEN, G. H.; HOROWITZ, A. J.; MINELLA, J. P. G.; CLARKE, R. T.; RIBEIRO, G. S. Estimativa do fluxo de sedimentos em suspensão utilizando a curva-chave aplicada a vazões mensais e diárias. In: *XVII Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 2007, São Paulo. Anais. São Paulo, 2007*

MERTEN, G. H.; HOROWITZ, A. J.; CLARKE, T. R.; MINELLA, J. P. G.; PICKBRENNER, K.; PINTO, M.C.F. Considerações sobre a utilização da curva-chave para determinação de fluxo de sedimentos. In: *Anais do VII Encontro nacional de engenharia de sedimentos – Porto Alegre: ABRH, 2006.*

MERTEN, G. H. & POLETO, C. *Qualidade dos sedimentos. Porto Alegre: ABRH. 2006. 397p.*

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; REICHERT, J. M.; SANTOS, D. R. Identificação e implicação para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, n.6, p.1637-1646, 2007.

MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; AZEVEDO, J. R. G.; ANTONINO, A. C. D.; SANTOS, T. E. M.; OLIVEIRA, L. M. M.; MOURA, A. E. S. S. Estudos hidrológicos em bacias experimentais e representativas da rede de hidrologia do semi-árido (Pernambuco, Brazil). In: *9º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA), Benguela, Angola, Outubro, 2009b.*

MONTENEGRO, A.A.A. & MONTENEGRO, S.M.G.L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB*, v.10, n.1, pp. 30–37, 2006.

MONTENEGRO, S. M. G.; MONTENEGRO, A. A. A.; MACKAY, R.; OLIVEIRA, A. S. C. Dinâmica hidro-salina em aquífero aluvial utilizado para agricultura irrigada familiar em região semiárida. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, n.2, p. 85-92, 2003.

NICHOLS, M. H. Measured Sediment Yield Rates From Semiarid Rangeland Watersheds. *Rangeland Ecol Manage*, v.59, p.55-62, 2006.

OLD, G.H., LEEKS, G.J.L., PACKMAN, J.C., SMITH, B.P.G., LEWIS, S., HEWITT, E.J., HOLMES, A. Y. “The impact of a convectional summer rainfall event on river flow and fine sediment transport in a highly urbanized catchment: Bradford, West Yorkshire.” *The Science of the Total Environment*, v.314-316, p.495-512, 2003.

PAIVA, E. M. C. D. Métodos de Cálculo do transporte de Sedimentos em Rios. In: Hidrologia Aplicada à gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas. Org. por DE PAIVA, J. B. D.; DE PAIVA, E. M. C. D., Porto Alegre: ABRH, p.313-364, 2001.

PICOUET, C., HINGRAY, B., OLIVRY, J.C. "Empirical and conceptual modeling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the Upper Niger river basin." *Journal of Hydrology*, n.250, p.19-39, 2001.

PONCE, V.M. *Engineering Hydrology. Principles and Practices*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, p.640, 1989.

POWELL, D.M.; REID, I.; LARONNE, J.B.; FROSTICK, L. Bed load as a component of sediment yield from a semiarid watershed of the northern Negev. *AISH Publication*, v.236, p.389-397, 1996.

PUIGDEFABREGAS, J.; SOLE, A.; GUTIERREZ, L.; BARRIO, G. DEL; BÔER, M. Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from the Rambla Honda field site in Southeast Spain. *Earth-Science Reviews*, v.48, p. 39-70, 1999.

PROBST, J.L.; AMIOTTE-SUCHET, P.A. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrology Science Journal*, v.37, n.6, p.621-637, 1992.

REID, I., LARONNE, J.B., POWELL, D. M. Impact of major climate change on coarse-grained river sedimentation: a speculative assessment based on measured flux. In: Brown, A.G., Quine, T.A. (Eds.), *Fluvial Processes and Environmental Change*. John Wiley and Sons Ltd, p.105-115, 1999.

REID, I.; LARONNE, J.B. Bed load sediment transport in an ephemeral stream and a comparison with seasonal and perennial counterparts. *Water Resour. Res.* v.31, n3, p. 773-781, 1995.

RESTREPO, J. D.; KJERFVE, B.; HERMELIN, M.; RESTREPO, J. C. Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River, Colombia. *Journal of Hydrology*, 316:p. 213-232, 2006.

ROVIRA, A.; BATALLA, R. J.; SALA, M. Fluvial sediment budget of a Mediterranean river: the lower Tordera, Catalan Coastal Ranges, NE Spain. *Catena*, n.60, p.19-42, 2005.

SANTOS, L.L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e Aplicações. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife-PE, v.2, n.3, p.1-19, 2009.

SANTOS, T.E.M.; SILVA, J.R.L.; ANDRADE, T.S.; MONTENEGRO, A.A.A.; SILVA JÚNIOR, V.P.; SANTOS, E.S. Índice de erosividade (EI30) das chuvas para a bacia experimental do Jatobá, no semi-árido pernambucano. In: *Anais do VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. Gravatá, Anais, 2006.

SANTOS, I., FILL, H.D., SUGAI, M.R.V.B., BUBA, H., KISHI, R.T., MARONE, E., LAUTERT, L.F. “Medição do transporte de sedimentos.” In: Hidrometria aplicada. Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, Curitiba-PR, p.272, 2001.

SILVA, L. L.; COSTA, R. F.; CAMPOS, J. H. B. C.; DANTAS, R. T. Influência das precipitações na produtividade agrícola no Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, n.4, p.454-461, 2009.

SILVA JUNIOR, V. P.; DOS SANTOS, E. S.; DOS SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. de A.; SILVA, E. F. de F. Hidrometria experimental na bacia do Alto Ipanema no município de Pesqueira-PE. In: IX Simpósio de recursos hídricos do nordeste, 2008, Salvador. Anais... Salvador, 2008.

SIMÕES, S. J. C.; COIADO, E. M. (2001). Métodos de Estimativa da Produção de Sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas, in: Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas. Org. por De PAIVA, J. B. D.; De PAIVA, E. M. C. D., Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 365-394

SIMOM, A., DICKERSON, W., HEINS, A. “Suspended-sediment transport rates at the 1.5-year recurrence interval for ecoregions of the United States: transport conditions at the bankfull and effective discharge?” *Geomorphology*, 58, p. 243-262, 2003.

SIMONS, D. B.; SENTÜRK, F. Sediment transport technology: water and sediment dynamics. In: Water Resources Publications. Colorado, 879p, 1992.

SOUZA, C. F.; DORNELLES, A. M.; ACIOLE, L. A.; MERTEN, G. Comparação dentre estimativas de produção de sedimentos na bacia do rio Potiribu. In: VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2006. Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: nov. 2006.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Editora da UFRGS/ABRH, v.4. 918p. Porto Alegre/RS, 2007.

VANONI, V.A. (Ed.) Sedimentation Engineering. American Society of Civil Engineers Manual and Report of Engineering Practice n.54. 1975.

VERSTRAETEN, G.; POESEN, J. Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate. *Geomorphology*, v.40, p.123-144, 2001.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245p, 1975.

WALLING, D.E. Linking the field to the river: sediment delivery from agricultural land. In: Soil Erosion on Agricultural Land. Ed.: BOARDMAN, J.; FOSTER, I.D.L.; DEARING, J.A. Wiley, Chichester, p.129-152, 1990.

WIEGAND, M. C. Proposta metodológica para estimativa da produção de Sedimentos em grandes bacias hidrográficas: estudo de caso Alto Jaguaribe, CE. Dissertação

submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, 2009.

XU, J. Implication of relationships among suspended sediment size, water discharge and suspended sediment concentration: the Yellow River basin, China. *Catena*. v.49, p. 289- 307, 2002.

XU, J. Grain-size Characteristics of suspended load sediment of the Yellow River, China. *Catena*, v.43, n.2, p. 176-186, 2000.

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