

Unesp  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

BRUNO PAVANELLI ZANELLA

**MODELAGEM DO APORTE DE SEDIMENTOS APLICADA À BACIA
HIDROGRÁFICA CONTRIBUINTE DA PCH COSTA RICA (MS) E
PROPOSTA DE MITIGAÇÃO DO ASSOREAMENTO**

Guaratinguetá

2016

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá
Guaratinguetá

2016

BRUNO PAVANELLI ZANELLA

**MODELAGEM DO APORTE DE SEDIMENTOS APLICADA À BACIA
HIDROGRÁFICA CONTRIBUINTE DA PCH COSTA RICA (MS) E
PROPOSTA DE MITIGAÇÃO DO ASSOREAMENTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientadora: Prof^a Dr^a Isabel Cristina de Barros Trannin

Guaratinguetá

2016

Z28m	<p>Zanella, Bruno Pavanelli</p> <p>Modelagem do aporte de sedimentos aplicada à bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS) e proposta de mitigação do assoreamento / Bruno Pavanelli Zanella – Guaratinguetá, 2016.</p> <p>142 f. : il.</p> <p>Bibliografia : f. 128-142</p> <p>Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.</p> <p>Orientadora: Prof^a Dr^a Isabel Cristina de Barros Trannin</p> <p>1. Usinas hidrelétricas 2. Sedimentologia 3. Métodos de simulação</p> <p>I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.311.21(043)</p>
------	--

BRUNO PAVANELLI ZANELLA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof.^ª Dr.^ª ISABEL CRISTINA DE BARROS TRANNIN
Orientadora / UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
UNESP/FEG


Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JUNIOR
UNESP/FEG


Prof.^ª Dr.^ª SUELI YOSHINAGA PEREIRA
UNICAMP


Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS TRAGA
UNITAU

Janeiro de 2016

DADOS CURRICULARES

BRUNO PAVANELLI ZANELLA

NASCIMENTO	11.01.1984 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP
FILIAÇÃO	José Juarez Zanella Elena Aparecida Pavanelli Zanella
2004/2008	Curso de Graduação em Engenharia Ambiental Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
2009/2011	Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
2011/2012	Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho Universidade de Taubaté
2012/2016	Doutorado em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

de modo especial, aos meus pais, Elena e Juarez que sempre me apoiaram, aos meus irmãos, avós e a minha noiva Eliane Barreto.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me acompanhar nessa jornada e por me dar saúde para vencer os obstáculos;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UNESP de Guaratinguetá;

À Prof^a. Dr^a. Isabel Cristina de Barros Trannin pela orientação, pelos conhecimentos compartilhados e pelos ensinamentos;

Ao Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho por compartilhar seus conhecimentos;

A todos os Professores que passaram pela minha vida e que de alguma forma me serviram de exemplo e dividiram suas experiências e conhecimentos;

À ANEEL, EDP e FUNDUNESP na realização do Projeto de P&D.

À empresa ANAMBI – Análise Ambiental Ltda. pelo apoio nas coletas hidrossedimentológicas em especial aos seus colaboradores Camila e Thiago.

À empresa Viveiro Ravenala Ltda. pelo monitoramento do plantio.

Aos amigos envolvidos nesta pesquisa, David, Willian, Celso e Alessandra.

À minha mãe Elena e ao meu pai Juarez, pelo exemplo de vida, pela dedicação no meu desenvolvimento pessoal e profissional, por fazerem parte e estarem presentes em todos os momentos da minha vida;

Aos meus irmãos Gláucia, Glauco e Maryangela, pela amizade e por estarem presentes para me ajudar e apoiar em todos os momentos;

A toda minha família, pelo apoio incondicional, pela compreensão e dedicada atenção, em especial aos meus avos Geny, Célia, José e ao meu avô Vicente, que mesmo longe tem iluminado o meu caminho;

Ao meu padrinho Prof. Dr. Carlos Augusto Pavanelli e à minha madrinha Heloísa Helena Carvalho Pavanelli pelos conselhos e carinho.

À Eliane Barreto, minha noiva, pelo amor, companheirismo, compreensão e carinho;

Aos amigos que cativei ao longo da vida, pela amizade e compreensão. Agradeço em especial aos amigos Danilo Augusto Faria e Marcelo Godoy Rigobello, pelos conselhos e pelo apoio;

E a todos os seres que passaram pela minha vida, compartilhando sentimentos, valores, conhecimentos, e que estarão eternamente guardados em minha memória.

*A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original”.*

Albert Einstein

ZANELLA, B. P. **Modelagem do aporte de sedimentos aplicada à bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS) e proposta de mitigação do assoreamento.** 2016. 142f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

A avaliação do potencial de produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica contribuinte de uma hidrelétrica é de extrema importância para a análise da viabilidade de implantação de uma planta geradora, sobretudo quando se trata de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH), pois o assoreamento pode comprometer a longevidade do empreendimento. Este estudo teve como objetivo aplicar e avaliar modelos de predição de aporte de sedimentos na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, no Estado de Mato Grosso do Sul, gerados pelos softwares SWAT e InVEST. A bacia contribuinte desta PCH, com aproximadamente 1.200km², é integrante da bacia do Alto Rio Sucuriú, e apresenta escassez de dados de séries históricas de hidrologia e sedimentologia. A modelagem pelo software SWAT e InVEST permitiu verificar que a produção de sedimentos ocorre em altas taxas na bacia contribuinte desta PCH. A perda total de solo nesta bacia obtida pelo InVEST foi de 19,23 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (2.392.353,10 Mg ano⁻¹), superior em 2,2 vezes o valor gerado pelo software SWAT, de 8,54 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (1.062.402,15 Mg ano⁻¹). O total de sedimentos que efetivamente chega ao canal de adução da PCH Costa Rica estimada pelo InVEST foi de 100.674,20 Mg ano⁻¹ de sedimentos, enquanto o SWAT apresentou um total 10,43 vezes superior (1.049.521,72 Mg ano⁻¹). A diferença obtida entre os dois modelos pode ser atribuída às peculiaridades de cada software, sendo utilizada no InVEST, a relação máxima do aporte de sedimento definida em 80% que não é aplicada no SWAT representa a capacidade máxima de retenção possível em cada célula. A modelagem da perda de solo em bacias hidrográficas realizada pelos softwares SWAT e InVEST mostrou-se promissora, com elevada correlação entre si e com o Método de Einsten Modificado. Estes sedimentos são carregados e se acumulam nos cursos d'água, gerando problemas operacionais para esta PCH, que necessita de dragagem constante para permitir o funcionamento do empreendimento, gerando custos que não foram previstos na concepção do projeto. Diante deste cenário foi proposta a recomposição vegetal das áreas degradadas por processos erosivos intensos, com a utilização de biotecnologia, em sistema de plantio direto de espécies nativas do Cerrado em consórcio com leguminosas inoculadas com rizóbio. A simulação do InVEST para o cenário futuro com recomposição vegetal de 13,78 km² das APPs hídricas desta bacia gerou uma redução na produção de sedimentos de 6.464,99 Mg ano⁻¹, demonstrando que a adoção de práticas conservacionistas pelos produtores da bacia contribuinte da PCH Costa Rica pode amenizar os processos erosivos, aumentar a capacidade produtiva dos solos e diminuir os custos desta hidrelétrica com o desassoreamento do canal de adução.

Palavras-Chave: Hidrelétricas, Produção de sedimentos, SWAT, InVEST, Hidrossedimentologia.

ZANELLA, B. P. **Modeling of sediment delivery applied to the watershed of SHP Costa Rica (MS) and a siltation mitigation proposal.** 2016. 142f. Thesis (Doctor in Mechanical Engineering) Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

The evaluation of sediment production potential in a hydroelectric watershed is extremely important for the deployment of assessing the feasibility of a generating plant, especially in the case of a Small Hydroelectric Plant (SHP) because the sediment deposition may compromise the longevity of the project. This study aimed to implement and evaluate sediment delivery prediction models in the watershed of SHP Costa Rica in the state of Mato Grosso do Sul, generated by SWAT and InVEST software. The basin of this SHP, with approximately 1.200km², is an upper portion of the Sucuriú river basin and presenting scarcity of data time series of hydrology and sedimentology. Modeling by SWAT and InVEST software has shown that the production of sediments occurs at high rates in the basin of this SHP. The total soil losses in watersheds of this SHP obtained by InVEST was 19,23 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (2392353,10 Mg ano⁻¹), higher than the value obtained by SWAT software with 8,54 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (1062402,15 Mg ano⁻¹). The sediment that reaches the adduction channel of SHP Costa Rica estimated by InVEST is 100,674.20 Mg year⁻¹ of sediments, while the SWAT has a total 10.43 times higher (1.049.521,72 Mg ano⁻¹). The difference obtained between the two models can be attributed to the peculiarities of each software being used in InVEST, the maximum ratio of sediment contribution set at 80% which is not applied in SWAT is the maximum capacity possible retention in each cell. The modeling of soil loss in river basins performed by SWAT and InVEST software proved promising, with high correlation with each other and the method of Modified Einstein. These sediments are carried and accumulate in streams, creating operational problems for SHP Costa Rica, which requires dredging to allow operation, and generates costs that were not anticipated in the initial project. In this scenario was proposed a plant recovery of degraded areas with the use of biotechnology in no-tillage system of native Cerrado species intercropped with legumes inoculated with Rhizobium. The simulation of InVEST for future scenario with plant recovery of 13.78 km² of hydric permanent preservation areas in the SHP Costa Rica basin generated a reduction of 6464.99 Mg year⁻¹ in the total loss of sediment in small watersheds. The adoption of conservation practices by farmers of the SHP Costa Rica basin can mitigate the erosive processes, increase the productive capacity of soils and reduce the costs of this hydropower plant with dredging in the adduction channel.

Keyword: Hydroelectric plants, Production of sediments, SWAT, InVEST, Hydro-sedimentology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Variações entre a velocidade média de um curso d'água (cm s^{-1}) e o tamanho das partículas (mm) e suas relações com os grandes grupos de processos fluviais.....	23
Figura 2 – a. Localização da área de interesse no Brasil. b. Localização da área de interesse no Estado de Mato Grosso do Sul.	32
Figura 3 – Geologia correspondente à região da área de estudo no município de Costa Rica (MS).....	34
Figura 4 – Pedologia correspondente à região da área de estudo no município de Costa Rica (MS).....	35
Figura 5 – Distribuição dos pontos de amostragem na bacia hidrográfica do Rio Sucuriú, contribuinte da PCH Costa Rica (MS).	38
Figura 6 – Planilha de cálculo da descarga sólida total para o Ponto 2 (P2), localizado no exutório do Ribeirão São Luis, na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS).....	44
Figura 7 – Representação esquemática dos dados empregados para a estimativa de perda de solo por erosão utilizando o programa InVEST	46
Figura 8 – Plataforma de conectividade entre operador e computador utilizada pelo software InVEST	48
Figura 9 – Modelo digital de elevação do terreno (DEM) para a área de estudo.....	49
Figura 10 – Mapa do Brasil com as equações empregadas e suas respectivas regiões de abrangência para o cálculo da erosividade	51
Figura 11 – Mapa de uso e ocupação do solo para o ano de 2011 com base na imagem de satélite do Landsat.	54
Figura 12 – Representação esquemática dos dados empregados para a estimativa de perda de solo por erosão utilizando o programa SWAT.	59
Figura 13 – Vazões obtidas nos pontos amostrados nas estações chuvosas e de estiagem dos anos de 2012 e 2013, na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS).	62
Figura 14 – Descarga sólida total dos diferentes pontos de amostragem da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS).	63
Figura 15 – Região de cabeceira a montante do ponto de coleta número 16 com grandes áreas destinadas à agroindústria na produção de sementes de soja.....	64
Figura 16 – Concentrações de sólidos em suspensão obtidas nas estações chuvosa e de estiagem nos anos de 2012 e 2013 na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS) e os limites estabelecidos por Carvalho et al. (2000).	65
Figura 17 – Granulometria dos sólidos em suspensão, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS) na estação chuvosa de 2012 (a) e 2013 (b).	66
Figura 18 – Granulometria dos sedimentos em suspensão, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS) na estação de estiagem de 2012 (a) e 2013 (b).....	67
Figura 19 – Granulometria dos sólidos de fundo, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação chuvosa de 2012 (a) e 2013(b).	68

Figura 20 – Granulometria dos sólidos de fundo, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), no período de estiagem de 2012 (a) e 2013(b).	69
Figura 21 – Relação entre as variações da velocidade média de um curso d'água (cm s^{-1}) e o tamanho das partículas de sedimentos (mm) e os processos fluviais. Em destaque, os valores máximos e mínimos de velocidade média de fluxo dos cursos d'água da bacia contribuinte da PCH Costa Rica nos períodos chuvosos e de estiagem de 2012 e 2013.....	72
Figura 22 – Erosividade anual média para o Brasil.....	76
Figura 23 – Erosividade media anual para o Estado de Mato Grosso do Sul.....	77
Figura 24 – Mapa pedológico da bacia contribuinte da PCH Costa Rica/MS.	79
Figura 25 – Mapa raster com os valores de erodibilidade (fator K) para cada tipo de solo da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS)	81
Figura 26 – Mapa raster do fator LS para a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica.....	82
Figura 27 – Detalhamento de áreas suscetíveis à erosão pela análise do fator topográfico (LS) na bacia contribuinte da PCH Costa Rica.	83
Figura 28 – Comparativo das áreas suscetíveis à erosão pela análise do fator topográfico (LS) com o mapa de erodibilidade dos solos da bacia contribuinte da PCH Costa Rica.	84
Figura 29 – Mapa raster de declividade do terreno para a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica gerado pelo software InVEST.	85
Figura 30 – Localização do cinturão de processos erosivos no mapa geológico da bacia hidrográfica do Alto Rio Sucuriú (MS).....	86
Figura 31 – Mapa da produção de sedimentos em $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, nas sub-bacias que compõem a bacia contribuinte da PCH Costa Rica, geradas pelo software InVEST.....	92
Figura 32 – Áreas susceptíveis aos processos erosivos considerando o fator topográfico (LS) e a erodibilidade dos solos (Fator K) e a modelagem da produção anual de sedimentos na bacia contribuinte da PCH Costa Rica.	93
Figura 33 – Microbacias com diferenças superiores a $15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nas taxas de perda de solo geradas pelos modelos do SWAT e do InVEST para as 149 microbacias.	99
Figura 34 – Dispersão dos dados de perda de solo obtidos pelos softwares SWAT e InVEST para as 149 microbacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS).....	100
Figura 35 – Voçoroca a montante da PCH Costa Rica, inserida no cinturão de quebra geomorfológica da topografia com o desprendimento de grandes blocos de solo.	101
Figura 36 – Vista geral de uma voçoroca à montante da PCH Costa Rica/MS	104
Figura 37 – Imagem de satélite com destaque para o cinturão de processos erosivos e outras frentes de erosão em direção às áreas agrícolas	105
Figura 38 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS) em 2011(a) e em cenário futuro, adotando a recomposição vegetal das áreas de preservação permanente (APPs), conforme Código Florestal - Lei Federal 12.651/2012 (b).	106
Figura 39 – Localização da área destinada à implantação do projeto modelo de recomposição vegetal na cabeceira da principal e mais antiga voçoroca identificada à montante da PCH Costa Rica (MS).....	112

Figura 40 – Preparação dos inoculantes, por meio da multiplicação em meio líquido YM, contendo estirpes de rizóbio específicas para leguminosas nativas do Cerrado, fornecidas pela Embrapa Agrobiologia/Seropédica (RJ).	116
Figura 41 – Inoculação das sementes de leguminosas com as estirpes específicas de rizóbio utilizando o meio líquido YM na diluição 10^{-7} e, no caso das sementes de Canavalia e de Ormosia, meio YM misturado à turfa esterilizada.	116
Figura 42 – Área experimental à montante da voçoroca do município de Costa Rica (MS).	117
Figura 43 – Parcela experimental 1: tratamento controle – sem plantio de espécies nativas.	118
Figura 44 – Parcela experimental 2: espécies nativas do Cerrado consorciadas com leguminosas não inoculadas com rizóbio.	118
Figura 45 – Parcela experimental 3: espécies nativas do cerrado não consorciadas com leguminosas.	119
Figura 46 – Parcela experimental 4: espécies nativas do cerrado consorciadas com leguminosas inoculadas com rizóbio específico.	119
Figura 47 – Limpeza da área para implantação das parcelas experimentais na cabeceira da voçoroca do município de Costa Rica (MS), preservando as espécies nativas remanescentes do Cerrado, nas parcelas experimentais.	120
Figura 48 – Delimitação das parcelas experimentais na região à montante, na cabeceira da voçoroca do município de Costa Rica (MS), respeitando o nível do terreno.	120
Figura 49 – Esquema do espaçamento adotado nos plantios das áreas experimentais.	121
Figura 50 – Abertura das covas com 10 cm de profundidade e espaçadas de 2m x 3m, para semeadura das espécies leguminosas e não leguminosas nativas do Cerrado nas parcelas experimentais implantadas à montante da voçoroca do município de Costa Rica (MS).	122
Figura 51 – Semeadura das espécies leguminosas e nãoleguminosas, nativas do Cerrado, nas parcelas experimentais no entorno da voçoroca do município de Costa Rica (MS).	122
Figura 52 – Trabalhos executados pela empresa “Viveiro Ravenala Ltda.”: a) Construção da cerca de proteção da área experimental do projeto de recomposição vegetal implantada na cabeceira da voçoroca do município de Costa Rica (MS), b) Irrigação das parcelas experimentais, c) e d) Acompanhamento do crescimento das sementes de espécies nativas do Cerrado e controle de pragas.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Pontos de Amostragem da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS).....	39
Tabela 2- Principais fórmulas para cálculo da descarga sólida de arrasto e de material do leito apresentadas por Stevens e Yang (1989).....	41
Tabela 3- Dados referentes ao Ponto 2, na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, localizado no exutório do Ribeirão São Luis, utilizados no método de Einstein modificado.....	42
Tabela 4 - Faixas granulométricas do material de leito e em suspensão referente ao Ponto 2, da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, no exutório do Ribeirão São Luis...43	
Tabela 5 - Banco de dados a ser inserido no software InVEST para a predição da produção e retenção de sedimentos nas sub-bacias que compõem a bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS).	46
Tabela 6 - Erodibilidade dos solos (Fator K) da Bacia do Alto Paraguai, próxima à região do município de Costa Rica (MS).	52
Tabela 7 - Classes de uso do solo da bacia do Alto rio Sucuriú, à montante do reservatório da PCH Costa Rica, em 2011, expressos em km ² e porcentagem.	54
Tabela 8 - Uso do solo (Fator C) da Equação Universal de Perda de Solo, para algumas classes de usos.	56
Tabela 9 - Uso do solo (Fator C) da Equação Universal de Perda de Solo, para algumas classes de uso.....	56
Tabela 10 - Fator P da Equação Universal de Perda de Solo, para algumas práticas conservacionistas adotadas.	56
Tabela 11 - Dimensionamento da Área de Preservação Permanente (APP).	60
Tabela 12 - Velocidade média da seção do curso d'água amostrada nos locais de coleta para as 4 campanhas realizadas no período chuvoso e seco de 2012 e 2013.	71
Tabela 13 - Descarga sólida total dos 16 pontos amostrados na bacia contribuinte da PCH Costa Rica, calculada pelo método de Einstein Modificado nas estações chuvosas e de estiagem de 2012 e 2013.	73
Tabela 14 - Tabulação dos valores calculados para a erosividade (Fator R) da bacia hidrográfica da PCH Costa Rica/MS.....	74
Tabela 15 - Classes de erosividade (Fator R).	78
Tabela 16 - Classes de erodibilidade (Fator K).	80
Tabela 17 - Fator K para os solos da área de estudo, com base no Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai.	80
Tabela 18 - Valores estabelecidos para a tabela biofísica de cada classe de uso e ocupação do solo, considerando as práticas conservacionistas e de manejo do solo.	87
Tabela 19 - Produção de sedimento, por microbacias hidrográficas a montante da PCH Costa Rica, gerados por meio do software InVEST.	87
Tabela 20 - Classe de interpretação para expectativa de perda de solo.....	93
Tabela 21 - Modelagem da perda de solo das 149 microbacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS) pelos softwares SWAT e InVEST.....	94

Tabela 22 - Produção de sedimentos estimada pelo método de Einstein modificado e pelos softwares InVEST e SWAT, no exutório das 16 sub-bacias que compõem a bacia contribuinte da PCH Costa Rica amostradas nas 4 campanhas hidrossedimentológicas.....	102
Tabela 23 - Uso do solo da bacia contribuinte da PCH Costa Rica, em 2011 e em cenário futuro, com revegetação das APPs, conforme descrito na Lei Federal 12.651/2012.....	107
Tabela 24 - Aporte de sedimentos pelas sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, modelada pelo software InVEST, para o uso do solo em 2011 e em cenário futuro, com a revegetação das APPs.....	107
Tabela 25 - Espécies nativas que podem ser introduzidas na recuperação de áreas degradadas e revegetação no Estado do Mato Grosso do Sul, conforme comunicado técnico da Embrapa, nº 75.....	113
Tabela 26 - Leguminosas nativas do Cerrado e respectivos inoculantes a base de rizóbio específico.....	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APPs	Áreas de Preservação Permanente
CAR-MS	Cadastro Ambiental Rural do Mato Grosso do Sul
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FUNDUNESP	Fundação para o Desenvolvimento da UNESP
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
InVEST	Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs
LULC	Land Use/Land Cover
MDE	Modelo Digital de Elevação
MUSLE	Equação Universal de Perda de Solo Modificada
NBR	Norma Brasileira (Aprovada pela ABNT)
PCBAP	Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
SEMAC	Secretaria de Estado de Meio Ambiente, das Cidades, do Planejamento, da Ciência e Tecnologia (MS)
SENAC	Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial
SEPLAN	Secretaria de Estado de Planejamento (MS)
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SINIMA	Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente
SMA	Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo
SPD	Sistema de Plantio Direto
SUPEMA	Superintendência de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Extinta)
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
USLE	Equação Universal de Perda de Solo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS	21
2.1	OBJETIVO GERAL	21
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1	PROCESSOS EROSIVOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS	22
3.2	ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIO DE HIDRELÉTRICAS	24
3.3	MODELAGEM DA PREDIÇÃO DO APORTE DE SEDIMENTOS	26
3.3.1	<i>Aplicação do SWAT na previsão do aporte de sedimentos</i>	<i>26</i>
3.3.2	<i>Aplicação do InVEST na previsão do aporte de sedimentos.....</i>	<i>28</i>
3.3.3	<i>Características das equações de perda de solo – USLE e MUSLE.....</i>	<i>30</i>
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1	CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	32
4.1.1	<i>Geologia.....</i>	<i>33</i>
4.1.2	<i>Pedologia</i>	<i>34</i>
4.1.3	<i>Geomorfologia</i>	<i>36</i>
4.1.4	<i>Vegetação do Estado de Mato Grosso do Sul.....</i>	<i>36</i>
4.2	LEVANTAMENTOS HIDROSEDIMENTOLÓGICO	37
4.2.1	<i>Determinação de descarga líquida (vazão).....</i>	<i>39</i>
4.2.2	<i>Determinação da concentração de sedimentos em suspensão.....</i>	<i>39</i>
4.2.3	<i>Medição de descarga de fundo.....</i>	<i>40</i>
4.3	PREDIÇÃO QUANTITATIVA DO APORTE DE SEDIMENTOS	41
4.3.1	<i>Método de Einstein modificado.....</i>	<i>42</i>
4.3.2	<i>Metologia utilizada pelo modelo InVEST</i>	<i>45</i>
4.3.3	<i>Metologia utilizada pelo modelo SWAT.....</i>	<i>58</i>
4.3.4	<i>Comparação entre os métodos de previsão de aporte de sedimentos</i>	<i>59</i>
4.4	PROPOSTA PARA A MITIGAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS E ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE (APP)	60
4.4.1	<i>Plantio nas áreas destinadas a recomposição vegetal</i>	<i>61</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
5.1	RESULTADOS DOS ESTUDOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS.....	62
5.1.1	<i>Descarga líquida (vazão).....</i>	<i>62</i>
5.1.2	<i>Descarga sólida total</i>	<i>63</i>
5.1.3	<i>Concentrações de sólidos em suspensão.....</i>	<i>64</i>
5.1.4	<i>Granulometria dos sólidos em suspensão do Alto rio Sucuriú.....</i>	<i>65</i>
5.1.5	<i>Granulometria dos sólidos de fundo</i>	<i>68</i>
5.2	DESCARGA SÓLIDA TOTAL – MÉTODO DE EINSTEIN MODIFICADO.....	73
5.3	DESCARGA SÓLIDA TOTAL - SOFTWARE INVEST.....	74

5.3.1	<i>Índice de erosividade das chuvas (Fator R)</i>	74
5.3.2	<i>Índice de erodibilidade dos solos (Fator K)</i>	78
5.3.3	<i>Comprimento de rampa e declividade do terreno (Fator LS)</i>	82
5.3.4	<i>Elaboração da tabela biofísica correspondente às classes de uso e ocupação de solo</i>	86
5.3.5	<i>Valores da descarga sólida total - software InVEST</i>	87
5.4	MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS - SWAT E INVEST	94
5.5	APORTE DE SEDIMENTOS - EINSTEIN MODIFICADO X SWAT X INVEST	101
5.6	PERDA DE SOLO DA BACIA CONTRIBUINTE DA PCH COSTA RICA EM CENÁRIO FUTURO - INVEST.	106
5.7	PROPOSTA DE RECOMPOSIÇÃO VEGETAL DE ÁREAS DEGRADADAS COM UTILIZAÇÃO DE BIOTECNOLOGIA.....	112
5.7.1	<i>Seleção de espécies nativas do cerrado</i>	113
5.7.2	<i>Produção de inoculantes</i>	115
5.7.3	<i>Implantação das parcelas experimentais na cabeceira da voçoroca à montante da PCH Costa Rica (MS)</i>	117
5.7.4	<i>Monitoramento da área experimental à montante da voçoroca de Costa Rica</i>	122
6	CONCLUSÕES	125
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

1 INTRODUÇÃO

A contribuição das hidrelétricas na geração de energia é importante para as regiões tropicais, devido à grande disponibilidade de recursos hídricos. O Brasil é um dos países que apresentam elevado potencial de aproveitamento de recursos hídricos para a geração de energia elétrica (ANEEL, 2002).

De acordo com os dados do Balanço Energético Nacional, em 2011 a energia hidráulica contribuiu com 81,8% da matriz energética nacional, com uma queda na contribuição para 76,9% em 2012, para 70,6% em 2013 e novamente redução para 65,2% em 2014, apesar disso, a hidroeletricidade continua sendo a principal fonte energética brasileira (EPE, 2013; EPE, 2015).

No ano de 2014, a capacidade total instalada de geração de energia elétrica do Brasil atingiu 133.914 MW, ou seja, uma elevação na capacidade instalada de 7.171 MW. Nesta expansão, as hidrelétricas contribuíram com 44,3%, enquanto que as termoeletricas responderam por 18,1% deste aumento. Por fim, as usinas eólicas e solares foram responsáveis pelos 37,6% restantes de aumento da capacidade nacional (EPE, 2015).

O uso de energia no Brasil, em 2014, tem seu maior consumidor o setor industrial com consumo de 32,9 %, seguido pelo setor de transporte com 32,5%, o setor energético com 10,3%, residências com participação em 9,3%, de serviços com 4,7% e agropecuária com 4,2%. Sendo que em relação a 2013, o ano de 2014 apresentou aumento no consumo de energia de 260,2 Mtep para 265,9 Mtep (EPE, 2015).

Embora a riqueza em recursos hídricos do Brasil, seja estimada em 12% de toda a água doce do mundo, o clima típico de regiões tropicais, com chuvas intensas no verão, causam a erosão e, conseqüentemente, o assoreamento dos reservatórios, impactando de forma negativa o desempenho na produção de energia de grande parte das hidrelétricas brasileiras.

O processo de assoreamento dos cursos d'água pode gerar diminuição da eficiência energética e reduzir a vida útil dos reservatórios das usinas hidrelétricas. Além disso, o assoreamento pode causar abrasão dos canais de fuga e das pás das turbinas e a formação de bancos de areia pode interferir na navegação e, em alguns casos, causar a obstrução da tomada de água (MIRANDA, 2011).

A recuperação dos cursos d'água e dos reservatórios de hidrelétricas, além das áreas contribuintes dos recursos hídricos impactados por processos erosivos se faz necessário a

fim de garantir a demanda energética brasileira. Porém a reconstrução de um ecossistema necessita de uma abordagem técnica e uma análise dos fenômenos e processos envolvidos.

Neste estudo foram aplicados e avaliados os softwares SWAT e InVEST para a modelagem do aporte de sedimentos da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, no Estado do Mato Grosso do Sul, na região Centro-Oeste do Brasil. Essa bacia hidrográfica apresenta escassez de dados de séries históricas de hidrologia e sedimentologia, o que caracteriza a realidade brasileira e limita a obtenção de resultados com elevado grau de confiabilidade por softwares que exigem estes dados.

Os conhecimentos gerados pela avaliação da aplicabilidade destes softwares em cenário de escassez de séries históricas de dados de entrada, como ocorre no Brasil, poderá contribuir técnica e cientificamente para o aperfeiçoamento destes modelos com o intuito de indicar regiões com processos erosivos e orientar o poder público na aplicação de recursos públicos, a fim de minimizar o impacto ambiental destes processos nas bacias hidrográficas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo foi avaliar a aplicação de softwares na modelagem do aporte de sedimentos em cursos d'água da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, no Estado do Mato Grosso do Sul e propor metodologia para a mitigação de áreas degradadas por processos erosivos acelerados, visando à diminuição do assoreamento e o aumento na geração de energia desta hidrelétrica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram:

- Obter dados hidrológicos e hidrossedimentológicos da bacia hidrográfica de contribuição da PCH Costa Rica, em trechos estratégicos e no exutório das microbacias que compõem essa rede de drenagem;
- Estimar o potencial de aporte de sedimentos em cada ponto amostrado, considerando os dados hidrossedimentológicos, obtidos pelo método de Einstein modificado;
- Modelar e quantificar o potencial de aporte de sedimentos da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica pelo software livre, Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) e compará-lo ao fornecido pelo software Soil and Water Assessment Tool (SWAT) e aos dados obtidos pelo método de Einstein modificado;
- Avaliar por meio do software InVEST o potencial de retenção de sedimentos na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, com a recomposição vegetal das áreas de preservação permanente (APPs) hídricas;
- Propor metodologia para a mitigação das APPs hídricas da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, visando à redução do aporte de sedimentos e o assoreamento dos cursos d'água.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSOS EROSIVOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

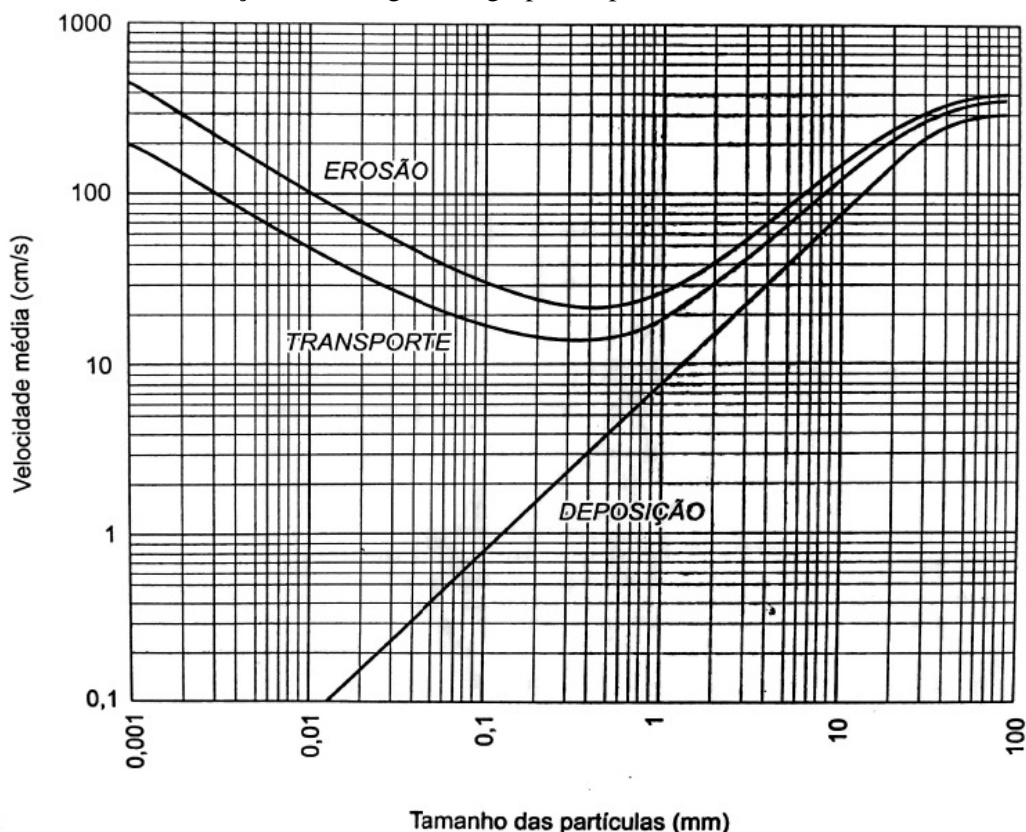
De acordo com Carvalho (1994), os processos responsáveis pela sedimentação são muito complexos, abrangendo a erosão e o deslocamento das partículas pelo escoamento superficial e outros mecanismos até um curso d'água, por meio do transporte deste sedimento no rio, sua deposição na própria calha, lagos e reservatórios e posterior compactação. Este autor destaca que todos os fenômenos relacionados à produção de sedimentos são processos naturais, que ocorrem ao longo dos tempos geológicos e são responsáveis pela forma atual da Terra.

Em uma bacia hidrográfica, a erosão é determinada pela separação e remoção de partículas da rocha e do solo pela ação da água (erosão hídrica), vento (erosão eólica) ou outros agentes presentes neste processo. Naturalmente, com a energia do impacto da gota de chuva no solo e escoamento das águas (erosão hídrica), as partículas são removidas do solo, causando os processos erosivos. E, desta forma, verifica-se que a erosão é mais intensa quanto menor a proteção do solo contra o impacto das gotas de chuvas (CARVALHO, 1994).

Silva et al. (2007) descreveram a erosão hídrica como erosão laminar, caracterizada pela remoção de uma fina camada de solo causada pela precipitação pluvial e escoamento superficial; a erosão linear pela formação de canais com frequência e dimensões variáveis entre 0,5m e 25m de profundidade; os deslizamentos pela ocorrência de deslizamento coletivo do solo e fragmentos rochosos por ação da gravidade em períodos chuvosos; e erosão fluvial que ocorre de modo contínuo e espontâneo pela ação das correntes dos rios.

As variações entre a velocidade média de um curso d'água e o tamanho das partículas (sedimentos) e suas relações com os grandes grupos de processos fluviais foi apresentado por Hjulstrom (1935) *apud* Christofolletti (1981) na Figura 1. Nesta Figura 1 é possível analisar a variação de velocidade de um curso d'água e sua capacidade de arraste de partículas. Verifica-se que os fenômenos de transporte e erosão de partículas grosseiras necessitam de uma maior velocidade d'água para sua ocorrência, enquanto que uma menor velocidade do curso d'água favorece a deposição de partículas no leito.

Figura 1 – Variações entre a velocidade média de um curso d'água (cm s^{-1}) e o tamanho das partículas (mm) e suas relações com os grandes grupos de processos fluviais.



Fonte: (Hjulstrom, 1935 *apud* Christofoletti, 1981).

Segundo Carvalho (1994), os processos erosivos sofrem influência de agentes passivos como a topografia, a gravidade, o tipo de solo, as formações superficiais e também de ações antrópicas. A topografia está relacionada à declividade e o comprimento de rampa do terreno; a gravidade ao deslocamento de grandes porções de solo, com favorecimento pelo aumento da declividade; o tipo de solo é um fator de grande importância, sendo que solos arenosos apresentam pouca resistência à força de arraste e solos argilosos, mais coesos, impedem a infiltração; a cobertura do solo o protege da erosão causada pelo impacto das gotas de chuva, aumenta a infiltração e diminui o escoamento superficial e; as ações antrópicas têm influência no tipo e intensidade dos processos erosivos.

A topografia do terreno, em relação ao seu comprimento de rampa e declividade, exerce grande influência sobre os processos erosivos. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2014), o tamanho e a quantidade dos sedimentos em suspensão que são arrastados pela água variam com a velocidade em que ocorre o escoamento superficial que, por sua vez, depende do comprimento de rampa e do valor da declividade do terreno.

Bertoni (1959) verificou que uma área com grande declividade (20%) e pequeno comprimento de rampa (20 metros) tem a mesma taxa de perda de solo que uma área com

menor declividade (1%) e maior comprimento de rampa (180 metros), nas mesmas condições de conservação, tipo de solo, cobertura e precipitação.

De acordo com Silva et al. (2007), o fator cobertura do solo é de grande importância na prevenção e controle da erosão e dos agravamentos do processo erosivo. Os autores citam que, sob condições naturais, as copas das árvores, a vegetação de sub-bosque e, principalmente, a serrapilheira, diminuem a energia cinética das gotas da chuva e, conseqüentemente, o impacto direto sobre as partículas do solo, que desencadeia o processo erosivo.

3.2 ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIO DE HIDRELÉTRICAS

De acordo com os dados do Balanço Energético Nacional, mesmo com a redução na geração de energia hidráulica no período de 2011 a 2014, a hidroeletricidade continua sendo a principal fonte energética brasileira, com 65,2% de participação na matriz energética nacional (EPE, 2015).

A construção de uma central de geração hidrelétrica apresenta inúmeros fatores positivos, como a geração energética por fontes renováveis e a minimização de fontes poluidoras, quando comparada às demais alternativas de geração. Porém, sua instalação acarreta impactos ambientais e sociais, considerados pela Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986, em seu artigo 2º, inciso VII, que determina que o licenciamento de atividades modificadoras do meio ambiente, como obras hidráulicas para exploração de recursos hídricos, para fins hidrelétricos, acima de 10MW dependem de Avaliação de Impactos Ambientais.

Entre os impactos ambientais associados à construção de uma usina hidrelétrica está a retenção de sólidos nos reservatórios, apresentada nos Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA) das Usinas de Jirau e Santo Antônio (RIMA, 2005) e no da Usina de Belo Monte (RIMA, 2009), sendo indicada para a Usina de Belo Monte, a implantação de um programa de proteção e recuperação de áreas de preservação permanente (APPs), para minimizar o assoreamento do reservatório.

Carvalho (1994) destaca que a erosão é mais intensa quanto menor for a proteção do solo, o que comprova a influência do uso e ocupação do solo sem adoção de práticas conservacionistas, na aceleração de processos erosivos em uma determinada região. De acordo com Carvalho et al. (2000), no momento em que o curso d'água principal atinge a

área de influência do reservatório ocorre uma redução na sua velocidade e, conseqüentemente, a minimização da energia de carreamento, o que favorece a deposição de sedimentos.

A avaliação do impacto ambiental, obrigatória para o licenciamento de hidrelétricas com geração de energia superior a 10 MW, considera o assoreamento de reservatórios como um dos impactos ambientais associados ao barramento. Neste aspecto, Coiado (2001) relata que o reservatório, independentemente de seu dimensionamento ou do uso proposto, reterá sedimentos carreados pelos cursos d'água.

Miranda et al. (2013) avaliaram a influência do assoreamento na capacidade de armazenamento do reservatório da usina hidrelétrica Três Irmãos, no Estado de São Paulo, e verificaram que, desde a implantação do projeto, em 1976 até o levantamento batimétrico realizado em 2008, o assoreamento reduziu o volume total deste reservatório em 14,3% ($1909,62 \cdot 10^6 \text{ m}^3$).

Maia (2006) verificou a redução em 4,14% do volume útil do reservatório de Promissão, localizado no Médio Tietê (SP), no período de 30 anos (diminuição de $2146,62 \text{ hm}^3$, em 1975, para $2057,82 \text{ hm}^3$, em 2005).

Carvalho, Guilhon e Trindade (2000) realizaram um estudo sedimentológico do projeto básico do reservatório da usina hidrelétrica Itiquira, no estado do Mato Grosso e verificaram que, considerando a descarga sólida total medida, a vida útil do reservatório seria de 12 anos. No entanto, quando consideraram a evolução do transporte de sólidos ao longo do tempo, com o aumento anual de 16%, a vida útil deste reservatório reduziria para 8 anos, em consequência do assoreamento.

Aguiar (2009), por meio de análises hidrogeomorfológicas e hidrossedimentológicas, comparou o aporte de sedimentos em suspensão em duas bacias hidrográficas, formadas pelo Rio Iguatemi, localizado no sul do Estado de Mato Grosso do Sul e pelo Rio Piquiri, localizado no Estado do Paraná, ambas contribuintes do reservatório da usina hidrelétrica de Itaipu. Este autor verificou que, embora a bacia do Rio Iguatemi apresentasse descarga líquida e área de drenagem inferior à bacia do Rio Piquiri, sua produção diária de sólidos em suspensão ($\text{Mg km}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) era quatro vezes superior à do Rio Piquiri, caracterizando a suscetibilidade das bacias hidrográficas do Estado do Mato Grosso do Sul aos processos erosivos e, conseqüentemente, ao assoreamento dos cursos d'água.

3.3 MODELAGEM DA PREDIÇÃO DO APORTE DE SEDIMENTOS

Os modelos de predição de aporte de sedimentos, tais como o HEC-RAS, SED2D WES, MIKE21-ST, InVEST, SWAT e WEPP, têm sido muito utilizados na quantificação dos sedimentos gerados em bacias hidrográficas, considerando a erodibilidade dos solos, a erosividade da chuva, o uso e ocupação do solo na bacia e outras características do meio físico.

Existem muitos softwares que podem ser aplicados à modelagem do processo de transporte de sedimentos e nutrientes em bacias hidrográficas e que diferem quanto à complexidade, necessidade de dados de entrada, requisitos, processos e maneira como são representados, a escala do seu destino e os tipos de informações de saída que eles fornecem (MERRITT et al., 2003).

De acordo com Merritt et al. (2003), em geral, os modelos se enquadram em três categorias principais, dependendo dos processos físicos simulados pelo modelo, dos algoritmos dos processos que o modelo descreve e da dependência de dados do modelo, podendo ser: 1) Empírico/estatístico/métrico; 2) Conceitual e; 3) Físico e, são propensos a conter módulos referentes a cada uma das características citadas.

3.3.1 Aplicação do SWAT na predição do aporte de sedimentos

A modelagem realizada pelo software Soil and Water Assessment Tool (SWAT) tem como base a Equação Modificada de Perda de Solo (MUSLE) (WILLIAMS; BERNDT, 1977) e resulta em uma análise global, necessitando, para isso, de uma diversidade de informações, a fim de executar seus cálculos computacionais. Muitos dos dados de entrada são usados para simular características especiais, que não são comuns a todas as bacias hidrográficas (NIETSCH, 2002). Segundo Arnold et al. (1998) o SWAT pode ser caracterizado como um modelo operacional ou conceitual, que opera em passo diário e tem como objetivo prever o impacto da gestão de uma bacia hidrográfica sobre a quantidade de água, de sedimentos e de subprodutos agrícolas em grandes bacias não instrumentadas. De acordo com estes autores o modelo gerado pelo SWAT apresenta pontos positivos como: 1) não exige calibração; 2) utiliza dados disponíveis para grandes áreas; 3) é computacionalmente eficiente para operar em grandes bacias em um prazo de

processamento não muito extenso; e 4) é de tempo contínuo, sendo capaz de simular longos períodos na predição dos efeitos das mudanças nas características da bacia.

Arnold et al. (1998) destacam que uma das maiores limitações da modelagem pelo SWAT, quando aplicado a grandes áreas, é a elevada variabilidade da precipitação na área de estudo, uma vez que a modelagem pelo software SWAT considera apenas a quantidade de precipitação e não agrega a intensidade da chuva em seu modelo computacional.

No Brasil, a modelagem pelo software SWAT tem sido aplicada na predição do aporte de sedimentos em bacias hidrográficas por vários autores, entre eles, Oliveira et al. (1999); Machado et al. (2003); Barsanti et al. (2003); Marchioro et al. (2011); Conceição et al. (2012) e Carvalho Neto et al. (2014).

De acordo com Oliveira et al. (1999), por meio da modelagem com o software SWAT, foi possível quantificar as mudanças nas características hidrossedimentológicas da bacia hidrográfica do rio Joanes, no Estado da Bahia, relacionadas às alterações no uso do solo em vários cenários e avaliar qualitativamente os possíveis impactos destas alterações na zona costeira. Os autores constataram que a retirada da vegetação original aumentou em 5 vezes a produção média anual de sedimentos e a construção de cinco barramentos no rio Joanes reduziu em torno de 18% e 47%, as vazões líquidas e sólidas, respectivamente, à jusante destes barramentos.

Machado et al. (2003) simularam cenários alternativos de uso da terra na microbacia do Ribeirão dos Marins, em Piracicaba (SP). No primeiro cenário, o uso atual foi mantido, sendo recuperada com vegetação nativa apenas a faixa de mata ciliar de 30 m em toda a extensão dos cursos d'água e a faixa de 50 m ao redor das nascentes, de acordo com o antigo Código Florestal de 1965. No segundo cenário, as áreas ocupadas por pastagem foram integralmente substituídas por vegetação florestal nativa. Os autores verificaram que no primeiro cenário a redução na produção de sedimentos, em relação ao estado real de uso e ocupação do solo foi de 10,8 % e no segundo cenário, a redução foi de 94%, evidenciando a importância do controle do aporte de sedimentos por meio da recuperação da mata ciliar dos cursos d'água e do incentivo à adoção de práticas conservacionistas.

Barsanti et al. (2003) avaliaram os processos erosivos das bacias hidrográficas do rio Taquarizinho (1500 km²) e do rio Aquidauana (15200 km²), na região do Pantanal, no estado do Mato Grosso do Sul, comparando o uso e ocupação do solo no período de 30 anos. Os autores verificaram que nas áreas de pastagem, em situações onde a braquiária estava menos densa, ocorreu aumento da perda de solo, com valores comparáveis aos obtidos em áreas agrícolas.

Marchioro et al. (2011) avaliaram a produção média de sedimentos da bacia do córrego Santa Maria, no estado do Rio de Janeiro e verificaram que as áreas com maior produção de sedimentos foram as ocupadas com pastagem associada às declividades entre 25 e 57%, comprimentos de encostas entre 15 e 28 m e às características do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVad), Neossolo Litólico (RLve) e Cambissolo Háplico (CXve2). Estes autores recomendaram a recomposição destas áreas com espécies nativas e, nas demais porções da bacia a difusão de práticas de manejo e conservação do solo.

Conceição et al. (2012) modelaram a vazão e a carga de sedimentos de uma bacia hidrográfica rural, no estado de Santa Catarina, com alta concentração de suínos. Os autores simularam a ocorrência de períodos chuvosos e secos empregando o software SWAT e constataram que a disposição de dejetos suínos no solo teve pouca influência sobre a produção de sedimentos, que variou de 0,94 a 1,10 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

Carvalho Neto et al. (2014) aplicaram o software SWAT na modelagem dos processos erosivos e transporte de sedimentos para diferentes valores do fator de uso e ocupação do Solo (C) da bacia do rio Una, no estado de Pernambuco e estimaram perdas de solo de até 300% superior quando substituíram o valor padrão do software SWAT pelos valores do fator C encontrados na literatura brasileira.

Garbossa et al. (2011) avaliaram o emprego do software SWAT para a modelagem no Brasil, no período de 1999 a 2010, e constataram que, para o estado do Mato Grosso do Sul, foi desenvolvido somente o estudo de Barsanti et al. (2003), que utilizaram este software apenas para a determinação de sedimentos em bacias hidrográficas da região.

3.3.2 Aplicação do InVEST na predição do aporte de sedimentos

O modelo empírico mais conhecido e utilizado para estimativa de taxas de perda de solo por erosão é a Equação Universal de Perda de Solo (USLE). Este modelo matemático foi desenvolvido em 1954 pelo National Runoff and Soil Loss Data Center, nos Estados Unidos e foi revisado por Wischmeier e Smith (1965), os quais fundamentados pelas pesquisas sobre processos erosivos, acrescentaram informações que possibilitaram estabelecer valores mais próximos dos reais aos fatores do modelo USLE para regiões agrícolas específicas e outras áreas pequenas propensas à erosão. Portanto, a USLE permite que os responsáveis pelo planejamento de uma bacia hidrográfica possam prever a taxa

média de erosão do solo para cada combinação de sistemas de cultivo e práticas de gestão com a sua associação a um tipo específico de solo, regime de chuvas e topografia (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Segundo informações da Natural Capital Project (2015), o software Integrate Valuation of Environment Service Tradeoffs (InVEST) foi desenvolvido pela parceria, em 2007, entre a Universidade de Stanford, a Universidade de Minnesota e The Nature Conservancy e World Wildlife Fund.

Saad et al. (2011) apresentaram resultados preliminares da avaliação dos módulos hidrológico e de sedimentos do InVEST, para o Sistema Cantareira, no estado de São Paulo, considerando 4 tipos de uso do solo: 1) pastagem em área total; 2) floresta em área total, 3) o uso do solo atual e, 4) o uso do solo atual com restauração das APPs. Os autores verificaram que a geração de sedimentos foi maior na área de pastagem, sendo que a Equação Universal de Perda de Solo comparada com outros estudos próximos à região (aproximadamente $4 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) gerou uma carga de sedimentos superestimada. Porém, mesmo necessitando de alguns ajustes e reformulações nos fatores utilizados, Saad et al. (2011) afirmaram que o software InVEST apresentou um grande potencial de aplicação na avaliação e valoração dos serviços ambientais das bacias hidrográficas brasileiras, sendo uma ótima ferramenta para subsidiar as políticas públicas nas tomadas de decisão de cunho ambiental.

Thompson e Fidalgo (2013) modelaram a perda de solos na bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu (RJ), empregando o módulo de estimativa de retenção de sedimentos do software InVEST e concluíram que, embora existam limitações no uso da USLE, o modelo possibilitou a espacialização de classes de perdas de solos com indicações de áreas consideradas mais vulneráveis aos processos erosivos. Estes autores relataram que a principal vantagem do uso deste software é a possibilidade de modelar em um único ambiente computacional, minimizando as possibilidades de erros na conversão dos dados e que sua maior limitação está na dificuldade de obter os dados iniciais de entrada, tais como dados climáticos e físicos da área de interesse.

O InVEST também foi utilizado por Conceição (2014) para determinar as áreas prioritárias para a redução e controle da erosão hídrica na bacia do rio Passaúna (PR). Esta modelagem foi uma primeira aproximação da estimativa do potencial de perda de solo e da exportação de sedimentos para os cursos d'água, possibilitando identificar a sub-bacia de maior contribuição de sedimentos para o reservatório e que deveria ser prioritária para as ações de controle da erosão hídrica. Diante dos resultados alcançados esse autor relatou que a ferramenta computacional InVEST se mostrou simples e acessível na simulação da erosão

hídrica em bacias hidrográficas. Entretanto, da mesma forma que Thompson e Fidalgo (2013), esse autor ressaltou a grande dificuldade de obtenção dos dados de entrada relativos à USLE.

3.3.3 Características das equações de perda de solo – USLE e MUSLE

A Equação Universal de Perda de Solo (USLE) descrita por Wischmeier e Smith (1965) foi modificada por Williams (1975), originando a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE), sendo o fator relativo à energia da precipitação, substituído pelo fator de escoamento superficial. De acordo com Williams e Berndt (1977), esta modificação possibilitou que a MUSLE se tornasse mais precisa na predição da produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica, eliminou a necessidade de relações de transporte de sedimentos e aumentou o potencial de aplicação na análise de eventos individuais de chuvas intensas. As relações de transporte são exigidas pela USLE porque o fator chuva representa a energia necessária para a desagregação das partículas. As relações de transporte não são necessárias na MUSLE porque o fator de escoamento superficial representa a energia necessária para a desagregação e transporte dos sedimentos.

Araujo (1997) utilizou técnicas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento como suporte aos modelos USLE e MUSLE e afirmou que o geoprocessamento foi, operacionalmente, eficiente nas tarefas de aquisição de parâmetros de entrada, na integração destes parâmetros e nas saídas de cada modelo de predição de produção de sedimentos.

Domingos (2006) relacionou o planejamento conservacionista com as perdas de solo por erosão hídrica laminar na bacia dos Córregos Rangel, Penha e Santo Antônio, no estado do Espírito Santo, com área total de 2.400,57 ha. Por meio da utilização da USLE, juntamente com o Sistema de Informações Geográficas (SIG), este autor verificou que a perda de solo nesta bacia, foi da ordem de 2.661 Mg de solo ha⁻¹ ano⁻¹. Neste estudo foi gerado um cenário alternativo de uso do solo, onde se propôs a recuperação de áreas degradadas e a substituição dos usos existentes nas APPs, por mata nativa, visando a diminuição de 9,54% das perdas de solo, o equivalente a 253 Mg de solo ha⁻¹ ano⁻¹, que deixariam de ser carregados para os corpos hídricos.

Gómez (2012) desenvolveu um estudo com o objetivo de estimar, por meio da USLE, a produção de sedimentos em todo o território brasileiro. Neste estudo, o autor, observou a pouca sensibilidade desta equação devido, principalmente, ao fator “erosividade” (Fator R). Por outro lado, o fator “cobertura do solo” (Fator C) se mostrou altamente sensível,

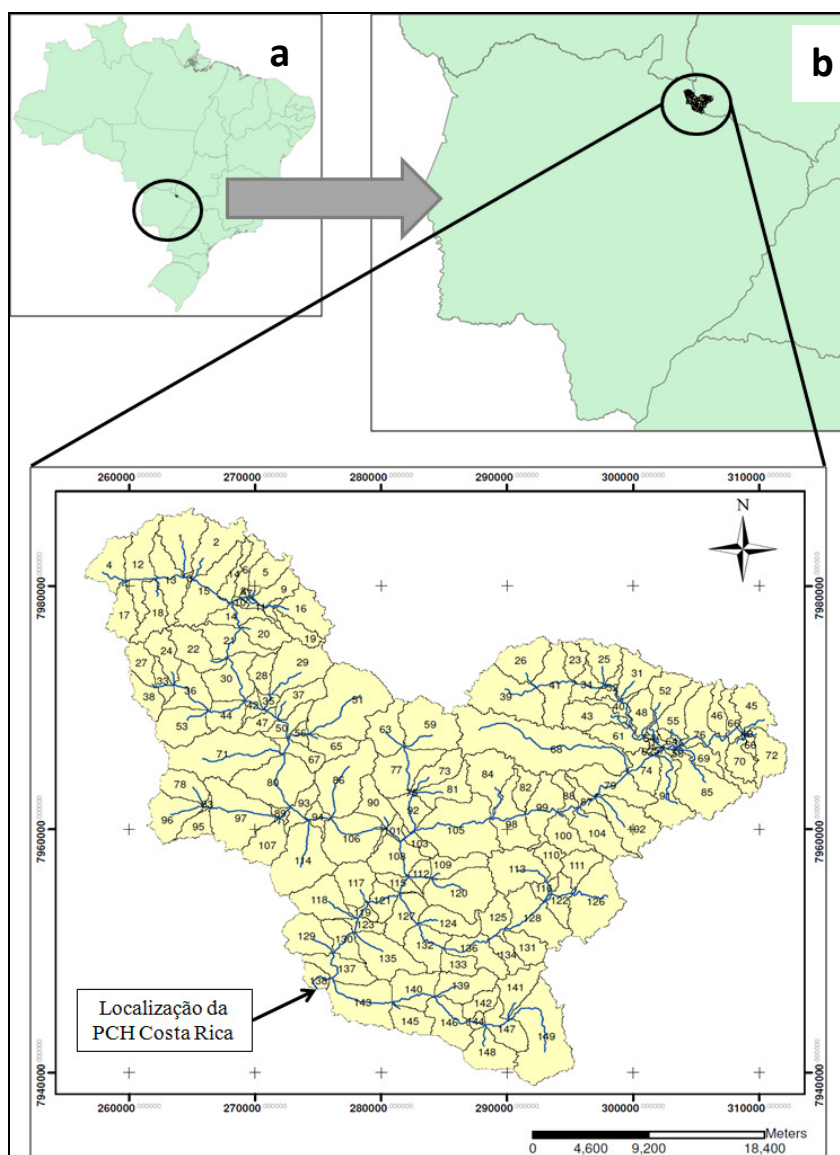
influenciando as taxas máximas de perda de solo, que variaram de $160 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ a $460 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Diante deste resultado, este autor indicou o emprego da equação USLE nas análises das mudanças de uso da terra em escalas regionais e para subsidiar as tomadas de decisão relacionadas ao planejamento e gestão territorial.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Costa Rica é um dos municípios mais prósperos do Estado de Mato Grosso do Sul e está localizado na região Centro Oeste do Brasil, entre as coordenadas UTM, 22K 274761 mE, 7948729 mS, a uma altitude de 677 metros (Figura 2). Neste município está a PCH Costa Rica, que desde 1998 vem operando, com uma capacidade instalada de 16 MW. A área de estudo compreende a bacia hidrográfica a montante da PCH Costa Rica.

Figura 2 – a. Localização da área de interesse no Brasil. b. Localização da área de interesse no Estado de Mato Grosso do Sul.



Fonte: o autor.

4.1.1 Geologia

De acordo com os dados obtidos pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2006), dentre os domínios tectono estratigráficos do Estado do Mato Grosso do Sul verifica-se que a região do município de Costa Rica está localizada na Bacia do Paraná, pertencente à Bacia da Era Paleo-Mesozóica, sendo esta correspondente ao Éon Fanerozóico.

O mapa geológico (Figura 3) do Estado do Mato Grosso do Sul (CPRM, 2006), na escala cartográfica de 1:1.000.000, apresenta a Formação Serra Geral e Formação Botucatu do Grupo São Bento, a Formação Vale do Rio do Peixe do Grupo Bauru; e do Grupo Caiuá, o Grupo Caiuá Indiviso e a Formação Santo Anastácio, ambos do Período Cretáceo (de 145 a 65,5 milhões de anos) da Era Mesozóica. No Período Terciário Neogeno (de 23,03 a 1,8 milhões de anos) da Era Cenozóica verifica-se a Formação Cachoeirinha. E no Período Quaternário Holoceno (de 0,01 milhões de anos) da Era Cenozóica, são encontrados os Depósitos Aluvionares.

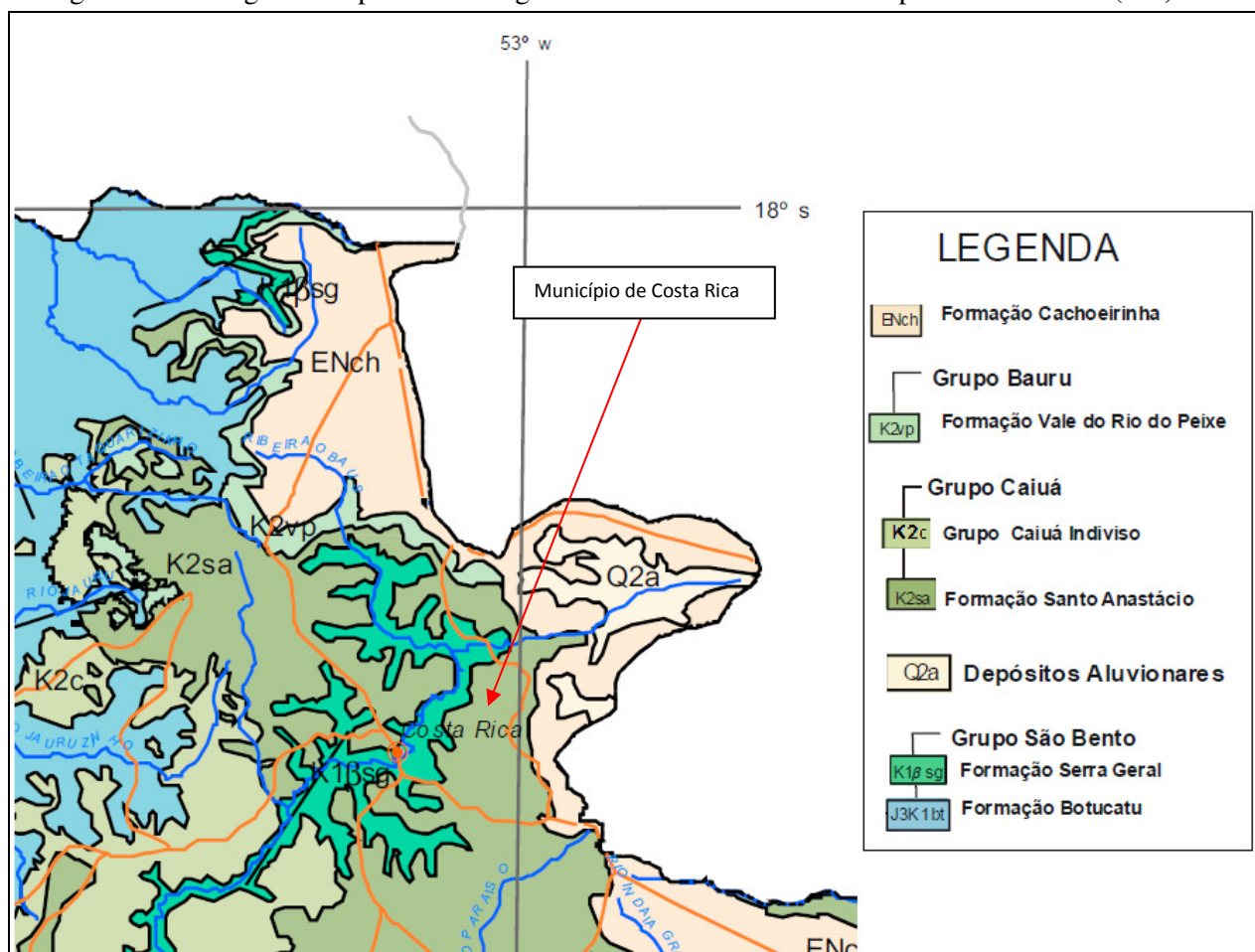
A Formação Serra Geral (K1 β sg), no entorno da maior parte do Rio Sucuriú e o Ribeirão dos Baús, apresentam basalto e basalto andesito de filiação toleítica e intercalam também camadas de arenito e litoarenito. E a Formação Botucatu (J3K1bt) é caracterizada por arenito fino a grosso de coloração avermelhada, grãos bem arredondados e com alta esfericidade, disposto em e/ou de estratificações cruzadas de grande porte (CPRM, 2006).

Nesta região de estudo, o Grupo Caiuá, divide-se em Grupo Caiuá Indiviso (K2c) e Formação Santo Anastácio (K2sa). As características do Grupo Caiuá Indiviso correspondem a arenito quartzoso a subarcoseano, fino a médio, arenito quartzoso a subarcoseano, fino a médio. A Formação Santo Anastácio é composta de arenito quartzoso, fino a muito fino, de seleção pobre e pouca matriz siltico-argilosa com intercalação de argilito (CPRM, 2006).

A Formação Cachoeirinha (ENch) aparece na região das nascentes do Ribeirão Baús e do Rio Sucuriú, esta formação apresenta sedimento inconsolidado, areno-argiloso, vermelho, parcialmente laterizado, localmente arenito amarelado, argiloso, médio a grosso, lentes de conglomerado; argilito cinza esverdeado com grãos de areia esparsos (CPRM, 2006).

Os Depósitos Aluvionares (Q2a), em uma área próxima da nascente do Rio Sucuriú, caracterizam-se por areia, areia quartzosa, cascalho, silte, argila e localmente turfa (CPRM, 2006).

Figura 3 – Geologia correspondente à região da área de estudo no município de Costa Rica (MS)

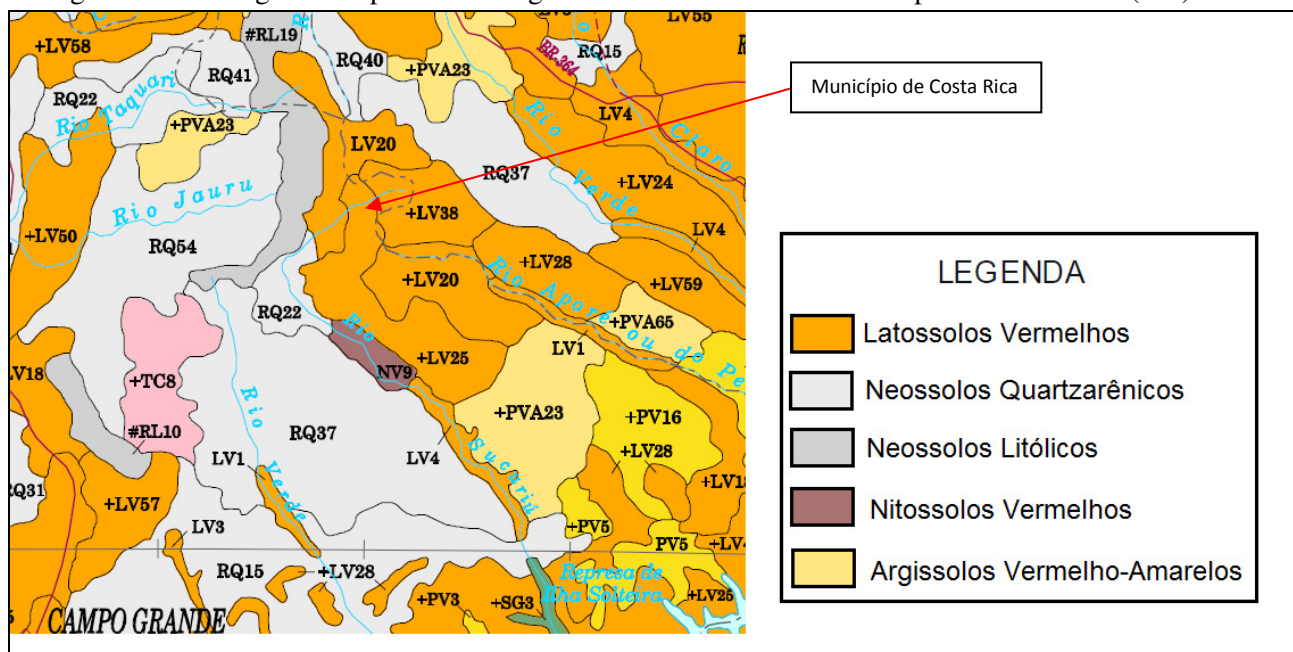


Fonte: modificado de CPRM (2006).

4.1.2 Pedologia

Na Figura 4 pode ser observado o Mapa de Solos do Brasil, na escala 1:5.000.000, fornecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2001), destacando a região do município de Costa Rica.

Figura 4 – Pedologia correspondente à região da área de estudo no município de Costa Rica (MS).



Fonte: modificado de IBGE (2001).

Na região de cabeceira do Rio Sucuriú (Alto Rio Sucuriú), verifica-se a presença de latossolos vermelhos, caracterizados como Latossolos Vermelhos Distróficos e Latossolos Vermelho Amarelo Distróficos (LV20); Latossolos Vermelhos Distróficos, Latossolos Vermelho Amarelo Distróficos e Gleissolos Háplicos Distróficos (LV38); e ainda, Latossolos Vermelhos Distróficos e Argissolos Vermelho Amarelo Distróficos (LV25) (IBGE, 2001).

Também na região de cabeceira do Rio Sucuriú, podem ser encontrados Neossolos Litólicos Distróficos, Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos e Neossolos Quartzarênicos Órticos (RL19). À jusante da área de interesse deste estudo, ocorre uma mancha de Neossolos Quartzarênicos Órticos e Neossolos Quartzarênicos Hidromórficos (RQ22) (IBGE, 2001).

Ferreira (2011) elaborou um mapa pedológico da região do Alto Rio Sucuriú com as principais classes de solo da região e que são importantes na caracterização da bacia hidrográfica de contribuição da PCH Costa Rica.

De acordo com a classificação de solos estabelecida pela EMBRAPA (2006) e o mapa pedológico elaborado por Ferreira (2011), o Latossolo vermelho predomina na região, com algumas manchas de Organossolos e Gleissolos, este último localizado na região de cabeceira do Rio Sucuriú.

4.1.3 Geomorfologia

O objeto de estudo da geomorfologia é a superfície da crosta terrestre, apresentando uma forma específica de análise que se refere ao relevo. A análise incorpora o necessário conhecimento de forças antagônicas, sistematizadas pelas atividades tectogenéticas (endógenas) e mecanismos morfoclimáticos (exógenos), responsáveis pelas formas resultantes (CASSETI, 2005).

Ferreira (2011) também elaborou um mapa geomorfológico da região do Alto Rio Sucuriú com as características dinâmicas do terreno e que são importantes na caracterização da bacia hidrográfica de contribuição da PCH Costa Rica.

A região de cabeceira do rio Sucuriú, apresenta no entorno de seu talvegue uma região de modelo de acumulação de inundação, e no divisor de águas o Chapadão das Emas. A bacia do Ribeirão Baús apresenta em sua porção montante o Chapadão das Emas, sendo que, da sua parte central até o exutório da bacia, na margem direita do Ribeirão visualiza-se as Rampas Arenosas e na margem esquerda a feição de Divisores Tabulares.

4.1.4 Vegetação do Estado de Mato Grosso do Sul.

De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Mato Grosso do Sul (SEMAG, 2010), este Estado apresenta dentro dos seus limites territoriais, quatro regiões fitoecológicas, descritas a seguir.

- **Savana (Cerrado):** formações de estrutura predominantemente campestre, intercalada por pequenas plantas lenhosas até arbóreas e em geral serpenteadas por floresta de galeria. Encontra-se praticamente em todo o Estado, destacando-se nas chapadas areno-argilosas, que se estendem de sudeste a norte e nordeste.

- **Savana Estépica (Vegetação Chaquenha):** composta de elementos arbóreos xeromorfos, cactáceos e lenhosos, espinhosos, cobrindo um tapete gramíneo cespitoso, perene, entremado de ervas anuais. Esta vegetação distribui-se nas áreas da depressão do rio Paraguai em toda sua extensão norte-sul e pelas planícies e pantanal, nas superfícies por onde se distribuem os solos salinos;

- **Floresta Estacional Semidecidual:** vegetação com elementos arbóreos que apresentam decidualidade foliar adaptativa à deficiência hídrica ou ao período frio (estação seca ou chuvosa, com acentuada variação térmica); Este tipo de vegetação situa-se nas porções sul e sudeste do Estado, recobrando os terrenos mais elevados e de litologias mais antigas;

- **Floresta Estacional Decidual:** vegetação com características de decidualidade semelhantes às da Região da Floresta Estacional Semidecidual, porém com percentual de decidualidade superior a 50% na época desfavorável. Esta vegetação reveste os terrenos predominantemente calcários, ocorrendo sobre o Planalto da Bodoquena e as elevações da Depressão do Rio Paraguai, compreendidos entre as altitudes de 100 m a 150 m.

Com base nos dados do IBGE/SENAC/SUPEMA(Extinta) e SEPLAN e no Plano Estadual de Recursos Hídricos de Mato Grosso do Sul (SEMAG, 2010), existem áreas ocupadas por formações pioneiras e áreas de tensão ecológica, descritas e seguir e apresentadas na Figura 8.

- **Formações Pioneiras:** constituídas por vegetação herbácea campestre ou lenhosa ao longo dos cursos d'água ou das depressões com água, sobre áreas pedologicamente instáveis. A presença das pioneiras é registrada apenas nas ilhas do rio Paraná e nas áreas próximas aos rios Dourados e Brilhante;

- **Áreas de Tensão Ecológica:** constituídas pelos contatos entre vegetações de diferentes regiões fitoecológicas, e que se manifestam na forma de interpenetração de espécies (ecótono ou mistura) ou interpenetração sem se misturar (encaves) distribuídas de forma generalizada.

4.2 LEVANTAMENTOS HIDROSEDIMENTOLÓGICO

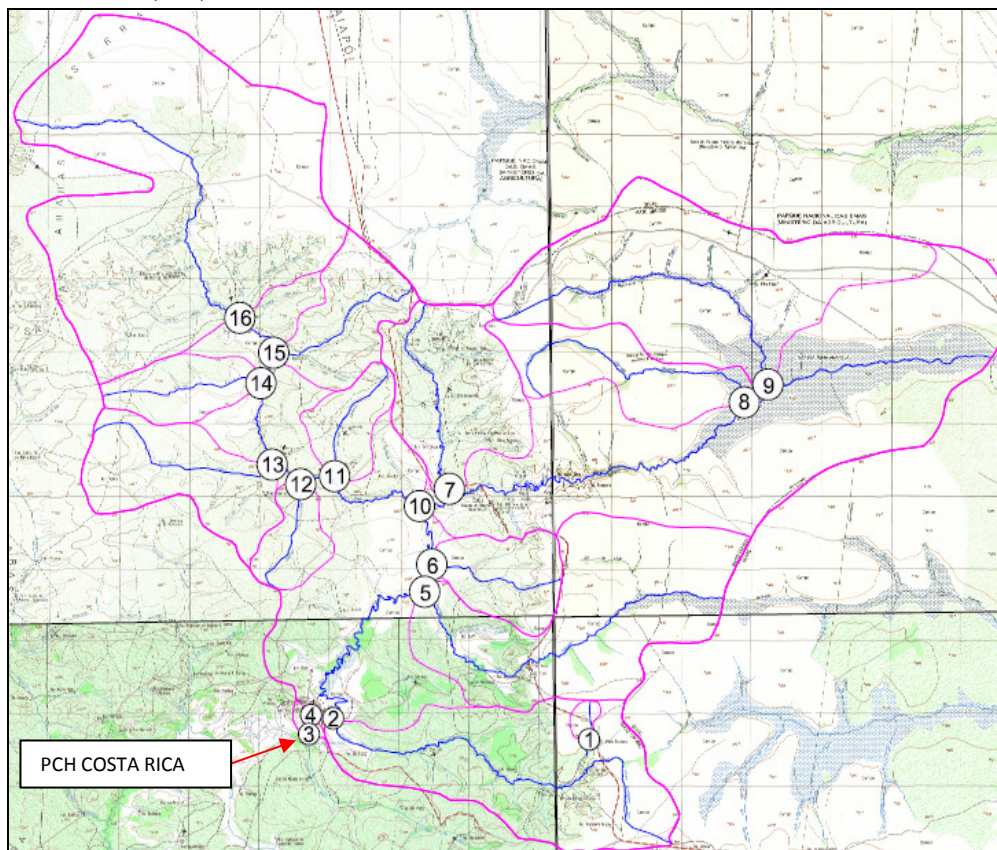
A rede sedimentométrica foi planejada estrategicamente, mantendo uma estreita relação com os processos erosivos identificados na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica. Desta forma, os pontos de amostragem foram selecionados, considerando o potencial de produção de sedimentos na bacia hidrográfica, sendo identificados os pontos críticos de zonas de erosão laminar e linear (voçorocas). Na seleção dos pontos de amostragem também foram considerados fatores como geologia, relevo, uso e ocupação do solo e cobertura vegetal.

Após a determinação dos pontos de amostragem, foram realizadas coletas de campo, distribuídas em 2 campanhas anuais, realizadas nos períodos chuvosos e de estiagem dos anos de 2012 e 2013. As campanhas de amostragem e as análises laboratoriais foram realizadas pela empresa Anambi - Análise Ambiental Ltda..

A bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica possui, aproximadamente, 1.200 km². A PCH Costa Rica está inserida no exutório desta bacia e os pontos de

amostragem foram alocados a sua montante, considerando o maior potencial de contribuição de sedimentos (Figura 5).

Figura 5 – Distribuição dos pontos de amostragem na bacia hidrográfica do Rio Sucuriú, contribuinte da PCH Costa Rica (MS).



Fonte: o autor

A Tabela 1 refere-se às coordenadas UTM dos pontos de amostragem e uma breve descrição destes pontos conforme estabelecido em cartografia oficial do IBGE na escala 1:50.000, sendo as cartas utilizadas nesta análise:

SE-22-Y-A-II → denominada “Baús”;

SE-22-Y-A-III → denominada “Parque Nacional das Emas”;

SE-22-Y-A-V → denominada “Costa Rica”;

SE-22-Y-A-VI → denominada “Cabeceiras do Aporé”.

Tabela 1- Pontos de Amostragem da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS).

Ponto	Coordenada UTM mE/mN	Descrição
1	290674 / 7946643	Jusante de uma grande voçoroca próximo da PCH Costa Rica
2	276249 / 7947718	Exutório do Ribeirão São Luis
3	274940 / 7946845	Ponto mais próximo do reservatório da PCH Costa Rica
4	275039 / 7947868	Zona de remanso na formação do lago, a jusante da Cidade de Costa Rica
5	281405 / 7954689	Exutório do Ribeirão da Laje
6	281801 / 7956205	Tributário da margem esquerda
7	282828 / 7960402	Exutório Córrego Varjão
8	299526 / 7965152	Exutório Córrego Saudade
9	300846 / 7966155	Exutório do Córrego do Ranchinho
10	281193 / 7959351	Exutório da cabeceira do Rio Sucuriú
11	276262 / 7961105	Exutório do Córrego Cavaco
12	274481 / 7960634	Exutório do Córrego Sucuriúzinho
13	272825 / 7961687	Exutório do Córrego Idaiá
14	272016 / 7966235	Exutório do Córrego Estiva
15	272819 / 7967906	Exutório do Córrego Bauzinho
16	270785 / 7969888	Cabeceira do Córrego Cachoeirinha

Fonte: o autor

4.2.1 Determinação de descarga líquida (vazão)

Nas medições de descarga líquida (vazão) utilizou-se o molinete hidrométrico MLN-7, em que o pulso gerado é computado no contador CPD-10. Em cursos d'água com até 6 metros de largura, as verticais foram espaçadas de 0,5 em 0,5 metros. Em cursos d'água com larguras maiores que 6 metros o espaçamento entre as verticais foi de 1 metro. E acima de 30 metros, o espaçamento foi de 2 metros. O número de pontos tomados verticalmente (profundidades) foi de um ponto para profundidades menores que 0,6 metros; de 3 pontos para profundidades entre 0,6 m e 2 m e de pelo menos 5 pontos para profundidades acima de 2 metros.

4.2.2 Determinação da concentração de sedimentos em suspensão

A determinação da concentração de sedimentos em suspensão acompanhou os levantamentos fluviométricos. Para esta medição, foram utilizados amostradores pontuais de sedimentos (DH-48 para trechos de coleta à vau e os medidores USP-46 e USP-61 com profundidade de amostragem de dezenas de metros), nos mesmos pontos tomados verticalmente para a determinação da descarga líquida (vazão).

Na determinação da Concentração de Sedimentos em Suspensão foi utilizado o método de integração vertical, utilizando o método de Igual Incremento de Largura (IIL). Esta determinação ocorre pela razão entre o peso do material sólido (contido na amostra

seca) e o volume da mistura água/sedimento, sendo expresso em mg L^{-1} . Nesta análise foram determinados também a concentração de sedimentos (mg L^{-1}), sólidos dissolvidos (mg L^{-1}), granulometria (%) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

De acordo com Carvalho et al. (2000) pode-se considerar como baixos, os valores de concentração de sólidos em suspensão inferiores a 50 mg L^{-1} , altos, os valores entre 150 e 300 mg L^{-1} e muito altos, os valores acima de 300 mg L^{-1} .

As análises granulométricas foram realizadas principalmente por peneiramento, conforme metodologia proposta pela NBR NM 248 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003), sendo que o sedimento passante pela peneira mais fina, de malha $0,0625 \text{ mm}$ foi analisado por outros métodos como o densímetro, a pipetagem ou o tubo de retirada de fundo, dependendo da quantidade de sedimentos.

4.2.3 Medição de descarga de fundo

As amostragens dos sedimentos do leito foram realizadas nos mesmos pontos de amostragem dos sedimentos em suspensão. Na coleta de material fino (argila a areia) foram utilizados amostradores de penetração vertical (draga de Petersen e USBM – 60) e para coleta de sedimentos coesivos e não-coesivos foram empregados amostradores de penetração horizontal. Na coleta dos sedimentos grosseiros, como seixos rolados e pedregulhos ($> 8 \text{ mm}$) a forma utilizada para calcular é a “contagem de seixos” em 100 a 200 pontos amostrais, conforme descrito por Carvalho (2008).

A quantidade de amostra de material de leito para uma análise granulométrica por peneiramento deve ser da ordem de 2 kg de sedimento molhado. Esse método de medição da descarga de fundo utiliza uma série de peneiras-padrão agitadas mecanicamente e por tempo determinado em aparelhos denominados “RO-TAP”. Na execução da análise granulométrica, tomam-se, aproximadamente, 100g de material seco, ou conforme o tamanho da peneira adicionam-se 5cm^3 de agente defloculante, levando-se essa mistura diversas vezes ao misturador mecânico. Lava-se o material na peneira número 230 ($0,065\text{mm}$), coloca-se outra quantidade de agente defloculante e repete-se a operação até que o material fique visivelmente limpo. Em seguida, coloca-se esse material num prato de evaporação, levando-o à estufa para secagem à temperatura de 105°C . Após a secagem, procede-se ao peneiramento mecânico do “RO-TAP” durante 15 minutos, numa série de peneiras de números 5, 10, 18, 35, 60, 80, 120, 230, correspondendo às aberturas de malhas, em milímetros, de 4,0, 2,0, 1,0, 0,5, 0,25, 0,177, 0,125 e 0,062. O peso do material retido na

peneira de número 230 foi subtraído dos 100g iniciais de material seco, a fim de se obter o peso da amostra seca que passou nesta peneira (BARBEDO, 2003).

4.3 PREDIÇÃO QUANTITATIVA DO APORTE DE SEDIMENTOS

O aporte de sedimentos pode ser determinado por meio de fórmulas e por métodos indiretos. Os métodos indiretos exigem um conhecimento detalhado das características físicas do curso d'água (seção transversal do trecho e as velocidades de escoamento associadas), coletas hidrossedimentológicas do material do leito e análise granulométrica do sedimento. Desta forma, por metodologia específica é possível realizar o cálculo da descarga do sedimento de arraste correspondente às partículas maiores que argila e silte, ou seja, de diâmetro superior a 0,065mm (CARVALHO, 1994).

As fórmulas apresentadas na Tabela 2 foram selecionadas por Stevens e Yang em 1989 e aplicadas por Carvalho (1994), para o cálculo da descarga de arrasto, considerando as características específicas dos cursos d'água.

Tabela 2- Principais fórmulas para cálculo da descarga sólida de arrasto e de material do leito apresentadas por Stevens e Yang (1989).

AUTOR DA FÓRMULA	DATA	MOVIMENTO DA CARGA SÓLIDA (B) OU CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL (BM)	TIPO DE FÓRMULA (1)	TIPO DE SEDIMENTO (2)	GRANULOMETRIA (3)
Ackers e White	1973	BM	D	S	S, G
Colby	1964	BM	D	S	S
Einstein (carga do leito)	1950	B	P	M	S, G
Einstein (material do leito)	1950	BM	P	M	S
Engelund e Hansen (*)	1967	BM	D	S	S
Kalinske	1947	B	D	M	S
Laursen	1958	BM	D	M	S
Meyer-Peter e Muller (*)	1948	B	D	S	S, G
Rottner	1959	B	D	S	S
Schoklitsch (*)	1934	B	D	M	S, G
Toffaleti	1968	BM	D	M	S
Yang (areia) (*)	1973	BM	D	O	S
Yang (pedregulho) (*)	1984	BM	D	O	G

(1) Determinística (D) ou Probabilística (P);

(2) Fração granulométrica (S), composição ou mistura (M) ou opcional (O);

(3) Areia (S) ou pedregulho (G);

(*) Consideradas de maior confiança por Stevens e Yang.

4.3.1 Método de Einstein modificado

A metodologia de cálculo da quantidade de sedimentos foi criada por Hans Albert Einstein (1950) e, posteriormente, Colby e Hembree (1955) elaboraram o método de Einstein modificado, que determina a descarga sólida de sedimentos com base nas suas faixas granulométricas. O método modificado de Einstein teve várias adaptações ao longo do tempo, sendo adequado ao sistema métrico por Otto Pfafstetter (CARVALHO et al., 2000) e complementado por Lara (1966) em função dos valores de “Z’s” (expoente da distribuição vertical de sedimentos).

Os dados iniciais de entrada do modelo são: 1- descarga líquida (Q); 2- largura (L); 3- velocidade média (V); 4- profundidade média (p); 5- média das profundidades nas verticais de amostragem (ps); 6- área da seção transversal (A), 7- temperatura da água (T), 8- Amostras de mistura água-sedimento e; 9- Amostras do material de fundo. Estas informações iniciais são obtidas pelas medições das características do curso d’água, no ponto de interesse, conforme metodologias descritas no subitem 4.2.

O cálculo da descarga total de sólidos pelo método de Einstein modificado foi desenvolvido conforme Amaral (2010) e os dados utilizados foram obtidos nas coletas de campo realizadas nas duas campanhas anuais, nos períodos chuvosos e de estiagem dos anos de 2012 e 2013, para os 16 pontos amostrados.

Nas Tabelas 3 e 4 podem ser observados os dados do Ponto 2 (P2), localizado no exutório do Ribeirão São Luis, como exemplo das informações utilizadas para todos os pontos de amostragem.

Tabela 3- Dados referentes ao Ponto 2, na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, localizado no exutório do Ribeirão São Luis, utilizados no método de Einstein modificado.

Características do Ponto de Amostragem (P2)			
Rio:	Sucuriú	Medição líquida n°:	1
Data:	04/09/2012	Amostradores:	MAS 08 e DH 48
Entidade:	FUNDUNESP		
Código:	Ponto 02	Molinete n°:	MLN - 7
Local:	Exutório-margem esquerda		
Medição sólida n°:	1	Data:	05/09/2012
Dados de Campo e Laboratório			
Descarga líquida:	17,67 m ³ /s		
Velocidade:	0,29 m/s		
Profundidade média (análise de QI):	1,24 m		
Profundidade média (análise de Qs):	1,24 m		
Largura:	40,70 m		

Tabela 3- Dados referentes ao Ponto 2, na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, localizado no exutório do Ribeirão São Luis, utilizados no método de Einstein modificado. Continuação

Área:	48,83 m ²
Temperatura:	20,0 °C
D ₆₅ (K _s):	0,40 mm
D ₃₅ :	0,22 mm
Concentração:	29,84 ppm
Distância do bico do amostrador ao fundo:	0,10 m

Q_l – vazão líquida
 Q_s – vazão sólida
 D₆₅ (K_s) – diâmetro da partícula que representa 65% da amostra
 D₃₅ – diâmetro da partícula que representa 35% da amostra
 Fonte: Anambi (2013)

A inserção dos dados de campo e laboratório dos pontos de amostragem foi realizada para as quatro campanhas hidrossedimentológicas nos 16 pontos amostrados.

Tabela 4 - Faixas granulométricas do material de leito e em suspensão referente ao Ponto 2, da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, no exutório do Ribeirão São Luis.

Faixa (mm)	Curvas granulométricas	
	% material em suspensão	% material do leito
0.000-0.0156	-	-
0.0156-0.0625	-	-
0.002-0.0625	6,6 %	2,5 %
0.0625-0.125	33,8 %	10,0 %
0.125-0.250	49,8 %	29,0 %
0.250-0.500	9,6 %	33,5 %
0.500-1.000	0,2 %	3,5 %
1.000-2.000	-	1,2 %
2.000-4.000	-	4,0 %
4.000-8.000	-	5,3 %
8.000-16.000	-	11,0 %
Totais	100,0 %	100,0 %

Fonte: Anambi (2013)

Verifica-se na Tabela 4 que a faixa granulométrica, que corresponde à maior porcentagem de material em suspensão e de material de leito é, respectivamente, a faixa de 0,125 a 0,250 e de 0,250 a 0,500 para o P2. Com os dados coletados em campo e amostrados em laboratório foi possível realizar o cálculo pelo método de Einstein modificado e estabelecer a descarga sólida total em toneladas de sedimento por dia, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Planilha de cálculo da descarga sólida total para o Ponto 2 (P2), localizado no exutório do Ribeirão São Luis, na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS)

CÁLCULO DA DESCARGA TOTAL DE SEDIMENTOS - MÉTODO MODIFICADO DE EINSTEIN																						
Rio: Sucuriú		Local: Costa Rica		Calculado por: Camila Toso																		
Data: 04/09/2012		Medição sólida n°: 2		Amostradores: MAS 08 e DH 48																		
Entidade: PCH Costa Rica		Medição líquida n°: 2		Molinete n°: MLN - 7																		
Código: Ponto 02				Data: 05/09/2012																		
Dados:										Resultados das equações:												
Q: 17,671 m³/s		L: 40,700 m		V _K : 0,000001036 m/s²		(RS) ^{1/2} : 0,00350		P: 11,607		Z _{ref} : -0,170												
v: 0,293 m/s		A: 48,825 m²		D ₃₅ : 0,223 mm		u* _c : 0,01096		A': 0,081		p': 1,240												
p: 1,240 m		T: 20,00 °C		D ₆₅ : 0,401 mm		delta: 0,00110		A'': 0,000285		86.400 w: 3516480												
p _s : 1,240 m		p _n : 0,100 m		Concentr.: 29,840 ppm		K _g /delta: 0,36566		Porcentagem de escoamento na zona amostrada: 95,3 %														
				Q _{sm} : 45,559 t/d		x: 1,173		Descarga em suspensão total na zona amostrada: 43,397 t/d														
CÁLCULO DE I _r Q _r								CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA TOTAL														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Tamanho dos grãos (mm)	D (mm)	psi	fi	5.33xD ^{3/2} x 10 ⁻⁶	i _r (%)	i _r Q _r x 10 ⁻⁶ (kg/s.m)	i _r Q _r (t/d)	i _s (%)	Q' _s	Multiplificadores	Z'	A'' x 10 ⁻³	J' ₁	J' ₂	J'' ₁	J'' ₂	(PJ'' ₁ +J'' ₂)/(PJ' ₁ +J' ₂)	I'' ₁	I'' ₂	PI'' ₁ +I'' ₂ +1	Descarga sólida total (t/d)	
0.000-0.0156	0.0056			0.0706						0.006	-0.001	0.009	0.920	-0.716	1.000	-0.998	1.065	2.4E+04	-2.4E+04	2.6E+05		
0.0156-0.0625	0.0312			0.9289						0.108	-0.018	0.050	0.927	-0.706	1.001	-0.970	1.058	5.1E+03	-5.0E+03	5.5E+04		
0.0625-0.125	0.0625	30.040	0.000	4.4300	10.00	0.00	0.0	33.80	14.7	0.440	-0.075	0.143	0.982	-0.676	1.010	-0.891	1.010	3.0E+03	-2.6E+03	3.2E+04	14.812	
0.125-0.250	0.125	30.040	0.000	12.551	29.00	0.00	0.0	49.80	21.6	1.000	-0.170	0.285	2.1E+00	-6.3E-01	1.1E+00	-7.9E-01	4.9E-01	3258.420	-2389.202	#####	10.656	
0.250-0.500	0.250	30.040	0.000	35.500	33.50	0.00	0.0	9.60	4.2	1.705	-0.290	0.571	7.0E+01	-6.0E-01	2.7E+00	-7.0E-01	3.7E-02	8790.350	-2298.045	#####	0.154	
0.500-1.000	0.500	38.096	0.000	100.20	3.50	0.00	0.0	0.20	0.087	2.554	-0.435	1.140	1.0E+04	-5.6E-01	2.2E+02	-6.3E-01	2.2E-02	#####	-2260.141	#####	0.002	
1.000-2.000	1.000	75.976	0.000	282.20	1.20	0.00	0.0			3.328	-0.567	2.274	9.8E+05	-5.5E-01	2.1E+04	-5.9E-01	2.2E-02	#####	-1770.454	#####		
2.000-4.000	2.000	152.492	0.000	802.43	4.00	0.00	0.0			4.276	-0.728	4.565	2.6E+08	-5.6E-01	5.6E+06	-5.8E-01	2.2E-02	#####	-1391.290	#####		
4.000-8.000	4.000	304.984	0.000	2269.6	5.30	0.00	0.0			5.547	-0.945	9.129	4.5E+11	-6.1E-01	9.8E+09	-6.2E-01	2.2E-02	#####	-1234.602	#####		
8.000-16.000	8.000	609.967	0.000	6419.4	11.00	0.00	0.0			7.003	-1.193	18.258	2.4E+15	-3.1E+00	5.1E+13	-8.2E-01	2.1E-02	#####	-1126.720	#####		
TOTAL	-	-	-	-	100.00	0.00	0.0	100.00	43.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28.672

Fonte: Anambi (2013)

4.3.2 Metodologia utilizada pelo modelo InVEST

Na predição do aporte de sedimentos pelas sub-bacias contribuintes dos pontos onde foram realizadas as coletas hidrossedimentológicas também será aplicada a modelagem do software InVEST, que é fundamentada na USLE (THOMPSON e FIDALGO, 2013).

A perda de solo anual sobre cada pixel i , $usle_i$ ($Mg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$), é dada pela USLE:

$$usle_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot C_i \cdot P_i \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

R_i é a erosividade provocada pela chuva ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ ano^{-1}$),

K_i é a erodibilidade do solo da região ($Mg\ ha\ ano\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$),

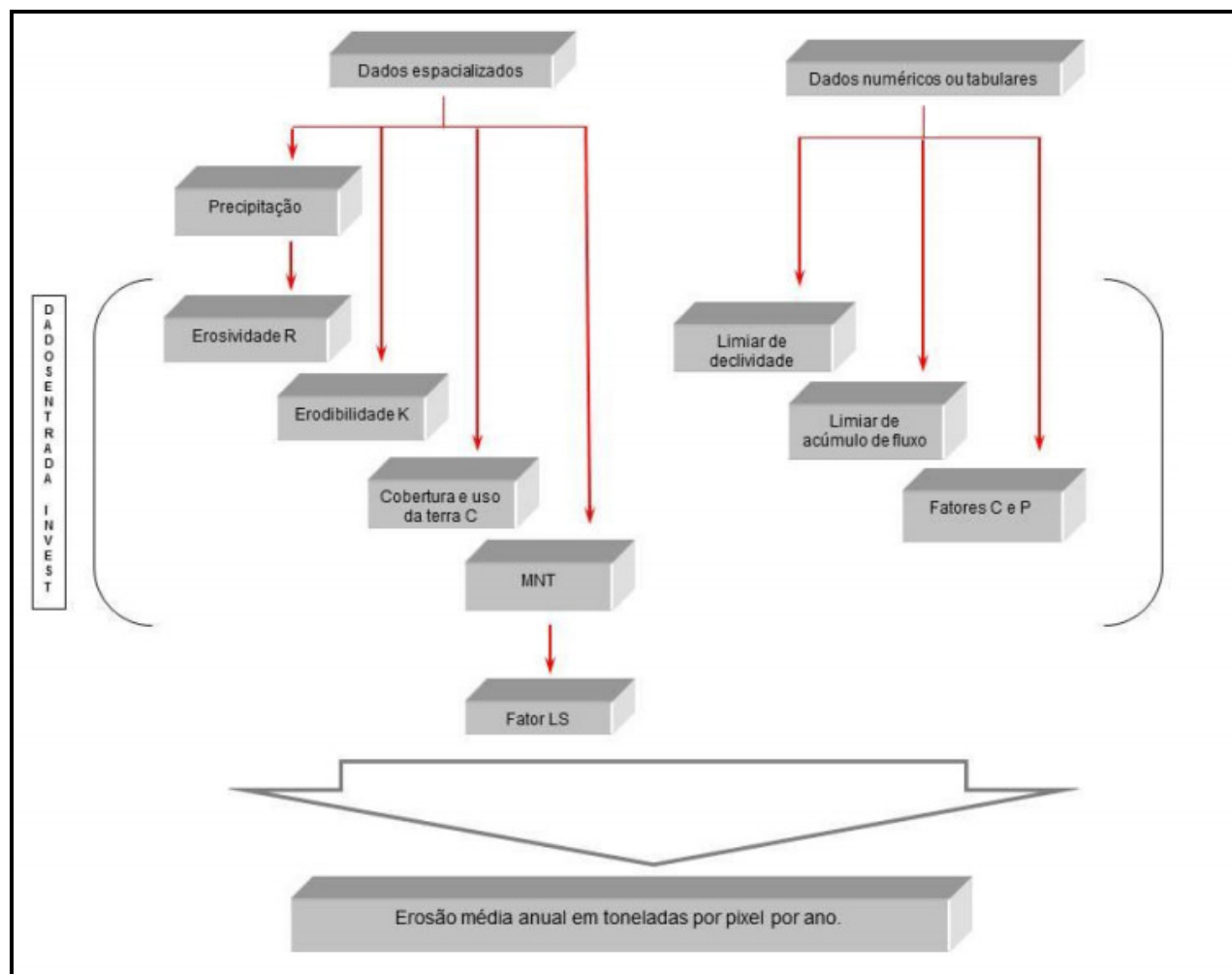
LS_i é o fator gradiente relativo ao comprimento do declive,

C_i fator de gestão relativo ao uso e ocupação do solo,

e, P_i é fator relativo as praticas conservacionistas.

O InVEST, assim como o software SWAT, utiliza uma interface em GIS. Desta forma, Thompson e Fidalgo (2013) elaboraram um fluxograma, apresentado na Figura 7, representativo das feições necessárias ao emprego do cálculo da USLE no modelo InVEST. Neste estudo, o banco de dados utilizado no desenvolvimento da modelagem pelo InVEST foi o mesmo empregado no SWAT por Catelani (2015), visando à minimização dos erros atribuídos ao desencontro de informações durante a comparação entre os dois modelos.

Figura 7 – Representação esquemática dos dados empregados para a estimativa de perda de solo por erosão utilizando o programa InVEST



Fonte: (THOMPSON e FIDALGO, 2013).

Os fatores que compõem a equação 1 são determinados pelos dados de entrada relacionados a área de estudo, necessários à execução do software InVEST (Tabela 5).

Tabela 5 - Banco de dados a ser inserido no software InVEST para a predição da produção e retenção de sedimentos nas sub-bacias que compõem a bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS).

DADOS DE ENTRADA	DESCRIÇÃO
Modelo Digital de Elevação (MDE)	Mapa raster com o valor de elevação para cada célula
Índice de Erosividade da Chuva (R)	Mapa raster com o valor do índice de erosividade para região ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Valor que depende da duração e intensidade da chuva para a região.
Erodibilidade do Solo (K)	Mapa raster com o valor de erodibilidade ($\text{Mg ha h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) para cada tipo de solo. Esta erodibilidade é determinada pelo potencial de desagregação das partículas constituintes do solo.

Tabela 5 - Banco de dados a ser inserido no software InVEST para a predição da produção e retenção de sedimentos nas sub-bacias que compõem a bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS).Continuação.

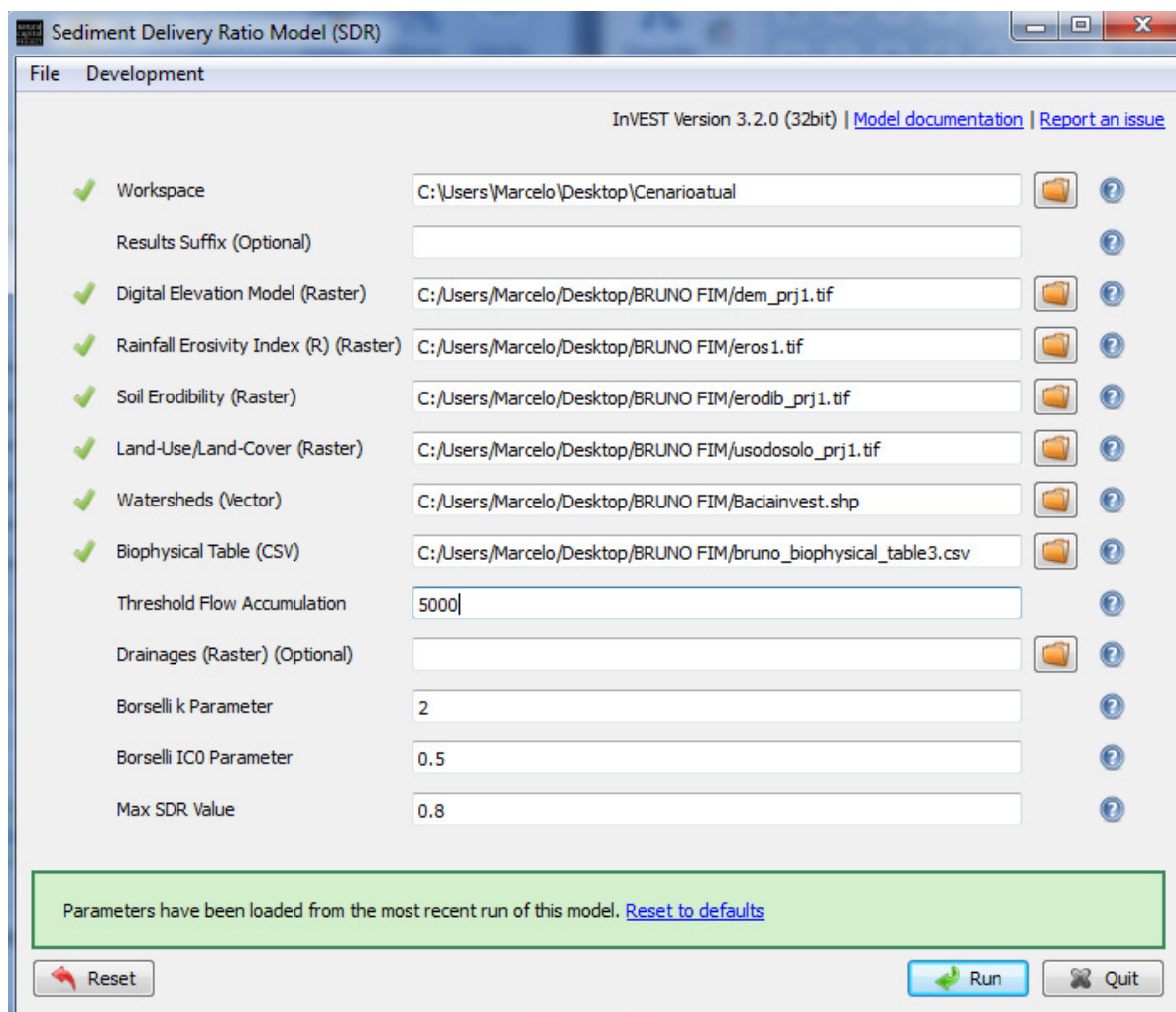
DADOS DE ENTRADA	DESCRIÇÃO
Uso e Cobertura do Solo	Mapa raster com os usos e coberturas da região de estudo
Bacias Hidrográficas de Interesse (Watersheds)	Mapa com a delimitação das sub-bacias hidrográficas, que serão analisadas quanto à produção e retenção de sedimentos para um determinado ponto de interesse.
Tabela Biofísica	Tabela com os usos e coberturas dos solos com seus respectivos fatores relativos ao potencial de retenção de sedimentos e referidas práticas conservacionistas.

Fonte: o autor

O modelo InVEST utiliza nas predições do aporte de sedimento (Descarga Sólida Total) a Equação Universal de Perda de Solo (USLE), conforme citado pelos autores Thompson e Fidalgo (2013).

A interface utilizada no InVEST, com os dados de entrada utilizados na simulação, pode ser observada na Figura 8. Desta forma, verifica-se que o programa resgata informações de um banco de dados (“wokspace”) previamente processado em outro software de processamento de informações geográficas (SIG) que será apresentado nos itens subsequentes.

Figura 8 – Plataforma de conectividade entre operador e computador utilizada pelo software InVEST

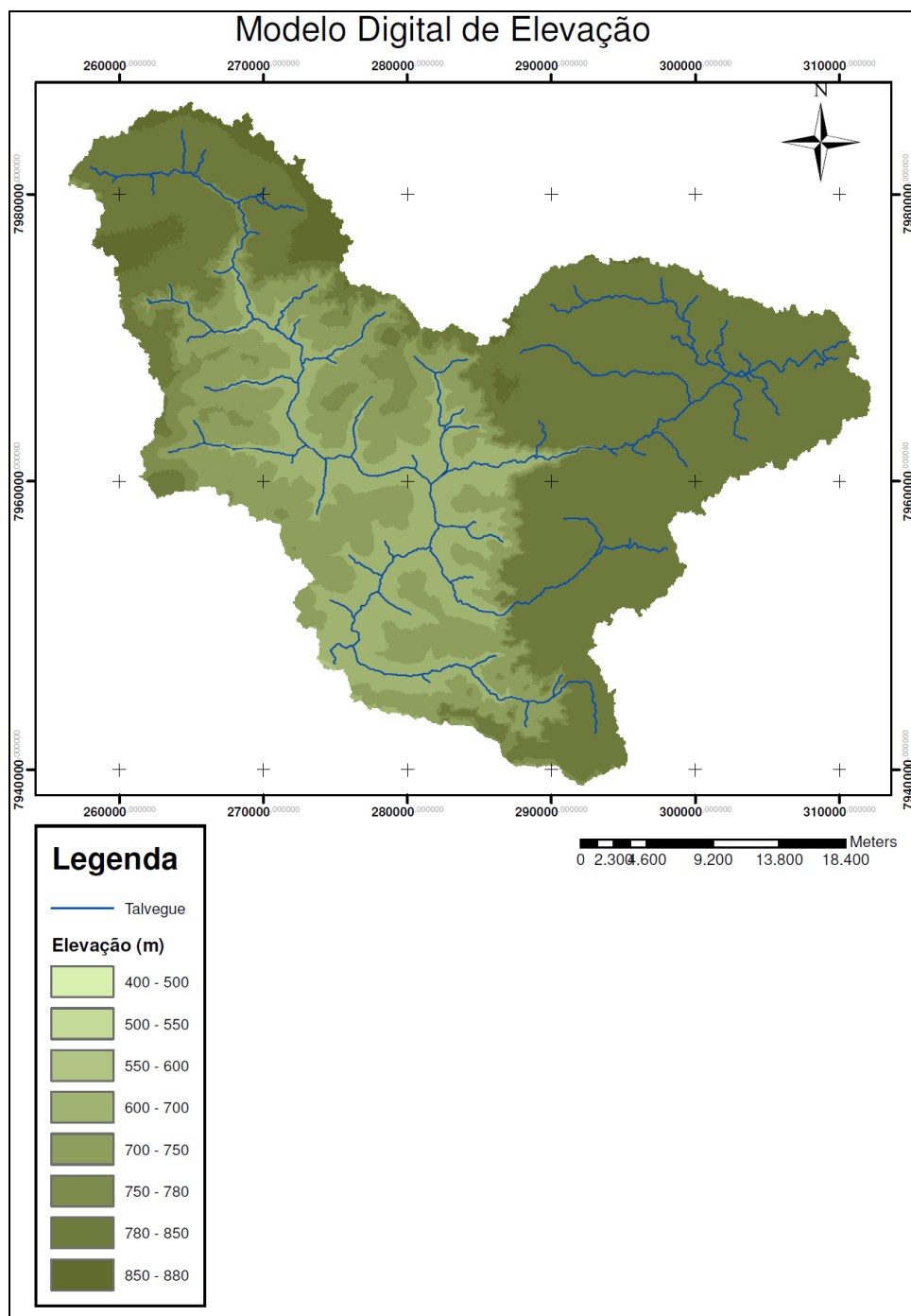


Fonte: o autor

MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO DO TERRENO (DEM)

O modelo digital do terreno foi elaborado por Catelani (2015) e apresentado na Figura 9 em seu formato raster. Esse é o formato de entrada requerido pelo software InVEST.

Figura 9 – Modelo digital de elevação do terreno (DEM) para a área de estudo.



Fonte: modificado de Catelani (2015)

ÍNDICE DE EROSIVIDADE DAS CHUVAS (FATOR R)

De acordo com o manual da Natural Capital Project⁽¹⁾ (2015), o valor do índice de erosividade deve ser obtido por meio de publicações científicas ou pode ser calculado com base em metodologia específica.

A equação 2, proposta por Morais et al. (1991), foi utilizada para calcular o índice de erosividade média mensal (EI_m) na região de Flechas, no estado do Mato Grosso (MT), aplicado em Silva (2004) na área de interesse deste estudo.

$$EI_m = 36,849 \times \left(\frac{p^2}{P}\right)^{1,0852} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

EI_m = índice de erosividade média mensal ($MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);

p = precipitação média mensal (mm);


P = precipitação média anual (mm).

A média anual do fator “R” (Equação 3) pode ser obtida pelo somatório dos valores da média mensal dos índices de erosividade determinados pela equação 2.

$$FATOR R = \sum_1^{12} EI_m \quad (\text{Equação 3})$$

Silva (2004) apresentou o mapa de erosividade para o Brasil com as respectivas equações empregadas nos cálculos e suas áreas de abrangência (Figura 10). Neste mapa, o município de Costa Rica região corresponde a Região 2.

Figura 10 – Mapa do Brasil com as equações empregadas e suas respectivas regiões de abrangência para o cálculo da erosividade



Numero	Eq.	Autor (es)
1	$R_x = 3.76 * \left(\frac{M_x^2}{P}\right) + 42.77$	Oliveira Jr. e Medina (1990)
2	$R_x = 36.849 * \left(\frac{M_x^2}{P}\right)^{1.0852}$	Morais et al. (1991)
3	$R_x = (0.66 * M_x) + 8.88$	Oliveira Jr. (1988)
4	$R_x = 42.307 * \left(\frac{M_x^2}{P}\right) + 69.763$	Silva (2001)
5	$R_x = 0.13 * (M_x^{1.24})$	Leprun (1981)
6	$R_x = 12.592 * \left(\frac{M_x^2}{P}\right)^{0.6030}$	Val et al. (1986)
7	$R_x = 68.73 * \left(\frac{M_x^2}{P}\right)^{0.841}$	Lombardi Neto e Moldenhauer (1992)
8	$R_x = 19.55 + (4.20 * M_x)$	Rufino et al. (1993)

Fonte: modificado de SILVA (2004).

Para a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, o fator R pode ser determinado, utilizando os dados de precipitação da estação pluviométrica número 1853004, do município de Costa Rica (MS), disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas do Hidroweb, da Agência Nacional de Águas (ANA, 2015).

A estação pluviométrica número 1853004, localizada a 1,32 km da PCH Costa Rica no município de Costa Rica/MS, apresenta uma série histórica com valores de chuvas diárias de 1984 até 2014.

ÍNDICE DE ERODIBILIDADE (FATOR K)

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2014), determinados solos são mais vulneráveis aos processos erosivos do que outros, sob a mesma intensidade de chuva, declividade, cobertura vegetal e práticas conservacionistas. Essa vulnerabilidade ou susceptibilidade do solo aos processos erosivos é denominada erodibilidade do solo. Os valores de erodibilidade dos solos (Fator K) para a bacia de contribuição da PCH Costa Rica foram os adotados no Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai (PCBAP) contígua à bacia estudada (Tabela 6).

Os Neossolos presentes na região são classificados em Neossolos Litólicos e Neossolos Quartzarênicos, sendo este último o de maior proporção.

Tabela 6 - Erodibilidade dos solos (Fator K) da Bacia do Alto Paraguai, próxima à região do município de Costa Rica (MS).

Tipo de solo	Fator K (Mg ha h (MJ⁻¹ ha⁻¹ mm⁻¹))
Gleissolos	0,0010
Latossolo Vermelho Distrófico	0,02
Latossolo Vermelho Escuro Distrófico	0,0163
Neossolos Quartzarênicos	0,0509

Fonte: PCBAP (1997).

RELAÇÃO COMPRIMENTO DE RAMPA E DECLIVIDADE DO TERRENO (FATOR LS)

O manual da Natural Capital Project⁽¹⁾ (2015) estabelece que o fator LS seja determinado pelo software, por meio da equação 4 elaborada por Desmet e Govers (1996).

$$LS_i = S_i \frac{(A_{i-in} + D^2)^{m+1} - A_{i-in}^{m+1}}{D^{m+2} \times x_i^m \times (22,13)^m} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

S_i é o fator declividade para cada célula da grade analisada em função de sua inclinação em radianos (θ):

$S = 10,8 \times \text{sen}(\theta) + 0.03$, quando $\theta < 9\%$;

$S = 16,8 \times \text{sen}(\theta) - 0.50$, quando $\theta \geq 9\%$.

A_i é a área de contribuição (m^2) na entrada de uma célula da grade, que é calculada a partir da direção do fluxo pelo método de borda infinita;

D é a dimensão linear da célula de grade (m);

$x_i = |\text{sen}\alpha_i| + |\text{cos}\alpha_i|$, em que α_i é a Direção para a célula de grade i ;

m é o expoente da equação universal de perda de solo relativo ao fator comprimento e declividade (LS).

Ainda segundo o Manual do InVEST, o valor de m tem por base a equação de perda de solo clássica, sendo discutida em Oliveira et al. (2013):

$m = 0,2$ para a declividade menor que 1%;

$m = 0,3$ para declividade maior que 1% e menor ou igual a 3,5%;

$m = 0,4$ para declividade maior que 3,5% e menor ou igual a 5%;

$m = 0,5$ para declividade maior que 5% e menor ou igual a 9%;

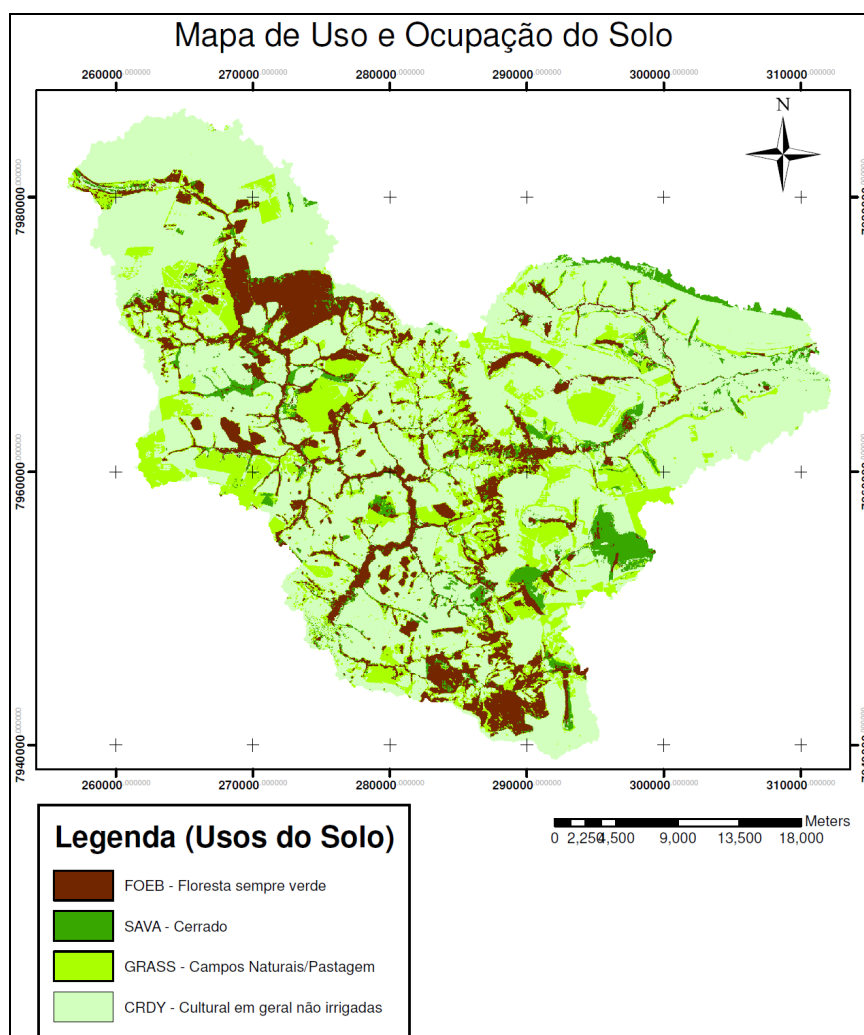
$m = \beta / (1+\beta)$ onde $\beta = \text{sen}\theta / 0,0986 / (3\text{sen}\theta^{0,8} + 0,56)$ para declividades maiores que 9%.

O software InVEST calcula o fator LS ao realizar a análise do Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDE).

MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA CONTIBUINTE DA PCH COSTA RICA

O mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica no ano de 2011 (Figura 11) foi elaborado por Catelani (2015), com base no imageamento remoto da bacia hidrográfica de estudo pelo satélite Landsat.

Figura 11 – Mapa de uso e ocupação do solo para o ano de 2011 com base na imagem de satélite do Landsat.



Fonte: modificado de Catelani (2015)

De acordo com Catelani (2015), as principais classes de uso do solo da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, com as respectivas áreas ocupadas são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Classes de uso do solo da bacia do Alto rio Sucuriú, à montante do reservatório da PCH Costa Rica, em 2011, expressos em km² e porcentagem.

Classes de uso do solo (2011)	Área (km ²)	Uso do Solo (%)
FOEB – Floresta sempre verde	166,85	13,41
SAVA – Cerrado	71,47	5,74
GRAS – Campos naturais/Pastagem	220,86	17,75
CRDY – Culturas, em geral, não irrigadas	785,20	63,10

Tabela 7 - Classes de uso do solo da bacia do Alto rio Sucuriú, à montante do reservatório da PCH Costa Rica, em 2011, expressos em km² e porcentagem. Continuação.

Classes de uso do solo (2011)	Área (km ²)	Uso do Solo (%)
Área Total	1244,38	100

Fonte: CATELANI (2015).

INFORMAÇÕES SOBRE AS CLASSES DE USO DO SOLO (TABELA BIOFÍSICA)

A tabela biofísica corresponde aos atributos relativos às classes de uso do solo da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), apresentados na Tabela 7.

Desta forma, cada linha corresponde a um tipo de uso do solo e cada coluna deve ser renomeada e ter valores definidos, conforme estabelecido no manual da Natural Capital Project⁽¹⁾ (2015):

lucode (Código do uso do solo): Valor inteiro para cada uso do solo/ cobertura do solo (“land use/land cover” - LULC), este valor deve estar em acordo com o valor estabelecido no mapa “raster” de uso e ocupação do solo.

usle_c: Fator C relacionado ao manejo dos usos do solo para a equação universal de perda de solo, sendo o valor estabelecido entre 0 e 1.

usle_p: Fator P relacionado as práticas conservacionistas dos usos do solo para a equação universal de perda de solo, sendo o valor estabelecido entre 0 e 1.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2014), o fator C retrata, além da combinação de sequências de culturas e práticas de manejo, a proteção exercida pela cobertura vegetal em uma dada área, reduzindo assim, o valor final obtido pela equação universal de perda de solo.

O fator C mede o efeito combinado de todas as variáveis de cobertura e de gestão inter-relacionados, além de ser definida como a proporção de perda, a partir de um solo cultivado, em condições específicas e a perda correspondente ao solo mantido continuamente com e sem cobertura vegetal (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Os valores para o Fator C foram obtidos por meio do boletim de pesquisa e desenvolvimento elaborado pela Embrapa (GALDINO et al., 2003) para a bacia do Alto Taquari, contígua a bacia contribuinte da PCH Costa Rica (Tabela 8) e os aplicados por Oliveira et al. (2009) à bacia hidrográfica do Córrego do Lageado (MS) (Tabela 9).

Tabela 8 - Uso do solo (Fator C) da Equação Universal de Perda de Solo, para algumas classes de usos.

Classe de vegetação nativa da Bacia do Alto Taquari/MS	Fator C
Floresta estacional semidecidual – Aluvial (Mata, mata ciliar)	0,034
Floresta estacional semidecidual - Sub-Montana	0,062
Savana florestada (Cerradão)	0,213
Savana – Arborizada (Campo cerrado, cerrado aberto)	0,140
Savana florestada + arborizada	0,189
Savana arborizada + florestada	0,164
Savana – Arborizada + gramíneo lenhosa	0,129
Enclave – Savana/Floresta estacional semidecidual (Mata)	0,124

Fonte: Embrapa (GALDINO et al., 2003).

Tabela 9 - Uso do solo (Fator C) da Equação Universal de Perda de Solo, para algumas classes de uso.

Classe de usos do solo	Fator C
Água	0
Área Úmida	0
Cerradão	0,001
Cerrado	0,002
Eucalipto	0,005
Pastagem	0,01
Solo Exposto	1
Área Urbana	0,03

Fonte: Oliveira et al. (2009)

Brito et al. (1998) adotaram os valores 0,020 e 0,200 para o fator C de solo coberto por agricultura permanente e com agricultura anual, respectivamente, para região de Irai de Minas-MG, conforme Stein et al. (1987). Na área de estudo verificou-se a predominância de culturas anuais como algodão, soja e milho, para as quais será adotado o fator C de 0,200.

Os valores adotados para práticas conservacionistas (Fator P) foram obtidos em Bertoni e Lombardi Neto (2014), apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Fator P da Equação Universal de Perda de Solo, para algumas práticas conservacionistas adotadas.

Práticas Conservacionistas	Fator P
Plantio morro abaixo	1
Plantio em contorno	0,5
Alternância de capinas + plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2

Fonte: (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2014).

VARIÁVEIS UTILIZADAS NA MODELAGEM DO SOFTWARE InVEST

Para a modelagem do aporte de sedimentos na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, utilizando o software InVEST, foram aplicadas variáveis como limite de acumulação de fluxo (*Threshold flow accumulation*), relação máxima do aporte de sedimento ($SDR_{máx}$) e os fatores de calibração k_b e IC_0 .

De acordo com o manual da Natural Capital Project⁽¹⁾ (2015), o limite de acumulação de fluxo é o número de células a montante do ponto de interesse, que deve fluir para uma célula, antes de ser considerado parte de uma drenagem do terreno, utilizado para determinar a drenagem do modelo digital do terreno. Este limiar influi na conectividade hídrica e na exportação de sedimentos, sendo que quando este atinge a corrente, a deposição de sedimentos é interrompida e o sedimento passa a ser exportado até alcançar o ponto de interesse. Cabe mencionar que segundo Maidment (2002) qualquer valor limite de acumulação de fluxo pode ser utilizado, porém valores abaixo de 1000 células são questionáveis, especialmente, quando a área apresenta topografia plana, como é a característica da área de estudo. Esse autor destaca que para o banco de dados de elevação dos Estados Unidos, com células de dimensões de 30 metros, o valor típico para o *Threshold flow accumulation* é de 5000. Considerando que cada célula da bacia contribuinte da PCH Costa Rica apresenta dimensões de 30 metros conforme a resolução de cada célula dos mapas do banco de dados, aplicou-se o valor de 5000 para o *Threshold flow accumulation* na geração do modelo do InVEST.

Os fatores k_b e IC_0 são de calibração e definem a relação entre o índice de conectividade e a razão de remoção de sedimentos (SDR). Vigiak et al. (2012) e Jamshidi et al. (2013) adotaram os valores de IC_0 de 0,5 e k_b de 2, para estudos desenvolvidos na Espanha e Austrália, respectivamente. Vigiak et al. (2012) afirmaram que estes valores foram os ideais para a calibração, com coeficiente de eficiência do modelo (ME) da ordem de 97%.

A relação do aporte de sedimento máxima ($SDR_{máx}$) corresponde ao valor máximo que uma célula pode atingir em função da textura do solo (Natural Capital Project⁽¹⁾, 2015). Vigiak et al. (2012) citam que os valores da relação do aporte de sedimento máxima (SDR) são calculados para as classes de tamanho de partículas (argila, silte e areia <1000 μm) assumindo a velocidade de sedimentação adequada para cada classe de partículas. Estes autores verificaram que a SDR_{Max} correspondeu à fração de partículas mais finas das camadas superficiais de areia grossa (<1000 μm) e que pode variar de 0,7 a 0,9. Em estudos

mais avançados, o SDR_{max} pode ser usado na calibração, sendo o valor padrão de 0,8, quando não se tem estudos detalhados do transporte de sedimento da região de interesse.

4.3.3 Metodologia utilizada pelo modelo SWAT

A Equação Universal de Perda de Solos Modificada – MUSLE, utilizada no modelo SWAT, é descrita na equação 5 elaborada por Williams e Berndt (1977):

$$sed = a(H_{sup} \cdot q_{pico} \cdot area_{URH})^b \cdot K \cdot C \cdot LS \cdot P \cdot CFRG \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

sed: produção de sedimento, após evento de precipitação, no dia (Mg);

a,b: coeficientes de ajuste adimensionais;

H_{sup} : altura do escoamento superficial (mm de chuva por ha);

q_{pico} : vazão de escoamento de pico do evento ($m^3 s^{-1}$);

$area_{URH}$: área da unidade de resposta hidrológica na qual é estimada o aporte de sedimentos (hectare);

K: erodibilidade do solo ($Mg m^2 hr m^{-3} Mg^{-1}$);

C: fator de cobertura do solo (adimensional);

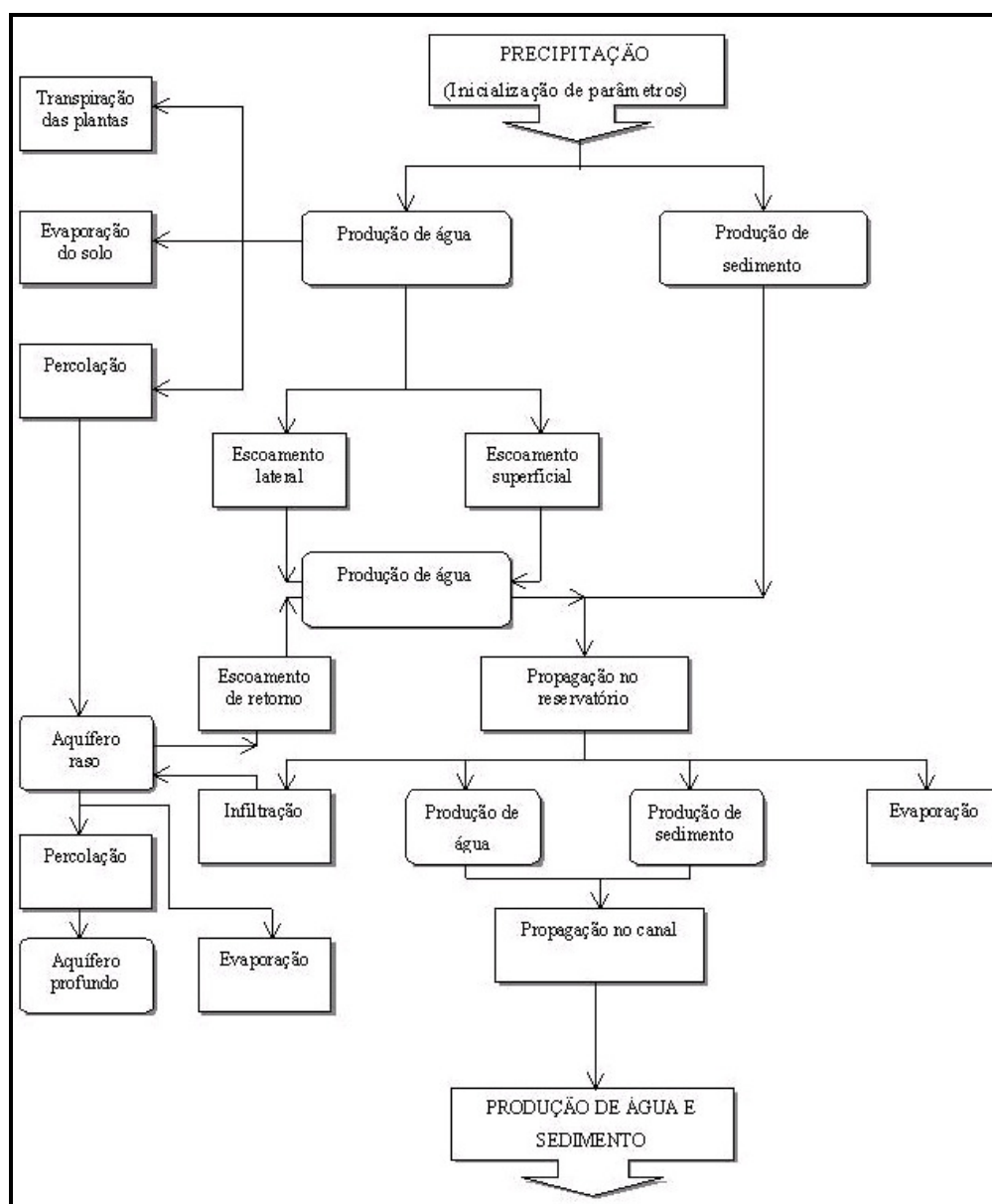
P: fator das práticas conservacionistas (adimensional);

LS: “fator topográfico” caracterizado pelo produto do comprimento do declive e grau do declive;

CFRG: fator de fragmentação esparsa.

No fluxograma elaborado por Adriollo (2008), é possível observar os dados necessários ao emprego da MUSLE (Figura 12).

Figura 12 – Representação esquemática dos dados empregados para a estimativa de perda de solo por erosão utilizando o programa SWAT.



Fonte: (ADRIOLLO, 2008).

4.3.4 Comparação entre os métodos de predição de aporte de sedimentos

Para a predição do aporte de sedimentos na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica foram utilizados: 1) o software InVEST, que é fundamentado na USLE; 2) o software SWAT, que emprega a MUSLE e; 3) o método modificado de Einstein. As predições realizadas pelo emprego do software SWAT foram fornecidas por Catelani (2015).

O software InVEST foi utilizado para avaliar o potencial de retenção de sedimentos na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, pela adoção de práticas

conservacionistas na recomposição de áreas de preservação permanente (APP) hídricas, estabelecidas pelo Código Florestal Brasileiro, Lei Federal 12.651/2012 em seu artigo 4º (Tabela 11). Por meio de mudanças no cenário de uso e ocupação do solo foi possível estabelecer a quantidade de sedimentos retida pelas matas ciliares, ou seja, a carga de sedimentos que pode deixar de assorear os cursos d'água da bacia contribuinte da PCH Costa Rica.

Tabela 11 - Dimensionamento da Área de Preservação Permanente (APP).

Largura do Curso d'água	APPs hídricas (m)
Inferior a 10 metros	30
Entre 10 e 50 metros	50
Entre 50 e 200 metros	100
Entre 200 a 600 metros	200
Superior a 600 metros	500

Fonte: Lei Federal 12.651/2012.

4.4 PROPOSTA PARA A MITIGAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS E ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE (APP)

Entre as metodologias aplicadas à recomposição de áreas degradadas por processos erosivos acelerados e de APPs hídricas, para a bacia hidrográfica contribuinte da PCH de Costa Rica, foi proposta a recomposição vegetal. Esta proposta foi fundamentada em dados técnicos e científicos, visitas técnicas, com ênfase aos aspectos de maior relevância, como a cobertura vegetal nativa e entorno próximo, considerando a dinâmica da região.

As recomendações técnicas do projeto de recomposição vegetal atenderam as orientações contidas na Resolução SMA 32, de 03/04/2014, que “*Estabelece as orientações, diretrizes e critérios sobre restauração ecológica no Estado de São Paulo, e dá providências correlatas*”, considerando que esta resolução aborda também a recuperação de áreas degradadas de Cerrado Paulista e tem, portanto, a possibilidade de ser estendida para a região de Cerrado do Estado do Mato Grosso do Sul.

Cabe mencionar que a Resolução SMA de 08/2008 foi revogada durante a realização das etapas do modelo de plantio, desta forma adequou-se a proposta de plantio a Resolução SMA 32, de 03/04/2014 que substituiu a anterior.

4.4.1 Plantio nas áreas destinadas a recomposição vegetal

De acordo com a Resolução da SMA 32/2014, o plantio deve ser realizado a fim de garantir que o projeto de restauração ecológica ao empregar a técnica de plantio em área total utilize no mínimo 80 (oitenta) espécies florestais nativas de ocorrência regional. Contudo, sugere-se que o número de espécies arbustivas e arbóreas represente no mínimo 70% (setenta por cento) do número total de espécies utilizadas, ou seja, um total mínimo de 56 espécies arbustivas e arbóreas.

Melo et al. (2011) afirma que o sistema de plantio direto (SPD) consolidou-se como a mais importante prática conservacionista. O SPD é uma prática consolidada, que tende a contribuir com o uso racional do solo, agregando produtividade e reduzindo as perdas de solo por erosão.

Entre as espécies a serem utilizadas, as mais promissoras para a restauração dos solos empobrecidos e erodidos do cerrado são as leguminosas perenes, como as essências arbóreas, que não só protegem os solos, como participam, vantajosamente, da reciclagem de nutrientes, ao contrário das culturas anuais (VARGAS; HUNGRIA, 1997).

As leguminosas arbóreas apresentam características especiais que as tornam, particularmente, apropriadas aos sistemas de reflorestamento. Muitas espécies são pioneiras e colonizam clareiras e áreas desmatadas, fornecendo proteção para a regeneração de florestas secundárias. Uma propriedade importante de grande parte das espécies de leguminosas arbóreas é a capacidade de realizar simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio, assim como as leguminosas forrageiras (VARGAS; HUNGRIA, 1997). De acordo com Vargas e Hungria (1997), as leguminosas arbóreas nativas, especialmente as do cerrado, representam um potencial inexplorado, devido ao desconhecimento de suas características silviculturais, sua produtividade e, denotadamente, sua habilidade em associar-se a bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico (rizóbio) e fungos micorrízicos. Neste estudo foi proposta para a recomposição das áreas degradadas, o plantio de algumas leguminosas nativas, que realizam simbiose com rizóbio em consórcio com outras espécies nativas da região de cerrado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

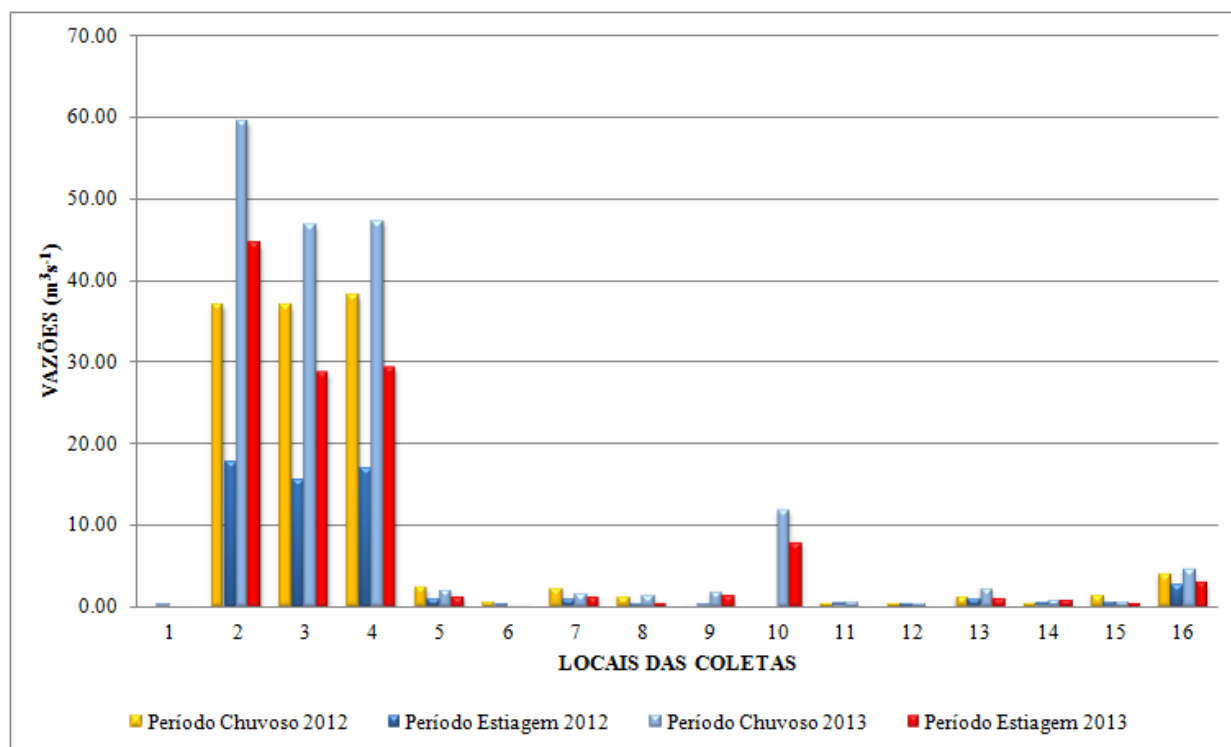
5.1 RESULTADOS DOS ESTUDOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS

5.1.1 Descarga líquida (vazão)

A distribuição dos dados de descarga líquida (vazões) apresentou comportamento similar entre as estações chuvosas e de estiagem dos anos de 2012 e 2013, havendo diferença apenas na amplitude dos dados, considerando que no período chuvoso as vazões são maiores (Figura 13).

As vazões obtidas foram menores em pontos de amostragem mais próximos das nascentes dos cursos d'água. No ponto 10, analisado em 2012, não foi possível a determinação da vazão, por tratar-se de um meandro abandonado. Em 2013 foi alterado para outro ponto próximo ao amostrado em 2012, no curso d'água existente.

Figura 13 – Vazões obtidas nos pontos amostrados nas estações chuvosas e de estiagem dos anos de 2012 e 2013, na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS).

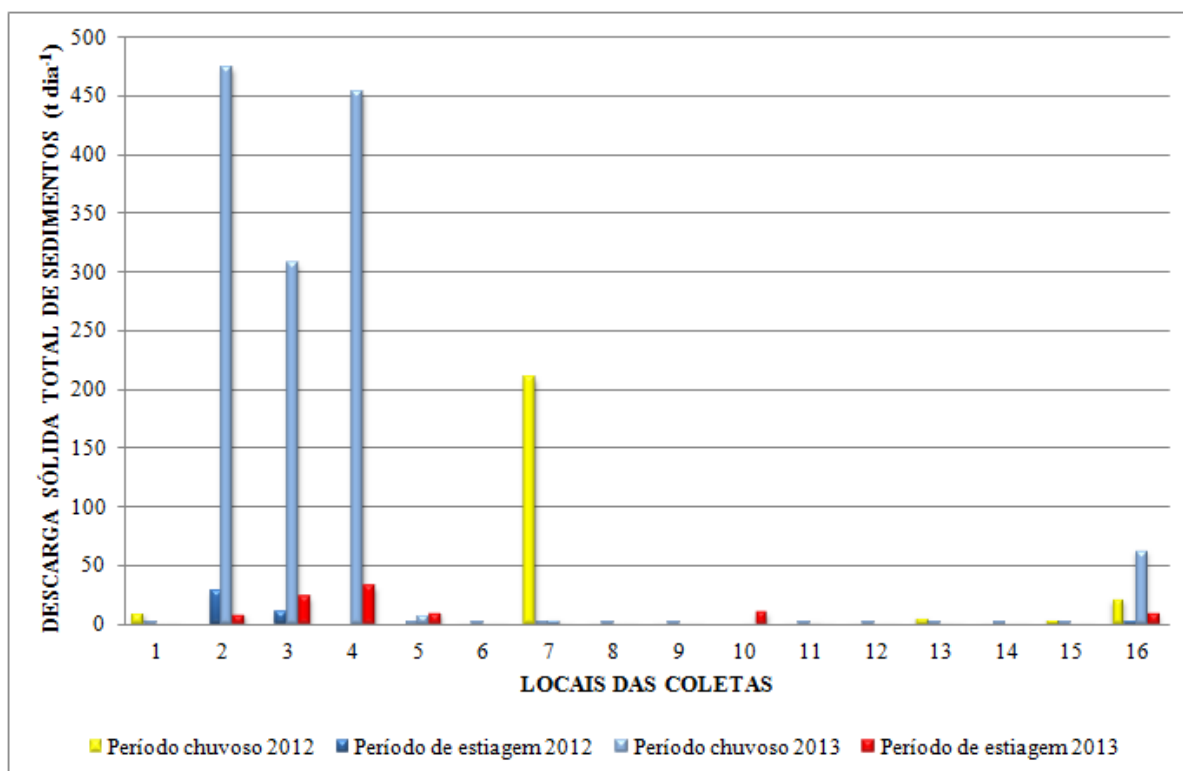


Fonte: modificado de (TRANNIN et al., 2013).

5.1.2 Descarga sólida total

De acordo com os dados apresentados na Figura 14, verificou-se que a descarga sólida total obtida nas estações chuvosas e de estiagem dos anos de 2012 e 2013 não sofreram grandes variações na maioria dos pontos amostrados.

Figura 14 – Descarga sólida total dos diferentes pontos de amostragem da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS).

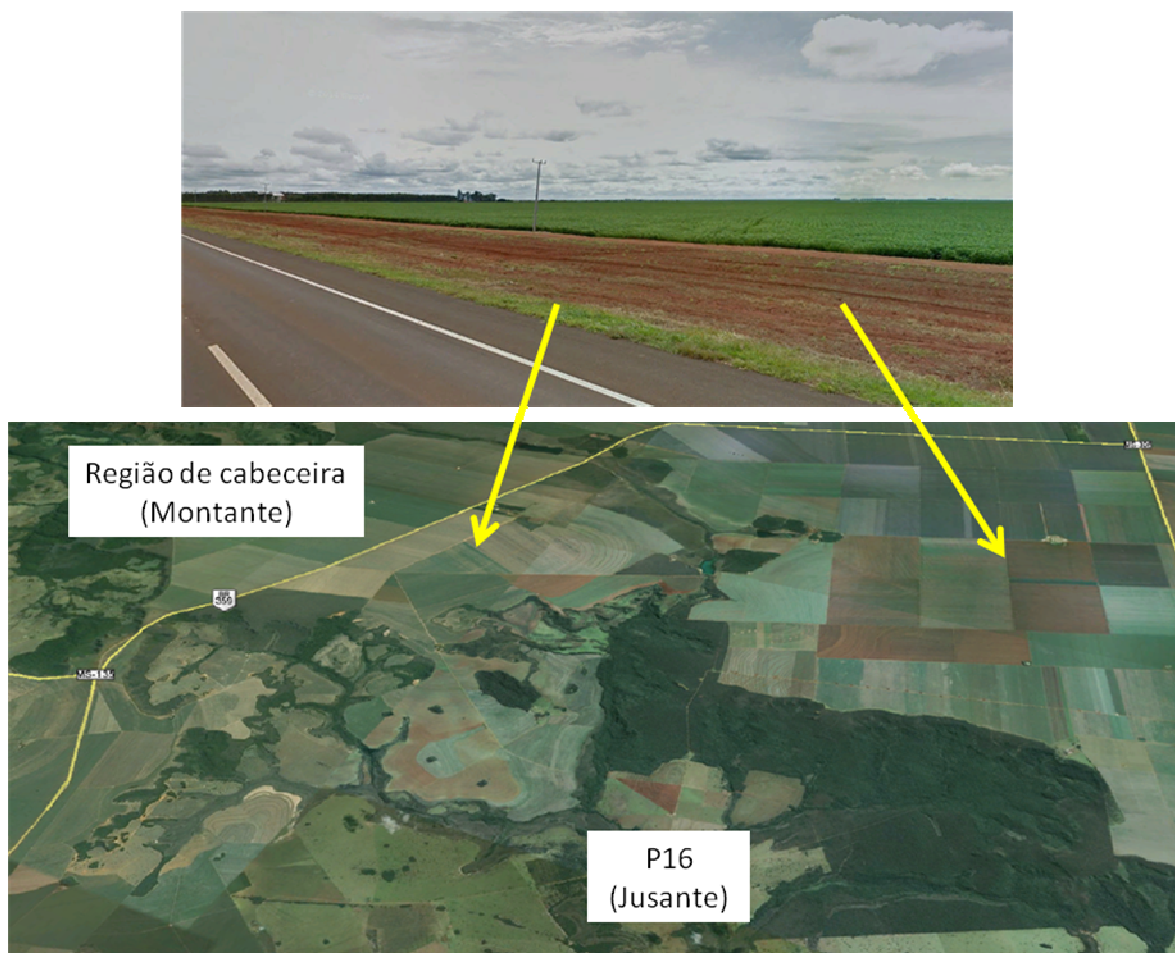


Fonte: modificado de (TRANNIN et al., 2013)..

Os pontos 2, 3 e 4, próximos à captação da PCH Costa Rica no período chuvoso de 2013, apresentaram grande quantidade de sedimentos nas frações média e fina, devido à diminuição da velocidade da água nesta seção hidráulica, provocando deposição de sedimento e consequente assoreamento do curso hídrico. Em Barcelos et al. (2012), verifica-se que a descarga sólida total é definida segundo a concentração de sólidos em suspensão e as características físicas tais como, do leito, da largura, da profundidade média do trecho em análise, da velocidade e vazão de água nesta seção hidráulica, além da dimensão da bacia hidrográfica, uso do solo e valores de precipitação. Considerando o uso do solo, o ponto 16 está localizado na região de cabeceira da bacia contribuinte da PCH Costa Rica, mas tem a sua montante, uma extensa área ocupada por atividades agrícolas desenvolvidas de forma

intensiva, o que justifica a elevada descarga sólida total, como pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Região de cabeceira a montante do ponto de coleta número 16 com grandes áreas destinadas à agroindústria na produção de sementes de soja



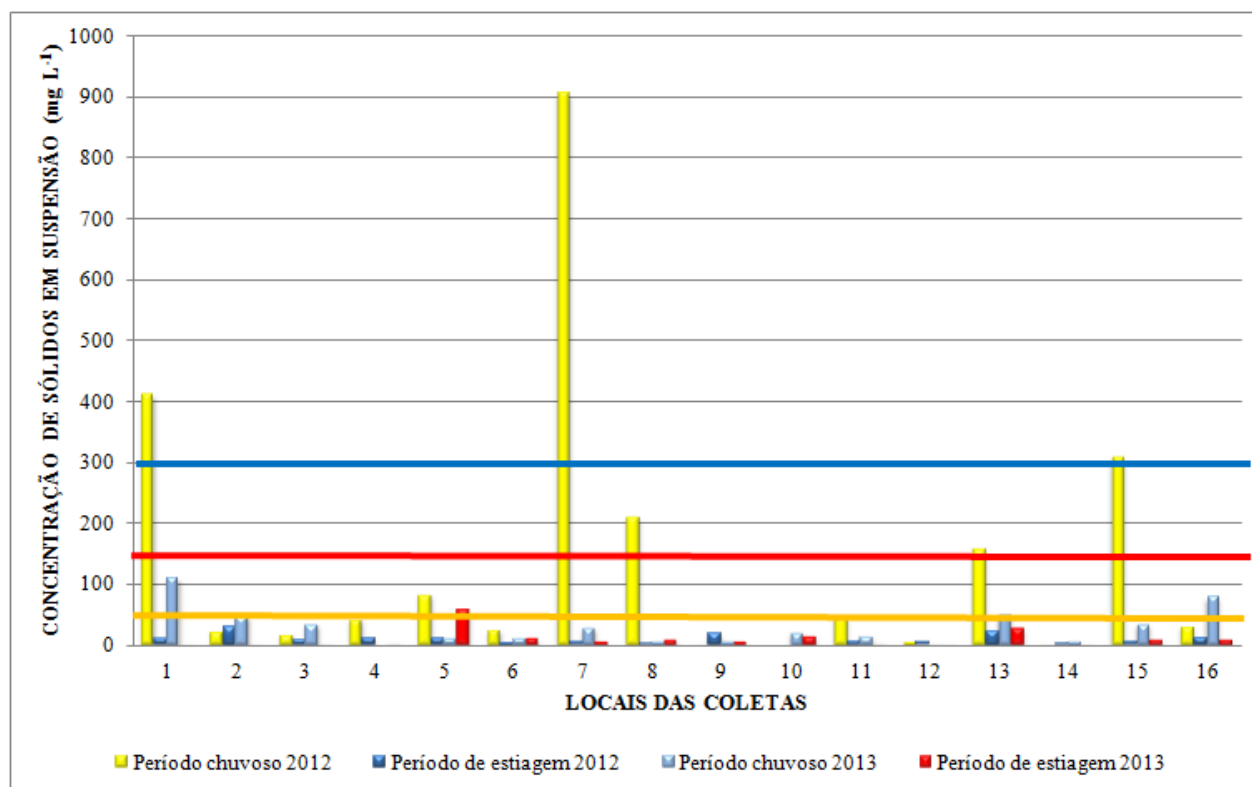
Fonte: modificado de (GOOGLE, 2015).

5.1.3 Concentrações de sólidos em suspensão

A Figura 16 apresenta as concentrações de sólidos em suspensão determinada pelas campanhas hidrossedimentológicas e com isso foi possível verificar uma variação nos locais amostrados. Os maiores valores amostrados, nos pontos 1, 7, 8, 13 e 15, da concentração de sólidos em suspensão na estação chuvosa do ano de 2012 não verificados novamente no período de estiagem de 2012. Este comportamento demonstra a influência da chuva na desagregação de partículas e carreamento de sedimentos oriundos de processos erosivos. Os dados amostrados reforçam que o aporte de sedimento em cursos d'água pode ser

intensificado nos períodos chuvosos e favorece a deposição da fração grosseira quando ocorre redução da energia de arrasto com a diminuição da velocidade dos cursos d'água.

Figura 16 – Concentrações de sólidos em suspensão obtidas nas estações chuvosa e de estiagem nos anos de 2012 e 2013 na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS) e os limites estabelecidos por Carvalho et al. (2000).



Fonte: modificado de (TRANNIN et al., 2013).

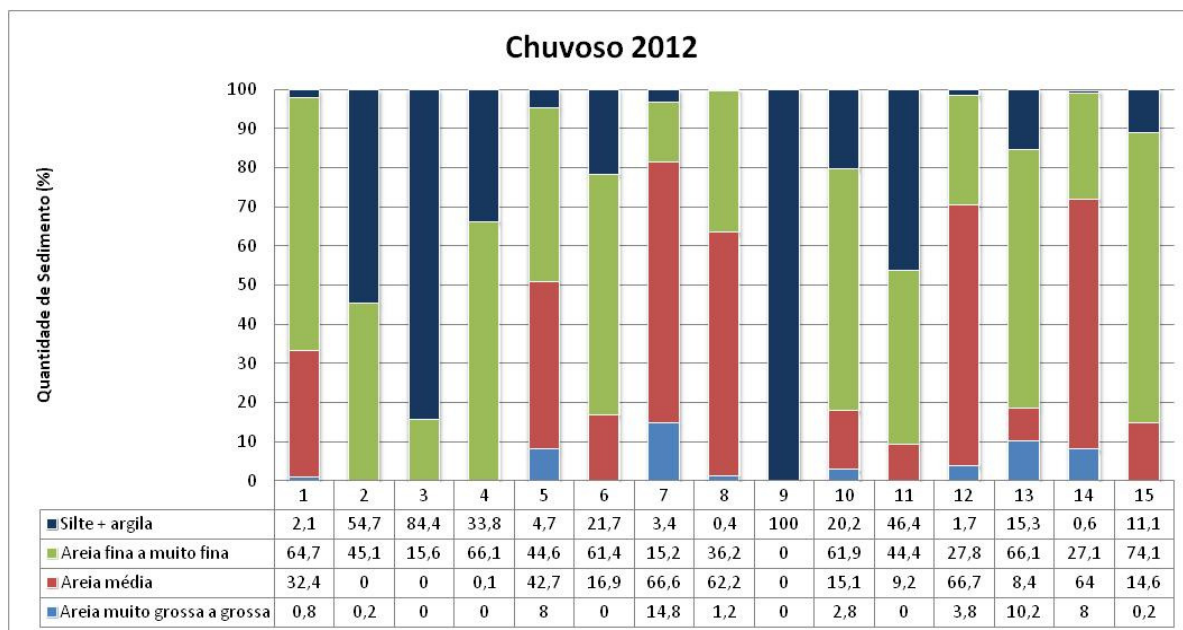
Carvalho et al. (2000) consideram os valores inferiores a 50 mg L^{-1} de concentração de sólidos em suspensão como baixos; altos, os valores compreendidos entre 150 e 300 mg L^{-1} e muito altos, os acima de 300 mg L^{-1} . Os pontos 1, 7 e 15 apresentaram valores muito altos e os pontos 8 e 13 altos de concentração de sólidos em suspensão no período chuvoso de 2012 (Figura 16). Uma das justificativas para a obtenção desses dados nestes pontos pode ser a colheita mecanizada de soja e milho a montante da bacia hidrográfica aliada aos eventos pontuais de chuva neste período.

5.1.4 Granulometria dos sólidos em suspensão do Alto rio Sucuriú

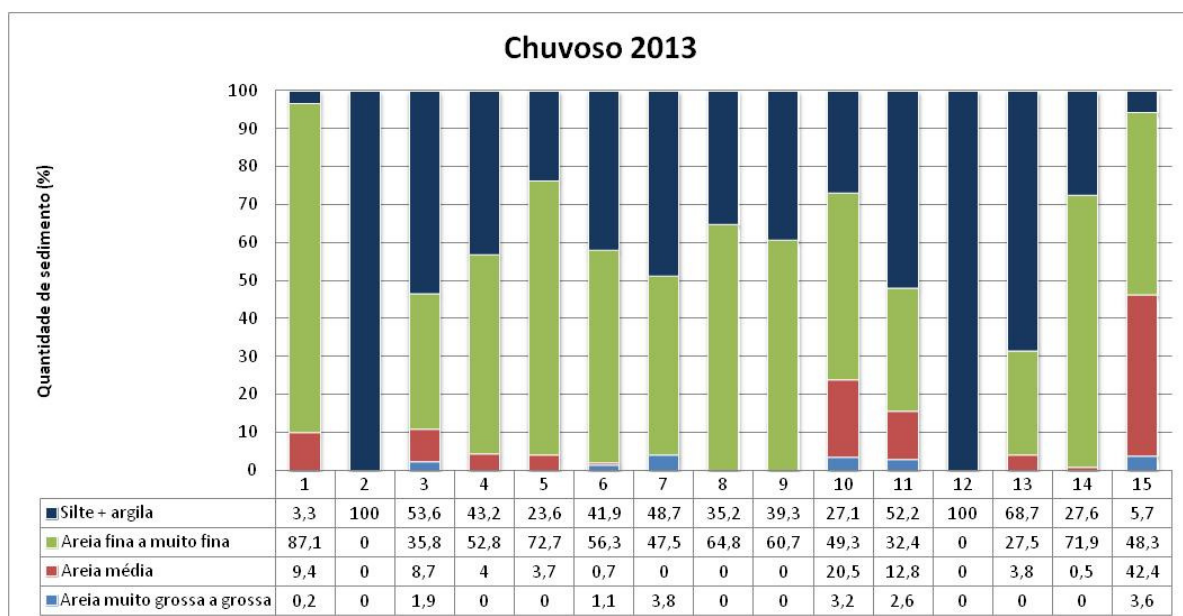
O regime de escoamento turbulento mantém a carga de partículas de granulometria fina (silte e argila) em suspensão, que por serem muito pequenas, se conservam elevadas no

fluido (VESTENA, 2008). Nas Figura 17 e Figura 18 podem ser observadas as granulometrias dos sólidos em suspensão obtidas pelas campanhas hidrossedimentológicas nas estações chuvosas e de estiagem de 2012 e 2013, respectivamente.

Figura 17 – Granulometria dos sólidos em suspensão, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS) na estação chuvosa de 2012 (a) e 2013 (b).



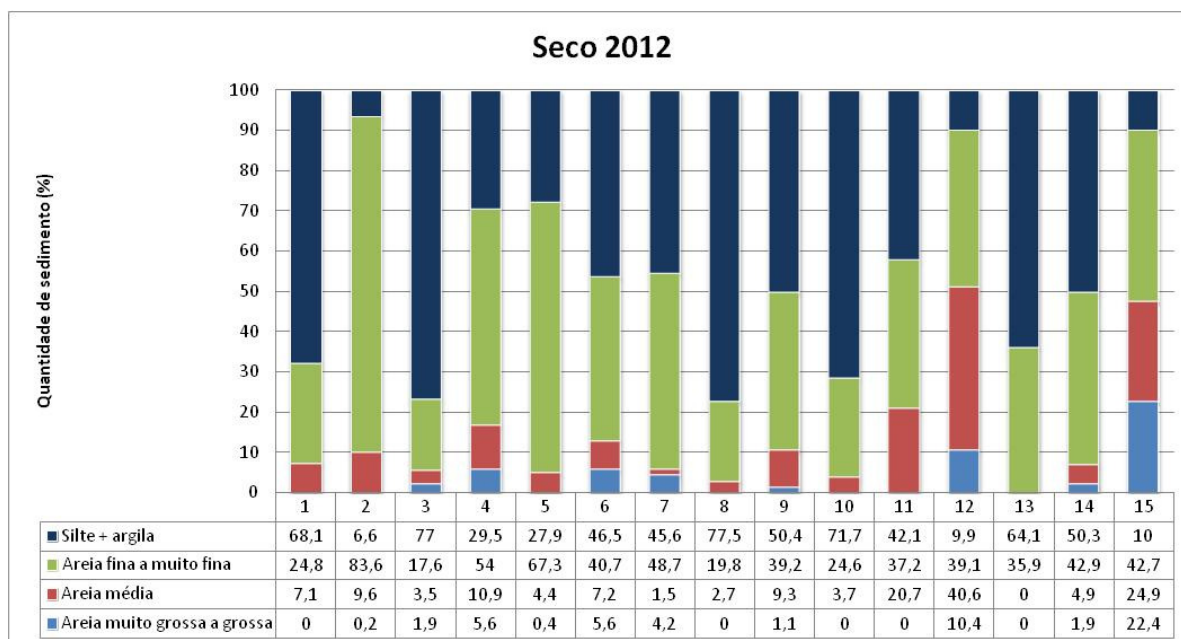
(a)



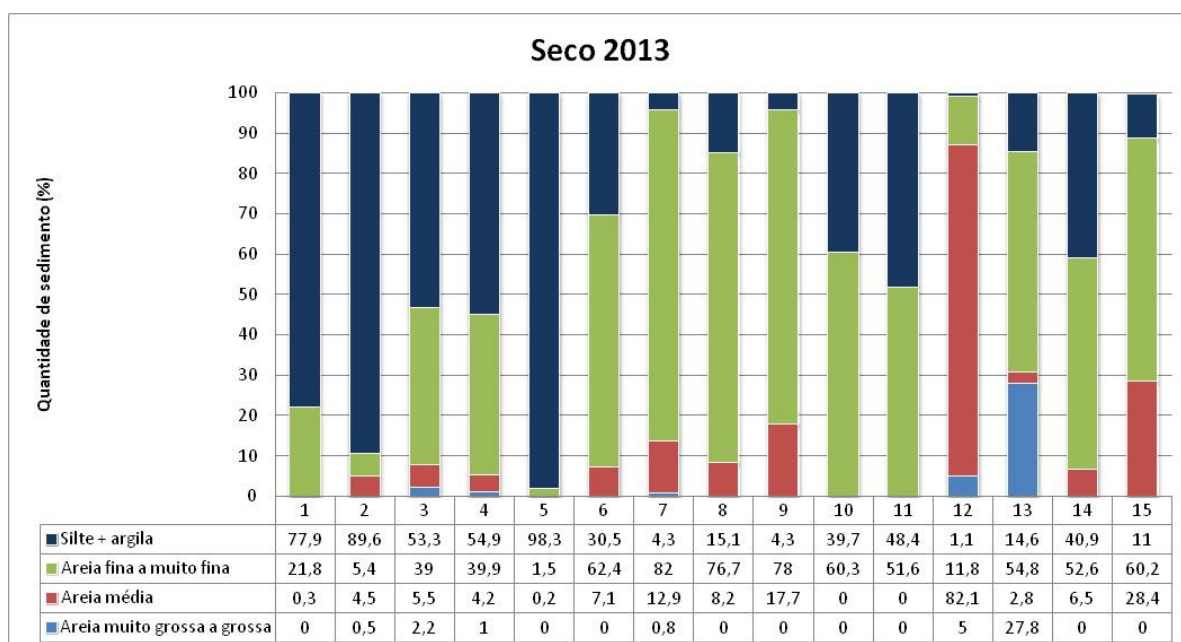
(b)

Fonte: o autor.

Figura 18 – Granulometria dos sedimentos em suspensão, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS) na estação de estiagem de 2012 (a) e 2013 (b)



(a)



(b)

Fonte: o autor.

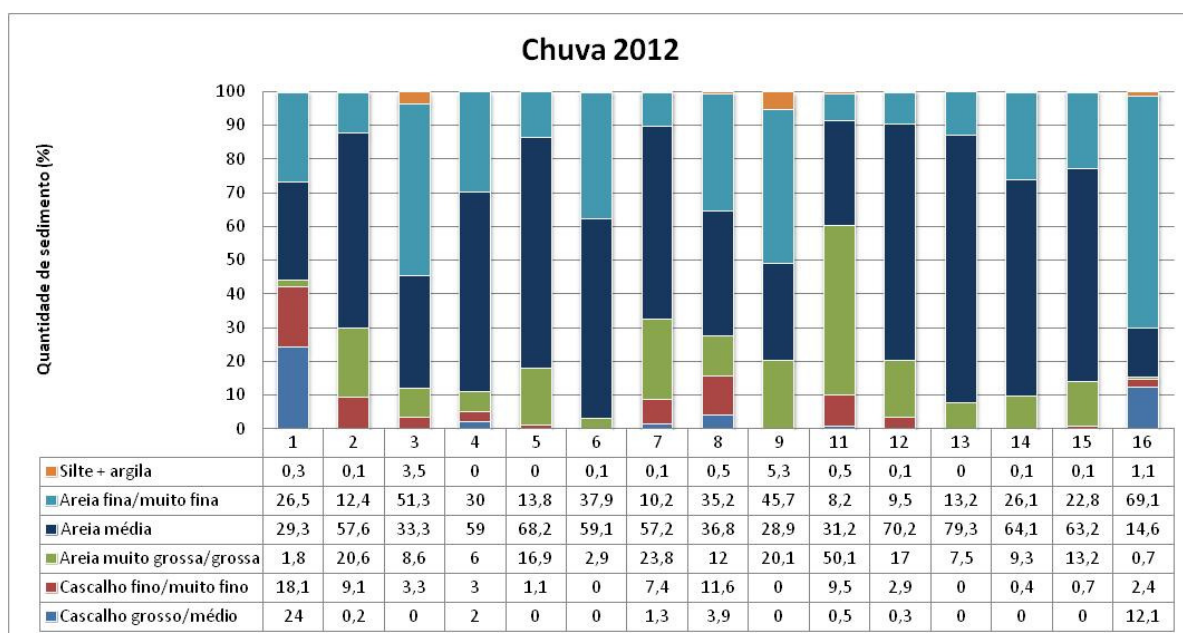
Ao comparar os dados obtidos na estação chuvosa com os da estiagem foi possível observar que houve aumento na predominância das frações mais finas a média da areia na descarga de sólidos em suspensão no período chuvoso, provavelmente, devido à

intensificação dos processos erosivos causados pela chuva, o que mantém a fração mais finas a média da areia em suspensão. A presença dessas frações mais finas a média da areia também pode ser justificada pela existência nesta bacia hidrográfica do Alto Rio Sucuriú, de grandes áreas de solos muito arenosos, como os Neossolos Quartzarênicos.

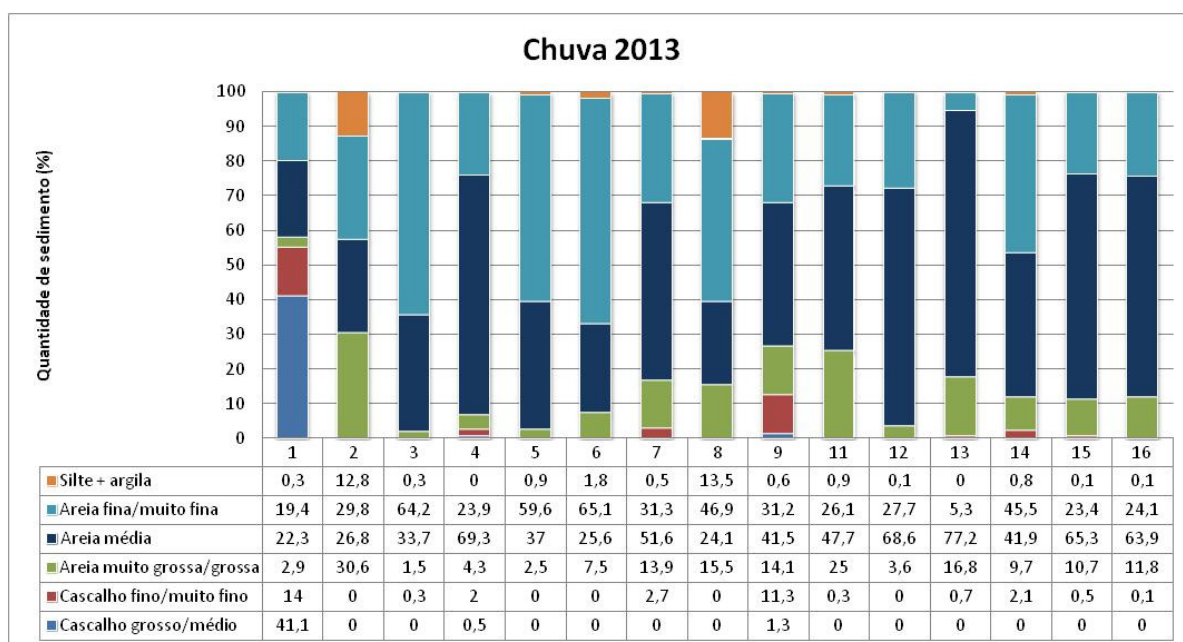
5.1.5 Granulometria dos sólidos de fundo

As Figura 19 e Figura 20 apresentam a granulometria dos sólidos de fundo dos pontos amostrados na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, nos períodos chuvosos e de estiagem dos anos de 2012 e 2013, respectivamente.

Figura 19 – Granulometria dos sólidos de fundo, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação chuvosa de 2012 (a) e 2013(b).



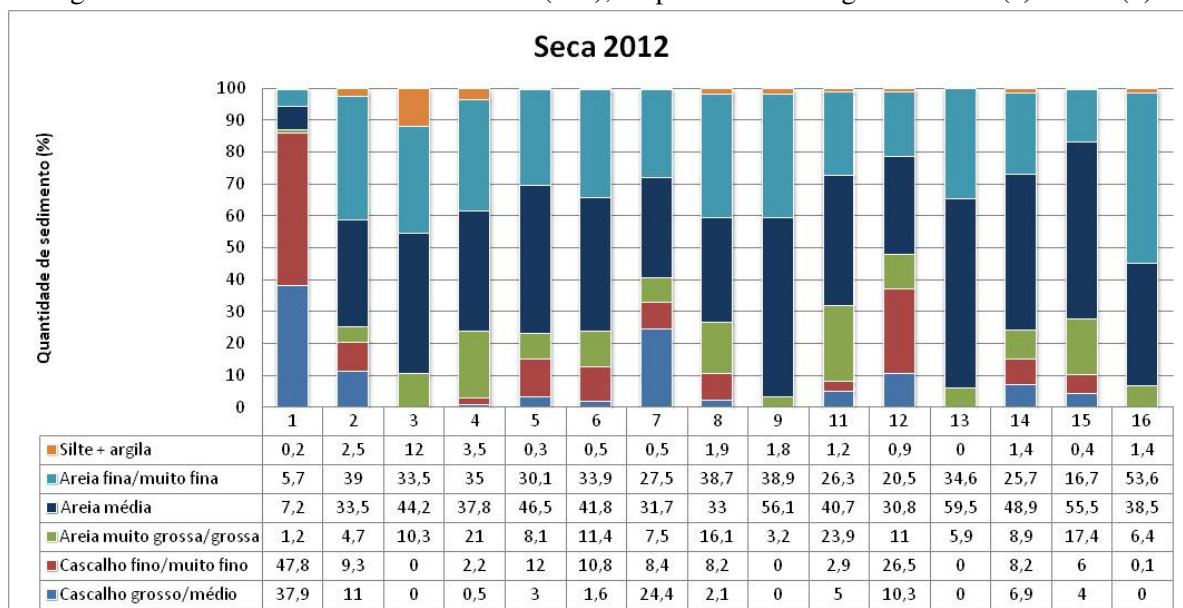
(a)



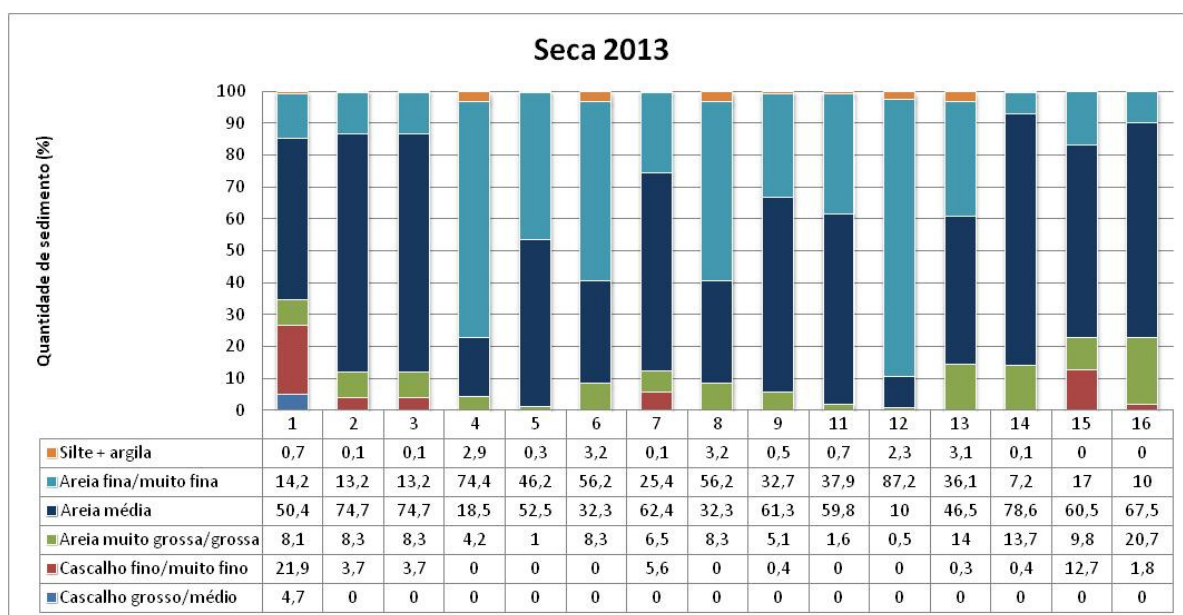
(b)

Fonte: o autor.

Figura 20 – Granulometria dos sólidos de fundo, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), no período de estiagem de 2012 (a) e 2013(b).



(a)



(b)

Fonte: o autor.

O ponto 1, localizado à jusante da maior voçoroca da bacia contribuinte da PCH Costa Rica, não apresentou comportamento semelhante aos demais pontos amostrados, apresentando maior quantidade de frações de cascalho fino/muito fino e cascalho grosso/médio nos períodos de estiagem. Este resultado evidenciou a contribuição da voçoroca para a produção de sedimentos grosseiros aos cursos d'água da bacia, mesmo no período de estiagem.

Normalmente, o período chuvoso é responsável pelo aumento do fluxo de água necessária ao arraste de frações mais grosseiras em suspensão e de fundo. Além disso, no período chuvoso, devido ao aumento de fluxo dos cursos d'água, ocorre redução da contribuição da fração fina para a descarga de fundo e esta permanece em suspensão. Conforme Silva et al. (2007), este fato pode ser justificado pela forte relação entre a dinâmica do transporte de sedimento fluvial com as velocidades da água.

A Tabela 12 apresenta a velocidade média da seção hidráulica dos cursos d'água nos 16 pontos amostrados na bacia contribuinte da PCH Costa Rica, nos períodos chuvosos e de estiagem dos anos de 2012 e 2013.

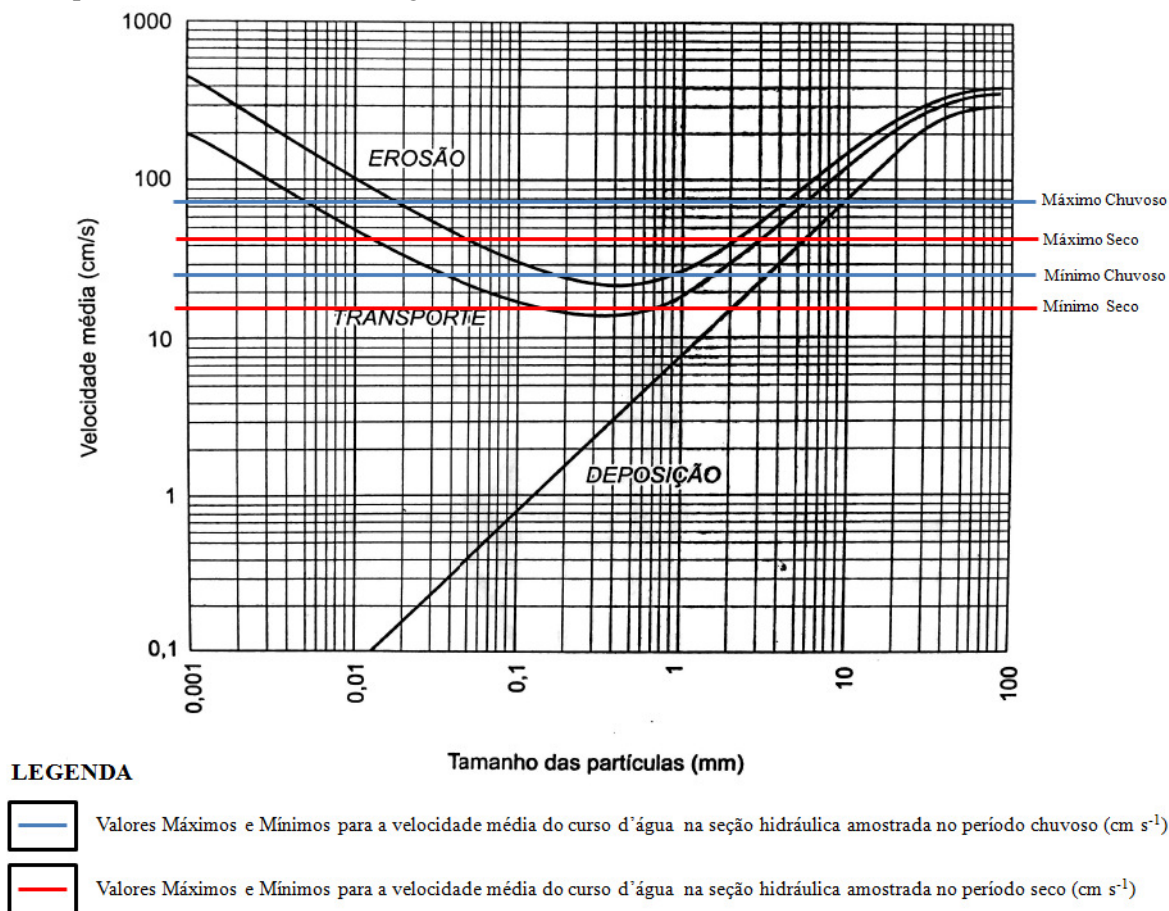
Tabela 12 - Velocidade média da seção do curso d'água amostrada nos locais de coleta para as 4 campanhas realizadas no período chuvoso e seco de 2012 e 2013.

PONTOS	Período Chuvoso 2012 (m s ⁻¹)	Período Estiagem 2012 (m s ⁻¹)	Período Chuvoso 2013 (m s ⁻¹)	Período Estiagem 2013 (m s ⁻¹)	Média dos Períodos Chuvosos (m s ⁻¹)	Média dos Períodos Estiagem (m s ⁻¹)
01	0,47	0,38	0,49	0,06	0,48	0,22
02	0,77	0,29	0,62	0,48	0,69	0,39
03	0,48	0,23	0,69	0,45	0,58	0,34
04	0,67	0,29	0,82	0,52	0,75	0,40
05	0,53	0,33	0,43	0,45	0,48	0,39
06	0,31	0,19	0,21	0,24	0,26	0,21
07	0,87	0,38	0,30	0,37	0,59	0,38
08	0,20	0,20	0,34	0,27	0,27	0,23
09	0,18	0,07	0,38	0,73	0,28	0,40
10	----	----	0,36	0,37	0,36	0,37
11	0,32	0,21	0,42	0,14	0,37	0,17
12	0,33	0,42	0,26	0,17	0,29	0,29
13	0,37	0,32	0,34	0,40	0,35	0,36
14	0,33	0,22	0,19	0,26	0,26	0,24
15	0,34	0,31	0,27	0,29	0,31	0,30
16	0,47	0,32	0,69	0,53	0,58	0,42

Fonte: (Anambi, 2013)

A Figura 21 apresenta as variações de velocidade média de um curso d'água (cm s⁻¹) e suas relações com o tamanho das partículas de sedimentos (mm) e com os processos fluviais, conforme apresentado por Hjulstrom (1935), *apud* Christofolletti (1981) e reapresentada por Silva et al. (2007), com ajuste dos valores máximos e mínimos de velocidade média de fluxo dos cursos d'água da bacia contribuinte da PCH Costa Rica nos períodos chuvosos e de estiagem de 2012 e 2013.

Figura 21 – Relação entre as variações da velocidade média de um curso d'água (cm s^{-1}) e o tamanho das partículas de sedimentos (mm) e os processos fluviais. Em destaque, os valores máximos e mínimos de velocidade média de fluxo dos cursos d'água da bacia contribuinte da PCH Costa Rica nos períodos chuvosos e de estiagem de 2012 e 2013.



Fonte: modificado de Hjultrom (1935) *apud* Christofolletti (1981) e Silva et al. (2007).

De acordo com a Figura 21, o ponto 11 apresentou a menor velocidade de escoamento no período de estiagem, indicando que as frações granulométricas de diâmetro inferior a 0,001mm a aproximadamente 2,0mm estão sendo transportadas e que as frações de diâmetros superiores a 2,0mm estão sendo depositadas.

A velocidade máxima de escoamento d'água amostrado ($74,5 \text{ cm s}^{-1}$) foi obtida no ponto 4, no período chuvoso (Tabela 12). Nesta velocidade, as frações granulométricas de diâmetro inferior a 0,001mm a aproximadamente 6,0mm estão sendo transportadas; as frações de 0,02mm a 4mm, são erodidas das margens e fundo do curso d'água, e as frações de 4mm estão sendo depositadas.

Este comportamento pode ser confirmado pelos resultados obtidos nas amostragens de campo, sendo identificada a maior participação da fração fina para a descarga de sólidos em suspensão e da fração grosseira para a descarga de fundo, em torno de 99%.

A deposição e o conseqüente assoreamento do canal de adução da PCH Costa Rica foram evidenciados pela presença de frações mais finas como silte e argila na composição granulométrica de sedimentos de fundo dos cursos d'água, nas regiões de baixa velocidade de escoamento.

Os resultados obtidos evidenciaram a necessidade da adoção de medidas conservacionistas de solo, para que o assoreamento seja controlado e não prejudique o desempenho da PCH Costa Rica na geração de energia e não reduza o elevado potencial de produção agrícola da região, destacando-se a orientação dos proprietários rurais na adoção de medidas conservacionistas.

5.2 DESCARGA SÓLIDA TOTAL – MÉTODO DE EINSTEIN MODIFICADO

A empresa Análise Ambiental Ltda. – ANAMBI, responsável pela execução das amostragens e análises laboratoriais nas quatro campanhas de levantamentos hidrossedimentológicos utilizou o método de Einstein modificado para estimar a descarga sólida total, inserindo os dados obtidos em campo e em laboratório, em planilhas de cálculo do programa Excel.

Na Tabela 13 podem ser observadas as descargas sólidas totais calculadas pelo método de Einstein Modificado e os respectivos valores médios obtidos nas estações chuvosas e de estiagem de 2012 e 2013.

Tabela 13 - Descarga sólida total dos 16 pontos amostrados na bacia contribuinte da PCH Costa Rica, calculada pelo método de Einstein Modificado nas estações chuvosas e de estiagem de 2012 e 2013.

PONTOS	Período Chuvoso 2012 (Mg dia ⁻¹)	Período de Estiagem 2012 (Mg dia ⁻¹)	Período Chuvoso 2013 (Mg dia ⁻¹)	Período de Estiagem 2013 (Mg dia ⁻¹)	Média (Mg dia ⁻¹)	Valor Anual (Mg ano ⁻¹)
01	9,78	0,05	1,27	0,01	2,78	1014,15
02	231,59	28,67	279,71	8,54	137,13	50051,99
03	76,41	10,83	308,32	23,77	104,83	38263,59
04	234,99	11,14	453,85	32,55	183,13	66843,09
05	33,01	1,01	7,57	9,22	12,70	4636,32
06	1,16	0,07	0,32	0,37	0,48	175,29
07	210,81	0,80	4,06	1,27	54,24	19795,78
08	0,67	0,05	0,42	0,56	0,43	155,13

Tabela 13 - Descarga sólida total dos 16 pontos amostrados na bacia contribuinte da PCH Costa Rica, calculada pelo método de Einstein Modificado nas estações chuvosas e de estiagem de 2012 e 2013. Continuação.

PONTOS	Período Chuvoso 2012 (Mg dia ⁻¹)	Período de Estiagem 2012 (Mg dia ⁻¹)	Período Chuvoso 2013 (Mg dia ⁻¹)	Período de Estiagem 2013 (Mg dia ⁻¹)	Média (Mg dia ⁻¹)	Valor Anual (Mg ano ⁻¹)
09	0,06	0,05	1,39	0,48	0,49	180,13
10	----	----	1,39	10,62	6,00	2190,55
11	0,79	0,15	2,51	0,04	0,87	317,82
12	0,20	0,76	0,09	0,05	0,27	100,10
13	5,49	1,34	10,45	1,06	4,59	1673,89
14	0,15	0,06	0,40	0,10	0,17	63,05
15	3,74	0,18	1,17	0,32	1,35	493,30
16	21,05	2,36	63,03	9,40	23,96	8745,67

Fonte: (Anambi, 2013)

5.3 DESCARGA SÓLIDA TOTAL - SOFTWARE InVEST

5.3.1 Índice de erosividade das chuvas (Fator R)

A erosividade (Fator R) verificada na Tabela 14 e que foi utilizada como representativa para a bacia hidrográfica do Alto rio Sucuriú à montante da PCH Costa Rica/MS.

Tabela 14 - Tabulação dos valores calculados para a erosividade (Fator R) da bacia hidrográfica da PCH Costa Rica/MS.

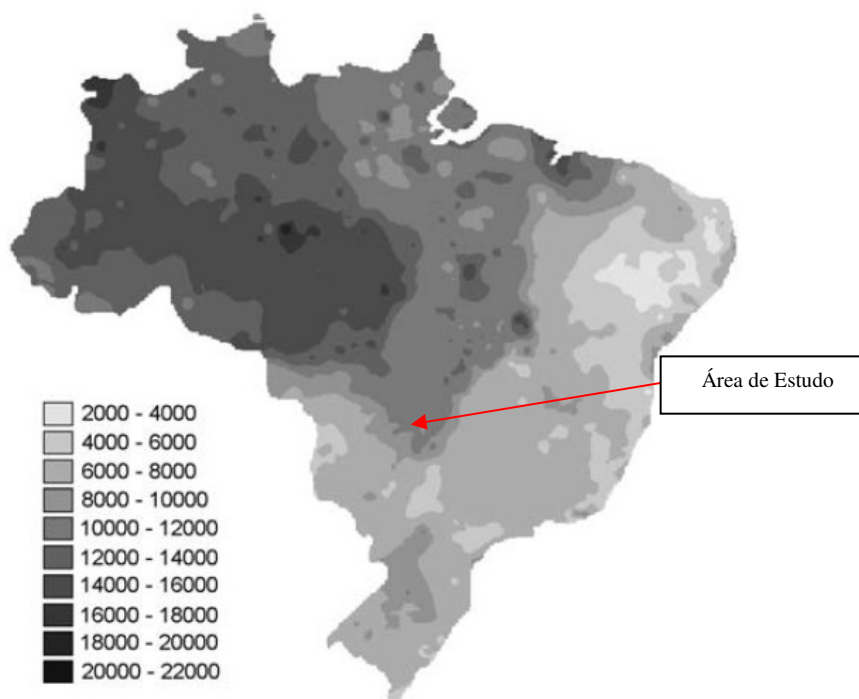
Anos	EI _m												FATOR R (ΣEI _m anual)
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	
1984	893.5	331.1	748.6	298.2	2.2	0.0	0.0	189.9	13.7	38.0	661.4	551.5	3728.2
1985	2765.4	720.9	736.0	148.8	181.9	0.2	1.3	0.0	1.1	242.6	309.8	110.9	5219.0
1986	477.6	297.8	943.7	85.6	4.7	0.0	0.8	155.6	28.3	132.9	421.1	993.6	3541.7
1987	1325.1	457.8	590.1	137.2	66.1	0.1	0.0	3.1	9.0	294.6	269.4	747.7	3900.2
1988	1452.2	840.7	828.1	1118.8	7.0	0.0	0.0	0.0	7.7	160.6	80.2	1569.6	6064.9
1989	839.1	561.0	801.3	690.0	8.4	1.2	9.3	21.2	14.9	164.3	185.7	983.1	4279.7
1990	1207.9	162.7	345.2	495.4	44.0	0.0	0.1	70.5	422.7	302.8	260.7	343.2	3655.3
1991	587.5	387.8	887.5	126.4	210.0	0.5	0.0	0.0	18.3	193.7	25.5	1461.3	3898.4
1992	915.1	196.5	1363.0	871.9	43.1	0.0	0.0	0.8	173.7	486.3	327.4	76.8	4454.6
1993	385.8	1256.7	689.4	260.4	153.8	57.9	0.0	2.7	175.3	32.6	110.8	1447.0	4572.3
1994	862.3	630.2	691.3	88.5	81.4	11.8	10.5	0.0	0.0	105.3	444.4	515.9	3441.6
1995	615.0	1264.6	994.9	297.5	1.1	14.7	0.0	0.0	76.3	83.4	248.7	460.2	4056.4

Tabela 14 - Tabulação dos valores calculados para a erosividade (Fator R) da bacia hidrográfica da PCH Costa Rica/MS. Continuação.

Anos	EI _m												FATOR R (ΣEI_m anual)
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	
1996	389.6	219.9	492.5	102.6	186.1	0.0	0.0	0.0	307.6	178.0	1302.0	749.0	3927.3
1997	2413.1	86.6	80.3	16.9	13.8	271.2	0.0	0.0	89.7	86.6	1146.2	1066.0	5270.4
1998	662.3	791.0	369.3	45.9	0.8	0.0	0.0	67.6	119.4	174.0	152.2	2116.0	4498.4
1999	980.8	245.2	1050.4	607.4	93.8	1.4	0.0	0.0	17.9	103.9	414.5	535.2	4050.8
2000	757.1	1600.5	1394.3	208.6	13.9	0.0	7.0	21.8	344.4	70.4	261.6	317.6	4997.2
2001	186.0	467.6	237.6	289.2	11746.8	0.0	0.0	2.8	30.9	93.1	356.8	383.4	13794.3
2002	138.2	306.0	164.3	53129.6	15.2	0.0	52.4	1.0	3.6	128.5	126.7	17.5	54082.8
2003	2559.9	509.7	330.3	283.2	0.0	3.0	0.0	1.2	7.9	216.6	311.2	805.5	5028.4
2004	1822.7	549.2	92.5	0.0	0.0	0.3	3.4	0.0	0.1	262.2	736.2	1654.8	5121.4
2005	1520.4	294.1	331.8	0.0	0.0	1.6	0.1	0.0	30.7	40.1	1566.4	790.7	4575.9
2006	788.0	701.3	524.3	0.0	0.0	0.0	0.9	4.7	53.0	626.3	389.2	565.9	3653.5
2007	1943.0	0.0	847.3	10.6	23.0	0.0	12.6	0.0	3.6	695.6	355.0	971.1	4861.8
2008	1650.9	1022.5	1666.1	408.7	0.0	48.0	0.0	0.5	0.1	0.0	328.4	411.8	5537.0
2009	943.0	604.9	508.9	21.0	9.0	7.6	1.1	2.5	71.9	229.3	1396.3	1655.3	5450.9
2010	1745.3	906.6	348.9	234.9	1.3	0.0	0.1	0.0	0.0	652.0	226.9	387.7	4503.7
2011	1185.9	788.8	3038.6	29.6	2.8	4.8	0.0	0.0	0.1	367.9	135.3	111.9	5665.8
2012	1126.1	349.0	299.6	809.7	351.9	66.2	0.1	0.0	8.6	0.0	589.0	397.1	3997.2
2013	1789.0	1046.9	872.7	53.4	0.2	28.6	4.2	0.0	34.5	337.6	212.5	403.8	4783.4
2014	77.2	299.9	55.7	197.8	36.0	8.1	190.8	0.0	150.0	7.7	0.0	0.0	1023.2
FATOR R MÉDIO PARA ESTAÇÃO 1853004								(MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹)					6310,8

De acordo com Silva (2004), no mapa de erosividade média anual do Brasil, o Estado do Mato Grosso do Sul apresenta uma variação de erosividade de 2.000 a 12.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ e na região próxima à área de estudo, varia de 6.000 a 10.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ (Figura 22).

Figura 22 – Erosividade anual média para o Brasil.



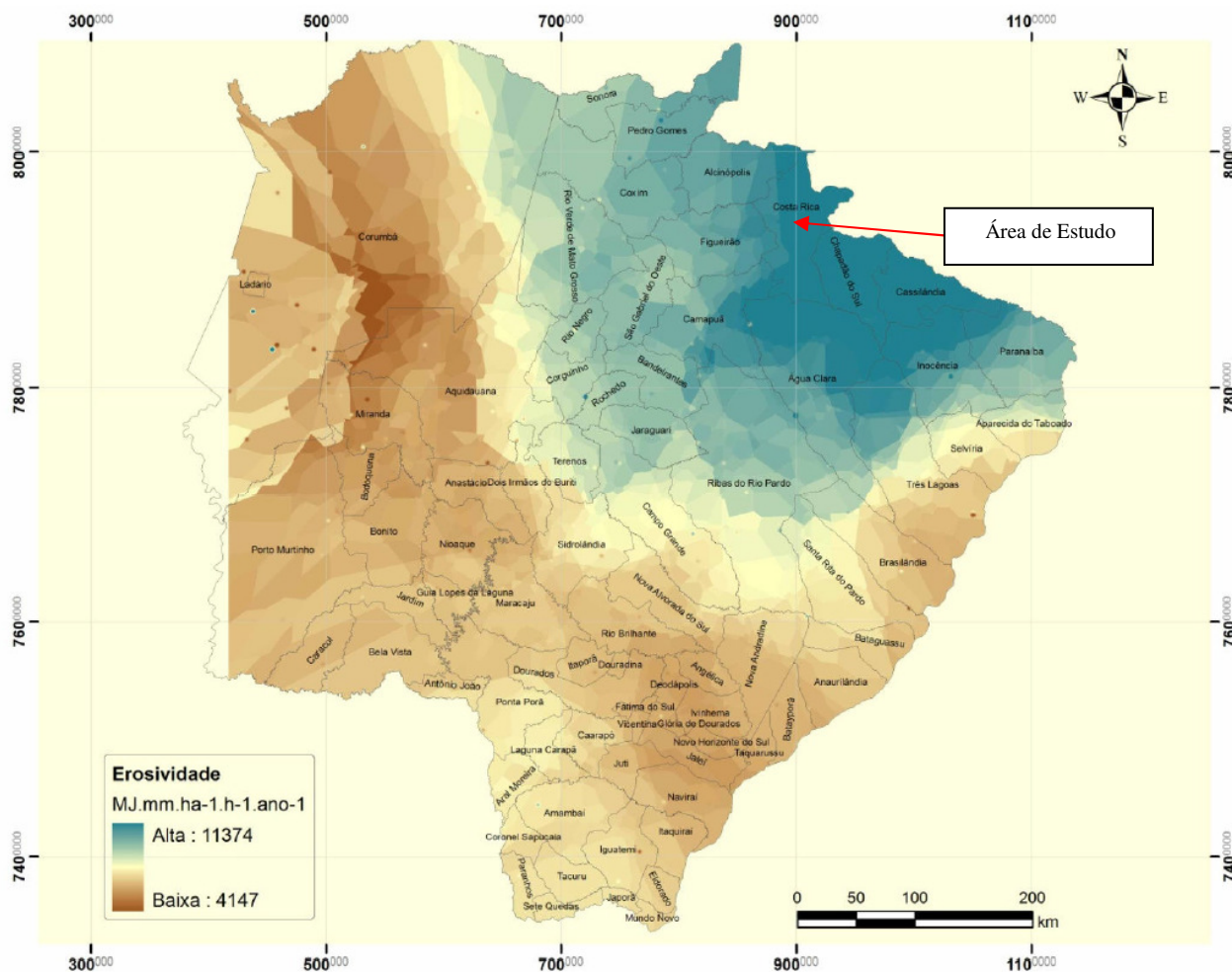
Fonte: modificado de Silva (2004)

De acordo com Silva (2004), a erosividade anual no Brasil, apresenta uma variação de 3.116 a 20.035 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Comparando os valores de erosividade para o Estado de Mato Grosso do Sul obtidos por Rebucci et al.(2009) e Silva (2004), com os da estação pluviométrica 1853004, foi possível observar que a média anual de 6.310,8 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ está na faixa de erosividade obtida por estes autores. Porém, nos anos de 2001 e 2002, os valores de erosividade foram, respectivamente, de 13.794,3 e 54.082,8 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, próximo da faixa superior ocorrida no ano de 2001 e muito superior ao do ano de 2002 obtidos por estes autores. Estes resultados demonstraram que, em determinados anos, a região da área de estudo pode apresentar valores de erosividade superiores aos brasileiros.

De acordo com a Embrapa (GALDINO et al., 2003) a erosividade é de 8.588,9 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ para o município de Costa Rica (MS), sendo o Fator R calculado a partir dos dados obtidos na Estação 1853004, de 6.310,8 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Rebucci et al. (2009) elaboraram um mapa de erosividade para o Estado do Mato Grosso do Sul considerando dados de 156 estações pluviométricas, sendo verificada uma variação na

erosividade de 4.147 a 11.374 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ e o valor médio de 6477 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ (Figura 23).

Figura 23 – Erosividade media anual para o Estado de Mato Grosso do Sul



Fonte: modificado de (Rebucci et al., 2009)

Na Tabela 15 são apresentadas as classes de erosividade (Fator R) estabelecidas por Silva et al. (2007). Estes autores verificaram que as classes de interpretação do índice de erosividade foram determinadas por Carvalho et al. (1994) no sistema métrico e que para converter para o sistema internacional de unidades, as classes de erosividade devem ser multiplicadas por 9,81, fator adotado por Foster et al. (1981).

Tabela 15 - Classes de erosividade (Fator R).

Classe de erosividade (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹)	Intensidade
R < 2.452,5	Fraca
2.452,5 < R < 4.905,0	Média
4.905,0 < R < 7.357,5	Média a Forte
7.357,5 < R < 9.810,0	Forte
R > 9.810,0	Muito forte

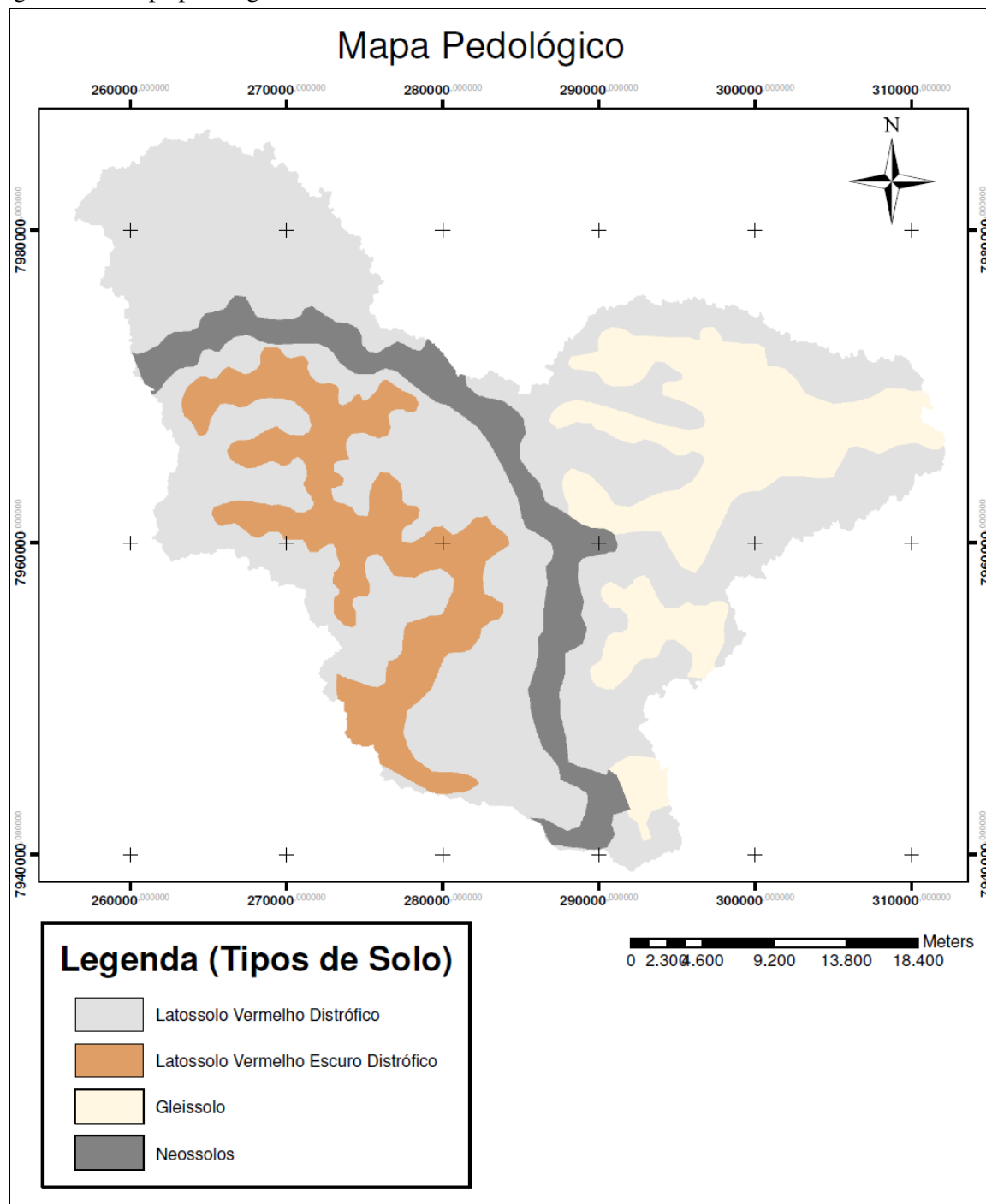
Fonte: Silva et al. (2007)

Com base nas classes de erosividade apresentadas na Tabela 15, a erosividade calculada com os dados obtidos na estação pluviométrica nº 1853004 da Agência Nacional de Águas (ANA) para os anos de 1984 a 2014 apresentam, em 63,33% dos anos, erosividade classificada como média e 30% como erosividade média a forte, enquanto nos anos de 2001 e 2002, a erosividade média anual foi classificada como “muito forte”.

5.3.2 Índice de erodibilidade dos solos (Fator K)

O mapa pedológico (Figura 24), elaborado por Catelani (2015) apresenta os tipos de solo da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS) e é determinante para estabelecer o índice de erodibilidade dos solos (Fator K), bem como, para a espacialização deste fator na área de estudo.

Figura 24 – Mapa pedológico da bacia contribuinte da PCH Costa Rica/MS.



Fonte: modificado de Catelani (2015).

Os valores de erodibilidade (Fator K) de cada tipo de solo identificado na bacia (Tabela 6) foram obtidos por meio de valores encontrados na literatura, conforme PCBAP (1997).

Na Tabela 16 são apresentadas as classes de erodibilidade, conforme Silva e Alvares (2005) com modificações da metodologia de Carvalho (1994), pela utilização do fator de

conversão (Valor de 9,81) de Foster et al. (1981) para valores no sistema internacional de unidades.

Tabela 16 - Classes de erodibilidade (Fator K).

Classes de erodibilidade (Mg ha h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	Intensidade
K < 0,01529	Baixa
0,01529 < K < 0,03058	Média
K > 0,03058	Alta

Fonte: Silva e Alvares (2005)

De acordo com estas classes de erodibilidade e com os valores de fator K citados no Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai, próxima à área de estudo, verificou-se que a bacia contribuinte da PCH Costa Rica apresenta solos com média a alta erodibilidade e, portanto, muito susceptíveis aos processos erosivos (Tabela 17).

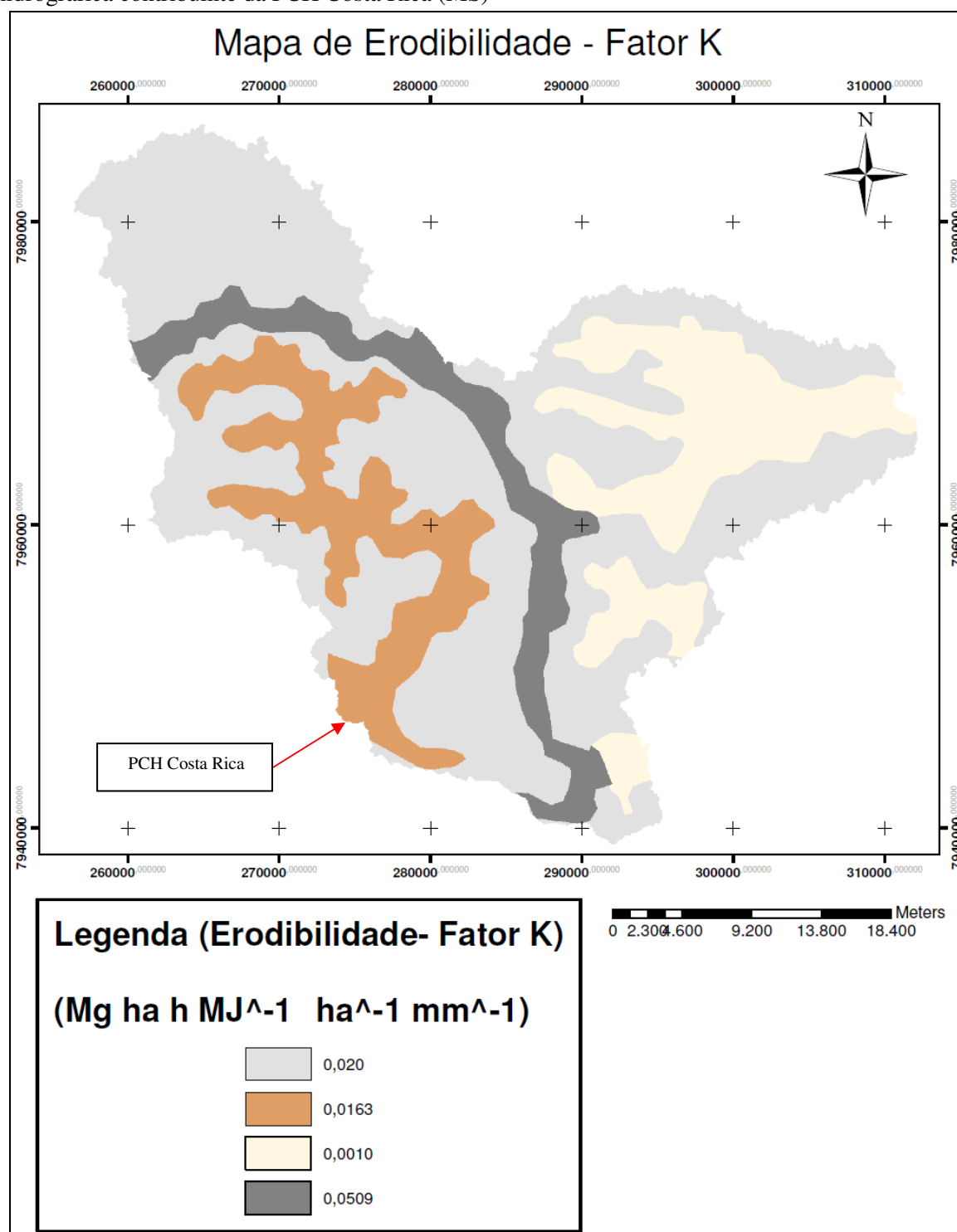
Tabela 17 - Fator K para os solos da área de estudo, com base no Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai.

Tipo de Solo	Fator K (Mg ha h (MJ mm)⁻¹)	Erodibilidade
Gleissolos	0,0010	Baixa
Latossolo Vermelho Distrófico	0,02	Média
Latossolo Vermelho Escuro	0,0163	Média
Neossolos	0,0509	Alta

Fonte: (PCBAP, 1997)

O mapa raster de erodibilidade apresenta os dados inseridos no programa InVEST para o cálculo da equação universal de perda de solo (Figura 25).

Figura 25 – Mapa raster com os valores de erodibilidade (fator K) para cada tipo de solo da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS)

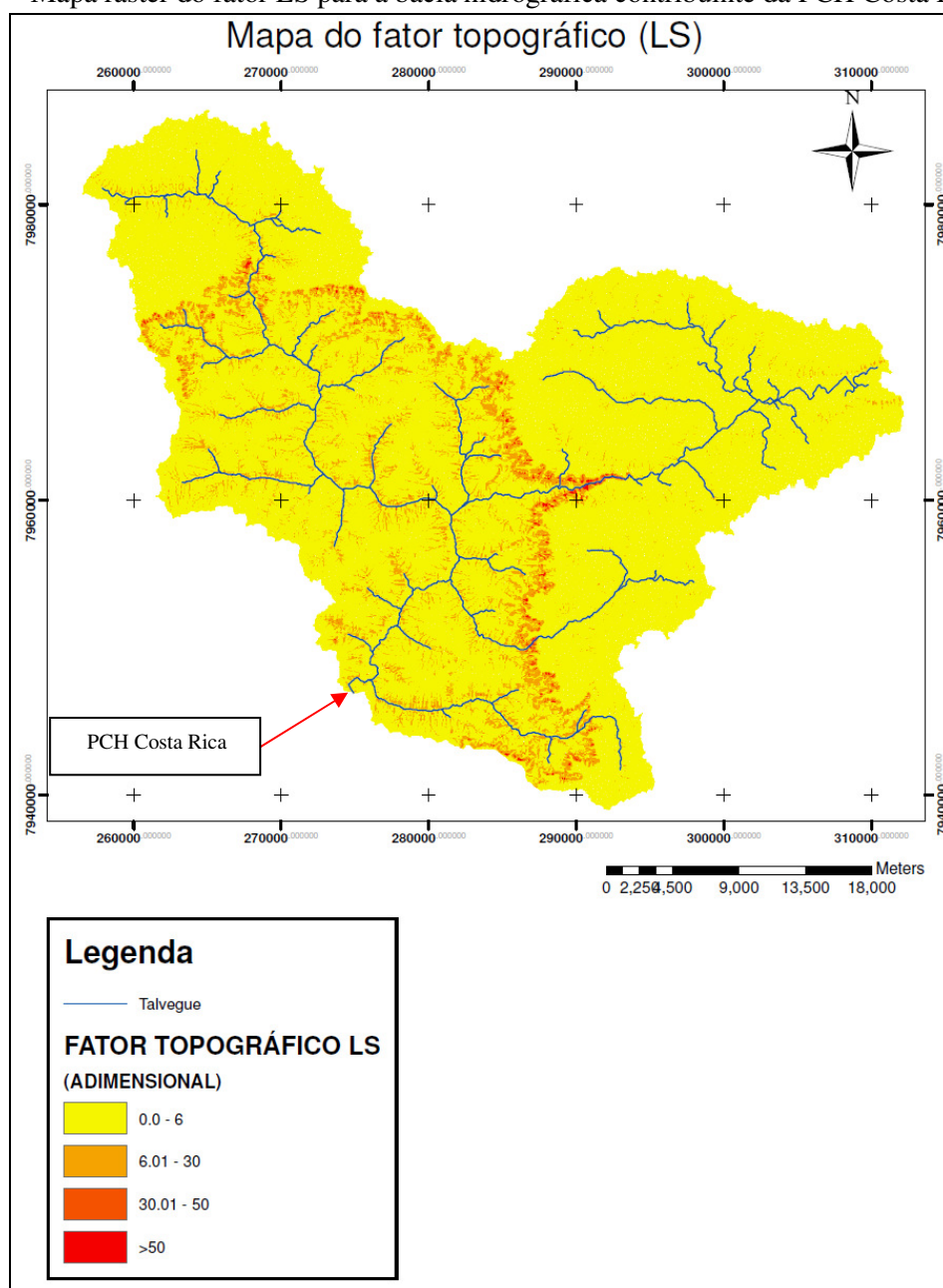


Fonte: o autor

5.3.3 Comprimento de rampa e declividade do terreno (Fator LS)

A Figura 26 apresenta o fator LS calculado e fornecido como saída intermediária no processamento do modelo. Este fator é utilizado como banco de dados prévio no cálculo da quantidade aportada de sedimentos na bacia hidrográfica à montante da PCH Costa Rica.

Figura 26 – Mapa raster do fator LS para a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica.



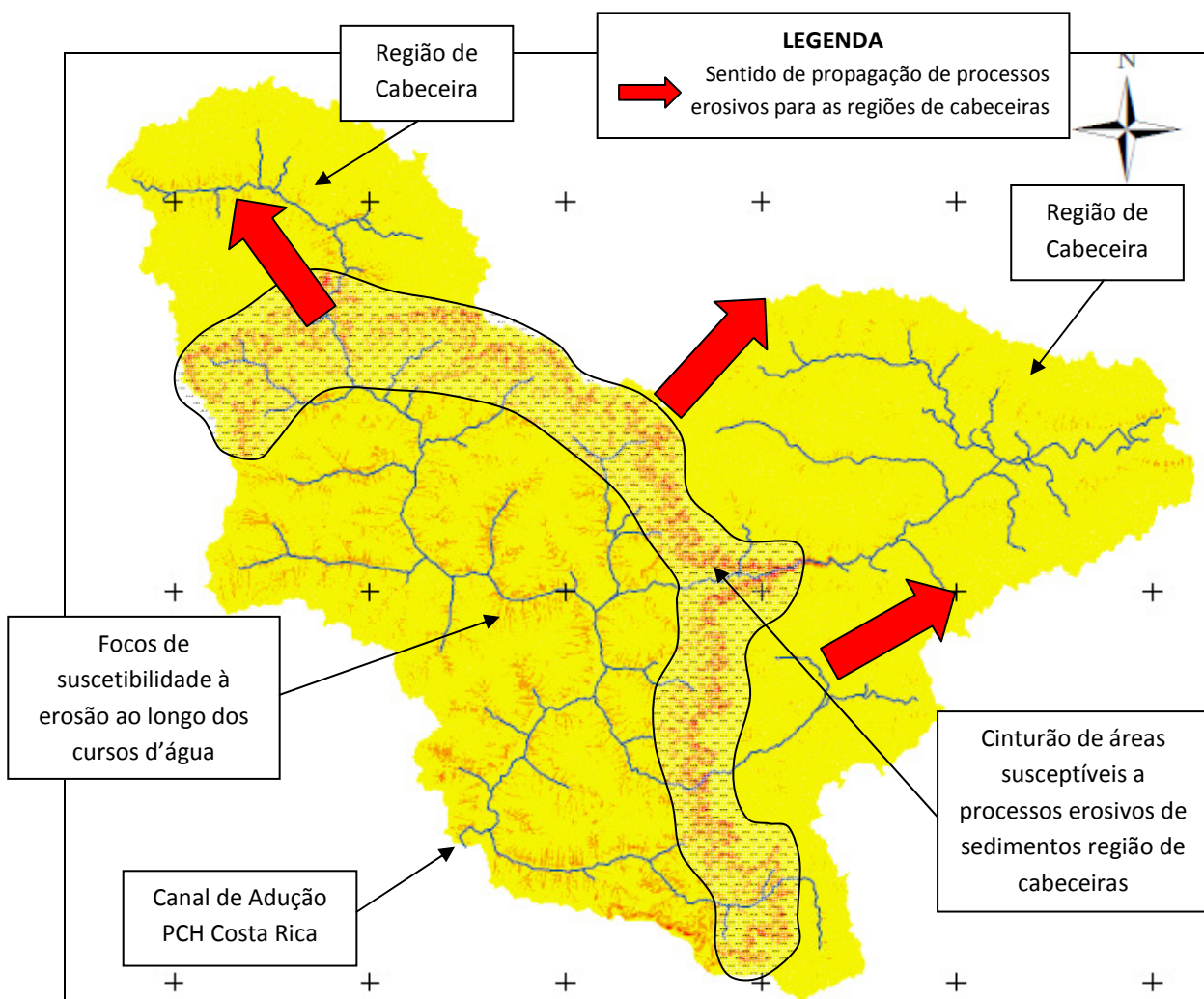
Fonte: o autor

O fator topográfico (LS), segundo Neves et al. (2008), compreende ao comprimento da vertente (L), que representa a distância entre o ponto de origem do escoamento

superficial até o ponto onde a declividade decresce o suficiente para ocorrer a deposição de sedimentos.

As regiões destacadas em vermelho no mapa da bacia contribuinte da PCH Costa Rica correspondem aos valores mais elevados do Fator LS, de maior susceptibilidade aos processos erosivos (Figura 27). Neste mapa da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica é possível observar a formação de um cinturão de ocorrência de processos erosivos na região da cabeceira a média bacia e, à jusante desse cinturão, ao longo dos cursos d'água, também podem ser identificados pontos de susceptibilidade à erosão.

Figura 27 – Detalhamento de áreas suscetíveis à erosão pela análise do fator topográfico (LS) na bacia contribuinte da PCH Costa Rica.



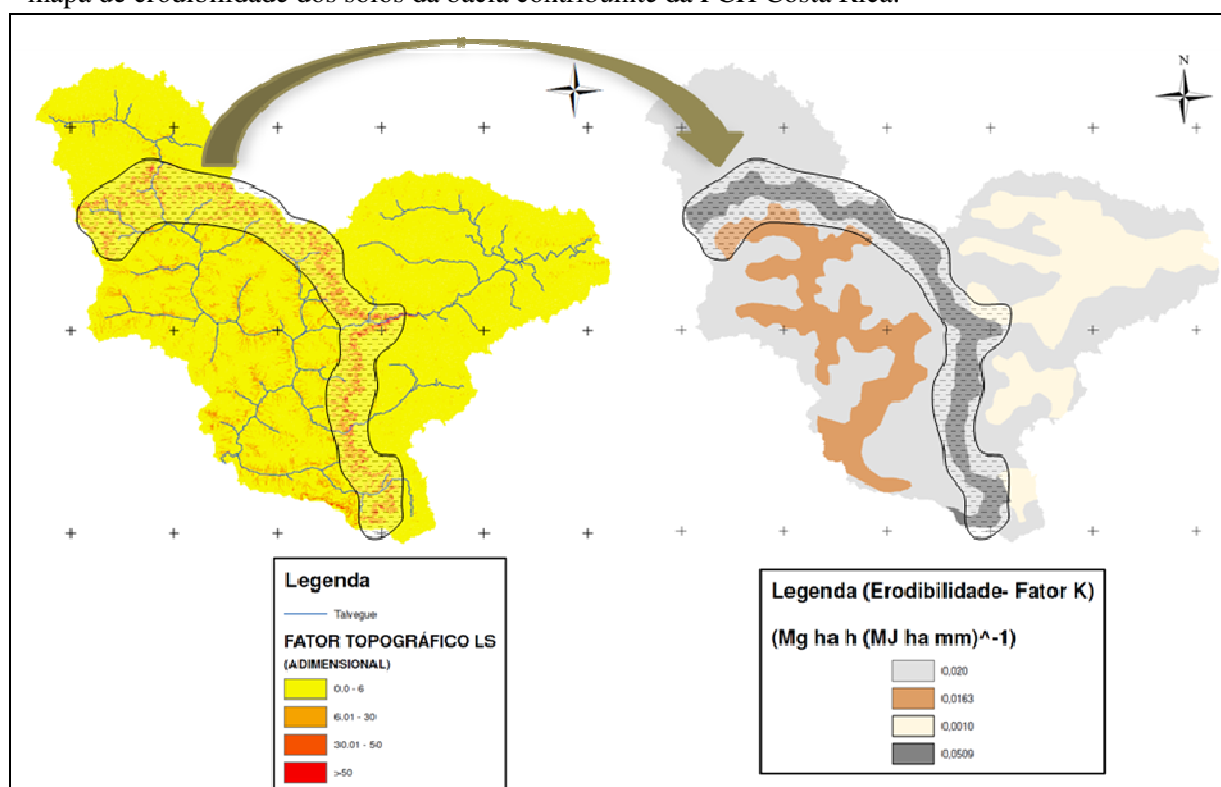
Fonte: o autor

Pinheiro e Cunha (2012) avaliaram a importância do fator topográfico (LS) da equação universal de perda de solo na modelagem dos processos erosivos em bacias

hidrográficas e identificaram áreas potencialmente susceptíveis aos processos erosivos na bacia do Córrego Ibitinga, no município de Rio Claro (SP).

A sobreposição dos mapas do fator topográfico (Fator LS) e do fator erodibilidade dos solos (Fator K), possibilitou verificar que o cinturão de áreas suscetíveis a processos erosivos coincidem com as classes de solo de maior erodibilidade, indicando o elevado potencial de geração de sedimentos destas áreas (Figura 28).

Figura 28 – Comparativo das áreas suscetíveis à erosão pela análise do fator topográfico (LS) com o mapa de erodibilidade dos solos da bacia contribuinte da PCH Costa Rica.

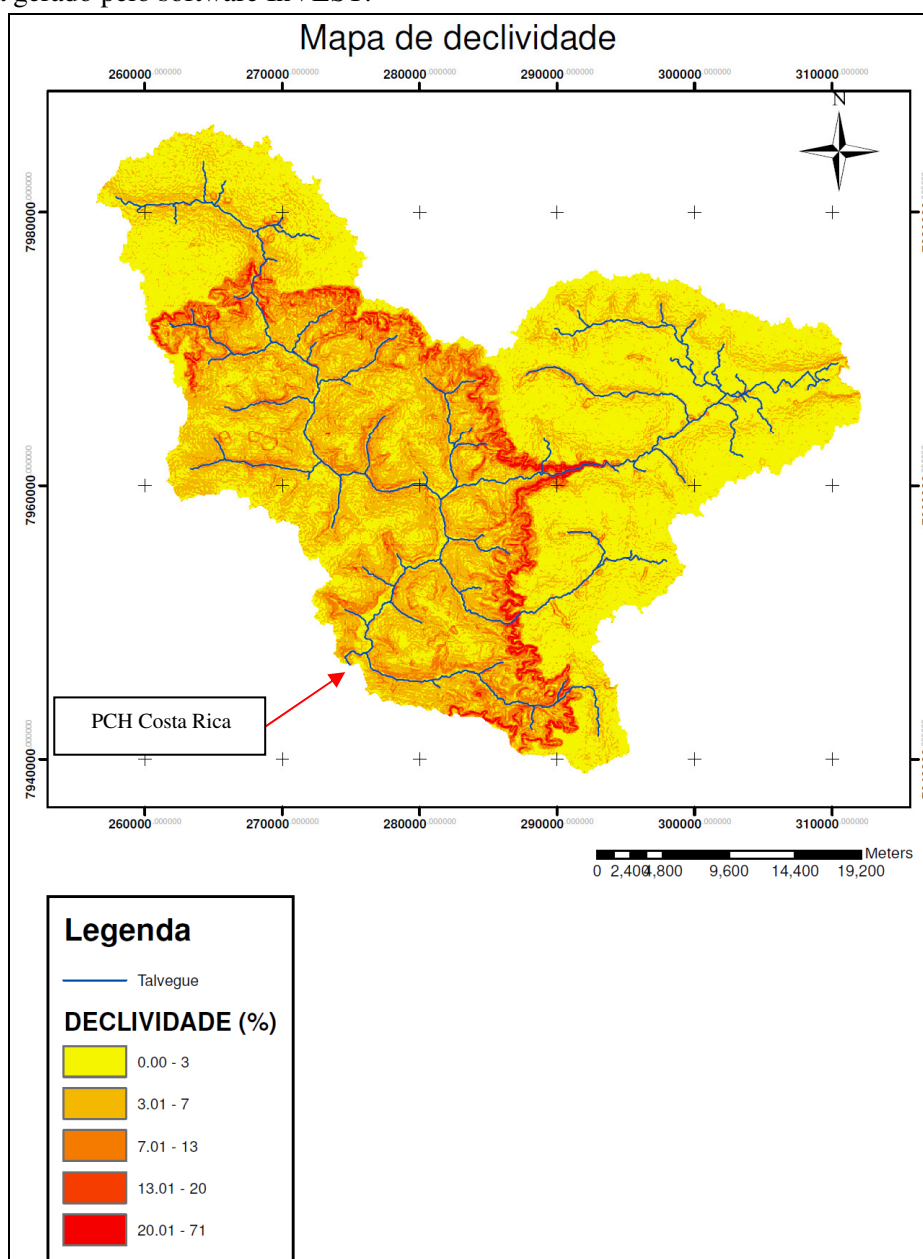


Fonte: o autor

O mapa de declividade do terreno gerado pelo InVEST facilita o processamento computacional e é utilizado para os cálculos da equação universal de perda de solo (Figura 29). Neste mapa foi observado que as áreas de maior declividade corresponderam àquelas do cinturão de susceptibilidade à erosão, bem como, à porção a sua jusante, sendo estas propensas à maior velocidade de escoamento superficial e, conseqüentemente, ao aumento da energia de carregamento de sedimentos para o canal de adução da PCH Costa Rica. Na região extrema da cabeceira da bacia, o terreno apresenta conformação plana com baixa declividade média (< 3%) e altitude entre 790 a 850 metros. A região entre a cabeceira e a

média bacia apresenta elevada declividade média, entre 20 e 71% que, de acordo com Santos et al. (2005), são áreas de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas e presença de desnivelamentos relativamente grandes e declives de forte a muito forte. Na região a jusante do cinturão das áreas susceptíveis à erosão, próximo ao canal de adução da PCH Costa Rica, a superfície apresenta altitude entre 550 a 700 metros e declividade média entre 3,01 e 7%, que segundo Santos et al. (2005) são regiões de topografia suave ondulada e pouco movimentada, com declives suaves.

Figura 29 – Mapa raster de declividade do terreno para a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica gerado pelo software InVEST.

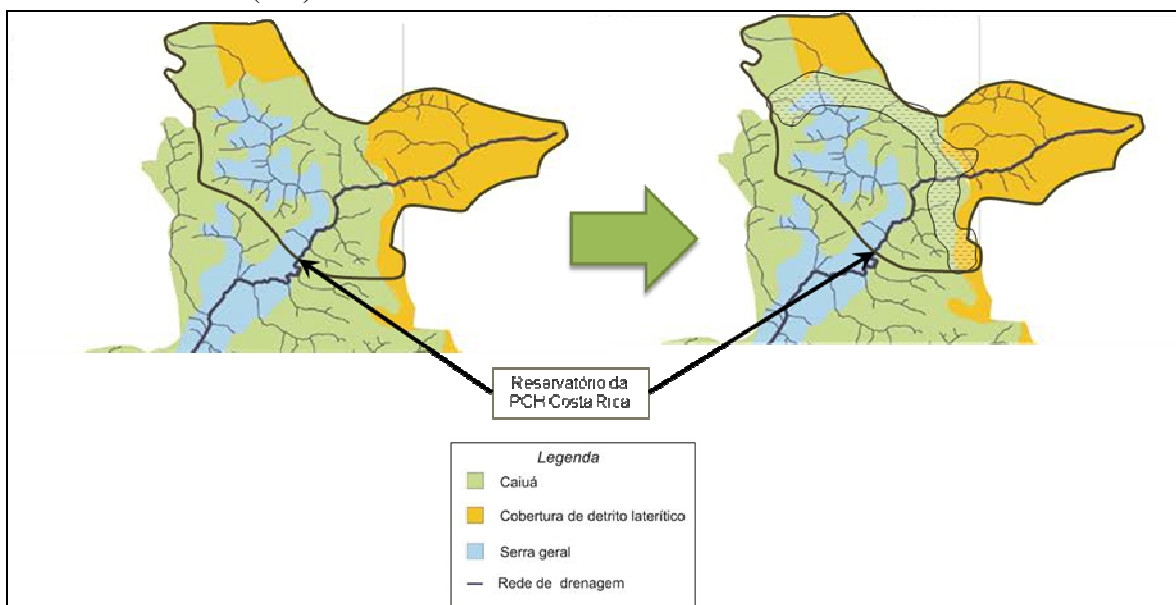


Fonte: o autor

As análises da declividade, da erodibilidade dos solos e da elevação do terreno da área de estudo indicam que o cinturão de áreas susceptíveis à erosão corresponde a uma quebra na estrutura geomorfológica que condiciona a formação de patamares desnivelados nos quais ocorrem classes de solo de elevada erodibilidade, como o Neossolo Quartzarênicos e o Latossolo Vermelho Distrófico.

A Figura 30 apresenta, pelo mapa modificado de Ferreira (2011), as estruturas geomorfológicas presentes na bacia à montante da PCH Costa Rica e a localização do cinturão de processos erosivos coincidindo com a quebra de estrutura geomorfológica. Esta quebra é representada pela transição de patamares elevados de cobertura de detritos lateríticos para patamares inferiores dos arenitos suprabasálticos da formação Caiuá (JABUR; SANTOS, 1984) e mais próximo do canal de adução da PCH Costa Rica, o basalto da formação Serra Geral (REIS et al. 2014).

Figura 30 – Localização do cinturão de processos erosivos no mapa geológico da bacia hidrográfica do Alto Rio Sucuriú (MS).



Fonte: modificado de Ferreira (2011)

5.3.4 Elaboração da tabela biofísica correspondente às classes de uso e ocupação de solo

A tabela biofísica corresponde a atributos referentes a práticas conservacionistas e de manejo, relativa às classes de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Alto rio Sucuriú à montante da PCH Costa Rica (Tabela 18).

Tabela 18 - Valores estabelecidos para a tabela biofísica de cada classe de uso e ocupação do solo, considerando as práticas conservacionistas e de manejo do solo.

Classe de uso do solo (2011)	lucode	Fator C (Usle_c)	Fator P (Usle_p)
FOEB – Floresta sempre verde	1	0,124 ^{**}	0,2 ^{***}
SAVA - Cerrado	2	0,213 ^{**}	0,2 ^{***}
GRASS – Campos naturais/Pastagem	3	0,01 [*]	0,5 ^{***}
CRDY- Culturas em geral, não irrigadas.	4	0,200 ^{****}	0,5 ^{***}

Fonte: ^{*}Oliveira et al. (2009); ^{**}(GALDINO et al., 2003); ^{***}Bertoni; Lombardi Neto (2014); ^{****} Brito et al. (1998).

Em trabalho de campo, na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, observou-se que o único tipo de prática conservacionista aplicado nas áreas agrícolas é o terraceamento, que consiste no plantio em curvas de nível.

5.3.5 Valores da descarga sólida total - software InVEST

Como pode ser observado na Tabela 19, o software InVEST apresenta a produção de sedimentos (variável SYLD) para a área total da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica em Mg ano^{-1} e para as sub-bacias a produção de sedimentos é fornecida em $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$.

Tabela 19 - Produção de sedimento, por microbacias hidrográficas a montante da PCH Costa Rica, gerados por meio do software InVEST.

Microbacias (ws_i)	Área		Produção de Sedimento	
	Área (km^2)	Área (ha)	usle_tot (Mg ano^{-1})	usle_tot ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$)
1	12.89	1289.20	13516.97	10.48
2	11.22	1122.00	10669.74	9.51
3	0.47	47.14	502.03	10.65
4	9.56	956.05	10470.43	10.95
5	7.05	704.78	5866.66	8.32
6	4.70	469.51	5257.97	11.20
7	0.27	26.61	439.30	16.51
8	0.30	29.52	408.86	13.85
9	5.52	552.33	3406.81	6.17
10	0.78	77.68	1455.04	18.73
11	2.00	199.68	1939.06	9.71
12	13.15	1315.30	14151.87	10.76
13	10.88	1087.50	17906.14	16.47
14	9.86	986.42	15851.59	16.07
15	15.44	1543.80	20730.31	13.43
16	9.85	985.22	6856.99	6.96

Tabela 19 - Produção de sedimento, por microbacias hidrográficas a montante da PCH Costa Rica, gerados por meio do software InVEST. Continuação.

Microbacias (ws_i)	Área		Produção de Sedimento	
	Área (km ²)	Área (ha)	usle_tot (Mg ano ⁻¹)	usle_tot (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
17	7.54	753.97	6115.97	8.11
18	7.93	793.07	8525.60	10.75
19	4.66	465.66	3092.06	6.64
20	6.57	657.47	15312.63	23.29
21	9.99	999.25	41168.27	41.20
22	9.80	980.00	38513.42	39.30
23	4.30	430.33	3668.97	8.53
24	6.83	682.88	18079.32	26.48
25	7.81	781.43	4499.63	5.76
26	10.48	1048.40	5982.05	5.71
27	5.67	566.53	11301.58	19.95
28	4.92	492.35	18188.69	36.94
29	15.15	1514.50	49136.65	32.44
30	11.94	1193.80	29007.61	24.30
31	8.29	828.92	3825.70	4.62
32	2.75	274.54	390.21	1.42
33	3.26	325.78	23766.23	72.95
34	4.86	485.51	589.11	1.21
35	1.70	170.08	2472.69	14.54
36	9.30	929.70	38319.95	41.22
37	6.67	666.79	17761.64	26.64
38	5.55	554.89	37891.53	68.29
39	18.33	1833.00	9545.86	5.21
40	3.22	322.19	102.88	0.32
41	13.10	1309.50	6847.36	5.23
42	2.55	255.37	2692.77	10.54
43	8.73	872.98	943.10	1.08
44	6.76	676.03	12500.32	18.49
45	9.03	902.58	3482.00	3.86
46	4.65	464.72	2340.34	5.04
47	3.90	389.60	5790.64	14.86
48	5.54	554.04	347.58	0.63
49	0.07	7.36	2.22	0.30
50	5.02	502.02	9293.07	18.51
51	28.49	2848.60	121862.40	42.78
52	8.41	841.15	4963.40	5.90
53	10.95	1095.20	27120.37	24.76
54	0.60	60.49	17.52	0.29
55	7.28	728.31	3059.03	4.20
56	2.17	216.96	3967.32	18.29
57	0.58	57.75	14.11	0.24

Tabela 19 - Produção de sedimento, por microbacias hidrográficas a montante da PCH Costa Rica, gerados por meio do software InVEST. Continuação.

Microbacias (ws_i)	Área		Produção de Sedimento	
	Área (km ²)	Área (ha)	usle_tot (Mg ano ⁻¹)	usle_tot (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
58	0.05	5.30	3.07	0.58
59	16.38	1637.80	116734.07	71.27
60	0.03	3.42	3.65	1.07
61	7.28	728.05	334.86	0.46
62	0.56	56.38	14.92	0.26
63	9.86	986.08	41871.31	42.46
64	1.89	188.56	65.50	0.35
65	5.92	591.77	5618.43	9.49
66	5.85	584.92	1711.73	2.93
67	4.94	493.64	5474.91	11.09
68	44.09	4409.40	13560.89	3.08
69	4.62	461.98	2387.03	5.17
70	6.02	602.20	3610.50	6.00
71	25.59	2559.50	54716.67	21.38
72	8.69	869.04	3542.90	4.08
73	7.04	703.67	24486.06	34.80
74	7.09	708.89	1493.62	2.11
75	0.08	8.04	53.04	6.60
76	14.15	1415.10	7318.90	5.17
77	14.19	1418.70	51218.33	36.10
78	7.72	771.68	19044.54	24.68
79	12.40	1239.70	3254.31	2.63
80	18.73	1872.70	36665.50	19.58
81	7.83	783.40	37984.70	48.49
82	4.81	480.97	3169.50	6.59
83	0.57	56.81	1063.84	18.73
84	12.61	1261.40	7549.56	5.99
85	16.72	1671.90	9730.10	5.82
86	19.13	1913.20	33214.77	17.36
87	3.94	394.48	246.70	0.63
88	4.07	406.63	280.43	0.69
89	1.32	131.75	1378.76	10.46
90	6.98	698.19	18868.59	27.03
91	11.65	1165.10	5070.75	4.35
92	6.02	601.95	13521.67	22.46
93	5.01	501.17	5602.24	11.18
94	2.70	270.17	2604.62	9.64
95	4.31	431.27	7549.88	17.51
96	10.76	1075.90	15842.77	14.73
97	20.00	1999.80	23053.84	11.53
98	11.85	1184.70	33715.15	28.46

Tabela 19 - Produção de sedimento, por microbacias hidrográficas a montante da PCH Costa Rica, gerados por meio do software InVEST. Continuação.

Microbacias (ws_i)	Área		Produção de Sedimento	
	Área (km ²)	Área (ha)	usle_tot (Mg ano ⁻¹)	usle_tot (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
99	10.46	1046.10	4245.00	4.06
100	6.97	697.42	3738.38	5.36
101	2.57	257.00	3663.24	14.25
102	12.88	1287.70	8747.89	6.79
103	3.01	300.55	4855.17	16.15
104	10.41	1041.30	1837.58	1.76
105	24.96	2495.70	123423.39	49.45
106	16.02	1601.90	41465.88	25.89
107	8.70	870.15	8519.19	9.79
108	9.82	981.54	19917.63	20.29
109	6.17	616.75	19404.89	31.46
110	4.28	427.76	1758.54	4.11
111	6.09	608.53	3689.70	6.06
112	3.19	319.28	3880.65	12.15
113	13.10	1310.10	6618.08	5.05
114	19.67	1966.70	29496.96	15.00
115	3.67	367.45	7283.10	19.82
116	2.46	245.71	78.89	0.32
117	9.37	936.71	24780.24	26.45
118	11.32	1131.90	25354.75	22.40
119	2.17	216.79	4307.36	19.87
120	16.96	1696.20	86586.35	51.05
121	5.26	526.06	10901.22	20.72
122	5.62	561.65	1530.39	2.72
123	2.97	297.38	4893.16	16.45
124	8.19	819.33	54636.15	66.68
125	6.72	672.10	6340.99	9.43
126	18.76	1876.20	3631.66	1.94
127	8.63	863.31	19794.78	22.93
128	14.67	1466.60	3764.65	2.57
129	10.29	1028.60	24969.30	24.28
130	6.63	662.69	14705.73	22.19
131	6.10	610.24	2398.24	3.93
132	9.30	930.30	26909.30	28.93
133	4.42	441.88	29705.51	67.23
134	4.33	432.89	1632.71	3.77
135	13.32	1332.00	30634.25	23.00
136	9.03	903.09	61321.24	67.90
137	8.78	878.11	21142.10	24.08
138	3.39	339.39	5863.25	17.28
139	9.47	947.06	48596.31	51.31

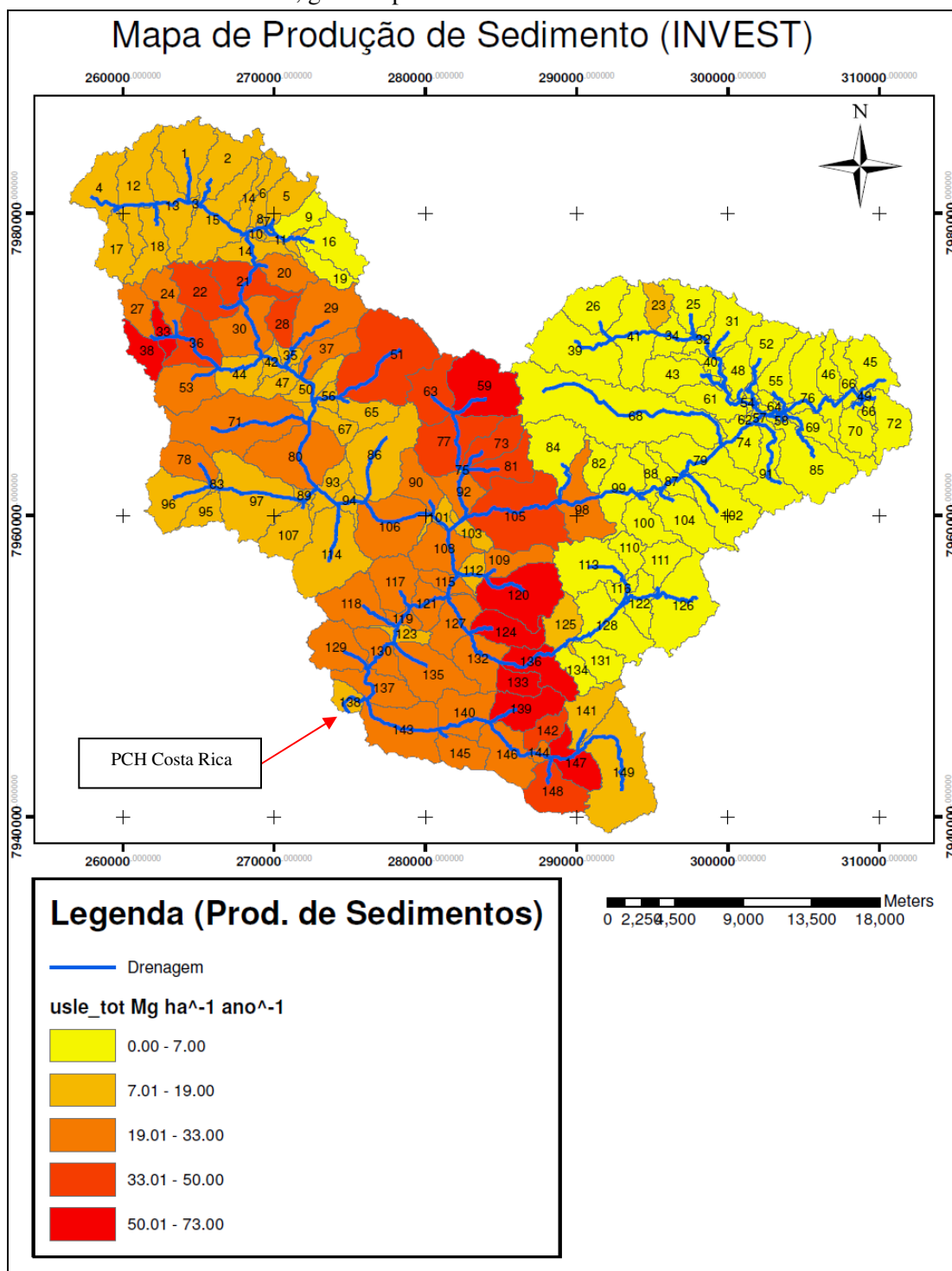
Tabela 19 - Produção de sedimento, por microbacias hidrográficas a montante da PCH Costa Rica, gerados por meio do software InVEST. Continuação.

Microbacias (ws_i)	Área		Produção de Sedimento	
	Área (km ²)	Área (ha)	usle_tot (Mg ano ⁻¹)	usle_tot (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
140	9.65	965.11	23555.35	24.41
141	8.52	852.10	14572.03	17.10
142	4.40	440.34	21832.26	49.58
143	16.10	1610.10	35577.24	22.10
144	1.42	142.36	4235.08	29.75
145	6.30	629.66	18119.60	28.78
146	10.72	1072.20	27435.97	25.59
147	7.93	793.07	42256.08	53.28
148	10.04	1003.70	39055.43	38.91
149	26.45	2644.70	23126.08	8.74

Fonte: o autor

A Figura 31 apresenta de forma espacializada os valores gerados pelo software InVEST, para a produção de sedimentos (Mg ha⁻¹ ano⁻¹) na análise da variável “usle_tot” das sub-bacias da bacia contribuinte da PCH Costa Rica.

Figura 31 – Mapa da produção de sedimentos em Mg ha⁻¹ ano⁻¹, nas sub-bacias que compõem a bacia contribuinte da PCH Costa Rica, geradas pelo software INVEST.

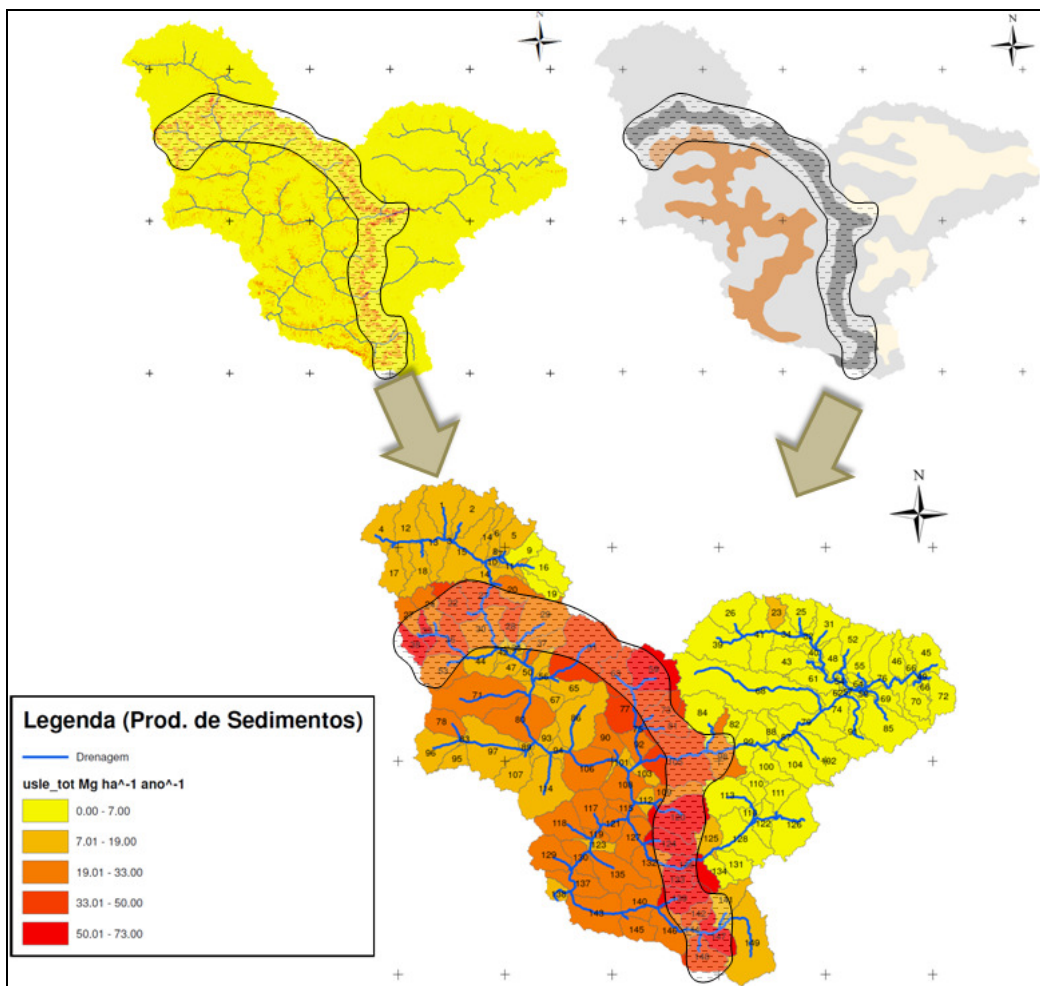


Fonte: o autor

As bacias hidrográficas com maior produção de sedimentos estão localizadas na região média da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, o que condiz com a análise prévia dos dados intermediários realizados pelo software INVEST, em que se

verificaram as áreas de maior suscetibilidade à erosão pela análise do fator topográfico (LS) e de erodibilidade dos solos (K) da bacia (Figura 32).

Figura 32 – Áreas susceptíveis aos processos erosivos considerando o fator topográfico (LS) e a erodibilidade dos solos (Fator K) e a modelagem da produção anual de sedimentos na bacia contribuinte da PCH Costa Rica.



Fonte: o autor

Na Tabela 20 são apresentadas as classes de “expectativa de perda de solo, conforme Silva et al. (2007)”, modificada de Carvalho (1994).

Tabela 20 - Classe de interpretação para expectativa de perda de solo.

Perdas de solo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)	Expectativa de perda
<10	Nula a pequena
10-15	Moderada
15-50	Média
50-120	Média a forte
120-200	Forte
>200	Muito forte

Fonte: Carvalho (1994) e modificada por Silva et al. (2007)

De acordo com a Tabela 20, a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica apresenta 40,11% da área, predominantemente na região de cabeceira, com expectativa de perda de solo nula a pequena, 11,25% moderada e 48,64% média e média a forte.

5.4 MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS - SWAT e InVEST

Catelani (2015) utilizou o software SWAT para modelar a produção de sedimentos das 149 microbacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica. Estes dados foram confrontados com os gerados pela modelagem empregando o software InVEST (Tabela 21) nas microbacias como um todo.

Tabela 21 - Modelagem da perda de solo das 149 microbacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS) pelos softwares SWAT e InVEST.

Microbacias	Área (km ²)	Área (ha)	SWAT	InVEST	Diferença entre InVEST e SWAT
			SYLD (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	usle_tot (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
1	12.89	1289.20	3.14	10.48	7.34
2	11.22	1122.00	2.38	9.51	7.13
3	0.47	47.14	7.45	10.65	3.20
4	9.56	956.05	3.32	10.95	7.63
5	7.05	704.78	3.56	8.32	4.76
6	4.70	469.51	2.03	11.20	9.17
7	0.27	26.61	13.76	16.51	2.75
8	0.30	29.52	13.34	13.85	0.51
9	5.52	552.33	2.75	6.17	3.41
10	0.78	77.68	6.59	18.73	12.14
11	2.00	199.68	2.79	9.71	6.92
12	13.15	1315.30	3.18	10.76	7.58
13	10.88	1087.50	4.05	16.47	12.41
14	9.86	986.42	5.54	16.07	10.53
15	15.44	1543.80	4.65	13.43	8.78
16	9.85	985.22	1.36	6.96	5.60
17	7.54	753.97	2.02	8.11	6.09
18	7.93	793.07	2.07	10.75	8.68
19	4.66	465.66	1.22	6.64	5.42
20	6.57	657.47	4.49	23.29	18.80
21	9.99	999.25	17.06	41.20	24.14
22	9.80	980.00	10.95	39.30	28.35
23	4.30	430.33	2.35	8.53	6.17
24	6.83	682.88	7.50	26.48	18.97

Tabela 21 - Modelagem da perda de solo das 149 microbacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS) pelos softwares SWAT e InVEST. Continuação.

Microbacias	Área (km ²)	Área (ha)	SWAT	InVEST	Diferença entre InVEST e SWAT
			SYLD (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	usle_tot (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
25	7.81	781.43	2.46	5.76	3.29
26	10.48	1048.40	3.49	5.71	2.22
27	5.67	566.53	6.10	19.95	13.85
28	4.92	492.35	25.08	36.94	11.87
29	15.15	1514.50	29.60	32.44	2.85
30	11.94	1193.80	18.32	24.30	5.97
31	8.29	828.92	2.83	4.62	1.78
32	2.75	274.54	2.54	1.42	-1.12
33	3.26	325.78	16.40	72.95	56.55
34	4.86	485.51	2.56	1.21	-1.35
35	1.70	170.08	7.29	14.54	7.25
36	9.30	929.70	16.90	41.22	24.32
37	6.67	666.79	25.49	26.64	1.15
38	5.55	554.89	15.42	68.29	52.87
39	18.33	1833.00	3.40	5.21	1.81
40	3.22	322.19	1.39	0.32	-1.07
41	13.10	1309.50	2.27	5.23	2.96
42	2.55	255.37	8.78	10.54	1.77
43	8.73	872.98	3.17	1.08	-2.09
44	6.76	676.03	10.61	18.49	7.88
45	9.03	902.58	3.11	3.86	0.75
46	4.65	464.72	2.54	5.04	2.50
47	3.90	389.60	9.96	14.86	4.90
48	5.54	554.04	1.99	0.63	-1.37
49	0.07	7.36	0.50	0.30	-0.20
50	5.02	502.02	8.84	18.51	9.67
51	28.49	2848.60	19.19	42.78	23.59
52	8.41	841.15	1.82	5.90	4.08
53	10.95	1095.20	12.88	24.76	11.89
54	0.60	60.49	0.98	0.29	-0.70
55	7.28	728.31	1.74	4.20	2.46
56	2.17	216.96	5.91	18.29	12.37
57	0.58	57.75	0.92	0.24	-0.68
58	0.05	5.30	0.53	0.58	0.05
59	16.38	1637.80	16.40	71.27	54.88
60	0.03	3.42	0.29	1.07	0.77
61	7.28	728.05	1.52	0.46	-1.06
62	0.56	56.38	1.13	0.26	-0.86

Tabela 21 - Modelagem da perda de solo das 149 microbacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS) pelos softwares SWAT e InVEST. Continuação.

Microbacias	Área (km ²)	Área (ha)	SWAT	InVEST	Diferença entre InVEST e SWAT
			SYLD (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	usle_tot (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
63	9.86	986.08	14.54	42.46	27.92
64	1.89	188.56	1.08	0.35	-0.73
65	5.92	591.77	7.36	9.49	2.13
66	5.85	584.92	2.57	2.93	0.36
67	4.94	493.64	7.56	11.09	3.53
68	44.09	4409.40	3.00	3.08	0.07
69	4.62	461.98	1.59	5.17	3.57
70	6.02	602.20	2.34	6.00	3.66
71	25.59	2559.50	8.40	21.38	12.97
72	8.69	869.04	2.22	4.08	1.86
73	7.04	703.67	15.24	34.80	19.56
74	7.09	708.89	2.40	2.11	-0.30
75	0.08	8.04	2.47	6.60	4.13
76	14.15	1415.10	1.48	5.17	3.70
77	14.19	1418.70	10.49	36.10	25.61
78	7.72	771.68	7.30	24.68	17.38
79	12.40	1239.70	2.77	2.63	-0.15
80	18.73	1872.70	9.26	19.58	10.32
81	7.83	783.40	21.35	48.49	27.13
82	4.81	480.97	3.53	6.59	3.06
83	0.57	56.81	7.15	18.73	11.57
84	12.61	1261.40	4.25	5.99	1.73
85	16.72	1671.90	1.37	5.82	4.45
86	19.13	1913.20	10.91	17.36	6.45
87	3.94	394.48	2.44	0.63	-1.81
88	4.07	406.63	3.25	0.69	-2.56
89	1.32	131.75	3.81	10.46	6.66
90	6.98	698.19	6.82	27.03	20.20
91	11.65	1165.10	1.05	4.35	3.30
92	6.02	601.95	7.99	22.46	14.47
93	5.01	501.17	8.35	11.18	2.83
94	2.70	270.17	9.57	9.64	0.07
95	4.31	431.27	5.30	17.51	12.21
96	10.76	1075.90	7.16	14.73	7.56
97	20.00	1999.80	10.65	11.53	0.88
98	11.85	1184.70	21.29	28.46	7.17
99	10.46	1046.10	9.93	4.06	-5.87
100	6.97	697.42	2.51	5.36	2.85

Tabela 21 - Modelagem da perda de solo das 149 microbacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS) pelos softwares SWAT e InVEST. Continuação.

Microbacias	Área (km ²)	Área (ha)	SWAT	InVEST	Diferença entre InVEST e SWAT
			SYLD (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	usle_tot (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
101	2.57	257.00	3.89	14.25	10.36
102	12.88	1287.70	1.70	6.79	5.10
103	3.01	300.55	4.71	16.15	11.45
104	10.41	1041.30	3.08	1.76	-1.32
105	24.96	2495.70	19.03	49.45	30.42
106	16.02	1601.90	8.97	25.89	16.92
107	8.70	870.15	6.05	9.79	3.74
108	9.82	981.54	8.14	20.29	12.15
109	6.17	616.75	19.31	31.46	12.15
110	4.28	427.76	1.99	4.11	2.12
111	6.09	608.53	1.92	6.06	4.15
112	3.19	319.28	9.66	12.15	2.49
113	13.10	1310.10	4.01	5.05	1.04
114	19.67	1966.70	7.61	15.00	7.39
115	3.67	367.45	6.31	19.82	13.51
116	2.46	245.71	1.93	0.32	-1.61
117	9.37	936.71	8.89	26.45	17.56
118	11.32	1131.90	7.50	22.40	14.90
119	2.17	216.79	9.24	19.87	10.63
120	16.96	1696.20	21.25	51.05	29.80
121	5.26	526.06	9.32	20.72	11.40
122	5.62	561.65	1.98	2.72	0.75
123	2.97	297.38	10.35	16.45	6.11
124	8.19	819.33	19.23	66.68	47.45
125	6.72	672.10	3.31	9.43	6.13
126	18.76	1876.20	2.45	1.94	-0.52
127	8.63	863.31	9.20	22.93	13.73
128	14.67	1466.60	3.05	2.57	-0.48
129	10.29	1028.60	9.27	24.28	15.01
130	6.63	662.69	7.35	22.19	14.84
131	6.10	610.24	4.45	3.93	-0.52
132	9.30	930.30	7.59	28.93	21.33
133	4.42	441.88	23.73	67.23	43.50
134	4.33	432.89	3.37	3.77	0.40
135	13.32	1332.00	8.24	23.00	14.75
136	9.03	903.09	13.79	67.90	54.11
137	8.78	878.11	8.00	24.08	16.08
138	3.39	339.39	8.39	17.28	8.88
139	9.47	947.06	19.58	51.31	31.73

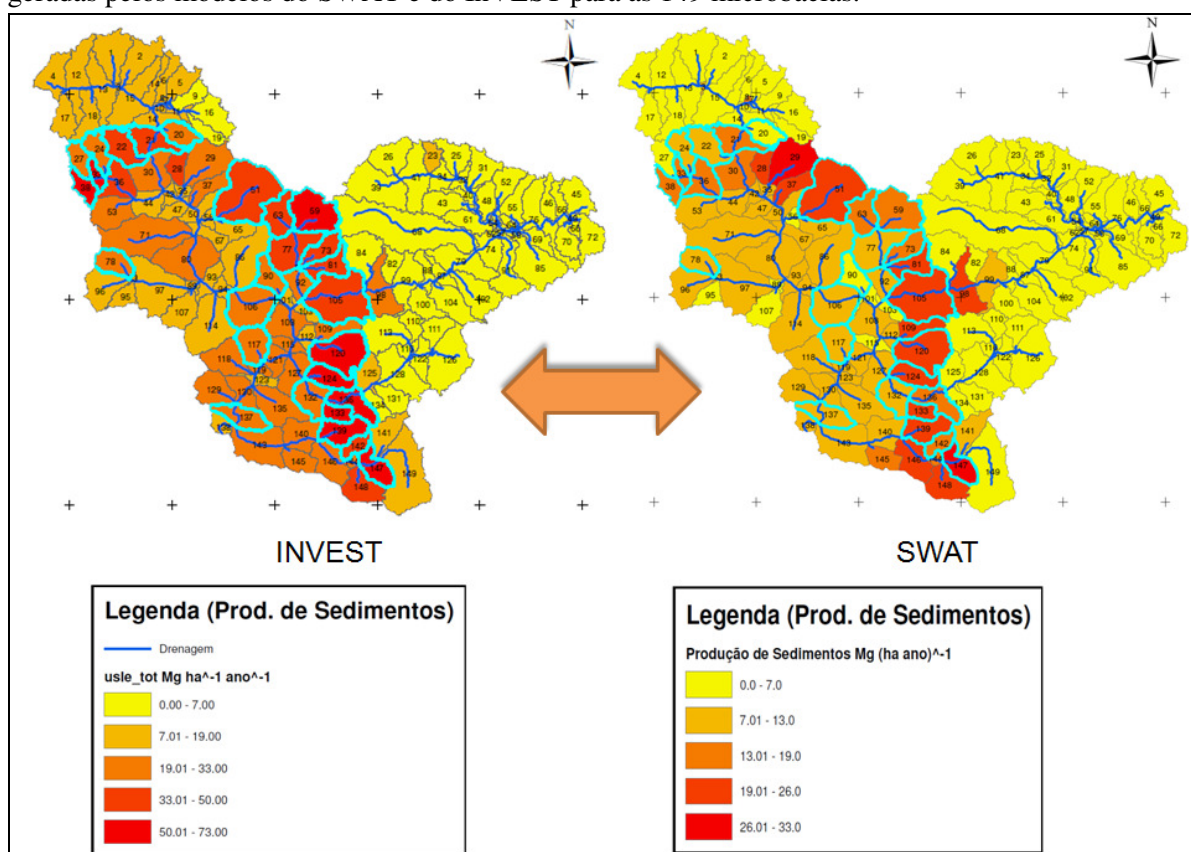
Tabela 21 - Modelagem da perda de solo das 149 microbacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS) pelos softwares SWAT e InVEST. Continuação.

Microbacias	Área (km ²)	Área (ha)	SWAT	InVEST	Diferença entre InVEST e SWAT
			SYLD (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	usle_tot (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
140	9.65	965.11	11.35	24.41	13.06
141	8.52	852.10	9.25	17.10	7.85
142	4.40	440.34	18.97	49.58	30.61
143	16.10	1610.10	10.21	22.10	11.89
144	1.42	142.36	15.81	29.75	13.94
145	6.30	629.66	14.42	28.78	14.35
146	10.72	1072.20	22.27	25.59	3.32
147	7.93	793.07	32.07	53.28	21.21
148	10.04	1003.70	24.63	38.91	14.28
149	26.45	2644.70	4.42	8.74	4.32
TOTAL MÉDIO	1244,37	124437,20	8,54	19,23	

Fonte: o autor

Nessa comparação, verificou-se que a modelagem da perda de solo média na bacia contribuinte da PCH Costa Rica pelo software InVEST foi de 19,23 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (2392353,10 Mg ano⁻¹), cerca de 2,2 vezes superior a perda de solo média estimada pelo software SWAT, de 8,54 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (1062402,15 Mg ano⁻¹). Na Figura 33 estão destacadas as microbacias que apresentaram diferença nas perdas de solo superiores a 15 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ quando comparados os modelos do InVEST e do SWAT.

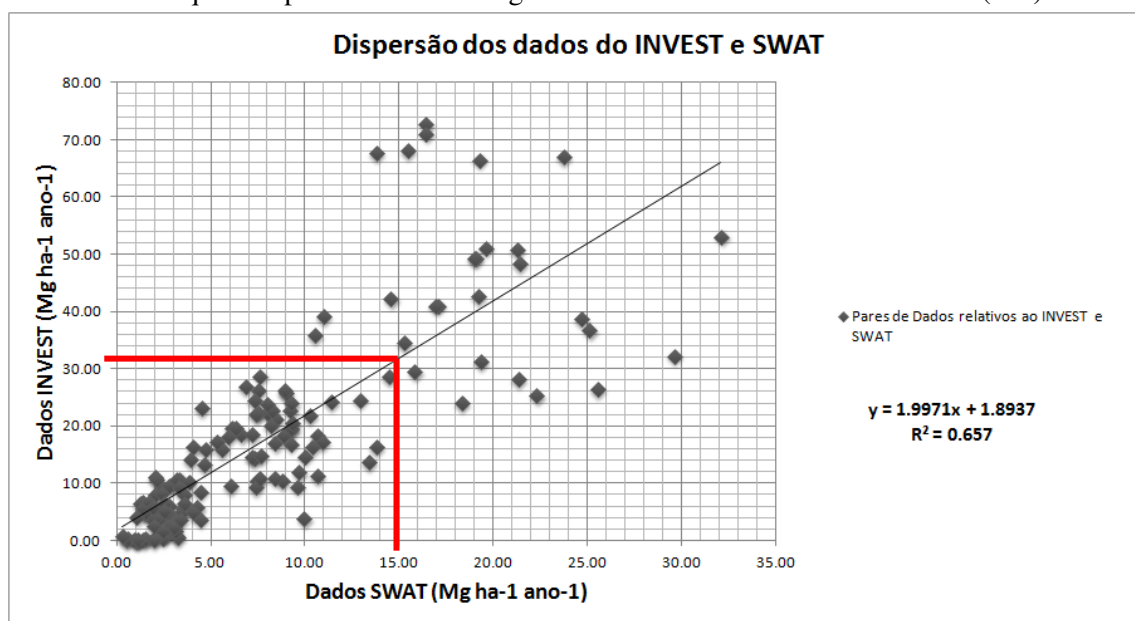
Figura 33 – Microbacias com diferenças superiores a $15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nas taxas de perda de solo geradas pelos modelos do SWAT e do InVEST para as 149 microbacias.



Fonte: o autor

Ao analisar a dispersão dos dados de perda de solo nas microbacias como um todo nos dois modelos, verificou-se que, com o aumento da perda de solo os valores tornaram-se mais afastados da linha de tendência (Figura 34). Esse afastamento da linha de tendência para perdas de solo das microbacias reflete o fato de que quanto maior a perda menor será a correlação dos dados modelados pelos softwares.

Figura 34 – Dispersão dos dados de perda de solo obtidos pelos softwares SWAT e InVEST para as 149 microbacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS).

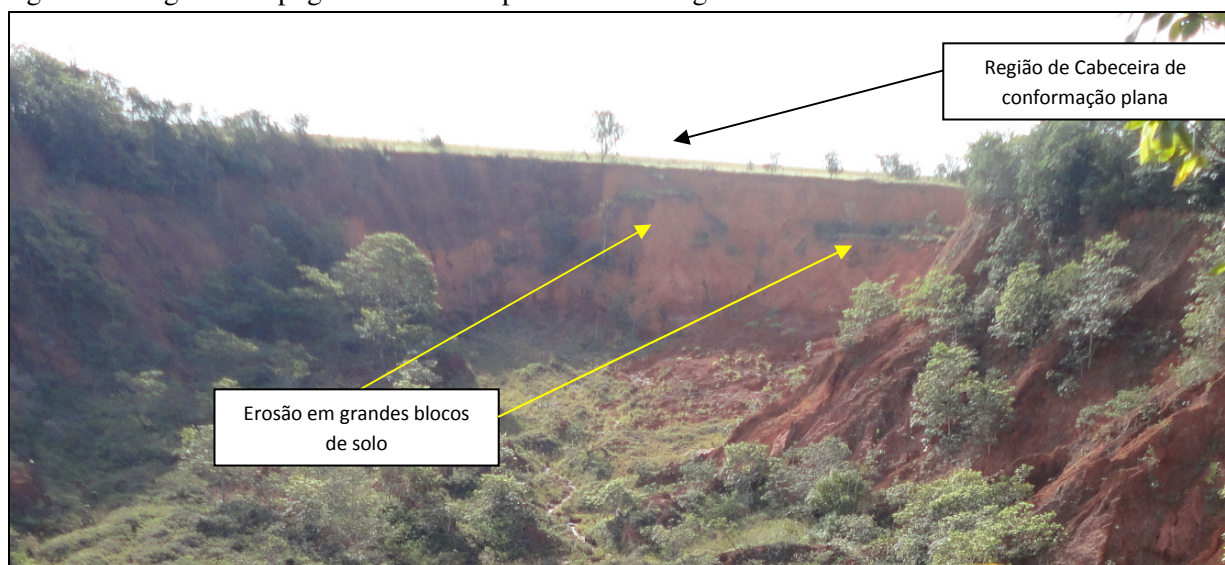


Fonte: o autor

O coeficiente de correlação de Pearson (R) de 0,81 indicou uma elevada correlação entre os dados obtidos pelos softwares InVEST e SWAT para a modelagem da perda de solo referente a cada uma das 149 microbacias.

As limitações das equações USLE e MUSLE, empregadas na modelagem da perda de solo nos programas InVEST e SWAT, respectivamente, restringem a aplicação a processos de erosão laminar e em sulcos (PRUSKI, 2009). Esta afirmação corrobora com as diferenças na predição de perda de solo pelos dois softwares nas 149 microbacias que compõem a bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS), onde são evidenciados processos erosivos acelerados, com a ocorrência de voçorocas e desprendimento de grandes blocos de solos na região do cinturão de quebra geomorfológica da topografia (Figura 35).

Figura 35 – Voçoroca a montante da PCH Costa Rica, inserida no cinturão de quebra geomorfológica da topografia com o desprendimento de grandes blocos de solo.



Fonte: o autor

5.5 APORTE DE SEDIMENTOS - EINSTEIN MODIFICADO x SWAT x InVEST

A produção de sedimentos (Mg ano^{-1}) estimada pelo método de Einstein modificado e pelos softwares InVEST e SWAT no exutório das 16 bacias hidrográficas amostradas nas campanhas hidrossedimentológicas estão apresentadas na Tabela 22. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que os softwares InVEST e SWAT superestimaram as perdas de solo nos exutórios das bacias, quando comparados com os valores obtidos pelo método de Einstein modificado. Esses resultados podem ser justificados, uma vez que para a modelagem da perda de solo pelos softwares, foi considerada a pluviosidade média de uma série histórica de 30 anos. Por outro lado, a perda de solo estimada pelo método de Einstein modificado, considerou a pluviosidade ocorrida na bacia contribuinte da PCH Costa Rica, no dia anterior à amostragem. Esse resultado comprova a necessidade de ampliar as campanhas dos levantamentos hidrossedimentológicos para a obtenção de uma série histórica consistente a ser utilizada nos cálculos da perda de solo pelo método de Einstein modificado.

Tabela 22 - Produção de sedimentos estimada pelo método de Einstein modificado e pelos softwares InVEST e SWAT, no exutório das 16 sub-bacias que compõem a bacia contribuinte da PCH Costa Rica amostradas nas 4 campanhas hidrossedimentológicas.

PONTO	Sedimento (Einstein modificado)	sed_export (InVEST) Mg ano ⁻¹	SED_OUTtons (SWAT)
1	1014.15	-	-
2	50051.99	12675.92	158762.97
3	38263.59	100674.20	1049521.72
4	66843.09	100537.15	1049521.72
5	4636.32	11317.05	77835.58
6	175.29	4462.25	51039.94
7	19795.78	10881.33	88360.35
8	155.13	500.42	10835.88
9	180.13	1555.35	26914.76
10	2190.55	22885.37	242828.74
11	317.82	1338.18	20880.54
12	100.10	1073.71	14961.87
13	1673.89	2738.12	43071.07
14	63.05	2378.23	21423.01
15	493.30	5943.22	60272.55
16	8745.67	21802.02	219412.43
Correlação de Pearson			R
Método Einstein e InVEST			0.78
Método Einstein e SWAT			0.79
InVEST e SWAT			0.99
Ponto 3 – Próximo ao canal de adução da PCH Costa Rica – destacado na coloração azul			

De acordo com Callegari-Jacques (2003), existe alta correlação entre os valores de perda de solo obtidos pelo método de Einstein modificado e os softwares SWAT e InVEST e muito alta ($R=0,99$) entre estes softwares.

O ponto 3 corresponde à quantidade de sedimentos que chega no canal de adução da PCH Costa Rica. Neste ponto, o aporte de sedimentos estimada pelo InVEST foi de 100.674,20 Mg ano⁻¹, enquanto pelo SWAT foi de 1.049.521,72 Mg ano⁻¹ de sedimentos, 10,43 vezes superior.

Os valores do aporte de sedimentos nos exutórios das 16 sub-bacias que compõem a bacia contribuinte da PCH Costa Rica, obtidos pela modelagem do software InVEST foram mais próximos dos estimados pelo método de Einstein Modificado que os modelados pelo SWAT. No entanto, independente do método, as estimativas de perda de solo na bacia contribuinte da PCH Costa Rica são preocupantes e indicam um elevado potencial de perda

gradativa da eficiência energética desta hidrelétrica e das áreas agricultáveis, caso nenhuma medida de controle dos processos erosivos seja adotada nesta bacia hidrográfica.

Os possíveis erros associados à predição do aporte de sedimentos na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica por modelagem podem ser atribuídos à escassez de dados do meio físico, hidrológicos, climáticos e sedimentológicos, o que pode ser reduzido com o monitoramento contínuo e a geração de uma série histórica de dados hidrossedimentológicos, que é imprescindível para a calibração e a validação dos modelos de predição, como também foi observado por Xavier et al. (2011), Buarque et al. (2013) e Catelani (2015).

A Resolução Conjunta ANEEL/ANA nº 3, de 10 de agosto de 2010 estabelece as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas, visando o monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associados aos empreendimentos hidrelétricos e da outras providências. Esta resolução determina que a bacia hidrográfica à montante da PCH Costa Rica, cuja área de drenagem está entre 501 a 5000 km², possua 3 estações para o monitoramento de parâmetros pluviométricos, 1 de parâmetros limnimétricos, 3 de parâmetros fluviométricos e 2 de parâmetros sedimentométricos, o que não vem sendo realizado por este empreendimento.

Este estudo fez parte do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) Reabilitação de voçorocas para a contenção do assoreamento e melhoria do desempenho de reservatórios na produção de energia elétrica (Processo Fundunesp 1886/2011). Em sua concepção inicial, este projeto tinha entre seus objetivos, analisar a contribuição e propor medidas de contenção dos processos erosivos de uma voçoroca de grandes dimensões, visando à diminuição da produção de sedimentos e o assoreamento do canal de adução da PCH Costa Rica, localizada a sua jusante (

Figura 36).

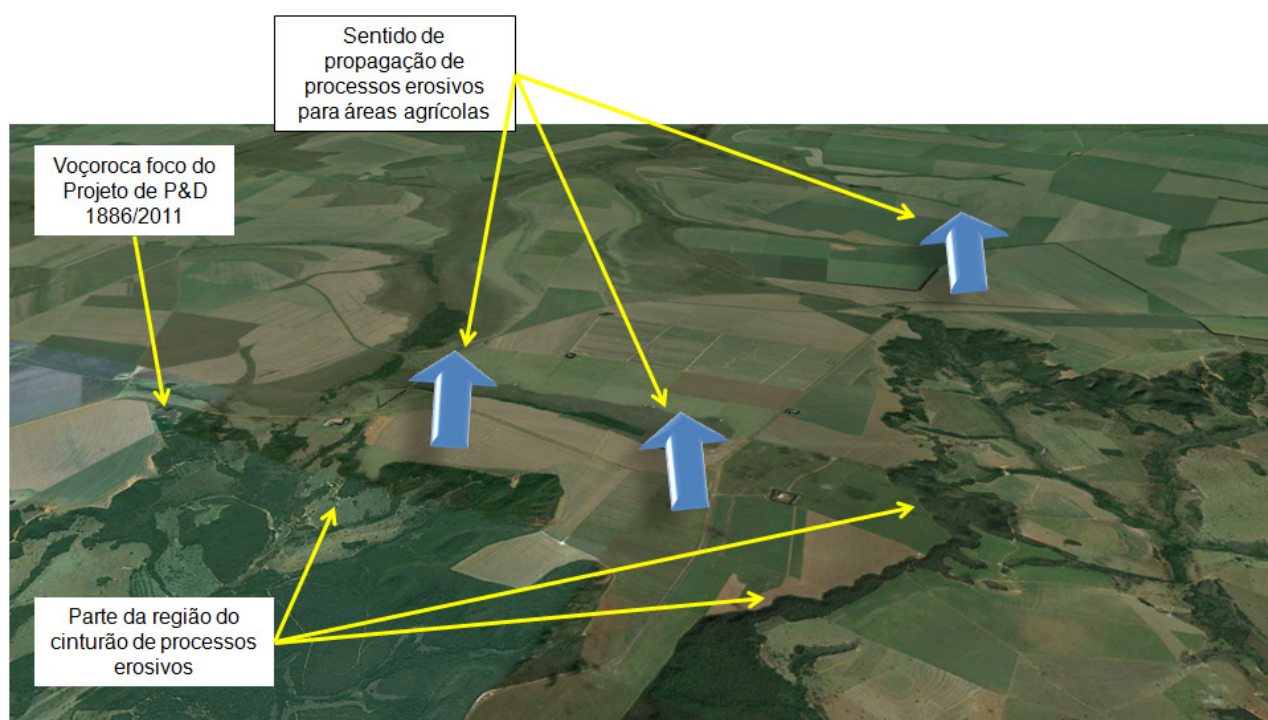
Figura 36 – Vista geral de uma voçoroca à montante da PCH Costa Rica/MS



Fonte: o autor

No entanto, a predição do aporte de sedimentos pela modelagem dos softwares SWAT e InVEST, além de proporcionar um estudo mais detalhado das características físicas, geomorfológicas e pedológicas na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, possibilitou verificar que esta voçoroca corresponde à apenas uma frente de erosão acelerada, de um cinturão de processos erosivos, identificado ao longo da região de cabeceira e da média bacia (Figura 37).

Figura 37 – Imagem de satélite com destaque para o cinturão de processos erosivos e outras frentes de erosão em direção às áreas agrícolas



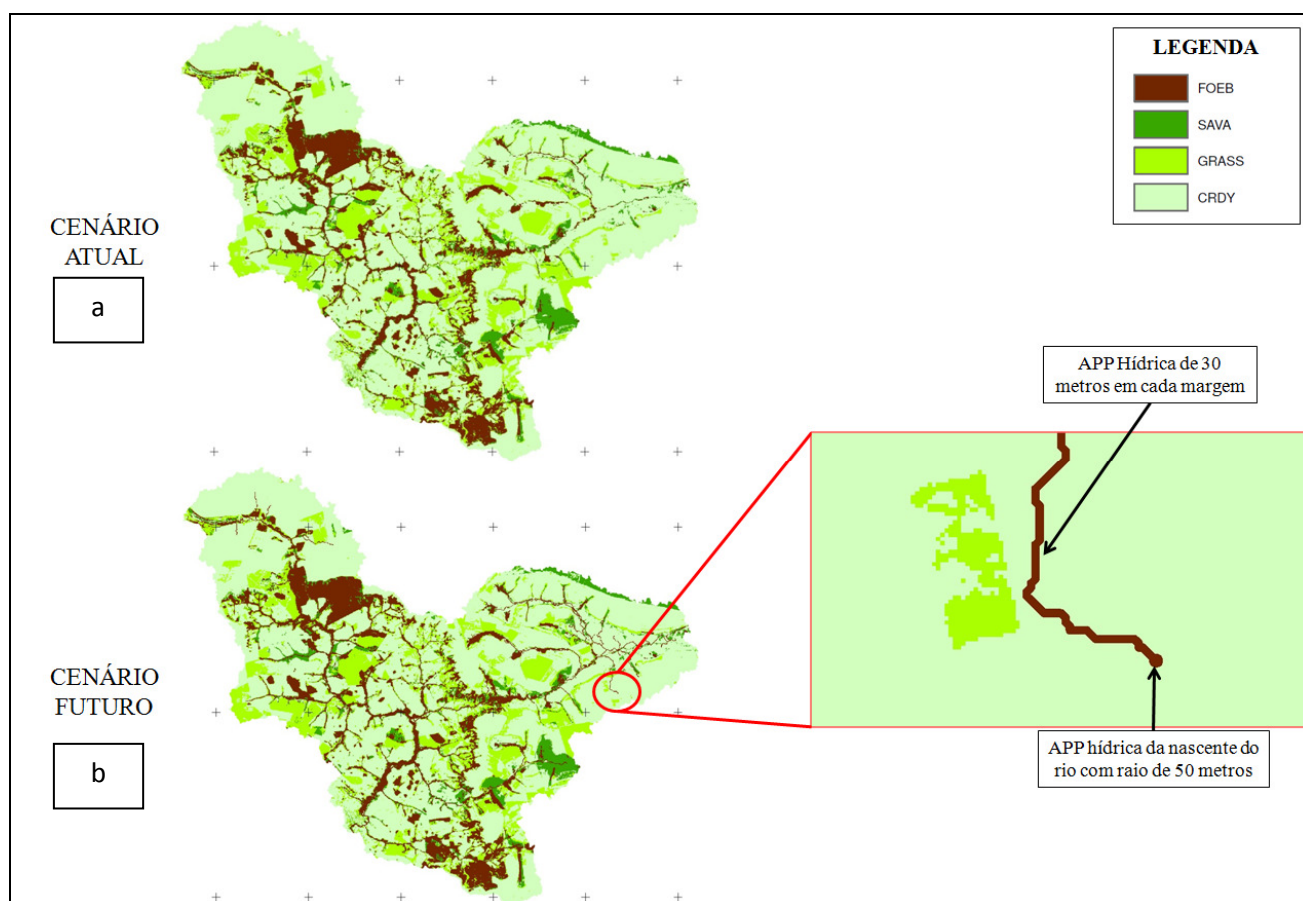
Fonte: modificado de GOOGLE EARTH (2015).

A gestão ambiental da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, visando a recomposição da cobertura vegetal das áreas degradadas por processos erosivos é importante para reduzir os impactos causados pelas atividades antrópicas desenvolvidas de forma inadequada, em especial, em áreas de preservação ambiental. Neste sentido, a adoção de práticas conservacionistas, o manejo adequado do solo e a recomposição florestal de áreas degradadas, podem minimizar o avanço dos processos erosivos em áreas de atividades agropecuárias e, conseqüentemente, a produção de sedimentos e o assoreamento dos cursos d'água da bacia contribuinte da PCH Costa Rica.

5.6 PERDA DE SOLO DA BACIA CONTRIBUINTE DA PCH COSTA RICA EM CENÁRIO FUTURO - InVEST.

Por meio do software InVEST foi gerado um mapa raster de uso e ocupação do solo da bacia contribuinte da PCH Costa Rica, comparando a situação em 2011 com um cenário futuro, adotando como prática conservacionista, a recomposição vegetal das áreas de preservação permanente (APPs) hídricas, respeitando as faixas estabelecidas pelo Novo Código Florestal Brasileiro, Lei Federal 12.651/2012 em seu artigo 4º, conforme Figura 38.

Figura 38 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS) em 2011(a) e em cenário futuro, adotando a recomposição vegetal das áreas de preservação permanente (APPs), conforme Código Florestal - Lei Federal 12.651/2012 (b).



Fonte: modificado de Catelani (2015).

As classes de uso do solo para o cenário de 2011 e para um cenário futuro com as APPs hídricas revegetadas estão expressas em área e porcentagem na Tabela 23. No cenário futuro, com a revegetação das APPs, o uso do solo por florestas sempre verdes (FOEB)

aumentou em 13,78 km² e a classe das culturas não irrigadas (CRDY) reduziu sua ocupação em 7,59 km² da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica.

Tabela 23 - Uso do solo da bacia contribuinte da PCH Costa Rica, em 2011 e em cenário futuro, com revegetação das APPs, conforme descrito na Lei Federal 12.651/2012.

Classes de uso do solo	Cenário (2011)		Cenário Futuro (APPs revegetadas)	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
FOEB – Floresta sempre verde	166,85	13,41	180,63	14,52
SAVA - Cerrado	71,47	5,74	68,39	5,50
GRAS – Campos naturais/Pastagem	220,86	17,75	217,75	17,50
CRDY – Culturas não irrigadas	785,20	63,10	777,61	62,48
Área Total	1244,38	100	1244,38	100

Fonte: o autor

A produção de sedimentos pelas microbacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, modelada pelo software InVEST para a situação de 2011 e para o cenário futuro com a recuperação das APPs é apresentada na Tabela 24.

Tabela 24 - Aporte de sedimentos pelas sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, modelada pelo software InVEST, para o uso do solo em 2011 e em cenário futuro, com a revegetação das APPs.

Sub-Bacias (ws_i)	Área (ha)	Produção de Sedimentos	
		2011 (Mg ano ⁻¹)	Cenário futuro (Mg ano ⁻¹)
1	1289.20	13516.97	13351.02
2	1122.00	10669.74	10518.27
3	47.14	502.03	488.98
4	956.05	10470.43	10432.16
5	704.78	5866.66	5880.19
6	469.51	5257.97	5257.97
7	26.61	439.30	427.42
8	29.52	408.86	393.33
9	552.33	3406.81	3362.16
10	77.68	1455.04	1463.57
11	199.68	1939.06	1771.48
12	1315.30	14151.87	14049.81
13	1087.50	17906.14	17764.58
14	986.42	15851.59	15816.95
15	1543.80	20730.31	20621.83
16	985.22	6856.99	6755.65
17	753.97	6115.97	6120.77
18	793.07	8525.60	8227.42
19	465.66	3092.06	3090.92
20	657.47	15312.63	15237.68
21	999.25	41168.27	41082.16

Tabela 24 – Aporte de sedimentos pelas sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, modelada pelo software InVEST, para o uso do solo em 2011 e em cenário futuro, com a revegetação das APPs. Continuação

Sub-Bacias (ws_i)	Área (ha)	Produção de Sedimentos	
		2011 (Mg ano ⁻¹)	Cenário futuro (Mg ano ⁻¹)
22	980.00	38513.42	38376.39
23	430.33	3668.97	3668.97
24	682.88	18079.32	18079.32
25	781.43	4499.63	4494.55
26	1048.40	5982.05	5979.69
27	566.53	11301.58	11298.71
28	492.35	18188.69	18188.69
29	1514.50	49136.65	49070.98
30	1193.80	29007.61	29077.73
31	828.92	3825.70	3820.55
32	274.54	390.21	386.59
33	325.78	23766.23	23688.47
34	485.51	589.11	581.14
35	170.08	2472.69	2451.13
36	929.70	38319.95	38334.87
37	666.79	17761.64	17770.43
38	554.89	37891.53	37892.46
39	1833.00	9545.86	9541.15
40	322.19	102.88	98.32
41	1309.50	6847.36	6840.14
42	255.37	2692.77	2687.51
43	872.98	943.10	941.02
44	676.03	12500.32	12491.38
45	902.58	3482.00	3479.17
46	464.72	2340.34	2340.34
47	389.60	5790.64	5791.14
48	554.04	347.58	346.77
49	7.36	2.22	1.69
50	502.02	9293.07	9293.07
51	2848.60	121862.40	121465.23
52	841.15	4963.40	4956.70
53	1095.20	27120.37	27115.38
54	60.49	17.52	15.98
55	728.31	3059.03	3055.29
56	216.96	3967.32	3921.62
57	57.75	14.11	13.15
58	5.30	3.07	2.15
59	1637.80	116734.07	116614.96
60	3.42	3.65	2.16
61	728.05	334.86	333.04

Tabela 24 – Aporte de sedimentos pelas sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, modelada pelo software InVEST, para o uso do solo em 2011 e em cenário futuro, com a revegetação das APPs. Continuação

Sub-Bacias (ws_i)	Área (ha)	Produção de Sedimentos	
		2011 (Mg ano ⁻¹)	Cenário futuro (Mg ano ⁻¹)
62	56.38	14.92	13.76
63	986.08	41871.31	41871.85
64	188.56	65.50	62.16
65	591.77	5618.43	5564.82
66	584.92	1711.73	1708.96
67	493.64	5474.91	5461.21
68	4409.40	13560.89	13528.73
69	461.98	2387.03	2383.52
70	602.20	3610.50	3608.53
71	2559.50	54716.67	54501.32
72	869.04	3542.90	3542.05
73	703.67	24486.06	24445.13
74	708.89	1493.62	1491.19
75	8.04	53.04	37.98
76	1415.10	7318.90	7312.08
77	1418.70	51218.33	51094.24
78	771.68	19044.54	19097.08
79	1239.70	3254.31	3246.63
80	1872.70	36665.50	36607.08
81	783.40	37984.70	37984.45
82	480.97	3169.50	3169.50
83	56.81	1063.84	1062.86
84	1261.40	7549.56	7558.33
85	1671.90	9730.10	9695.15
86	1913.20	33214.77	33193.04
87	394.48	246.70	244.75
88	406.63	280.43	277.08
89	131.75	1378.76	1362.01
90	698.19	18868.59	18528.90
91	1165.10	5070.75	4954.04
92	601.95	13521.67	13425.33
93	501.17	5602.24	5581.13
94	270.17	2604.62	2591.95
95	431.27	7549.88	7548.78
96	1075.90	15842.77	15694.80
97	1999.80	23053.84	22995.82
98	1184.70	33715.15	33716.68
99	1046.10	4245.00	4242.99
100	697.42	3738.38	3735.36
101	257.00	3663.24	3622.94

Tabela 24 – Aporte de sedimentos pelas sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, modelada pelo software InVEST, para o uso do solo em 2011 e em cenário futuro, com a revegetação das APPs. Continuação

Sub-Bacias (ws_i)	Área (ha)	Produção de Sedimentos	
		2011 (Mg ano ⁻¹)	Cenário futuro (Mg ano ⁻¹)
102	1287.70	8747.89	8698.13
103	300.55	4855.17	4821.58
104	1041.30	1837.58	1835.13
105	2495.70	123423.39	123056.65
106	1601.90	41465.88	41359.68
107	870.15	8519.19	8513.74
108	981.54	19917.63	19849.70
109	616.75	19404.89	19412.24
110	427.76	1758.54	1758.55
111	608.53	3689.70	3689.53
112	319.28	3880.65	3863.69
113	1310.10	6618.08	6611.04
114	1966.70	29496.96	29446.16
115	367.45	7283.10	7275.72
116	245.71	78.89	76.54
117	936.71	24780.24	24711.78
118	1131.90	25354.75	25318.34
119	216.79	4307.36	4292.46
120	1696.20	86586.35	86591.35
121	526.06	10901.22	10827.10
122	561.65	1530.39	1528.09
123	297.38	4893.16	4893.16
124	819.33	54636.15	54509.20
125	672.10	6340.99	6327.19
126	1876.20	3631.66	3628.28
127	863.31	19794.78	19728.49
128	1466.60	3764.65	3756.26
129	1028.60	24969.30	24946.84
130	662.69	14705.73	14678.95
131	610.24	2398.24	2398.25
132	930.30	26909.30	26673.51
133	441.88	29705.51	29701.31
134	432.89	1632.71	1632.71
135	1332.00	30634.25	30551.78
136	903.09	61321.24	60845.87
137	878.11	21142.10	20958.37
138	339.39	5863.25	5670.78
139	947.06	48596.31	48581.05
140	965.11	23555.35	23512.14
141	852.10	14572.03	14596.35

Tabela 24 – Aporte de sedimentos pelas sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, modelada pelo software InVEST, para o uso do solo em 2011 e em cenário futuro, com a revegetação das APPs. Continuação

Sub-Bacias (ws_i)	Área (ha)	Produção de Sedimentos	
		2011 (Mg ano ⁻¹)	Cenário futuro (Mg ano ⁻¹)
142	440.34	21832.26	21832.26
143	1610.10	35577.24	35513.60
144	142.36	4235.08	4218.81
145	629.66	18119.60	18129.56
146	1072.20	27435.97	27392.96
147	793.07	42256.08	42097.99
148	1003.70	39055.43	39055.42
149	2644.70	23126.08	23133.27
TOTAL	124437.20	2392353.11	2385888.12

Fonte: o autor

De acordo com a modelagem do software InVEST, o total de sedimentos gerado pelas microbacias que compõem a bacia contribuinte da PCH Costa Rica em 2011 foi de 2.392.353,11 Mg ano⁻¹ e para o cenário futuro foi de 2.385.888,12 Mg ano⁻¹. Portanto, a recuperação de apenas 13,78 km² das APPs hídricas pode reduzir a geração de 6.464,99 Mg ano⁻¹ de sedimentos na bacia e resultar em benefícios econômicos e ambientais. Além do estabelecimento de APP, em seu artigo 12º, o Novo Código Florestal obriga a manutenção de 35% da área total da propriedade, como Reserva Legal do bioma cerrado. Em seu art. 67, o Novo Código Florestal estabelece que nos imóveis rurais que detinham em 22 de julho de 2008, área de até quatro módulos fiscais e que possuam remanescente de vegetação nativa em percentuais inferiores ao previsto no art. 12º, a Reserva Legal seja constituída conforme a área ocupada com a vegetação nativa existente em 22 de julho de 2008, vedadas novas conversões para o uso alternativo do solo.

Segundo o Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), cada módulo fiscal no município de Costa Rica corresponde a 70 hectares. Portanto, a propriedade rural que apresentar área no município de Costa Rica superior a 280 hectares deverá manter, em 35% da sua propriedade, reserva legal para o bioma Cerrado (INCRA, 2013).

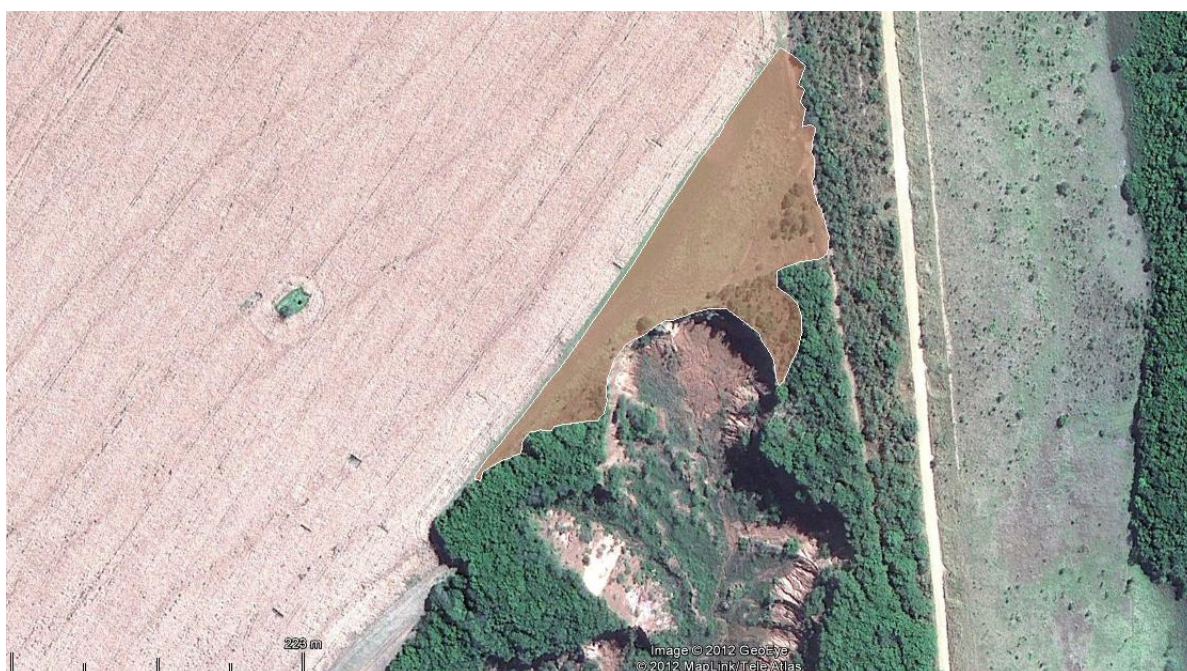
Assim, com a realização do Cadastro Ambiental Rural do Mato Grosso do Sul (CAR-MS), implantando por meio da Resolução SEMAC nº 11 de 15 de julho de 2014, das propriedades rurais do município de Costa Rica no Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente (SINIMA) e conforme estabelecido no Decreto nº 7.830, de 17 de outubro

de 2012, será possível estabelecer com maior grau de detalhamento as áreas futuras de recomposição florestal e estimar qual será o aporte de sedimentos para o reservatório da PCH Costa Rica neste novo cenário.

5.7 PROPOSTA DE RECOMPOSIÇÃO VEGETAL DE ÁREAS DEGRADADAS COM UTILIZAÇÃO DE BIOTECNOLOGIA

A proposta de recomposição vegetal das áreas degradadas foi desenvolvida com o intuito de promover a reabilitação de áreas impactadas pelos processos erosivos intensos, como as voçorocas. Inicialmente foi desenvolvido um projeto modelo, em escala experimental, na cabeceira da principal e mais antiga voçoroca identificada à montante da PCH Costa Rica (Figura 39).

Figura 39 – Localização da área destinada à implantação do projeto modelo de recomposição vegetal na cabeceira da principal e mais antiga voçoroca identificada à montante da PCH Costa Rica (MS).



Fonte: modificado de GOOGLE EARTH (2015).

5.7.1 Seleção de espécies nativas do cerrado

A cobertura vegetal original do Estado do Mato Grosso do Sul pode ser observada na Figura 8, elaborada pelo IBGE – SENAC/SUPEMA(Extinta) e SEPLAN e apresentada no Plano Estadual de Recursos Hídricos do Mato Grosso do Sul em SEMAC (2010).

Na seleção das espécies nativas utilizadas na recomposição vegetal das áreas degradadas pelos processos erosivos intensos de Costa Rica, foram consideradas as quatro regiões fitoecológicas, além das recomendações da Embrapa-Cerrados, sendo selecionadas as espécies nativas do Mato Grosso do Sul que compõem a vegetação de savana (cerrado), savana estépica, floresta estacional semidecidual e floresta estacional decidual. A Tabela 25 apresenta as espécies indicadas pelo comunicado técnico da Embrapa nº 75 (POTT; POTT, 2002), para a recuperação de áreas degradadas e revegetação para o Estado do Mato Grosso do Sul, sendo listadas espécies que produzem sementes ou frutos que alimentam e podem ser propagadas por aves. Estas espécies sugeridas, de forma geral, produzem muitas sementes e são de cultivo relativamente simples.

Tabela 25 - Espécies nativas que podem ser introduzidas na recuperação de áreas degradadas e revegetação no Estado do Mato Grosso do Sul, conforme comunicado técnico da Embrapa, nº 75.

PLANTAS		FAUNA	AMBIENTE			
NOME COMUM	NOME CIENTÍFICO		DRENADO			MATA CILIAR
			Tipos de solo			
			Arenoso	Argiloso		
			Pobre	Fértil		
Almécega	<i>Protium heptaphyllum</i>	x	x	x	x	
Araçá	<i>Psidium guineense</i>	x	x	x		x
Ariticum	<i>Annona crassiflora</i>	x	x	x		
Ariticum-rasteiro	<i>Annona dioica</i>	x	x	x		
Ata-brava, ariticunzinho	<i>Duguetia furfuracea</i>	x	x			
Ata-de-cobra	<i>Annona cornifolia</i>	x	x	x		
Belém, canudeiro	<i>Coccoloba mollis</i>	x	x	x		
Bocaiúva, macaúba	<i>Acrocomia aculeata</i>	x	x	x	x	
Carraporoca	<i>Rapanea umbellata</i>	x	x	x		x
Cajuzinho	<i>Anacardium humile</i>	x	x	x		
Capitão	<i>Terminalia argentea</i>		x	x		
Carvoeiro	<i>Sclerolobium paniculatum</i>		x			
Caviúna-do-campo	<i>Dalbergia miscolobium</i>		x	x		
Chapadinha	<i>Acosmium subelegans</i>		x	x		
Chico-magro	<i>Guazuma ulmifolia</i>	x	x	x	x	x
Embaúba	<i>Cecropia pachystachya</i>	x	x	x	x	x
Erva-de-lagarto	<i>Casearia silvestris</i>	x	x	x		x
Jatobá-do-cerrado	<i>Hymenaea stigonocarpa</i>	x	x	x		

Tabela 25 - Espécies nativas que podem ser introduzidas na recuperação de áreas degradadas e revegetação no Estado do Mato Grosso do Sul, conforme comunicado técnico da Embrapa, nº 75. Continuação.

PLANTAS		FAUNA	AMBIENTE			
NOME COMUM	NOME CIENTÍFICO		DRENADO			MATA CILIAR
			Tipos de solo			
			Arenoso	Argiloso		
		Pobre	Fértil			
Leiteirinho	<i>Chrysophyllum marginatum</i>	x	x	x	x	x
Louro-mole	<i>Cordia sellowiana</i>	x			x	
Mama-cadela	<i>Brosimum gaudichaudii</i>	x	x	x		
Mamão-de-pito	<i>Mabea fistulifera</i>		x	x		
Mangaba	<i>Hancornia speciosa</i>	x	x	x		
Maria-mole	<i>Dendropanax cuneatum</i>	x				x
Marmelada-de-bola, marmelada	<i>Alibertia edulis</i>	x	x	x		x
Marmelada-preta	<i>Alibertia sessilis</i>	x	x	x	x	
Mora, taiúva	<i>Maclura tinctoria</i>	x		x	x	
Murici, sumanera	<i>Byrsonima coccolobifolia</i>	x	x	x		
Morcego, morcegueira	<i>Andira spp.</i>	x	x	x		
Periquiteira, grandiúva, candiúba	<i>Trema micrantha</i>	x		x	x	
Pindaíba, pindaíva	<i>Xylopia aromatica</i>	x	x	x		x
Piúva-cascuda, ipê-amarelo	<i>Tabebuia ochracea</i>		x	x	x	
Pombeiro, pau-de-pombo, peito-de-pombo	<i>Tapirira guianensis</i>	x	x	x		x
Sombra de touro	<i>Erythroxylum suberosum</i>	x	x	x		

Fonte: (POTT; POTT, 2002)

Conforme as recomendações apresentadas na Tabela 25, nas encostas ou em áreas de solo exposto, verificam-se espécies capazes de sobreviver em condições inóspitas, com boa rebrota e que servem de alimento para a fauna como, por exemplo, ariticunzinho ou atabrava, ata-de-cobra, caiarana ou marinheiro, cajuzinho, castanha-de-macaco, erva-de-lagarto, guavira, japecanga, lixeira, lobeira, mama-cadela, mata-barata ou morceguinho, morcego, pombeiro ou peito-de-pombo, siputá e sombra-de-touro. No caso de solo estéril, as espécies resistentes são o capitão, carvoeiro, caviúna-do-campo e piúva-cascuda (POTT;POTT, 2002).

Leguminosas do gênero *Stylosanthes* (*S. capitata*, *S. macrocephala*, *S. viscosa*) são capazes de sobreviver a situações inóspitas. O *Stylosanthes*, conhecido como Estilosantes Campo Grande, cresce bem em solos pobres e arenosos (POTT; POTT, 2002).

Algumas das espécies listadas suportam áreas com solo encharcado, por exemplo, buriti, caapororoca, embaúba, figueira-do-brejo, ingá, maria-mole, murici-do-brejo,

novateiro, pindaíba-do-brejo, pinha-dobrejo, sangra-d'água e tarumã. Desta forma, estas espécies suportam o plantio em locais encharcados, tais como áreas de APP e áreas no interior das voçorocas onde ocorre o afloramento do nível freático (POTT; POTT, 2002).

De acordo com informações fornecidas no comunicado técnico da Embrapa (POTT; POTT, 2002), ainda existem várias outras espécies vegetais com potencial para utilização em recomposição e replantio no Estado do Mato Grosso do Sul.

A fixação biológica de nitrogênio, realizada por bactérias do gênero rizóbio, em simbiose com leguminosas, poderá favorecer o crescimento de outras espécies arbóreas nativas semeadas em consórcio com as leguminosas nas áreas experimentais. As espécies selecionadas para a aplicação desta biotecnologia e seus respectivos simbiontes (estirpes de rizóbio específico para cada espécie), são apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26 - Leguminosas nativas do Cerrado e respectivos inoculantes a base de rizóbio específico.

Leguminosas nativas do Cerrado	Nome popular	Estirpes de rizóbio inoculadas*
<i>Stylosanthes capitata/macrocephala</i>	Estilosantes	BR446 e BR502
<i>Canavalia ensiformis</i>	Feijão de porco	BR2003 e BR2811
<i>Dalbergia miscolobium</i>	Sapuvussu	BR8404
<i>Ormosia arborea</i>	Olho de cabra	BR446, BR502, BR2003, BR2811 e BR8404

* Inoculantes pesquisados junto a Embrapa Agrobiologia/Seropédica (RJ), inoculados na diluição de 10^{-7} .

Fonte: o autor

5.7.2 Produção de inoculantes

Após a seleção das leguminosas nativas do cerrado, foram realizados ensaios laboratoriais para isolamento, cultivo, multiplicação e produção dos inoculantes específicos, seguindo a metodologia proposta pelo Manual de Métodos Empregados em Estudos de Microbiologia Agrícola (HUNGRIA; ARAÚJO, 1994). As estirpes de rizóbio, específicas para inoculação das leguminosas nativas do Cerrado selecionadas neste projeto foram multiplicadas em meio líquido YM e inoculadas na mesma quantidade e na diluição de 10^{-7} (Figura 40).

Figura 40 – Preparação dos inoculantes, por meio da multiplicação em meio líquido YM, contendo estirpes de rizóbio específicas para leguminosas nativas do Cerrado, fornecidas pela Embrapa Agrobiologia/Seropédica (RJ).



Fonte: o autor

As sementes foram preparadas e inoculadas para posterior semeadura nas parcelas experimentais. A inoculação das sementes de leguminosas foi realizada pela aplicação do meio líquido YM na diluição 10^{-7} (1.10^8 g^{-1} células de rizóbio) e somente para as sementes de *Canavalia* e de *Ormosia* foi utilizada turfa esterilizada, misturada na relação de 20% em volume de meio YM, contendo o inoculante (Figura 41).

Figura 41 – Inoculação das sementes de leguminosas com as estirpes específicas de rizóbio utilizando o meio líquido YM na diluição 10^{-7} e, no caso das sementes de *Canavalia* e de *Ormosia*, meio YM misturado à turfa esterilizada.

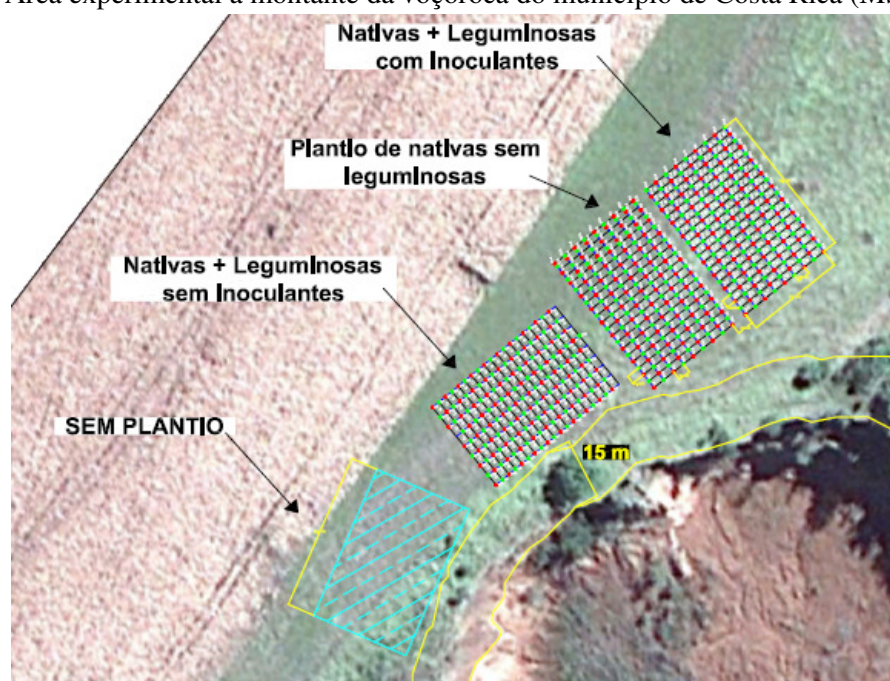


Fonte: o autor

5.7.3 Implantação das parcelas experimentais na cabeceira da voçoroca à montante da PCH Costa Rica (MS)

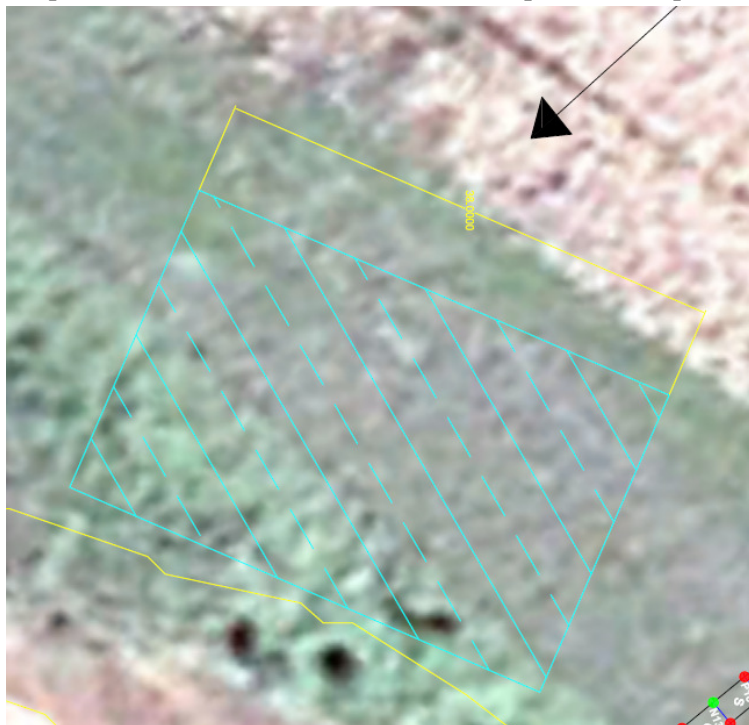
A área experimental foi constituída de 4 parcelas de 912m² (38mx24m), distanciadas de 4 metros, contendo os tratamentos: 1) sem plantio; 2) Espécies nativas consorciadas com leguminosas não inoculadas com rizóbio; 3) Espécies nativas não consorciadas com leguminosas e 4) Espécies nativas consorciadas com leguminosas inoculadas com rizóbio (Figuras 42 a 46). Essa área experimental foi mantida a uma distância de 15 metros da borda superior da voçoroca.

Figura 42 – Área experimental à montante da voçoroca do município de Costa Rica (MS).



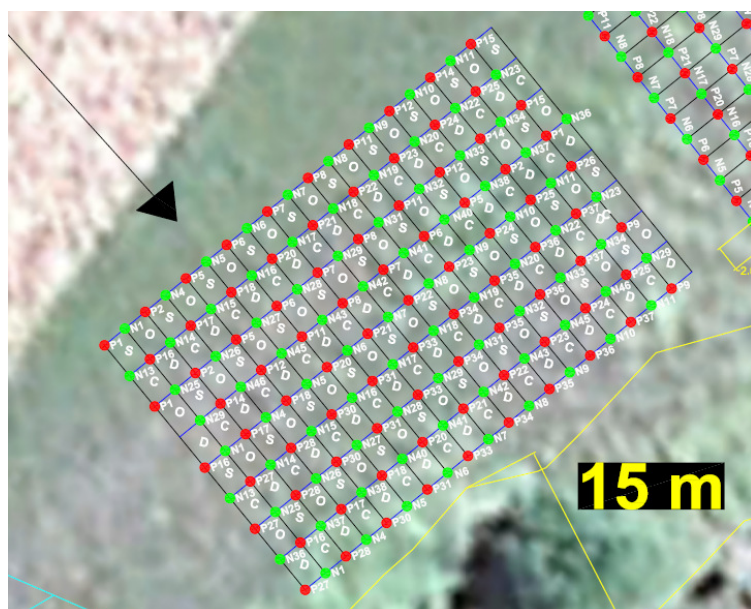
Fonte: modificado de GOOGLE EARTH (2015).

Figura 43 – Parcela experimental 1: tratamento controle – sem plantio de espécies nativas.



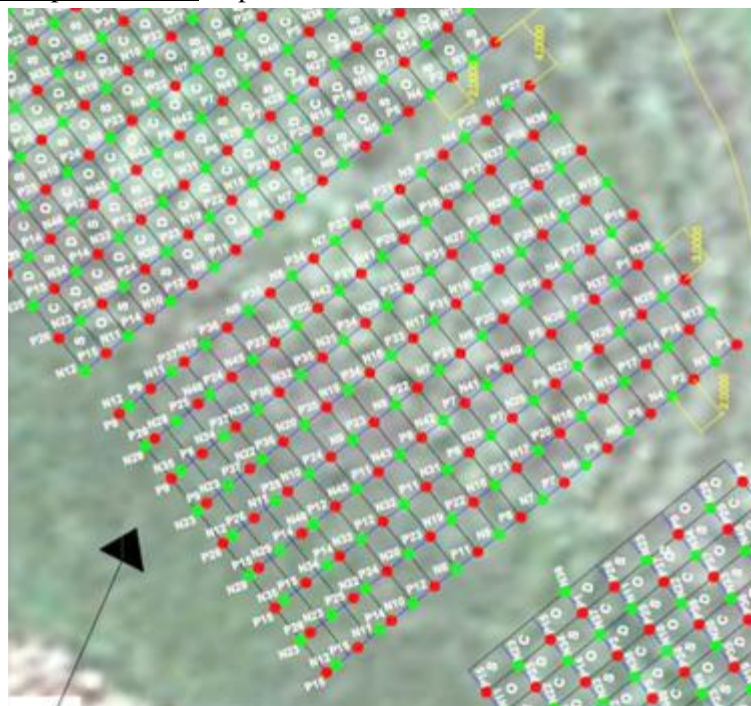
Fonte: modificado de GOOGLE EARTH (2015).

Figura 44 – Parcela experimental 2: espécies nativas do Cerrado consorciadas com leguminosas não inoculadas com rizóbio.



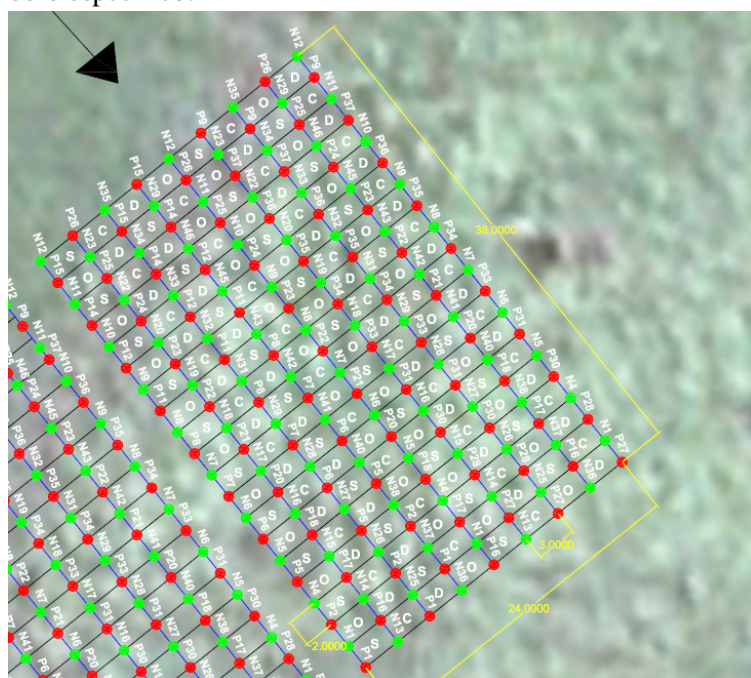
Fonte: modificado de GOOGLE EARTH (2015).

Figura 45 – Parcela experimental 3: espécies nativas do cerrado não consorciadas com leguminosas.



Fonte: modificado de GOOGLE EARTH (2015).

Figura 46 – Parcela experimental 4: espécies nativas do cerrado consorciadas com leguminosas inoculadas com rizóbio específico.



Fonte: modificado de GOOGLE EARTH (2015).

Devido à infestação de braquiária na área experimental foi necessária a roçada, executada com o trator e os implementos fornecidos pelo arrendatário da propriedade, onde

se encontra esta voçoroca. A roçada preservou as espécies nativas remanescentes do Cerrado e possibilitou a implantação das parcelas experimentais (Figura 47).

Figura 47 – Limpeza da área para implantação das parcelas experimentais na cabeceira da voçoroca do município de Costa Rica (MS), preservando as espécies nativas remanescentes do Cerrado, nas parcelas experimentais.



Fonte: o autor

Após a roçada, foram delimitadas as parcelas experimentais na cabeceira da voçoroca do município de Costa Rica, respeitando o nível do terreno (Figura 48).

Figura 48 – Delimitação das parcelas experimentais na região à montante, na cabeceira da voçoroca do município de Costa Rica (MS), respeitando o nível do terreno.

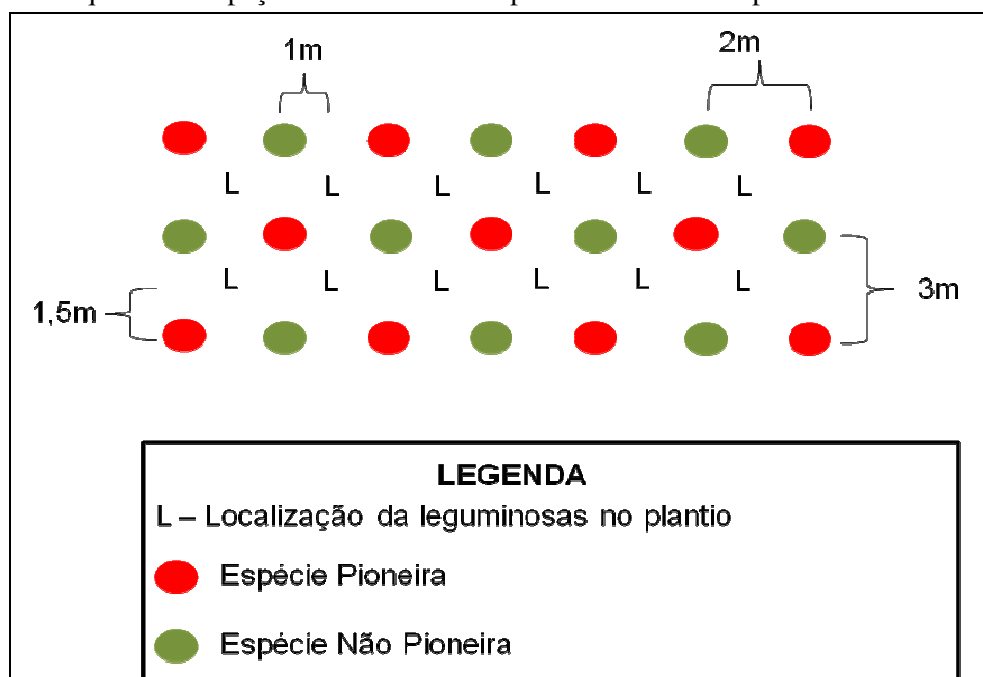


Fonte: o autor

As parcelas experimentais foram distanciadas de 4 metros e delimitadas por estacas de madeira e fios de nylon. Em seguida, foram abertas as covas com profundidade de 10 cm e espaçamento de 3 m entre linhas e 2 m entre plantas (Figuras 49 e 50). Não foi necessária a aplicação de adubo nitrogenado, pois este nutriente essencial ao crescimento das plantas será

fornecido pela fixação biológica de nitrogênio, realizada pelo rizóbio em simbiose com as leguminosas. Além disso, a aplicação de nitrogênio inibe o crescimento e a funcionalidade dos nódulos e consequente fixação de nitrogênio (WATERER; VESSEY, 1993).

Figura 49 – Esquema do espaçamento adotado nos plantios das áreas experimentais.



Fonte: modificado de Rodrigues et al. (2009).

O modelo de plantio selecionado, de acordo com as diretrizes da resolução SMA n° 32 de 2014, consiste na implantação de grupos de pioneiras e não pioneiras alternadas na linha de plantio. Na linha seguinte, alterna-se a ordem em relação à linha anterior, conforme ilustra a Figura 50.

Figura 50 – Abertura das covas com 10 cm de profundidade e espaçadas de 2m x 3m, para semeadura das espécies leguminosas e não leguminosas nativas do Cerrado nas parcelas experimentais implantadas à montante da voçoroca do município de Costa Rica (MS).



Fonte: o autor

A semeadura foi realizada, sendo dispostas 3 sementes por cova para cada espécie nativa do cerrado, seguindo a distribuição do croqui, previamente preparado (Figura 51).

Figura 51 – Semeadura das espécies leguminosas e nãoleguminosas, nativas do Cerrado, nas parcelas experimentais no entorno da voçoroca do município de Costa Rica (MS).



Fonte: o autor

Durante a semeadura a equipe terceirizada do “Viveiro Ravenala” iniciou a construção da cerca ao redor da área experimental, para prevenir a entrada de animais.

5.7.4 Monitoramento da área experimental à montante da voçoroca de Costa Rica

A empresa “Viveiro Ravenala Ltda.”, contratada para a construção da cerca de proteção da área experimental, bem como, para a execução dos trabalhos de irrigação e acompanhamento da germinação das sementes de espécies nativas do Cerrado (Figura 52).

As recomendações básicas para o monitoramento da área experimental à montante da voçoroca, realizada pela empresa “Viveiro Ravenala Ltda.” foram:

- 1) Irrigação das parcelas experimentais;
- 2) Controle do ataque de insetos (formiga) e pragas (manter a área livre de invasoras por meio de capina entre as covas de semeadura);
- 3) Realizar o desbaste das mudas após germinação e a substituição onde não houver germinação adequada;
- 4) Manter a cerca em bom estado para evitar a entrada de animais na área experimental.

Figura 52 – Trabalhos executados pela empresa “Viveiro Ravenala Ltda.”: a) Construção da cerca de proteção da área experimental do projeto de recomposição vegetal implantada na cabeceira da voçoroca do município de Costa Rica (MS), b) Irrigação das parcelas experimentais, c) e d) Acompanhamento do crescimento das sementes de espécies nativas do Cerrado e controle de pragas.



Fonte: o autor

O plantio direto, em concordância com as diretrizes da resolução SMA nº 32 de 2014, se mostra promissor na recomposição de áreas degradadas da bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS). A incorporação de leguminosas inoculadas com estirpes específicas de rizóbio também é importante para garantir a fixação de nitrogênio no solo e diminuir o consumo de adubos minerais. Carvalho et al. (2010) avaliaram a emissão de óxido nitroso (N_2O) com aplicação de fertilizantes nitrogenados em sistema de plantio direto em solos do Cerrado e constataram que as parcelas experimentais em que foram adicionados fertilizantes nitrogenados apresentaram maiores valores de emissão de N_2O . Este e outros estudos comprovam a importância do plantio de espécies nativas em consórcio com leguminosas

para a ciclagem de nutrientes por longos períodos, para reduzir a inviabilidade econômica dos custos com a adubação de áreas extensas e para minimizar as emissões de gases de efeito estufa (N_2O) provenientes dos fertilizantes nitrogenados.

De acordo com Heinrichs et al. (2005), o feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) proposto neste projeto como leguminosa no consórcio com a vegetação nativa do Cerrado, apresentou maior produção de biomassa e aumentou o acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre no solo, quando comparado com mucuna anã, guandu anão, crotalária e plantas invasoras. Esse estudo evidencia o potencial de amplificação da gama de nutrientes que podem ser bioacumulados no solo, devido a inserção de leguminosas fixadoras de nitrogênio em projetos de recomposição vegetal. Além da reciclagem de nutrientes, em consequência da adubação verde, Nascimento et al. (2003) relatam que este tipo de adubação promove a proteção do solo em áreas sujeitas a processos erosivos, proporciona maior retenção de água e menor variabilidade térmica do solo.

A proposta de recomposição de áreas degradadas aplicando biotecnologia, utilizando leguminosas inoculadas em consórcio com a vegetação nativa se mostra promissor, considerando que estas espécies apresentam elevada capacidade de adaptação ao bioma Cerrado e proporciona condições para que as espécies nativas se estabeleçam em ambientes inóspitos. Essa prática, geralmente, é de baixo custo que outras medidas de intervenção em áreas degradadas que envolvem preparos preliminares e etapa de produção de mudas em viveiros (SANTOS, 2010).

6 CONCLUSÕES

Os softwares InVEST e SWAT apresentaram aplicabilidade na modelagem da perda de solo em bacias hidrográficas, na indicação das regiões com processos erosivos acelerados e na simulação de cenários futuros, demonstrando a redução no aporte de sedimentos.

A modelagem da perda de solo de bacias hidrográficas gerada pelos softwares SWAT e InVEST apresentou aplicabilidade mesmo em cenários de escassez de séries históricas de dados hidrológicos e hidrossedimentológicos, como na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS) e na maior parte do território brasileiro, com elevada correlação com o Método de Einsten Modificado, utilizado convencionalmente para estimar a perda de solos.

A perda total média de solo na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS) estimada pela modelagem com o InVEST foi de $19,23 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ($2.392.353,10 \text{ Mg ano}^{-1}$), cerca de 2,2 vezes superior ao valor obtido pelo software SWAT, de $8,54 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ($1.062.402,15 \text{ Mg ano}^{-1}$).

A quantidade de sedimento que chega ao canal de adução da PCH Costa Rica estimada pelo InVEST foi de $100.674,20 \text{ Mg ano}^{-1}$, enquanto o SWAT apresentou um total 10,43 vezes superior ($1.049.521,72 \text{ Mg ano}^{-1}$). A modelagem da perda de solo por processos erosivos empregando o software InVEST, na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, que não possui séries históricas de dados hidrossedimentológicos representou uma inovação tecnológica. Por meio desta modelagem foi possível avaliar quantitativamente o aporte de sedimentos que atingem os corpos d'água, fundamental para a tomada de decisão no planejamento ambiental, no manejo dos solos e na manutenção da qualidade dos recursos naturais de bacias hidrográficas. Além disso, com a modelagem do cenário atual e futuro de perda de solo, empregando o software InVEST, foi possível identificar espacialmente as áreas com maior potencial de geração de sedimentos e demonstrar que a adoção de práticas conservacionistas, como a recomposição vegetal das APPs hídricas, pode minimizar os impactos do assoreamento no canal de adução da PCH Costa Rica.

A ausência de série histórica de dados hidrossedimentológicos da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica foi um fator limitante para a calibração e a validação da modelagem da perda de solo pelos softwares SWAT e InVEST.

A simulação de cenário futuro, pelo software InVEST, considerando a recomposição vegetal de $13,78 \text{ km}^2$ de APPs hídricas da bacia contribuinte da PCH Costa Rica gerou uma

redução de 6.464,99 Mg ano⁻¹ de sedimentos em relação à perda de solo total obtida no ano de 2011 nas 149 microbacias, que compõem esta bacia.

A proposta de recomposição vegetal das áreas degradadas com a utilização de biotecnologia, em sistema de plantio direto de espécies nativas do Cerrado em consórcio com leguminosas inoculadas com rizóbio é uma tecnologia promissora, devido à capacidade destas espécies melhorarem as condições físicas e a fertilidade dos solos e, com isso, favorecerem a adaptação de outras espécies nativas. Para a proposta de recomposição vegetal das APPs hídricas foram realizadas pesquisas, desenvolvimento e aplicação de técnicas e materiais biotecnológicos para a seleção de espécies nativas do cerrado, entre estas, leguminosas nodulíferas com capacidade de realizar simbiose eficiente com estirpes específicas de rizóbio. Estas espécies vegetais podem favorecer o crescimento de outras espécies nativas não leguminosas, por meio do fornecimento de nitrogênio ao meio, obtido pela fixação biológica de nitrogênio atmosférico, realizada pelo rizóbio, o que ativa os processos de sucessão ecológica e aumenta o potencial de recomposição vegetal bem sucedida de ambientes inóspitos, como os encontrados nos cinturões de processos erosivos e em voçorocas. Esse comportamento já foi evidenciado em inúmeros estudos, desenvolvidos em diferentes regiões do país, mas para o Estado do Mato Grosso do Sul, as pesquisas relacionadas a esse tema são escassas, pontuais e incipientes.

Neste estudo foi possível analisar e quantificar a perda de solo na bacia hidrográfica de interesse, fornecer subsídios técnicos para a adoção de políticas públicas na tomada de decisão e demonstrar que a aplicação de biotecnologia, na recomposição vegetal com a simbiose leguminosa-rizóbio pode minimizar o processo erosivo, reduzir a produção de sedimentos e, conseqüentemente, o assoreamento de cursos d'água, aumentando a eficiência energética desta e de outras hidrelétricas brasileiras.

A adoção de práticas conservacionistas pelos produtores da bacia contribuinte da PCH Costa Rica pode amenizar os processos erosivos e, conseqüentemente, aumentar a capacidade produtiva dos solos e diminuir os custos desta hidrelétrica com o desassoreamento do canal de adução.

7 RECOMENDAÇÕES

Em trabalhos futuros recomenda-se:

(1) A realização de novas campanhas hidrossedimentológicas nos mesmos pontos amostrados a fim de gerar uma série histórica de dados e para a calibração dos modelos;

(2) A realização de novas simulações com os softwares para as áreas declaradas de reserva legal, após aprovação e disponibilização do banco de dados do CAR, pelo órgão ambiental estadual competente;

(3) A implantação do modelo de recomposição vegetal proposto, em áreas degradadas por processos erosivos da bacia hidrográfica a fim de avaliar o potencial de desenvolvimento das espécies, em áreas de solo exposto, em áreas de pastagem e outras características de meio físico.

(4) Implantar um Projeto de Educação Ambiental nas escolas da região visando a conscientização das gerações futuras sobre os benefícios da recuperação das APPs e de áreas degradadas por processos erosivos, na preservação dos recursos hídricos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM248. Agregados-Determinação da composição granulométrica.** 2003.

ABREU, R. L. de. **Mapa de localização da cidade de Costa Rica no Estado de Mato Grosso do Sul.** 2006. Disponível em <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MatoGrossodoSul_Municip_CostaRica.svg>, Acesso em 20 ago. 2015.

ADRIOLO, M. V.; SANTOS, L.; GIBERTONI, R. C.; CAMARGO, A. S. G. **Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos.** In SIMPÓSIO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 6. 2008. Belo Horizonte. Anais: Comitê Brasileiro de Barragens. V. 1, p. 1-17. 2008.

AGUIAR, A. M. **Análises Hidrogeomorfológicas e Hidrossedimentológicas para comparação entre duas bacias hidrográficas contribuintes do reservatório de Itaipu.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo. 157p. 2009.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **HidroWeb: Sistemas de Informações Hidrológicas.** Brasil. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>, Acesso em 21 jul. 2015.

ANAMBI - ANÁLISE AMBIENTAL LTDA. **Levantamento de dados hidrossedimentológicos da bacia contribuinte da PCH Costa Rica/MS.** Costa Rica, MS. v.4. 2013.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** Brasília: ANEEL. 153 p. 2002.

AMARAL, J. F. **Análise do Transporte de Sedimentos na Bacia do Rio Claro.** Trabalho de Monografia (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 98 p. 2010.

ARAÚJO JR. G. J. L. D. **Aplicação dos modelos EUPS e MEUPS na bacia do Ribeirão Bonito (SP) através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento.** São José dos Campos: INPE, 1997. Disponível em < <http://www.obt.inpe.br/pgsere/Araujo%20Jr-G-J-%20L-D-1997/publicacao.pdf>>, Acesso em 02 fev. 2015.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. **Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model Development.** JAWRA. v.34. n.1. p. 73-89. 1998.

BARBEDO, A. G. A. **Estudo Hidrossedimentológico na Bacia do Alto Paraguai – Pantanal.** 2003. 107f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2003.

BARCELOS, A.A; BRAGA, C.O; CABRAL, J.B.P; ROCHA, I.R. **Análise da descarga sólida em suspensão dos afluentes do reservatório da UHE Barra dos Coqueiros – GO.** REVISTA GEONORTE, Edição Especial, V.3, N.4, p. 495-505, 2012.

BARSANTI, P.; DISPERATI, L.; MARRI, P.; MIONE, A. **Soil erosion evaluation and multitemporal analysis in two Brazilian basins.** In: 2ND INTERNATIONAL SWAT CONFERENCE. Bari. Italy. 2003. Disponível em <<http://swat.tamu.edu/docs/swat/conferences/2003/Session%20E/Barsanti.pdf>>, Acesso em 02 fev. 2015.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** São Paulo: Editora Ícone. 9^a ed. 355p. 2014. ISBN 978-85-274-0980-3

BERTONI, J. **O espaçamento dos terraços em culturas anuais, determinado em função das perdas por erosão.** Bragantia, Campinas, v. 18, n. unico, p. 113-140, 1959. Disponível em < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0006-87051959000100010&script=sci_arttext>. Acesso em 21 jul 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87051959000100010>.

BRASIL. **Decreto nº 7.830, de 17 de Outubro de 2012.** Dispõe sobre o Sistema de Cadastro Ambiental Rural, o Cadastro Ambiental Rural, estabelece normas de caráter geral aos Programas de Regularização Ambiental, de que trata a Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012, e dá outras providências. Diário Oficial da União. 2012.

BRASIL. **Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012.** Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nºs 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm>, Acesso em 29 ago. 2015.

BRASIL. **Resolução Conjunta ANEEL/ANA nº 3, de 10 de agosto de 2010.** Estabelecer as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos, e dar outras providências. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2010003cj.pdf>>, Acesso em 29 ago. 2015.

BRASIL. **Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 001 de 23 de janeiro de 1986.** Dispõe sobre as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental. Brasília, DF. 1986

BRITO, J. L. S.; LIMA, S. do C.; SHIKI, S.; MOREIRA, M. R. **Uso do geoprocessamento na estimativa de perda de solos por erosão laminar em Irai de Minas-MG.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9. Anais... São José dos Campos: INPE, p.501-512. 1998.

BUARQUE, D.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R. C. D.; TUCCI, C. E. M.; GUYOT, J. L. **Modelagem da produção e do transporte de sedimentos da bacia do rio Madeira**. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Bento Gonçalves: RS. 2013.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística. Princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003.

CARVALHO, A. M de.; ALVES, B. J. R.; PEREIRA, L. L. **Emissão de óxido nitroso com aplicação de fontes de fertilizantes nitrogenados em sistemas de plantio direto no Cerrado**. Boletim de pesquisa e desenvolvimento – EMBRAPA. n. 281. EMBRAPA CERRADOS. Planaltina – DF. 14 p. 2010. Disponível em <<http://www.cpac.embrapa.br/download/1729/t>>, Acesso em 29 ago. 2015.

CARVALHO NETO, J. G.; SILVA, J. Y. G.; SILVA, R. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Aplicação do modelo SWAT na estimativa de erosão e transporte de sedimentos na bacia do rio Una - Pernambuco**. In: XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. ABRH. 2014.

CARVALHO N. O.; GUILHON L. G.; TRINDADE, P. A. **O assoreamento de um pequeno reservatório - Itiquira, um estudo de caso**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 05 n. 1. p 69-79. 2000.

CARVALHO, N. O.; JÚNIOR, N. P. F.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de Práticas Sedimentométricas**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. 116p. 2000.

CARVALHO, T. M. **Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais**. Revista Brasileira de Geografia Física. Recife. v 01. p 73-85. 2008.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro, s.n. 372p. 1994.

CASSETI, Valter. **Introdução à Geomorfologia**. 2005. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em 02 set. 2014

CATELANI, C. S. **Geotecnologias aplicadas à análise do assoreamento de reservatórios de hidrelétricas em cenário de escassez de dados de séries históricas**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 138p. 2015.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. Editora Edgar Blücher. São Paulo. 1981.

COIADO, E. M. **Assoreamento de reservatórios**. In: Hidrologia aplica à gestão de pequenas bacias hidrográficas. ABRH. 624 p. 2001.

COLBY, B. R. & HEMBREE, C. H.. **Computation of total sediment discharge: Niobara river near Cody, Nebraska**. Washington D. C. : U. S. Geological survey, Water Supply Paper, 1955.

CONCEIÇÃO G.; KOBİYAMA M.; BELLI FILHO P.; MIRANDA C. R. de; MULLINARI M. **Simulação de vazão e sedimento em bacia hidrográfica rural com alta concentração de suínos e diferentes usos do solo**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 10. 2012, Foz do Iguaçu. Anais. Foz do Iguaçu. UTFPR, 2012. Disponível em < <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/78387/1/MIRANDA-ENES114.pdf>>, Acesso em 02 fev. 2015.

CONCEIÇÃO, J. R. da. **Metodologia para identificação de áreas prioritárias para redução da erosão hídrica em bacias de mananciais de abastecimento público do Paraná: Estudo de caso bacia do Passaúna**. Dissertação (mestrado profissional). Universidade Federal do Paraná. 94f. il. tabs+ mapas. Curitiba. 2014.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapas Geológicos digitais**. Sistema de Informações Geográficas-SIG. 2006.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. **A GIs procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units**. J. Soi 51, 427–433. 1996.

Disponível em < <http://www.jswconline.org/content/51/5/427.short>>, Acesso em 21 jul. 2015.

DOMINGOS, J. L. **Estimativa de perda de solo por erosão hídrica em uma bacia hidrográfica**. 66 f. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006. Disponível em <http://www.mundogeomatica.com.br/TesesMonografias/Tese_Site/monografia_jocival.pdf>, Acesso em 02 fev. 2015.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2013: Ano base 2012**. Rio de Janeiro. 288 p. 182 ill. 2013. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>, Acesso em 24 abr. 2014.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2014**. Rio de Janeiro. 292 p. 182 ill. 2015. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>, Acesso em 08 dez. 2015.

EINSTEIN, H. A. **The Bed-load function for sediment transportation in open channel flows**. US Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Technical Bulletin n. 1026. Washington, DC. 1950.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

FERREIRA, C. C. **Geotecnologias aplicadas a criação e organização de banco de dados geoambientais da bacia hidrográfica do rio Sucuriú - MS/BR**. 193 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul/UFMS, Três Lagoas, 2011. Disponível em <<https://sistemas.ufms.br/sigpos/portal/trabalhos/download/343/cursold:137.>>, Acesso em 02 fev. 2015.

FOSTER, G. R.; McCOOL, D. K.; RENARD, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. **Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI metric units.** *Journal of Soil and Water Conservation*. 36(6): 355-359. 1981.

GALDINO, S.; RISSO, A.; SORIANO, B. M. A.; VIEIRA, L. M.; PADOVANI, C. R.; POTT, A.; MELO E. C.; ALMEIDA JÚNIOR, N. de. **Perdas de solo na Bacia do Alto Taquari.** Embrapa Pantanal. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Corumbá. 40 p. 2003. Disponível em <http://www.cpap.embrapa.br/publicacoes/online/BP44.pdf>, Acesso em 22 jul. 2015.

GARBOSSA, L. H. P.; VASCONCELOS, L. R. C.; LAPA, K. R.; BRAINSKI, E. & PINHEIRO, A. **The use and results of the soil and water assessment tool in Brazil: A review from 1999 until 2010.** In: INTERNATIONAL SWAT CONFERENCE & WORKSHOPS, 2011, Toledo. Texas A&M University. p.1-27. 2011. Disponível em <http://intranetdoc.epagri.sc.gov.br/producao_tecnico_cientifica/DOC_3761.pdf>. Acesso em 02 fev. 2015.

GÓMEZ, J. D. P. **Estimativa de erosão pela Equação Universal de Perda de Solo (USLE) e transferência de sedimentos para todo o território Brasileiro.** 59 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura, Piracicaba, 2012. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-25102012-150933/en.php>>, Acesso em 02 fev. 2015.

GOOGLE. **Programa Google Earth.** 2015.

HEINRICHS, R.; VITTI, G. C.; MOREIRA, A.; FIGUEIREDO, P. A. M. de; FANCELLI, A. L.; CORAZZA, E. J. **Características químicas de solo e rendimento de fitomassa de adubos verdes e de grãos de milho, decorrente do cultivo consorciado.** *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. Viçosa. v. 29, n. 1, p. 71-79. 2005. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832005000100008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 29 ago. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000100008>.

HUNGRIA, M.; ARAÚJO, R. S. (Ed.). **Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola**. Brasília, DF: Embrapa-SPI; Goiânia: Embrapa-CNPAF; Londrina: Embrapa-CNPSO. p. 183-192. 1994.

IBGE; Embrapa. **Mapa de solos do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE: Embrapa Solos, 2001. 1 Mapa. Escala 1:5.000.000. 2001.

INCRA. **Sistema Nacional de Cadastro Rural – Índices Básicos**. 2013. Disponível em <http://www.incra.gov.br/sites/default/files/uploads/estrutura-fundiaria/regularizacao-fundiaria/indices-cadastrais/indices_basicos_2013_por_municipio.pdf>, Acesso em 28 ago. 2015.

JABUR, I. C.; SANTOS, M. L. dos. **Revisão estratigráfica da formação Caiuá**. **Boletim de Geografia**. Maringá, UEM-DGE, 2 (2) jan. 1984. Disponível em <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/viewFile/12928/7413>>, Acesso em 18 out. 2015.

JAMSHIDI, R.; DRAGOVICH, D.; WEBB, A.A. **Distributed empirical algorithms to estimate catchment scale sediment connectivity and yield in a subtropical region**. *Hydrological Processes*. 2013. Disponível em <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.9805/pdf>>, Acesso em 06 ago. 2015.

LARA, J. M. **Computation of “Z’s” for use in the modified Einstein procedure**. US Bureau of Reclamation. Denver Colorado. 1966.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. **Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*. Campinas. v. 27. p. 727-733. 2003. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v27n4/a17v27n4>>, Acesso em 02 fev. 2015.

MAIA, A. G. **As consequências do assoreamento na operação de reservatórios formados por barragens.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 164p. 2006. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-18022007-204402/pt-br.php>>, Acesso em 30 jul. 2015.

MAIDMENT, D.R. **Arc Hydro – GIS for Water Resources.** ESRI Press. Redlands, California. 2002.

MARCHIORO E.; FERNANDES, N. F.; MACEDO, J. R. de; BHERING, S. B.; GONÇALVES, A. O.; CAIADO, M. A. C. **Modelagem da produção de sedimentos no noroeste fluminense como subsídio ao planejamento ambiental: um estudo de caso da bacia do córrego Santa Maria.** Revista Brasileira de Geomorfologia. v.12. n.1. p.29-38. 2011. Disponível em <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/42072/1/JRonaldo-SilvioBh-Ortega-Geomorfologia.pdf>>, Acesso em 02 fev. 2015.

MELO, H. B. JR. DE; CAMARGO, R. DE; WENDLING, B. **Sistema de plantio direto na conservação do solo e água e recuperação de áreas degradadas.** Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.7, n.12; 2011.

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

MIRANDA, R. B. **A influência do assoreamento na geração de energia hidrelétrica: estudo de caso na usina hidrelétrica de Três Irmãos – SP.** 2011, 117f. Tese (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Usp, São Carlos, 2011.

MIRANDA, R. B.; SCARPINELLA, G. D.; MAUAD, F. F. **Influência do assoreamento na capacidade de armazenamento do reservatório da usina hidrelétrica de Três Irmãos (SP/Brasil).** Revista Recursos Hídricos, Vol. 34, Nº 2, 69-79. 2013.

MORAIS, L. F. B.; SILVA, V.; NASCIENVENG, T. M. da C.; HARDOIN, P. C.; ALMEIDA, J. E. L. de; WEBER, O. L. dos S.; BOEL, E.; DURIGON, V. **Índice EI30 de chuva e sua relação com o coeficiente de chuva do sudoeste do Mato Grosso**. Rev. Brasileira de Ciência do Solo, 15 (3). 339-344, 1991.

NASCIMENTO, J. T.; SILVA, I. F.; SANTIAGO, R. D.; SILVA NETO, L. F. **Efeito de leguminosas nas características químicas e matéria orgânica de um solo degradado**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.3. p.457-462, 2003.

NATURAL CAPITAL PROJECT. **Partners**. (1 página). 2015. Disponível em <<http://www.naturalcapitalproject.org/people/collaborators.html>> Acesso em 02 fev. 2015.

NATURAL CAPITAL PROJECT⁽¹⁾. **User's Guide – Sediment Retention**. 2015. Disponível em <http://data.naturalcapitalproject.org/invest-releases/documentation/current_release/sdr.html#references> Acesso em 20 jul. 2015.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool – user's manual: version 2000**. Blackland Research Center. USA. 458 p. 2002.

NEVES, S. M. A. S.; NEVES, R. J.; FORNELOS, L.F. **Aplicação de imagens do radar interferométrico (SRTM) na avaliação de fragilidade da Bacia do Córrego Cachoeirinha, nos municípios de Cáceres e Porto Estrela/MT**. Rev. Geogr. Acadêmica, Cáceres, v.2, n.2, p. 124-137, 2008. Disponível em: <<http://www.rga.ggf.br/index.php?journal=rga&page=article&op=view&path%5B%5D=37&path%5B%5D=37>>. Acesso em 21 ago. 2015.

OLIVEIRA, A. H.; SILVA, M. A. da; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; NETO, G. K.; FREITAS, D. A. F. de. **Development of Topographic Factor Modeling for Application in Soil Erosion Models**. In: Intechopen (Ed.). Soil Processes and Current Trends in Quality Assessment. p 28. 2013. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/soil-processes-and-current-trends-in-quality-assessment/development-of-topographic-factor-modeling-for-application-in-soil-erosion-models>>, Acesso em 21 jul. 2015.

OLIVEIRA, M. Q. C.; DOMINGUEZ, J. M. L.; MEDEIROS, Y. D. P. **Impacto de mudanças no uso do solo nas características hidrossedimentológicas da Bacia Hidrográfica do Rio Joanes e sua repercussão na zona costeira.** Anais: VII Congresso da ABEQUA. Porto Seguro. Bahia. 1999.

OLIVEIRA, P. T. S.; SOBRINHO, T. A.; RODRIGUES, D. B. B. **Mapeamento do risco a erosão na Área de Proteção Ambiental do córrego Lageado, MS.** Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal, Brasil. p. 4133-4140. 2009. Disponível em <<http://mart.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.13.18.35/doc/4133-4140.pdf>>, Acesso em 22 jul. 2015.

PCBAP - Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai (Pantanal). **Análise integrada e prognóstico da Bacia do Alto Paraguai.** vol 3. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos hídricos e da Amazônia Legal. Programa Nacional do Meio Ambiente. Brasília, PNMA. 1997.

PINHEIRO, L. de S. CUNHA, C. M. L da. **A importância da geração do fator topográfico (LS) da EUPS para modelagem erosiva de bacia hidrográfica.** Revista Geográfica de América Central, Norte América, 2012. Disponível em: <<http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/2585>>, Acesso em 20 ago. 2015.

POTT, A.; POTT, V. J. **Plantas nativas para recuperação de áreas degradadas e reposição da vegetação no Mato Grosso do Sul.** Comunicado Técnico – EMBRAPA. n. 75. EMBRAPA gado de corte. Campo Grande – MS. 2002.

PRUSKI, F. F. **Conservação do solo e da água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica.** 2.ed. Viçosa: UFV, 2009. 279p.

REBUCCI, L. C. S.; DE OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; PERTUSSATTI, C. A.; SOBRINHO, T. A. **Erosividade das chuvas no Estado de Mato Grosso do Sul.** XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande. Brasil. 2009. Disponível em

<https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/26924d35d59cb35f47ec3a6b96d48a2d_de95b74e8d0f54b3389a3c4d474002aa.pdf>, Acesso em 23 jul. 2015.

REIS, G. S.; MIZUSAKI, A. M.; ROISENBERG, A.; RUBERT, R. R. **Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira.** Pesquisas em Geociências, 41 (2): 155-168, maio/ago. 2014. ISSN 1518-2398. Disponível em <<http://www.ufrgs.br/igeo/pesquisas/4102/054102.pdf>>, Acesso em 18 out. 2015

RIMA. **Usina Hidrelétrica de Belo Monte.** Versão 2009. Disponível em <<http://www.eletronbras.com/elb/ri/data/Pages/LUMIS46763BB8PTBRIE.htm>> Acesso em 30 jan. 2015.

RIMA. **Usinas Hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau.** Versão 2005. Disponível em <http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/ambientais/Documents/RIMA%202014%20-%20Relat%C3%B3rio%20de%20Impacto%20Ambiental.pdf>, Acesso em 30 jan. 2015.

RODRIGUES, R.R.; BRANCALION, P.H.S.; ISERNHAGEN, I., **Pacto Pela Restauração da Mata Atlântica: Referencial dos conceitos e ações de restauração florestal.** LERF/ESALQ: Instituto BioAtlântica, 2009. Disponível em <<http://www.pactomataatlantica.org.br/pdf/referencial-teorico.pdf>>, Acesso em 21 out. 2015.

SAAD, S. I. ; ROCHA, H. R. ; Guimarães J. ; Silva, J. M. . **Avaliação do Modelo INTEGRATED VALUATION OF ECOSYSTEM SERVICES AND TRADEOFFS para o Sistema Cantareira: Módulos de Hidrologia e de Perda de Sedimentos.** In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011. Disponível em <https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/67bd0df97b4670702e805d47bd5c37db_7a2c9f02db398099f4ce3ef555308daa.pdf>, Acesso em 02 fev. 2015.

SANTOS, P. L. **Semeadura direta com espécies florestais nativas, para recuperação de agroecossistemas degradados.** (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão. 78p. 2010.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo.** 5.ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 100p. 2005.

SEMAC – Secretaria de Estado de Meio Ambiente, do Planejamento, da Ciência e Tecnologia e Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Mato Grosso do Sul.** 194p. Campo Grande-MS, 2010.

SEMAC – Secretaria de Estado de Meio Ambiente, do Planejamento, da Ciência e Tecnologia e Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul. **Resolução SEMAC nº 11 de 15 de julho de 2014.** Disponível em <<http://www.unisite.ms.gov.br/unisite/control/ShowFile.php?id=186168>> Acesso em 14 dez. 2015.

SILVA, A. M.; ALVARES, C. A. **Levantamento de informações e estruturação de um banco de dados sobre a erodibilidade de classes de solos no estado de São Paulo.** Geociências, v. 24, n. 1, p. 33-41, 2005. Disponível em:<http://www.revistageociencias.com.br/24_1/Art%203.pdf>. Acesso em 24 abr. 2015.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas.** RiMa. 2 ed. 158p. 2007. ISBN – 978-85-7656-099-9

SILVA, A. M. **Rainfall erosion map for Brazil.** Catena, 57 (3). 251-259, 2004.

SMA - Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Resolução SMA 32 de 03 de abril de 2014.** Disponível em <<http://www.ambiente.sp.gov.br/legislacao/resolucoessma/resolucao-sma-32-2014/>>, Acesso em 06 ago. 2015.

STEIN, D. P.; DONZELLI, P. L.; GIMENEZ, A. F.; PONÇANO, W. L.; LOMBARDI NETO, F. **Potencial de erosão laminar, natural e antrópico, na bacia do Peixe - Paranapanema.** In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 3. Anais... ABGE/DAEE, v.1, p.105-135. 1987.

THOMPSON, D.; FIDALGO, E. C. C. **Estimativa da perda de solos por meio da equação universal de perdas de solos (USLE) com uso do InVEST para a bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu- RJ.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos. In:XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2013. Disponível em <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/97697/1/Thompson-e-Fidalgo.pdf>>, Acesso em 02 fev. 2015.

TRANNIN, I. C. B.; ZANELLA, B. P.; CATELANI, C. S.; SIMOES, S. J. C.; MAGALHÃES SOBRINHO, P. **Reabilitação de voçorocas para a contenção do assoreamento e melhoria do desempenho de reservatórios na produção de energia elétrica.** Projeto P&D ANNEL/EDP-ENERPEIXE 2011-2013.

VARGAS, M.A.T.; HUNGRIA, M., ed. **Biologia dos solos dos cerrados.** Planaltina: EMBRAPA-CPAC. 524p. 1997.

VESTENA, L. R. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem.** 2008. 268f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

VIGIAK, O.; BORSELLI, L.; NEWHAM, L. T. H.; McINNES, J.; ROBERTS, A. M. **Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio.** *Geomorphology.* p 74–88. 2012. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X11004478#>>, Acesso em 05 ago. 2015.

XAVIER, F. V.; OLIVEIRA, S. A.; SILVEIRA, A. **Aplicabilidade do modelo hidrossedimentológico AVSWAT na Simulação do transporte de sedimentos, na Bacia**

Hidrográfica do Rio Manso - Mato Grosso, Brasil. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2011. Disponível em <https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/8717d3cddfe56c93e4d0a8518eacbebb_1645635f167a66cc79c41b27d536adec.pdf>, Acesso em 29 ago. 2015.

WATERER, J. G.; VESSEY, J. K. **Effect of low static nitrate concentrations on mineral nitrogen uptake, nodulation, and nitrogen fixation in field pea.** Journal of Plant Nutrition, v.16, p.1775-1789, 1993.

WILLIAMS, J. R.; BERNDT, H. D. **Sediment yield prediction based on watershed hydrology.** Trans. ASAE 20(6): 1100-4. 1977

WILLIAMS, J. R. **Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor.** p. 244-252. In: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources: proceedings of the Sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Miss., Nov. 28-30, 1972 (1975). Disponível em <<https://archive.org/stream/presentprospective40sedi#page/244/mode/2up>>, Acesso em 02 fev. 2015.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains.** Agriculture Handbook n. 282. USDA-ARS. 1965.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** USDA-ARS Agriculture Handbook, Washington DC, 1978.