



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS - UACA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA - PPGMET
CURSO DE DOUTORADO EM METEOROLOGIA

TESE DE DOUTORADO

**MUDANÇA NO USO DE SOLO E NO APORTE DE SEDIMENTOS
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO SUBMÉDIO RIO SÃO FRANCISCO**

MADSON TAVARES SILVA

ORIENTADOR: PROF. DR. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA

CAMPINA GRANDE - PB

AGOSTO, 2014

TESE DE DOUTORADO

**MUDANÇA NO USO DE SOLO E NO APORTE DE SEDIMENTOS
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO SUBMÉDIO RIO SÃO FRANCISCO**

MADSON TAVARES SILVA

ORIENTADOR:

Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA

CAMPINA GRANDE - PB

AGOSTO, 2014

MADSON TAVARES SILVA

**MUDANÇA NO USO DE SOLO E NO APORTE DE SEDIMENTOS
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO SUBMÉDIO RIO SÃO FRANCISCO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Meteorologia.

Área de concentração: Agrometeorologia e Micrometeorologia
Subárea: Modelagem Ambiental

CAMPINA GRANDE - PB
AGOSTO, 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- M586m Silva, Madson Tavares.
Mudança no uso de solo e no aporte de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio Rio São Francisco / Madson Tavares Silva. – Campina Grande, 2014.
121 f. : il.
- Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2014.
- "Orientação: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva".
Referências.
1. Agrometeorologia 2. Modelagem Hidrológica. 3. Evapotranspiração. 4. Escoamento Superficial. 5. SWAT (Soil and Water Assessment Tool).
I. Silva, Vicente de Paulo Rodrigues. II. Título.

CDU 551.502.4(043)

MADSON TAVARES SILVA

**MUDANÇA NO USO DE SOLO E NO APORTE DE SEDIMENTOS
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO SUBMÉDIO RIO SÃO FRANCISCO**

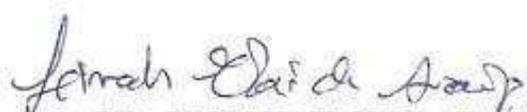
TESE APROVADA EM 29/08/2014

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. LINCOLN ELOI DE ARAUJO
Departamento de Engenharia e Meio Ambiente
Universidade Federal da Paraíba


Prof. Dr. WALKER GOMES DE ALBUQUERQUE
Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar
Universidade Federal de Campina Grande

*“Não importa quem você seja, ou que deseja na vida,
a ousadia em ser diferente reflete na sua personalidade,
no seu caráter, naquilo que você é.
E é assim que as pessoas lembrarão de você um dia”*
(Ayrton Senna)

DEDICATÓRIA

A Deus,
por sempre estar comigo, mesmo quando nem mesmo eu acreditava que iria conseguir
superar as dificuldades encontradas ao longo desta jornada.

A meus pais,
Manoel e Justina, pela compreensão e apoio incondicional, fazendo tudo que era possível e
às vezes quase o impossível para me proporcionar condições que me fizessem uma pessoa
capaz de traçar meus próprios caminhos, sempre com caráter, força e dedicação.

A minha irmã Márcia Tavares,
que sempre esteve ao meu lado, não apenas como irmã, mas sempre como uma amiga com
dedicação quase que exclusiva.

A todos os colegas e amigos do curso de Graduação, Mestrado e do Doutorado em
Meteorologia,
que sempre me ajudaram quando foi necessário, e que hoje fazem parte da minha vida, e
estarão sempre comigo mesmo que por acaso do destino possamos nos separar algum dia.
Agradeço em especial a Argemiro Gomes e Armando Santos por se fazerem presentes nos
momentos difíceis durante esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, por acreditar na minha proposta de trabalho, e não menos importante pelos conselhos, nos momentos de tomadas de decisão, não apenas para minha vida acadêmica, mas para vida em construção de um ser humano justo.

Aos membros da banca examinadora, pela colaboração na melhoria e engrandecimento desse trabalho.

A todos os professores que fazem parte da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, que sempre me ajudaram.

Ao Professor Dr. Raghavan Srinivasan, do Departamento de Ciências e Gestão do Ecossistema e do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade do Texas - A&M pela assistência e paciência na modelagem do SWAT

Aos funcionários da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, em particular a Divanete, que se mostrou sempre disposta a ajudar quando precisei.

A Universidade Federal de Campina Grande, pela excepcional estrutura de ensino e pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo suporte financeiro.

De forma geral, agradeço a todos que de algum modo fizeram parte dessa conquista muito importante na minha vida.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	XIII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Impactos das mudanças no uso de solo em bacias hidrográficas.....	19
2.2. Produção de sedimentos em bacias hidrográficas.....	21
2.3. Sistemas de informações geográficas e modelagem hidrológica.....	22
2.4. Modelo Digital de Elevação – MDE.....	24
2.5. Aplicações do modelo SWAT.....	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1. Área de estudo.....	27
3.2. Descrição das etapas do trabalho.....	32
3.3. Softwares computacionais.....	32
3.4. Levantamento dos aspectos físico-geográficos.....	33
3.4.1. Modelo digital de elevação – MDE.....	34
3.4.2. Mapa de uso e ocupação do solo.....	34
3.4.3. Mapa de solos da região.....	34
3.4.4. Suscetibilidade ao processo de erosão.....	35
3.4.4.1. Erosividade da chuva.....	37
3.4.4.2. Risco de erosão do solo e relevo.....	37
3.5. Descrição do modelo SWAT.....	39
3.5.1. Descrição das equações do modelo.....	42
3.6. Processo de funcionamento do modelo.....	46
3.6.1. Parâmetros climáticos do modelo.....	47
3.6.2. Parâmetros de solo do modelo.....	50
3.6.3. Unidade de resposta hidrológica – HRU.....	53
3.7. Reservatórios e entrada dos dados.....	53
3.8. Análise morfométrica da bacia hidrográfica.....	54
3.9. Análise de sensibilidade.....	55
3.10. Calibração e validação do modelo.....	58
3.11. Análises estatísticas.....	59
3.11.1 Dados dos MDE's, vazão e evapotranspiração potencial.....	59
3.12. Simulação de cenários.....	62
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5. CONCLUSÕES	112
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	28
Figura 2. Fluxograma das etapas do trabalho	32
Figura 3. Fluxograma de processamento do modelo SWAT (Adaptado de King et al., 1996)	41
Figura 4. Localização das estações meteorológicas	48
Figura 5. Localização das estações fluviométricas	50
Figura 6. Distribuição dos pontos de obtenção das amostras de solos na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	51
Figura 7. Perfil topográfico do trecho de coleta das amostras de solos na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	63
Figura 8. Delimitação da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF) realizada pelo ArcSWAT	65
Figura 9. Rede de drenagem da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	67
Figura 10. Mapa altimétrico da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	68
Figura 11. Mapa da declividade da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	69
Figura 12. Mapa de uso e ocupação atual da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	70
Figura 13. Mapa pedológico da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	71
Figura 14. Relação entre a precipitação e o índice de erosividade médio mensal para estação meteorológica da Ingazeira (a), de Ouricuri (b), de Verdejante (c) de Cabrobó (d) de Custódia (e) de Petrolândia (f) de Bebedouro (g) de Remanso (h) e do Morro do Chapéu (i)	75
Figura 15. Médias mensais do índice de erosividade e da precipitação pluvial para estação meteorológica da Ingazeira (a), de Ouricuri (b), de Verdejante (c) de Cabrobó (d) de Custódia (e) de Petrolândia (f) de Bebedouro (g) de Remanso (h) e do Morro do Chapéu (i)	76
Figura 16. Distribuição espacial do risco de degradação dos solos para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	77
Figura 17. Distribuição espacial da vulnerabilidade da declividade para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	78
Figura 18. Valores mensais da precipitação e vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para validação, com dados da estação fluviométrica do Juazeiro (1995 a 2004)	81
Figura 19. Relação entre as vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para o período de calibração, com dados da estação fluviométrica do Juazeiro	82
Figura 20. Relação entre as vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para o período de validação, com dados da estação fluviométrica do Juazeiro	83
Figura 21. Valores mensais da precipitação e vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para validação, com dados da estação fluviométrica de Abreus (1993 a 2000)	84
Figura 22. Relação entre as vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para o período de validação, com dados da estação fluviométrica de Abreus	85
Figura 23. Valores mensais da precipitação e vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para validação, com dados da estação fluviométrica de Floresta (2005 a 2006)	86
Figura 24. Relação entre as vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para o período de validação, com dados da estação fluviométrica de Floresta	87

Figura 25. Relação entre as estimativas de ETP pelo modelo SWAT e Linacre para estação meteorológica da Ingazeira (a), de Ouricuri (b), de Verdejante (c) de Cabrobó (d) de Custódia (e) de Petrolândia (f) de Bebedouro (g) de Remanso (h) e do Morro do Chapéu (i)	90
Figura 26. Distribuição dos totais acumulados da precipitação na região do submédio do rio São Francisco para os anos de (a) 1995, (b) 1996, (c) 1999, (d) 2000, (e) 2004, (f) 2008, (g) 2010 e (h) média 1993-2010	93
Figura 27. Escoamento superficial na região do submédio do rio São Francisco para os anos de (a) 1995, (b) 1996, (c) 1999, (d) 2000, (e) 2004, (f) 2008, (g) 2010 e (h) média 1993-2010	95
Figura 28. Distribuição das classes de solos da Bacia Hidrográfica do Rio Brígida	97
Figura 29. Aporte de sedimentos na região do submédio do rio São Francisco para os anos de (a) 1995, (b) 1996, (c) 1999, (d) 2000, (e) 2004, (f) 2008, (g) 2010 e (h) média 1993-2010	99
Figura 30. Uso e ocupação do solo nas condições do cenário I para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	100
Figura 31. Escoamento superficial médio anual nas condições do cenário I para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	101
Figura 32. Aporte de sedimentos médio anual nas condições do cenário I para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	102
Figura 33. Uso e ocupação do solo nas condições do cenário II para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	103
Figura 34. Escoamento superficial médio anual nas condições do cenário II para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	104
Figura 35. Aporte de sedimentos médio anual nas condições do cenário II para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	105
Figura 36. Uso e ocupação do solo nas condições do cenário III para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	106
Figura 37. Escoamento superficial médio anual nas condições do cenário III para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	107
Figura 38. Aporte de sedimentos médio anual nas condições do cenário III para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	108
Figura 39. Variabilidade média mensal das componentes do balanço hidrossedimentológico para o cenário atual e cenários de mudança da cobertura da superfície (a) produção de água, (b) evapotranspiração real, (c) evapotranspiração potencial, (d) umidade do solo, (e) escoamento superficial e (f) aporte de sedimentos	110

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1. Características da resolução espacial dos modelos digitais de elevação	33
Tabela 2. Classificação do potencial erosivo anual da chuva	37
Tabela 3. Escala de vulnerabilidade para as classes de declividade	38
Tabela 4. Escala de vulnerabilidade para tipos de solo	38
Tabela 5. Localização e informações referentes as estações meteorológicas	47
Tabela 6. Dados utilizados pelo gerador climático WXGEN	49
Tabela 7. Características físico-hídricas médias dos solos na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	52
Tabela 8. Características físicas e hidrológicas dos reservatórios inseridos na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	54
Tabela 9. Características morfométricas que foram avaliadas na BHSRSF	55
Tabela 10. Parâmetros passíveis de calibração do modelo SWAT	56
Tabela 11. Análise estatística dos modelos de elevação digital	64
Tabela 12. Características dimensionais da rede de drenagem da bacia de drenagem Bacia Hidrográficas do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	66
Tabela 13. Características climáticas das estações meteorológicas inseridas na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)	72
Tabela 14. Variabilidade média mensal do coeficiente de chuva e erosividade média anual para as estações meteorológicas inseridas na BHSRSF	73
Tabela 15. Parâmetros sensíveis selecionados após a análise de sensibilidade	79
Tabela 16. Análise estatística das vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para o período de calibração e validação, com dados da estação fluviométrica do Juazeiro	81
Tabela 17. Análise estatística das vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para o período de validação, com dados da estação fluviométrica de Abreus e Floresta	83
Tabela 18. Análise estatística dos modelos de evapotranspiração potencial (ETP)	88
Tabela 19. Valores médios mensais e anuais da precipitação pluvial (mm) para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco	91

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ANA	- Agência Nacional das Águas
ASCE	- American Society of Civil Engineers
ASTER	- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BHSRSF	- Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco
CBHSF	- Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
CN	- Curve Number (Curva Número)
CODEVASF	- Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
CREAMS	- Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPIC	- Erosion Productivity Impact Calculator
ETP	- Evapotranspiração potencial
ETr	- Evapotranspiração real
FAO	- Food and Agriculture Organization
GLEAMS	- Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems
HRU	- Unidades de Resposta Hidrológica
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
MDE	- Modelo digital de elevação
MUSLE	- Equação Universal da Perda de Solo Modificada
NASA	- National Aeronautics and Space Administration
ONU	- Organização das Nações Unidas
SiBCS	- Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
SRTM	- Shuttle Radar Topographic Mission
SUDENE	- Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
SWAT	- Soil and Water Assessment Tool
SWRRB	- Simulator for Water Resources in Rural Basins
UFMG	- Universidade Federal de Campina Grande
USDA-ARS	- United States Department of Agriculture - Agriculture Research Service
USLE	- Equação Universal da Perda de Solo
UTM	- Universal Transversa de Mercator

MUDANÇA NO USO DE SOLO E NO APORTE DE SEDIMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO SUBMÉDIO RIO SÃO FRANCISCO

RESUMO

O mapeamento e avaliação de risco de erosão é uma ferramenta importante para o planejamento da gestão de recursos naturais, permitindo que sejam implementadas estratégias de gestão mais sustentáveis a longo prazo. Neste trabalho objetivou-se calibrar e validar o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) para a simulação do escoamento superficial e aporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Submédio do Rio São Francisco (BHRSF). Para isso, foram usados mapas georreferenciados de uso atual do solo, unidades pedológicas e modelo digital de elevação, além de dados meteorológicos e hidrológicos da área de estudo. No estudo foram utilizadas séries históricas de dados mensais de vazões oriundos de três estações fluviométricas e dados meteorológicos diários provenientes de nove estações climatológicas distribuídas na área de estudo. O resultado das simulações para diferentes usos do solo possibilitou a identificação de áreas que apresentam o maior potencial a erosão hídrica, pedológica e associada ao relevo, como também toda a interação da interface do sistema solo-planta-atmosfera. O modelo SWAT foi calibrado e validado com sucesso utilizando-se os valores de vazão de forma adequada para estação fluviométrica do Juazeiro, tendo-se obtido valores de EMP de -3,2% e 0,8% para os períodos de calibração e validação, respectivamente. O maior valor para o fator R foi encontrado para a estação de Remanso (5315 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹) definido como potencial erosivo moderado a forte. A mudança da cobertura de pastagem para solo exposto verificada no cenário 3 indicou o impacto das alterações das características da superfície tendo em vista as condições climáticas de regiões semiáridas, as componentes do escoamento superficial e aporte de sedimentos foram as mais sensíveis as alterações, apresentando alterações em seus valores em condições atuais de cobertura.

Palavras-Chave: Modelagem hidrológica; evapotranspiração; escoamento superficial; SWAT.

CHANGE IN USE OF SOIL AND ON THE CONTRIBUTION OF SEDIMENT BASIN LOW-MIDDLE SÃO FRANCISCO RIVER

ABSTRACT

The mapping and assessment of risk of erosion is important for planning of natural resource management tool, allowing strategies to be implemented more sustainable long-term management. This work aimed to calibrate and validate the SWAT model (*Soil and Water Assessment Tool*) for the simulation of runoff and sediment delivery in the Lower Basin Watershed of Rio São Francisco (BHSRSF). For this, georeferenced maps of current land use, soil units and digital elevation model were used in addition to meteorological and hydrological data of the study area. In the study time series of monthly streamflow data from three gauged stations and daily meteorological data from nine meteorological stations distributed in the study area were used. The result of simulations for different soil enabled the identification of areas that present the greatest potential hydro, pedological and associated erosion of the relief, as well as all the interaction of soil-plant-atmosphere system interface. The SWAT model was calibrated and validated successfully using the flow values appropriately for fluviometric season Juazeiro, having obtained values of EMP of -3.2% and 0.8% for the calibration and validation periods, respectively. The largest value for the R factor was found for the station Backwater ($5315 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) defined as moderate to strong erosive potential. The change of pasture cover for bare soil observed in scenario 3 indicated the impact of changes in surface characteristics in view the climatic conditions of semi-arid regions, the components of runoff and sediment delivery were the most sensitive to changes, with alterations on their values in current conditions of coverage.

Keywords: Hydrologic modeling; northeast; evapotranspiration; Runoff; SWAT.

1. INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro é um dos maiores e mais populosos do mundo. Segundo Cirilo et al. (2007) ele se estende por uma área que abrange a maior parte de todos os Estados da região Nordeste (86,46%), a parte setentrional do Estado de Minas Gerais (11,01%) e o norte do Espírito Santo (2,51%); e ocupa uma área total de 974.752 km². Essa extensa região apresenta vegetação rasteira como tipo de cobertura predominante, proporcionando uma alta taxa de escoamento superficial, acelerando o processo de evaporação. Com a associação das características edáficas dessa região que possui em algumas áreas do semiárido a predominância de solo argiloso não há muita infiltração e em consequência disso dificilmente tem a recarga dos aquíferos (Amaral, 2003). Outro fator natural é a proximidade da linha do Equador, pois as baixas latitudes condicionam à região temperaturas elevadas e o número alto de fotoperíodo, em virtude da maior incidência perpendicular dos raios solares sobre a superfície do solo, havendo um índice elevado de evaporação (Amaral, 2003). A deficiência hídrica causa uma forte dependência da intervenção do homem no sentido de garantir, por meio de obras de infraestrutura hidráulica, o armazenamento de água para abastecimento humano e demais usos produtivos, como açudes, poços artesianos dentre outros (Izique, 2005).

As bacias hidrográficas nordestinas, principalmente aquelas situadas na porção semiárida, têm sido degradadas ao longo de décadas devido à extensiva atividade antrópica como a retirada da vegetação nativa e o uso irracional do solo para agricultura e pecuária (Aragão et al., 2002). Como relatam Albuquerque et al. (2001) o desmatamento indiscriminado da vegetação nativa para a agricultura e as queimadas sucessivas com manejo inadequado do solo tem contribuído, juntamente com as secas prolongadas, para comprometer o frágil equilíbrio do meio ambiente destas regiões. A erosão dos solos tem causas relacionadas à própria natureza, como a quantidade e distribuição das chuvas, a declividade, o comprimento e a forma das encostas, o tipo de cobertura vegetal e também a ação do homem, como o uso e o manejo da terra que na maioria das vezes, tende a acelerar os processos erosivos (Mendonça & Guerra, 2004). O processo erosivo pode ser minimizado com o uso integrado de práticas em que o ambiente é considerado como um todo. Desta forma, para que a exploração agrícola possa ser conduzida em bases conservacionistas, torna-se necessário um planejamento racional levando em consideração o conjunto de seus principais atributos físicos, ecológicos e econômicos (Pruski, 2009). As práticas conservacionistas de caráter vegetativo se valem da própria vegetação para defender o solo contra a erosão (Bertoni & Lombardi Neto, 2005), baseando-se, portanto, na busca de

manutenção da superfície do solo coberta (Pruski, 2009). A cobertura vegetal é um fator condicionante do processo erosivo. Hudson (1995) relata que a cobertura vegetal funciona como uma capa protetora para o solo e a sua presença é o fator chave na redução da erosão hídrica.

Nas últimas décadas, o interesse por estudos de impactos ambientais causados pelas atividades humanas tem movido um considerável número de pesquisadores a estudar novas ferramentas, inclusive aquelas que buscam simular as transformações ocorridas através das mudanças no uso da água e do solo, levando em consideração a questão da distribuição espacial dentro da bacia em estudo (Santos et al., 2005). Neste contexto, Machado (2003) relata que a modelagem hidrológica em bacias hidrográficas é um problema complexo, identificando como a maior limitação na utilização dos modelos a dificuldade de manipular a grande quantidade de dados relacionados com a variabilidade espacial e temporal das características que descrevem a heterogeneidade do comportamento hidrológico, no qual essa variabilidade implicará em limitações na aplicação de modelos. As dificuldades se tornam ainda maiores para modelar satisfatoriamente os processos de erosão do solo e transporte dos poluentes pelo escoamento superficial. Portanto, a utilização de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) integrado ao modelo hidrológico atenua este problema de gerenciamento e manipulação de dados. Segundo Tsou & Whitemorez (2001), o SIG fornece uma plataforma integrada para gerenciar, analisar e exibir dados e pode facilitar a sua compilação, calibração do modelo e a exibição de parâmetros e resultados. A necessidade de planejar adequadamente o aproveitamento dos recursos hídricos e de solo na região semiárida do Brasil é indiscutível, mas, são poucos os estudos no Brasil e quase nenhum para a região nordestina sobre o uso da modelagem hidrossedimentológica para auxiliar no processo do planejamento das bacias hidrográficas.

Os modelos numéricos aplicados na hidrologia apresentam-se como ferramentas de grande importância nos estudos do ciclo hidrológico e científicos relacionados com a gestão hídrica e problemas práticos. Desde meados dos anos 1960, diversos modelos hidrológicos foram estabelecidos; os modelos têm sido desenvolvidos desde bases mais conceituais simples até mais tarde com o desenvolvimento da computação e inserção dos SIG's desenvolvendo assim os modelos distribuídos de base física. Dentre os modelos distribuídos de base física, o *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT desenvolvido no início de 1990, é um modelo aplicado em escala de bacia hidrográfica (Arnold et al., 1993). SWAT foi projetado para incorporar dados de entrada de origem numérica e vetorial com objetivos de permitir a análise dos processos hidrológicos em grande escala espacial, seu processamento também é feito em escala contínua do tempo, permitindo simulações de mudança na

cobertura do solo e alterações nas componentes do clima (Arnold et al, 1993.; Arnold & Fohrer, 2005). Neste sentido, o presente trabalho tem os seguintes objetivos:

- **Geral:** Calibrar e validar o modelo SWAT para a simulação do escoamento superficial e aporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco – BHSRSF. A partir da simulação de diferentes cenários de uso do solo, pretende-se verificar as melhores alternativas de uso racional dos recursos de solo, água e vegetação.
- **Específicos:** através da aplicação do modelo hidrossedimentológico SWAT, validar as componentes de evapotranspiração potencial (ETP) e vazão. Avaliar as respostas dos modelos de elevação digital (MDE). Determinar o risco de erosão hídrica da bacia a partir do índice de erosividade (R) da EUPS, bem como analisar o uso do modelo SWAT para condições hidrológicas na região semiárida do Brasil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Impactos das mudanças no uso de solo em bacias hidrográficas

A cobertura vegetal das bacias hidrográficas, como um dos componentes do uso do solo, pode sofrer várias modificações ao longo do tempo quer sejam naturais ou antrópicas, e tais modificações produzem os mais variados impactos sobre o meio ambiente (Santos et al., 2002). A influência da vegetação no balanço hídrico tem sido muito estudada, dada a complexidade de sua relação com o ciclo hidrológico e sua participação em processos como a evapotranspiração e a interceptação da precipitação, afetando o comportamento do escoamento superficial na bacia hidrográfica (Santos et al., 2002). A mudança no uso da terra é um dos impactos mais notórios em paisagens agrícolas e urbanas em muitas regiões do mundo. Além disso, as mudanças climáticas associadas às mudanças no uso da terra deverão ter um forte impacto sobre o balanço hídrico de bacias hidrográficas (Defries & Eshleman, 2004).

A conversão de determinado uso do solo em outros ambientes, como florestas tropicais ou cerrados em pastagens, altera o ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica, especialmente o equilíbrio entre precipitação e evapotranspiração e, conseqüentemente, a resposta do escoamento superficial da área (Costa et al., 2003). Segundo Tucci & Clarke (1998), a distribuição da chuva ao longo do ano, a profundidade do solo e a declividade do terreno também são aspectos fundamentais na análise de mudanças de uso do solo. Ainda de acordo com Collischonn (2001), em regiões de solos pouco profundos, a mudança de cobertura vegetal tende a ter menos impacto sobre o escoamento, porque nesta condição, o armazenamento no solo pouco influencia a geração de escoamento e, em regiões de relevo acidentado, em que o escoamento superficial ocorre com maior facilidade, os impactos das mudanças de cobertura vegetal também tendem a ser menores. A conversão das florestas e pastagens naturais em áreas de cultivo agrícola pela atividade humana tem afetado a troca de energia, água e carbono entre a atmosfera e a superfície do solo (Collischonn, 2001).

Dentre as atividades mais impactantes sobre o meio ambiente, a agricultura intensiva apresenta-se como agente na degradação ambiental através dos processos erosivos de perdas de solos e conseqüente produção de grande quantidade de sedimentos que são transportados para as redes de drenagem dos rios (Sharma & Rai, 2004). Tais redes de drenagem apresentam-se como importante componente do ciclo de carbono, devido ao importante papel dos rios na fase terrestre do ciclo hidrológico, regulando a mobilização e transferência de componentes da terra para o mar. Estudos que buscam uma melhor compreensão do ciclo

global do carbono têm expressado crescente preocupação com a quantificação dos sedimentos e transporte de carbono pelos rios até o mar (Ludwig & Probst, 1998). Nesse contexto Degens et al. (1984) ressaltam que a erosão do carbono da terra e do seu subsequente transporte para mar através dos rios representa uma via importante no ciclo global do carbono podendo levar à redução da fertilidade do solo, perda de nutrientes, e quedas de produtividade das culturas em fazendas. Numa revisão de sistemas agrícolas mecanizadas em que o trigo, milho, soja, e cevada foram plantadas, Bakker et al. (2005) descobriram que, em média a erosão do solo, reduziu a produtividade das culturas em cerca de 4% para cada 10 cm de solo perdido.

Muitos estudos têm analisado os efeitos das mudanças no uso da terra sobre os fluxos hidrológicos em bacias hidrográficas (Costa et al., 2003; Ott & Uhlenbrook, 2004; Wegehenkel, 2004; Chen et al., 2005; Dougherty et al., 2007). Entretanto, a maioria desses estudos analisou o efeito da mudança no uso da terra sobre o balanço hídrico sem considerar que eventuais mudanças também podem provocar alterações sobre outras componentes da paisagem, tais como as propriedades do solo. Para Wahab et al. (2009), o entendimento como as mudanças no uso do solo influenciam os padrões de variação das vazões ajudam a planejar estratégias que minimizem os efeitos indesejáveis de futuras mudanças no uso e ocupação do solo. Por outro lado, segundo Hundecha et al. (2008), há pouca informação científica sobre a relação quantitativa entre as propriedades do uso do solo e os mecanismos de geração do escoamento superficial.

Sabendo-se que a intensidade das atividades agrícolas determinam em grande parte a magnitude da perda de solo e de água superficial, as consequências esperadas estão associadas a maior quantidade de sedimentos e lixiviação de poluentes nas águas superficiais, e que tais fatores somados conduzem para degradação do habitat aquático, afetando os diversos usos da água, e introduzindo toxinas na cadeia alimentar humana (Gitau et al., 2006). O controle efetivo das perdas de água e solo em bacias hidrográficas agrícolas requer o uso de práticas de manejo, quantificando a produção de sedimentos oriundos de terras agrícolas e transportados para os cursos d'água, tais práticas tornam-se essenciais para o controle da erosão do solo e execução adequada da redução do fluxo de transporte de sedimentos e cargas poluidoras para rede de drenagem, melhorando assim a qualidade da água (Heathwaite et al., 2005). No entanto, medições de campo e coleta de dados sobre a suspensão sedimentos e carbono orgânico particulado são geralmente de difíceis tarefas, raramente alcançados ao longo prazos em grandes bacias hidrográficas (Oeurng et al., 2011). Dessa forma, ferramentas apropriadas são necessárias para a melhor avaliação de longo prazo nos processos de erosão dos solos e como apoio à decisão para

planejamento e implementação de medidas adequadas para a gestão dos recursos naturais globais; tais ferramentas incluem vários modelos hidrológicos e de erosão do solo, bem como os sistemas de informações geográficas (SIG).

2.2. Produção de sedimentos em bacias hidrográficas

A erosão do solo pela água tem sido intensamente estudada no mundo todo ao longo das últimas décadas e é considerada como uma das principais ameaças à qualidade do solo e redução na produtividade agrícola (Boardman & Poesen, 2006). A produção de sedimentos pode ser aumentada pela mudança no uso de solo, afetando o seu desenvolvimento e diminuindo a capacidade de recuperação das áreas afetadas, dessa forma acelerando o processo de degradação e desertificação da paisagem (Boardman & Poesen, 2006). A produção de sedimentos é definida como a quantidade de solo erodido que é transportado pela água até certo ponto da bacia hidrográfica ou segmento do rio numa determinada escala de tempo especificado (Lin et al., 2007). Sendo dado como um resultado líquido da erosão e deposição dos processos dentro de uma bacia, a produção de sedimentos é dependente de todas as variáveis que controlam a erosão (Lin et al., 2007), incluindo o clima, área de drenagem, solos, geologia, topografia, vegetação e uso da terra.

A produção de sedimentos é fortemente afetada pelos fenômenos que atuam sobre a superfície da paisagem, fatores como a topografia, intensidade das chuvas, cobertura vegetal e classe de solo (Powell et al., 1996). Entretanto, tais autores ressaltam que estudos sobre essa temática aplicada em paisagens áridas são pouco conhecidos, principalmente porque eles são difíceis de medir diretamente. Em função da maioria dos rios em paisagens desérticas serem efêmeros, e mesmo em pequenas inundações pode ter intervalos de recorrência de grandes dimensões, a pequena série de dados históricos e consistidos associados a reduzida rede de monitoramento agravam a qualidade dos estudos (Powell et al., 1996).

Nas últimas décadas, muitos modelos hidrossedimentológicos têm sido propostos para descrever e prever a erosão do solo pela água e produção de sedimentos associado, no entanto, estes modelos, que são incapazes de descrever toda a erosão dos solos e processos inerentes ao transporte de sedimentos, ainda têm de ser aplicado com sucesso em escala de bacia (Vente & Poesen, 2005). Apesar do desenvolvimento de uma gama de fisicamente baseado a erosão do solo e equações de transporte e produção de sedimentos a previsão de tais fenômenos é obtida principalmente através de simples modelos empíricos ou de modelos de regressão (Verstraeten et al., 2003). Muitos modelos empíricos são aplicados em

bacias hidrográficas que abrangem uma grande variabilidade de uso de solo tanto em escalas regionais e nacionais (Restrepo et al., 2006); conseqüentemente, um grande número de variáveis tem de ser tomadas em conta. Além disso, como estes modelos concentrar-se na produção de sedimento anual em vez do evento específico, é difícil determinar a física real dos fatores responsáveis pela observação espacial e temporal das variações na sedimentação (Restrepo et al., 2006). Por outro lado, alguns modelos são baseados em eventos ocorridos em pequenas bacias hidrográficas, tendo em vista a melhor compreensão de processos associados à produção de sedimentos. Tal produção em pequenas bacias hidrográficas é de grande importância quando se investiga as ligações entre a erosão do solo e o transporte de sedimentos em grandes rios (Restrepo et al., 2006). No entanto, o detalhamento dos processos de base é necessário para compreensão na escala de pequenas bacias hidrográficas, todavia é difícil desenvolver modelos de simulação que adequadamente descrevam com eficiência as respostas hidrológicas (Lane et al., 2000).

2.3. Sistemas de informações geográficas e modelagem hidrológica

Devido à evolução tecnológica nos últimos anos, os modelos hidrológicos aplicados em bacias hidrográficas são cada vez mais usados para facilitar a gestão alternativa na área de alocação de recursos hídricos e controle de inundações (Setegn et al., 2009). Muitos modelos hidrológicos e de erosão do solo são projetados para descrever os processos de erosão, sedimentação e os processos físicos que controlam a transformação de precipitação em escoamento superficial (Setegn et al., 2009). Modelos hidrológicos aplicados na escala de bacias hidrográficas são frequentemente utilizados para quantificar e prever as conseqüências sobre as alterações nos componentes hidrológicos em função da mudança de uso do solo (Fohrer et al., 2001). As simulações dos efeitos hidrológicos de cenários de uso da terra são de fundamental interesse na integração de decisões, a fim de aperfeiçoar todas as ações de gestão hídrica na bacia.

Existem diferentes modelos sendo aplicados em estudos em todo mundo, descrevendo principalmente os processos hidrológicos de forma física ou por base de abordagens conceituais. Na maioria dos casos os modelos de base física são preferidos, pois grande parte dos seus parâmetros de entrada é mensurável e passível de modelagem em função de alterações nas condições de contorno (Moussa et al., 2002). Entretanto, Machado & Vettorazzi (2003) relatam que a modelagem hidrológica em bacias hidrográficas é um problema complexo, verificando como maior limitante na utilização dos modelos a dificuldade de manipular a grande quantidade de dados relacionados com a variabilidade

espacial e temporal das características que descrevem a heterogeneidade do comportamento hidrológico, no qual essa variabilidade implicará em limitações na aplicação de modelos. Todavia durante a última década, a integração dos SIG e modelagem ambiental têm facilitado uma conexão que oferece uma capacidade para prever as mudanças ambientais e avaliar os impactos em escala local, regional e global (Corwin et al., 2003). Neste contexto, Tucci & Clarke (1998) afirmam que o SIG e o Sensoriamento Remoto auxiliam na aquisição dos dados físicos, fazendo parte da estrutura de entrada de alguns modelos, ou seja, a integração entre SIG e modelos hidrológicos, atenua principalmente os problemas de manipulação e gerenciamento de dados. Segundo Tsou & Whittemorez (2001), um Sistema de Informação Geográfica (SIG) fornece uma plataforma integrada para gerenciar, analisar e exibir dados e pode facilitar a compilação destes, a calibração do modelo e a exibição de parâmetros e resultados.

As principais características de SIG estão em integrar, em uma única base de dados, informações provenientes de dados cartográficos, dados de censo e cadastro urbano, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno; e oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar, visualizar e inserir o conteúdo da base de dados georreferenciados (Dutra et al., 1997). Atualmente, através dos SIGs, pode-se obter uma descrição espacial detalhada de variáveis da região em estudo vinculadas a modelos hidrológicos distribuídos, contribuindo assim para se conhecer com maiores detalhes os processos complexos que, quando analisados de forma conjunta, convergem para uma maior precisão para análise do fenômeno (Gomes & Rodrigues, 1998). A integração dos SIGs com modelos hidrológicos permite a realização de inúmeras operações relacionadas à modelagem hidrológica de forma fácil e eficiente, tais como a caracterização física da bacia hidrográfica, delimitação, geração da rede de drenagem, divisão da bacia hidrográfica em áreas homogêneas, etc.

Com relação aos dados de entrada, Machado & Vettorazzi (2003) relata que eles podem ter origem das mais diversas fontes (imagens de satélite, mapas topográficos, mapas de solo, hidrografia, etc) e em diferentes escalas e cujos resultados são gerados comumente em forma de mapas. Os dados tratados em geoprocessamento têm como principal característica a diversidade de fontes geradoras e de formatos apresentados. Há pelo menos três maneiras de utilização de um SIG: como ferramentas para produção de mapas; como suporte para análise espacial de fenômenos e como banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial Machado & Vettorazzi (2003).

2.4. Modelo Digital de Elevação – MDE

Um modelo digital de elevação (MDE) fornece informações suficientes para que em um ambiente SIG sejam analisadas as declividades do terreno, estabelecida a direção do fluxo superficial e, por conseguinte, gerada a rede de drenagem para a bacia (Melo, 2008). A partir do conhecimento do exutório facilmente uma bacia pode ser delimitada. Através também da classificação de imagem de satélite, é possível analisar as mudanças de cobertura vegetal de uma área e, ainda, prever e localizar os impactos causados pela ação antrópica, permitindo um gerenciamento de bacias mais eficiente e eficaz (Melo, 2008). Ainda segundo esse autor, o relacionamento entre os dados classifica o acoplamento entre subsistemas de acordo com a proximidade entre os dados. A integração com compartilhamento ocorre quando um subsistema acessa diretamente os dados armazenados conforme o modelo e a estrutura de dados do outro subsistema. Já na integração sem compartilhamento de dados não se observa a existência de um banco de dados único para o sistema acoplado, acarretando na necessidade de uma ferramenta externa para intercâmbio de dados, fazendo do SIG o gerenciador de tais dados, enquanto que no compartilhamento de dados há troca de dados entre as ferramentas, que favorece o desempenho do modelo.

Com o advento de sensores orbitais, modelos de elevação, que permitem a determinação da rede de drenagem puderam ser extraídos através da interferometria. Este processo é o modo de operação de alguns sensores imageadores de microondas, como o exemplo do SRTM - *Shuttle Radar Topographic Mission*, ou da estereoscopia, através de sensores ópticos que adquirem imagens com retrovisada, a exemplo do ASTER/Terra - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (Fückner et al., 2009). A missão SRTM foi realizada para adquirir dados de altimetria de todo o globo terrestre a partir de sensores ativos (radar). A resolução original das imagens geradas é de 30 metros; porém, para a América do Sul a NASA liberou imagens com resolução de 90 metros. O produto é georreferenciado ao datum WGS84, em coordenadas geográficas decimais e pode ser obtido via Internet. Os dados ASTER GDEM são produzidos através de um consorcio entre o *METI - Ministry of Economy, Trade and Industry*, do Japão e a *NASA - National Aeronautics and Space Administration*, dos Estados Unidos, para construção de uma modelo digital de elevação global de livre acesso. A partir do dia 29 de junho de 2009, modelos digitais de elevação, construídos a partir de pares estereoscópicos de imagens oriundas da plataforma EOS AM-1 com o instrumento ASTER, sensor VNIR, foram disponibilizados gratuitamente e sem restrições (Rodrigues et al., 2010).

2.5. Aplicações do modelo SWAT

Um dos modelos mais utilizados no mundo para simular os processos da erosão do solo e transporte de poluentes é o modelo hidrossedimentológico *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT. Este é um modelo distribuído que pode ser acoplado a um ambiente SIG, que considera a variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica. O SWAT foi desenvolvido com o objetivo de estimar o impacto de diferentes práticas agrícolas na quantidade e qualidade da água, na perda do solo e carga de poluentes em uma bacia hidrográfica (Neitsch et al., 2005). Sendo um modelo de base física, e de parâmetros semi-distribuídos aplicado em escala de bacia hidrográfica funcionando de forma contínua em passo de tempo diário. Realizando a simulação dos processos hidrológicos, produção de sedimentos, perda de nutrientes e a perda de pesticidas em águas superficiais e subterrâneas, além de caracterizar os efeitos das práticas agrícolas sobre a produção de água em grandes bacias (Neitsch et al., 2005). Ainda de acordo com esse autor, tal modelo incorpora os efeitos do clima, escoamento superficial, evapotranspiração, crescimento da cultura, irrigação fluxo de água subterrânea, carga de nutrientes, transporte de pesticidas, bem como os efeitos em longo prazo de diferentes práticas de gestão agrícola.

O modelo SWAT utiliza como componentes de entradas dados pré-formatados numa base SIG para determinar a rede de drenagem e os limites topográficos, resultando constituintes de qualidade em uma bacia hidrográfica (Neitsch, et al., 2005). Essa ferramenta é útil no planejamento hídrico, monitoramento de enchentes e planejamento do uso da água em geral (Jayakrishnan et al., 2005). Este modelo provou ser uma ferramenta eficiente na previsão anual e mensal de vazão e qualidade da água. Mais recentemente, o modelo SWAT também foi testado para a previsão de proliferação bacteriana e microbiana (Parajuli et al., 2009). Análises das principais componentes que interferem na produção de fluxo no modelo SWAT em função da variabilidade climática e escalas temporais foram realizadas por Cibir et al. (2010); nesse estudo os principais parâmetros analisados foram associados aos processos hidrológicos e de uso de solo.

Procedimentos de autocalibração e análise de sensibilidade são procedimentos de grande importância no modelo SWAT, pois garantem que as parametrizações adotadas para cada sub-bacia sejam adequadas; dessa forma são fontes de estudos de muitos autores. Nesse particular, Muleta & Nicklow, (2005) aplicaram tais ferramentas numa bacia hidrográfica no sudeste do estado de Illinois – EUA. Similarmente, Dhar & Mazumdar, (2009) aplicaram o modelo SWAT para avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre as componentes do balanço hídrico na bacia hidrográfica de Bankura no leste de Bengali – Índia. Tais autores

verificaram a grande influência das componentes do clima sobre a produção de água na bacia, destacando o aumento da evapotranspiração e diminuição significativa do escoamento de base.

No Brasil os estudos de Baldissera (2005) analisando as vazões líquidas mensais nas condições da Bacia do Rio Cuiabá, Mato Grosso, e Machado & Vettorazzi (2003) avaliando a produção de sedimentos na bacia do Ribeirão dos Marins – SP são referências preliminares na aplicação do modelo SWAT. A simulação de produção e transporte de sedimento também foi objeto de estudo por Schultz et al. (2011) quando aplicaram o SWAT na bacia do Altíssimo Rio Negro, localizada no sul do país. Os autores associaram à maior produção de sedimentos a ocorrência de maior escoamento. Por outro lado, Uzeika (2009) aplicou o SWAT na microbacia de Arvorezinha, Rio Grande do Sul, com objetivo de simular dados hidrossedimentológicos; entretanto, tal autora não utilizou nenhuma ferramenta de calibração. Análises de cenários de mudança de uso de solo também foi objeto desse estudo. As simulações apresentaram grande sensibilidade à mudança de cobertura e os resultados de forma geral foram adequados para pequenas bacias. O trabalho de Carvalho Neto (2011) foi pioneiro na aplicação do modelo SWAT para uma bacia hidrográfica localizada no semiárido nordestino. O autor utilizou dois diferentes MDEs nas simulações: um gerado a partir da interpolação de dados de campo e outro obtido através de sensoriamento remoto. A parametrização e validação do modelo foram realizadas em nível de sub-bacias, apontando um bom desempenho do modelo, conforme valores obtidos para r^2 e coeficiente de Nash-Sutcliffe. A simulação de cenários foi realizada para a Bacia do Riacho dos Namorados, na situação atual de uso do solo, com e sem a presença dos açudes. Nesse estudo, também foram simulados quatro cenários de mudanças na cobertura do solo da bacia, nos quais a bacia poderia estar com: (a) vegetação nativa, (b) reflorestada com algaroba, (c) com a monocultura de milho e (d) totalmente desmatada. As simulações permitiram avaliar a influência dos açudes e constatar que o reflorestamento com algaroba protegeria a bacia melhor do que a vegetação nativa e, a cultura de milho é apenas ligeiramente melhor que o solo nu em termos de erosão.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

Localização

O estudo foi desenvolvido na região do Submédio do Vale do rio São Francisco, que abrange áreas dos Estados da Bahia e Pernambuco, estendendo-se da cidade de Remanso até a cidade de Paulo Afonso ambas no Estado da Bahia (Figura 1), com 110.446,00 km², ou 17% da área da Bacia do rio São Francisco. Essa região tem 440 km de extensão e a sua população é de 1,944 milhões de habitantes. Ela é composta pelas sub-bacias dos rios Pontal, Garças, Brígida, Pajeú, Moxotó e Xingó, pela margem esquerda; enquanto na margem direita ficam as sub-bacias de Tourão, Salgado, Vargem, Curaçá, Macuru e Poço Comprido assim como descrito pela Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF, 1999).

Clima

O Submédio do Vale do São Francisco está localizado entre os paralelos 8 e 9°S, cujo clima, BSh segundo classificação Köppen, é caracterizado como tropical semi-árido, com temperatura média anual em torno dos 26 °C, pluviosidade de aproximadamente 500 mm e altitude de 330 m em relação ao nível do mar (Teixeira & Azevedo, 2006).

O período chuvoso concentra-se entre os meses de novembro e abril, com 90% do total anual. A quadra chuvosa, de janeiro a abril, contribui com 70% do total anual. Os meses mais quentes são outubro e novembro e os mais frios junho e julho. As médias mensais de temperatura média do ar variam de 24,1 °C a 28,0 °C, ocorrendo uma pequena amplitude térmica anual, atribuída à proximidade da região em relação ao equador terrestre, com desvio padrão menor que 2,0 °C (Teixeira, 2010).

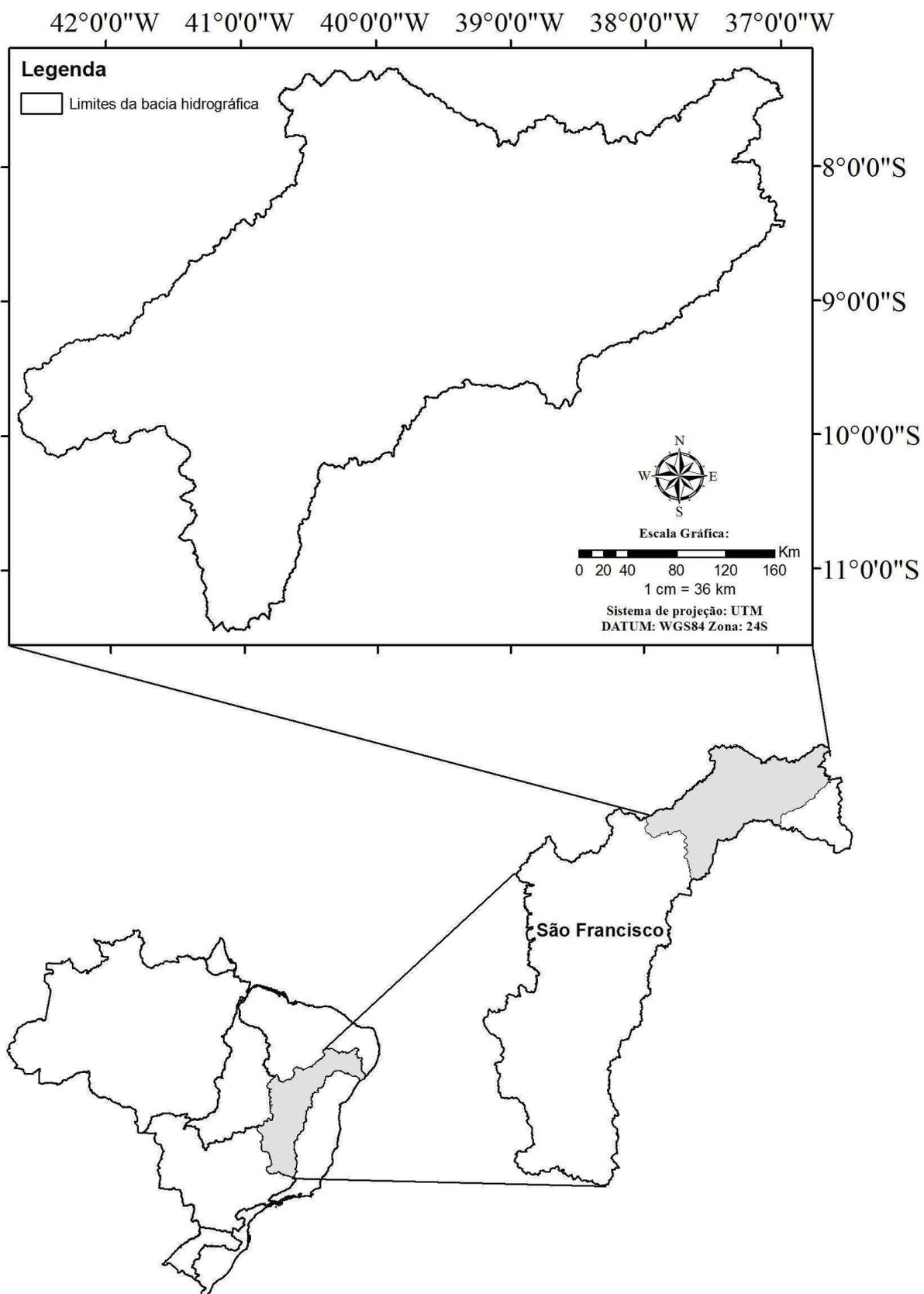


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

Geologia

Na região do Submédio do Vale do São Francisco, a geologia e o material originário exercem papel de grande importância na formação dos solos, em função da grande variação litológica da região. Segundo CODEVASF (1999), ocorrem áreas do cristalino com predomínio de gnaisses, granitos, migmatitos e xistos, áreas do cristalino recoberto por materiais mais ou menos arenosos e áreas sedimentares recentes de depósitos fluviais. Os xistos e gnaisses micáceos contêm intercalações de quartzitos e calcários cristalinos. Os xistos são compostos por muscovita-biotita-estauroлита-xistos granatíferos, quartzo-micaxisto, clorita-biotita-xistos granatíferos e sericita-clorita-xisto.

Os gnaisses são placosos ou em banco cinza-claro a cinza-avermelhado, constituídos de quartzo, plagioclásio, muscovita e mais raramente biotita e granada (CODEVASF, 1999). Na área, ocorrem materiais relacionados ao Pré-Cambriano com cobertura pedimentar, constituída por materiais arenosos, areno-argilosos, argilo-arenosos e material macroclástico, principalmente concreções ferruginosas e seixos de quartzo CODEVASF (1999). É encontrada, também, com certa frequência, pedregosidade superficial constituindo um pavimento desértico de calhaus e cascalhos de quartzo e quartzito, muitos já bastante ferruginizados; e concreções de ferro, onde ocorrem os Luvisolos. São comuns os afloramentos de quartzo branco-leitoso e, também, afloramentos de micaxistos cinzento-oliváceo, porém sem grande representatividade (CODEVASF, 1999).

Relevo

A altitude varia de 200 a 800 m na Chapada Cretácea do Araripe, que se prolonga para leste através da Serra dos Cariris, esculpida em rochas graníticas e gnáissicas de idade pré-cambriana. Do lado sul, ressaltam-se as formas tabulares do Raso da Catarina, esculpidas em sedimentos da bacia de Tucano, com altitude variando de 200 a 300 m (CODEVASF, 1999). Topograficamente, a região de estudo se caracteriza por apresentar relevo plano a ondulado com vales muito abertos. Essa característica é devida à menor resistência à erosão dos xistos, onde sobressaem formas abauladas esculpidas em rochas graníticas e gnáissicas. A maior parte da região está inserida na Depressão Sertaneja, que constitui uma superfície de pediplanação (depressão periférica do São Francisco), na qual ocorrem cristas e outeiros residuais (CODEVASF, 1999). Não são observados grandes inselbergues, sendo as fases mais movimentadas do relevo observadas em encostas onde a

formação geológica parece ser mais rica em quartzo e quartzito, mais resistentes à erosão (Silva et al., 2000).

Solos

A cobertura pedológica no Submédio do Vale do São Francisco está intimamente relacionada com o clima, o material de origem, a vegetação e o relevo CODEVASF, (1999). Há predominância de solos das classes dos Latossolos e Argissolos, além da ocorrência de Neossolos Quartzarênicos, Planossolos, Cambissolos, Vertissolos, Luvisolos e, nas áreas mais movimentadas, principalmente, Neossolos e Litossolos CODEVASF, (1999). Os Luvisolos e os Neossolos Litólicos são pouco profundos e muito suscetíveis à erosão; os Neossolos Quartzarênicos e os Neossolos Regolíticos apresentam textura muito grosseira, refletindo-se em altas taxas de infiltração, baixa retenção de umidade e baixa fertilidade; os Planossolos contêm altos teores de sódio CODEVASF (1999). Os solos irrigáveis são pouco extensos, sendo os Vertissolos, Argissolos, Latossolos e alguns Cambissolos, os principais. Com os modernos sistemas de irrigação localizada (microaspersão e gotejamento), os Neossolos Quartzarênicos foram incorporados aos sistemas produtivos, principalmente com o cultivo da videira. Margeando todo o rio e seus afluentes, encontra-se a faixa de Neossolos Flúvicos CODEVASF (1999).

Vegetação

A vegetação de caatinga é predominante em quase toda a área do Submédio do Vale do São Francisco, constituída principalmente por formações xerófilas, lenhosas, decíduais, normalmente espinhosas, com presença de plantas suculentas, tanto com padrão arbóreo como arbustivo, pouco densa a densa e com estrato herbáceo estacional (Andrade Lima, 1992).

Dados sócio-econômicos

O Submédio do Vale do rio São Francisco é o principal centro produtor e exportador de uvas de mesa do Brasil, destacando-se os municípios de Santa Maria da Boa Vista e Petrolina, no Estado de Pernambuco, com 54% da área cultivada, seguidos dos municípios de Juazeiro, Casa Nova, Curaçá e Sento Sé, no Estado da Bahia, onde a videira tem uma grande importância socioeconômica pelo grande número de empregos gerados (Silva &

Correia, 2000). A área plantada com essa cultura tem se expandido significativamente nos últimos anos nessa região. O sistema agrário é baseado na pecuária/agricultura tradicional integrada. Nas zonas mais favoráveis, desenvolve-se uma agricultura diversificada, ao lado da bovinocultura. As estruturas de produção são variáveis, mas há predominância de pequenas e médias propriedades. A existência de perímetros irrigados nessa área possibilita a exploração de outras culturas, além das de subsistência, tais como: cebola, tomate, melão, melancia, uva, manga, coco, banana, entre outras. A densidade demográfica na maior parte da área ainda é fraca (8 a 10 habitantes/km²), sendo considerada forte (80 habitantes/km²) nas áreas onde se desenvolve o sistema de policultura/pecuária (Silva & Correia, 2000)

Segundo Lacerda et al. (2004) nos últimos trinta anos, com os altos volumes de investimentos públicos e privados, sobretudo em sistemas de irrigação, a agricultura irrigada, principalmente a fruticultura, tornou-se a principal atividade econômica da região, produzindo impactos significativos sobre a renda e emprego (Lacerda et al., 2004).

Segundo dados da CODEVASF, do ano de 2010, existem cerca de 120 mil hectares irrigados no Submédio do Vale do São Francisco onde é produzida mais de um milhão de toneladas de frutas, com destaque para a manga que ocupa 23 mil hectares e a uva com 12 mil hectares, além de outras culturas, como acerola, goiaba coco verde, melão, melancia entre outros.

O Submédio do Vale do São Francisco detém a única Indicação Geográfica para produtos da Região Nordeste, é a Indicação de Procedência para uvas de mesa e mangas. O certificado foi concedido pelo INPI, no dia 7 de julho de 2009, ao Conselho da União das Associações e Cooperativas dos Produtores de Uvas de Mesa e Mangas do Vale do Submédio São Francisco (UNIVALE) (INPI, 2009).

3.2. Descrição das etapas do trabalho

As principais etapas do trabalho podem ser descritas conforme ilustrado na Figura 2.

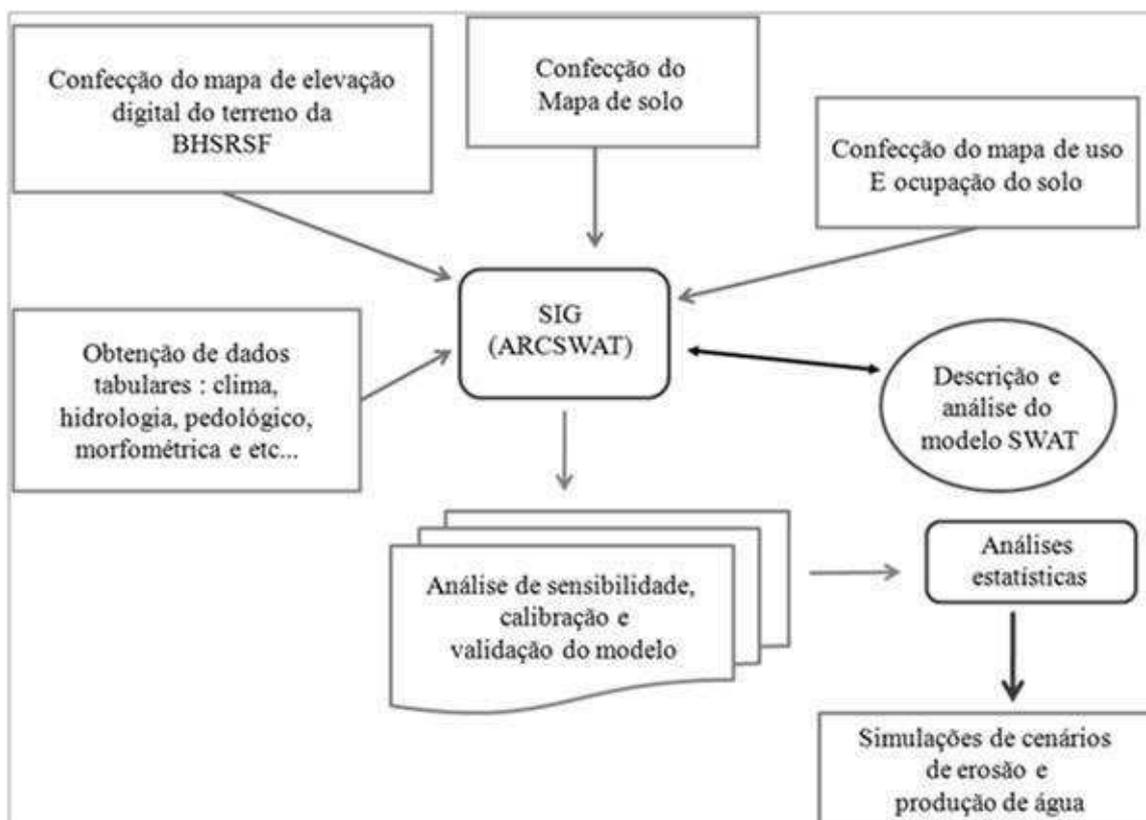


Figura 2. Fluxograma das etapas do trabalho

3.3. Softwares computacionais

Os seguintes softwares foram utilizados para a edição dos dados de entrada e saída do modelo SWAT.

- Erdas Imagine 9.2 (Processamento de dados de sensoriamento remoto)
- ArcGis 9.3 (Banco de dados e processamento de informações geográficas)
- ArcSWAT 2009 (Simulações hidrossedimentológicas)
- *pcpSTAT* (Gerador dos parâmetros climatológicos da precipitação)
- *dew* (Gerador dos parâmetros termodinâmicos)
- *SWAT - Check 2012* (Análise das componentes do balanço hidrossedimentológico)

3.4. Levantamento dos aspectos físico-geográficos

3.4.1. Modelo digital de elevação do terreno - MDE

Para realização deste trabalho foram coletados 38 pontos de controle na área de estudo através de GPS (GARMIN E-TREX 10) e seguidamente inseridos no SIG ArcGIS 9,3, também foram obtidas imagens de sensores remotos para composição dos modelos digitais de elevação (MDE). , As características da resolução espacial de cada modelo são apresentadas na Tabela (1). Foram utilizados, neste estudo, três conjuntos distintos de MDEs. O primeiro gerado a partir de dados do SRTM, o segundo do ASTER GDEM, e o por último dados do Topodata que vem ser o melhoramento do projeto SRTM (Valeriano 2004). Todas as imagens SRTM, ASTER e TOPODATA foram referenciadas ao Datum WGS84 Zona 24, e ao Sistema de projeção UTM.

Tabela 1. Características da resolução espacial dos modelos digitais de elevação

MDE	Resolução espacial
Aster	30x30m
Topodata	30x30m
SRTM	90x90m

Foi utilizado para discretização da bacia o modelo digital de elevação (MDE) com células de 90 metros apresentando precisão vertical compatível com a escala de 1:100.000 para a extração automática da rede de drenagem e delimitação das sub-bacias da BHSRSF, tal modelo foi obtido no site da EMBRAPA Monitoramento por satélite (CNPM) sendo fruto de um projeto chamado BRASIL EM RELEVO (As cartas utilizadas são referentes à área da BHSRSF: SC-23-X-D, SC-23-Z-D, SB-24-Y-C, SB-24-Y-D, SB-24-Z-C, SB-24-Z-D, SC-24-V-A, SC-24-V-B, SC-24-V-C, SC-24-V-D, SC-24-X-A, SC-24-X-B, SC-24-X-C, SC-24-X-D, SC-24-Y-A, SC-24-Y-B e SC-24-Y-C) o qual utiliza dados da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) referentes ao Brasil.

3.4.2. Mapa de uso e ocupação do solo

Para a confecção do mapa de uso do solo foi realizada uma classificação de forma supervisionada de um mosaico de cenas do TM/Landsat 5 que compreenderá a área de estudo, através do método intitulado Máxima Verossimilhança. Neste método, foram definidas as assinaturas espectrais das categorias conhecidas e das categorias de interesse. O SIG ERDAS 9.2 associa cada pixel da imagem à assinatura mais semelhante, através de uma função de densidade de probabilidade estatística (Bayes), na qual avalia-se a probabilidade de um determinado pixel pertencer a uma determinada categoria. Desta forma, cada pixel foi classificado na categoria a qual ele tem a maior probabilidade de associação (Mather, 1999). Com base nessas informações, foram definidas as áreas de treinamento, tendo como temas de interesse: sombra, solo exposto, vegetação, agricultura, pasto, água e área urbana. Para adaptar-se ao banco de dados presente na interface do modelo SWAT, foi feita uma analogia das classes obtidas pela classificação da imagem de satélite ao de uso e ocupação de solo presentes no modelo.

3.4.3. Mapa de solos da região

As informações que subsidiaram esta avaliação foram basicamente do mapa de solos na escala 1:5.000.000 (IBGE, 2004). Esse mapa temático, fruto da parceria entre a EMBRAPA e o IBGE, permitiu uma visualização espacial dos principais tipos de solos segundo as especificações e nomenclatura indicadas pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (EMBRAPA, 1999). Foram realizadas coletas de amostras de solo na área de estudo para validar as informações referentes ao mapa de solo, seguidamente as análises foram efetuadas no Laboratório de Solos da Universidade Federal de Campina Grande. Os solos foram caracterizados fisicamente em termos de densidade do solo (d_s), densidade de partículas do solo (d_p), porosidade total (p) e teores de areia, silte e argila, segundo a metodologia descrita em Kiehl (1979) que serviram de suporte dos dados de entrada do modelo SWAT.

3.4.4. Suscetibilidade ao processo de erosão

3.4.4.1. Erosividade da chuva

A erosividade da chuva foi estimada a partir das análises de chuvas individuais para estação de Bebedouro. A precipitação foi dividida por sua duração e se obteve, assim, a intensidade, dada em mm h^{-1} , conforme Foster et al. (1981). Para determinação do índice de erosividade (EI_{30}), fez-se necessária a multiplicação de dois parâmetros específicos das precipitações erosivas: energia cinética total da chuva (E_c), em $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ e intensidade máxima em 30 min (I_{30}), em mm h^{-1} .

De acordo com Wischmeier & Smith (1978) foi considerada a Equação 1 para estimativa da energia cinética por milímetro de chuva:

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \log I \quad (1)$$

em que:

E_c = energia cinética em $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$;

I = intensidade de chuva em mm hora^{-1} .

A energia cinética por incremento de chuva foi então determinada com a Equação 2:

$$E_{ci} = E_c \times \text{Vol} \quad (2)$$

em que:

Vol - quantidade de chuva do incremento (lâmina precipitada), mm

E_c - energia cinética por milímetro de chuva, $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$

A energia cinética total foi obtida pelo somatório da energia cinética de cada incremento, segundo a Equação 3:

$$E_{ct} = \sum E_{ci} \quad (3)$$

Logo, o EI_{30} foi calculado pela Equação 4:

$$EI_{30} = Ect \times I_{30} \quad (4)$$

em que:

EI_{30} - índice de erosão, $MJ \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ hora}^{-1}$

E_c - energia cinética por milímetro de chuva, $MJ \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$

I_{30} - intensidade máxima da chuva em 30 min, $\text{mm}^{-1} \text{ hora}^{-1}$

O valor limite do campo superior de definição da variável EI_{30} é $76 \text{ mm}^{-1} \text{ hora}^{-1}$, a qual gera uma energia cinética igual a $0,283 \text{ MJ mm}^{-1} \text{ hora}^{-1}$. Nas planilhas de chuva, foram consideradas todas as chuvas com intensidade superior a 10 mm, calculando-se a energia cinética, duração e intensidade máxima em trinta minutos dessas chuvas. Desta forma foi calculado, para cada precipitação, o índice EI_{30} em $MJ \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ hora}^{-1}$.

Somando-se os índices EI_{30} de todas as chuvas individuais e erosivas de cada mês, obteve-se a erosividade mensal das chuvas e, somando-se os índices EI_{30} mensais, obteve-se então a erosividade anual das chuvas ou parâmetro (R) da EUPS para bacia hidrográfica em estudo. O coeficiente de chuva ou índice médio mensal de erosão (R_c) foi calculado pelo método proposto por Lombardi Neto (1977), dado pela Equação 5:

$$R_c = \frac{Pm^2}{Pa} \quad (5)$$

em que:

R_c - coeficiente de chuva (mm)

P_m - precipitação média mensal (mm)

P_a - precipitação média anual (mm)

Por fim a relação direta entre o coeficiente de chuva ($R_c = Pm^2/Pa$) e o índice de erosividade (EI_{30}) possibilitou a determinação do potencial erosivo da chuva na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco – BHSRSF. O potencial erosivo anual da chuva foi classificado a partir da Tabela 2 segundo Carvalho (2008).

Tabela 2. Classificação do potencial erosivo anual da chuva

Erosividade ($MJ\ mm\ (ha\ h)^{-1}$)	Classe de erosividade
$R \leq 2452$	Erosividade fraca
$2452 < R \leq 4905$	Erosividade moderada
$4905 < R \leq 7357$	Erosividade moderada a forte
$7357 < R \leq 9810$	Erosividade forte
$R > 9810$	Erosividade muito forte

3.4.4.2. Risco de erosão do solo e relevo

A metodologia para elaboração de mapas que subsidiem a análise de vulnerabilidade Natural à Erosão desenvolvida por Crepani et al. (2001) tem como objetivo apoiar o Zoneamento Ecológico-Econômico apoiado no conceito de Ecodinâmica (Tricart, 1977), que define uma relação entre os processos de morfogênese e pedogênese onde ao predominar a morfogênese prevalecem os processos erosivos modificadores das formas de relevo, e ao predominar a pedogênese prevalecem os processos formadores de solos.

A estabilidade ou vulnerabilidade, a resistência ao processo natural de erosão das unidades de paisagem natural é definida pela análise integrada do conjunto rocha, solo, relevo, vegetação e clima. Seguindo esta proposta, cada um destes temas recebe uma pontuação de vulnerabilidade variando entre 1 e 3. Desta forma as unidades mais estáveis apresentarão valores mais próximos de 1,0, as intermediárias ao redor de 2,0 e as unidades de paisagem mais vulneráveis estarão próximas de 3,0. Como resultado final é apresentado a vulnerabilidade de cada unidade ambiental em função das informações provenientes de cada tema avaliado: substrato rochoso, relevo, vegetação, solos e clima.

Dessa forma, conforme os temas selecionados cinco grandes categorias hierárquicas foram adotadas para a produção final da carta: estável, baixo risco, médio risco, risco moderado, alto risco. Para cada tema selecionado utilizou-se a seguinte classificação conforme Ross (1994). Para o tema declividade do terreno, utilizaram-se os seguintes intervalos de classe e os valores de vulnerabilidade (Tabela 3).

Tabela 3. Escala de vulnerabilidade para as classes de declividade

Classes de Declividade (%)	Risco de Vulnerabilidade
< 3	Estável
3 – 6	Baixo Risco
6 – 12	Médio Risco
12 – 20	Risco Moderado
> 20	Alto Risco

Para a hierarquização da variável solo (Tabela 4) foram levados em consideração os tipos de solo encontrados na área de estudo. Assim, os tipos de solo são classificados conforme Ross (1994) de acordo com o grau de vulnerabilidade, e das características texturais, estruturais, plasticidade, grau de coesão das partículas e profundidade/espessura dos horizontes.

Tabela 4. Escala de vulnerabilidade para tipos de solo

Tipos de solo	Valor de Vulnerabilidade	Risco de Vulnerabilidade
Latossolo Vermelho-Amarelo	1,0	Baixo Risco
Latossolo Amarelo	1,0	
Argilossolo Vermelho-Amarelo	2,0	Médio Risco
Argilossolo Vermelho	2,0	
Luvissolo Crômico	2,0	
Planossolo Nátrico	2,0	
Planossolo Háplico	2,0	
Cambissolo Háplico	2,5	Moderado
Neossolo Regolítico	3,0	Alto Risco
Neossolo Litólico	3,0	
Neossolo Quartzarênico	3,0	
Neossolo Flúvico	3,0	
Vertissolo Cromado	3,0	

3.5. Descrição do modelo SWAT

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo matemático aplicado em bacias hidrográficas para avaliar o impacto da mudança de uso da terra sobre os fluxos hidrológicos (Arnold & Fohrer, 2005; Zhang et al., 2007). As simulações realizadas pelo modelo são baseadas em processos distribuídos realizados em escala diária de tempo.

O SWAT é um software livre, desenvolvido pelo USDA-ARS (*United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service*) que incorpora fundamentos de vários modelos específicos que contribuíram de forma significativa para o seu desenvolvimento, sendo resultado direto do modelo SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*), desenvolvido a partir da integração dos modelos GLEAMS (*Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems*), CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*) e EPIC (*Erosion-Productivity Impact Calculator*). As características básicas do modelo SWAT são apresentadas por Arnold et al. (1998), como sendo:

- O modelo requer informações específicas sobre o clima, as propriedades do solo, a topografia, a vegetação e as práticas de manejo do solo que ocorrem na bacia hidrográfica. Os processos físicos associados ao movimento da água, movimento dos sedimentos, crescimento das culturas, ciclagem de nutrientes, entre outros, são diretamente modelados pelo modelo utilizando esses dados de entrada. Um aspecto positivo dessa característica do modelo é que foi desenvolvido para ser aplicado em bacias não monitoradas;
- É computacionalmente eficiente, podendo simular extensas bacias hidrográficas sem gastos excessivos de tempo;
- É um modelo contínuo, capaz de simular os efeitos das mudanças no uso e manejo do solo em longos períodos de tempo. O modelo não foi desenvolvido para simular eventos isolados de precipitação.

A bacia hidrográfica foi discretizada com base no relevo, em sub-bacias, que por sua vez são parametrizadas através das Unidades de Resposta Hidrológica (*Hydrologic Response Units – HRUs*). Cada HRU corresponde a uma única combinação de uso da terra, tipo do solo e declividade da superfície. Subdividir a bacia em áreas contendo combinações únicas possibilita ao modelo considerar diferentes condições hidrológicas para diferentes usos e solos.

Segundo Baldissera (2005), o modelo foi desenvolvido para operar em intervalo diário e é capaz de simular longos períodos, para gerar os efeitos das variações de manejo no uso e ocupação do solo. De acordo com Arnold et al.(1998), o escoamento é calculado para cada HRU e propagado para obter o escoamento total para a sub-bacia, o que aumenta a precisão das predições e fornece uma melhor descrição física do balanço hídrico na bacia. A estrutura do modelo é baseada em comandos para propagar o escoamento, os sedimentos e os produtos agroquímicos pela bacia, sendo estes comandos organizados em oito componentes principais, que são hidrologia, clima, sedimentos, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola (Lopes, 2008). O processo de modelagem com o SWAT se dá inicialmente através da inserção de dados relacionados às características físico-climática da bacia. Os dados de entrada no modelo SWAT correspondem aos planos de informação cartográficos (PIs) e a dados alfanuméricos. A Figura 3 apresenta o fluxograma de processamento do modelo SWAT.

Segundo a classificação de Melo (2010) quanto ao relacionamento entre os dados a integração entre o SWAT e o SIG é feita com compartilhamento com os dois softwares. Já com relação ao grau de complexidade, há uma integração avançada caracterizada pela incorporação de processos mais complexos de simulação e análise do fenômeno em estudo. Ainda segundo a classificação proposto por Melo (2010), há integração interna entre estas ferramentas, estando o modelo conectado no SIG.

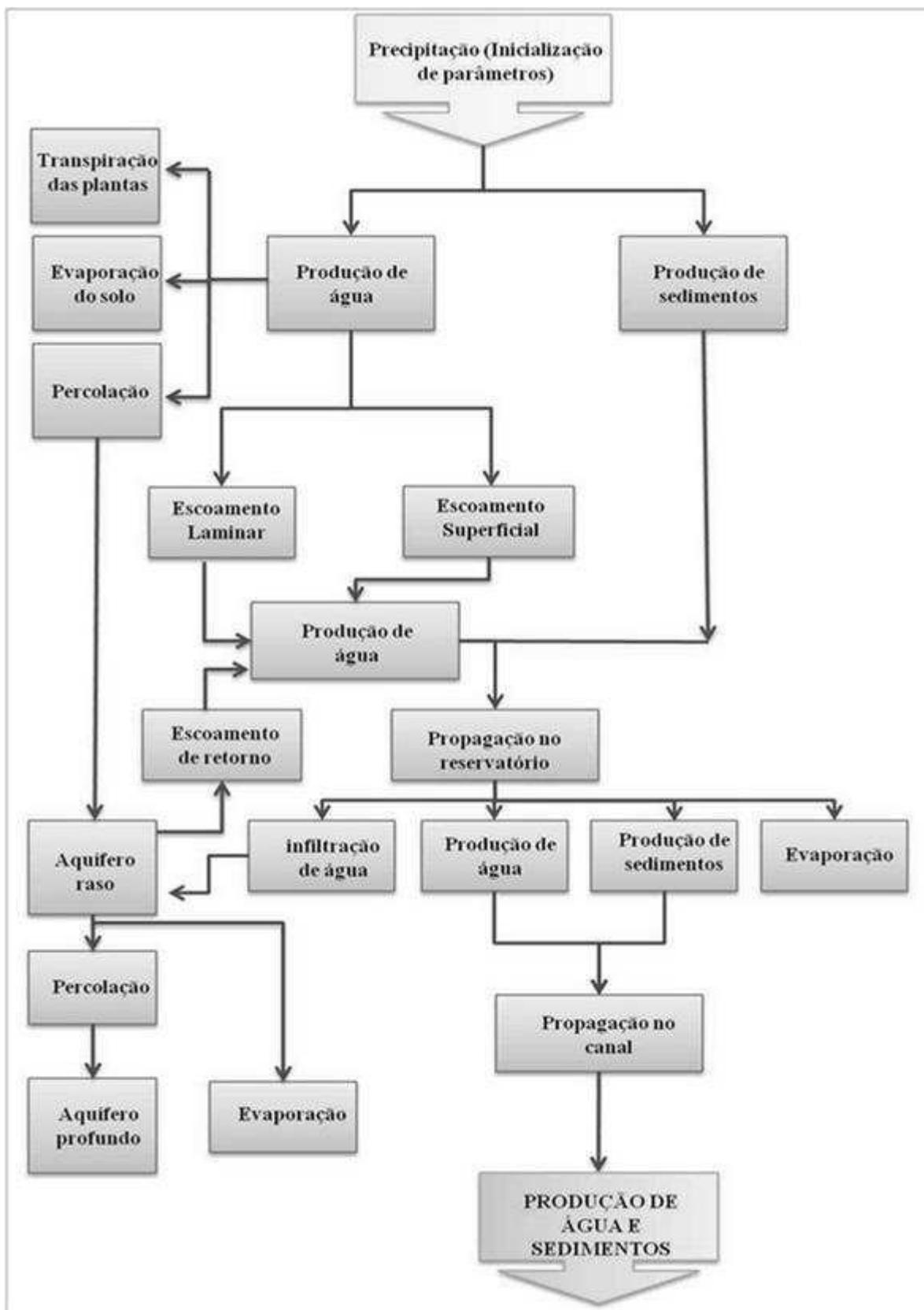


Figura 3. Fluxograma de processamento do modelo SWAT (Adaptado de King et al., 1996)

3.5.1. Descrição das equações do modelo

O modelo SWAT permite que vários processos físicos sejam simulados na bacia hidrográfica e a sua simulação será realizada com dois componentes: o escoamento superficial ou a fase de água e a erosão e transporte de sedimentos ou a fase de sedimentos. Estes processos serão apresentados nesta seção e estão conforme a documentação teórica do modelo SWAT elaborada por Neitsch et al. (2010).

Fase do sedimento no ciclo hidrológico

A fase do sedimento controla a quantidade de água (tratando efetivamente do ciclo hidrológico), sedimentos, nutrientes e pesticidas que chegam ao canal de cada sub-bacia. Os itens nutrientes e pesticidas serão suprimidos da descrição a seguir, por não serem objetos de estudo deste trabalho.

Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico simulado pelo SWAT foi composto de quatro volumes de controle, são eles: reservatório superficial, reservatório subsuperficial, reservatório subterrâneo (aquífero raso) e reservatório subterrâneo (aquífero profundo). No modelo SWAT a determinação da produção de água da bacia hidrográfica tem como base a Equação 6, definida pelo balanço hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=1}^t (P - Q_{sup} - ET - W_a - Q_{sub}) \quad (6)$$

em que:

SW_t : conteúdo final de água no solo (mm);

SW_0 : conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como a diferença entre a umidade de capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (mm);

t: tempo (dias);

P: precipitação pluvial (mm);

Q_{sup} : escoamento superficial (mm);

ET: evapotranspiração (mm);

W_a : percolação (mm), e

Q_{sub} : fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

Escoamento superficial

O escoamento superficial na rotina de simulação do SWAT se dá através do Método de Curva Número (CN), elaborado em 1954 pelo Serviço de Conservação do Solo (*Soil Conservation Service*, atualmente *Natural Resources Conservation Service*) dos Estados Unidos (Zhang et al., 2007). Tal método foi desenvolvido para fornecer, de maneira consistente, uma estimativa do escoamento superficial para diferentes usos e ocupação do solo e tipo de solo, considerando ainda a umidade prévia do solo (Neitsch, 2005). Com diversas revisões, este método possui relevante popularidade entre os hidrólogos, devido a simplicidade, estabilidade e eficiência das previsões (Zhang et al., 2007). O escoamento superficial por este método se dá conforme as Equações (7) e (8):

$$Q_{sup} = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)}, P > 0,2S \quad (7)$$

$$Q_{sup} = 0, P \leq 0,2S \quad (8)$$

em que:

Q_{sup} : escoamento superficial diário (mm);

P: precipitação pluvial diária (mm), e

S: parâmetro de retenção.

O parâmetro de retenção, S , varia: (a) na bacia, por causa do tipo de solo, uso da terra, manejo e declividade; e (b) com o tempo, por causa da variação do conteúdo de água no solo. S é relacionado à CN pela Equação (9):

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (9)$$

O fator CN foi determinado diariamente, no modelo SWAT, variando numericamente de 1 a 100, sendo o limite inferior representativo de um solo totalmente permeável e o limite superior de um solo que converterá toda a precipitação em escoamento (totalmente impermeável) (Neitsch, 2005). Por fim, a consideração da umidade antecedente do solo pode corrigir o valor de CN, quando há uma situação seca, ponto de murcha, ou uma situação em que está saturado, capacidade de campo (Neitsch, 2005). A condição de CN_2

expressa a condição normal do solo, CN_1 indica a condição do solo em ponto de murcha enquanto que CN_3 o solo na capacidade de campo. O cálculo de CN_1 e CN_3 se dá através uso do valor médio, CN_2 , conforme as Equações (10) e (11).

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{(100 - CN_2) + \exp[2,533 - 0,0636(100 - CN_2)]} \quad (10)$$

$$CN_3 = CN_2 \times \exp[0,0673(100 - CN_2)] \quad (11)$$

Evapotranspiração Potencial (ETP)

A evapotranspiração potencial foi calculada pelo modelo SWAT através do método de Penman-Monteith de acordo com a Equação (12). Necessitando, portanto, para a sua estimativa de dados médios climáticos das condicionantes termodinâmicas da atmosfera. A partir da determinação da evapotranspiração potencial, a evapotranspiração real foi determinada levando em consideração a demanda evaporativa da precipitação interceptada pela cobertura vegetal, a transpiração dos vegetais e a evaporação do solo.

$$ETP = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (12)$$

em que:

Rn: Saldo de Radiação ($Mj/m^2 \text{ dia}^{-1}$),

G: Fluxo de calor no solo ($Mj m^{-2} \text{ dia}^{-1}$),

Ta: Temperatura média do ar ($^{\circ}C$),

u2: Velocidade média diária do vento a 2m de altura,

es: Pressão de saturação de vapor média diária (kPa),

ea: Pressão atual de vapor média diária (kPa),

Δ : Declividade da curva de pressão de vapor.

Γ : Constante psicrométrica (kPa/ $^{\circ}C$).

Em virtude da indisponibilidade de dados para toda a área de estudo, a ETP foi estimada pelo método de Linacre a partir da Equação (13) para as estações meteorológicas utilizadas no estudo como critério de controle dos valores de saída do modelo.

$$ETP = \frac{500 \frac{T_{med} + (0,006 H)}{100 - (L)} + 15 (T_{med} - T_0)}{(80 - T_{med})} \quad (13)$$

em que:

T_{med} : Temperatura média (°C),

H : Altitude (m), para a localidade,

L : Latitude (°S), para a localidade,

T_0 : Temperatura de Orvalho (°C).

Sedimentos

A erosão do solo foi estimada no modelo SWAT através da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MEUPS). A MEUPS é a versão modificada da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS). Essa equação começou a ser implantada no final da década de 1950 pelo Serviço de Conservação dos Solos dos Estados Unidos. É um modelo empírico, baseado em grandes bases de dados de campo, que estima a erosão distribuída e concentrada com base nos valores de quatro grandes fatores intervenientes no processo erosivo: erosividade climática, erodibilidade dos solos, topografia, e uso e manejo da terra (Ward & Elliot, 1995). O fator de energia da chuva considerado na EUPS é substituído pelo fator de escoamento superficial na MEUPS. Esta modificação permite estimar a produção de sedimentos em eventos individuais. A estimativa da produção de sedimentos foi permitida porque o escoamento superficial é função das condições de umidade antecedente e este fator representa a energia utilizada pela desagregação e transporte de sedimentos.

A Equação Universal de Perda de Solo Modificada segundo (Williams, 1995) foi definida pela Equação (14):

$$sed = 11,8 (Q_{sup} \times q_{pico} \times \text{Área}_{HRU})^{0,56} \times K \times C \times LS \times P \times CFRG \quad (14)$$

em que:

sed: produção de sedimentos após evento de precipitação no dia, em toneladas;

Q_{sup} : escoamento superficial (mm);

q_{pico} : vazão de pico do escoamento (m³/s);

Área_{HRU} : área da Unidade de Resposta Hidrológica (ha);

K: erodibilidade do solo [(0,013ton m² hr)/(m³ ton cm)];

C: é o fator de uso e manejo do solo (adimensional);

LS: fator topográfico (adimensional);

P: fator das práticas conservacionistas (adimensional), e

CFRG: fator de fragmentação esparsa (adimensional).

3.6. Processo de funcionamento do modelo

A aplicação do modelo SWAT foi realizada a partir da entrada de dados geoespaciais e inserção de informações para composição do banco de dados climatológico e pedológico. A inserção dos planos de informação cartográficos e dos dados alfanuméricos no modelo ArcSWAT ocorreu via interface apropriada (SIG). A partir da inserção do MDE foi obtida a rede de drenagem e assim foi possível realizar a delimitação e discretização da bacia em sub-bacias. Já a sobreposição do mapa de uso e cobertura do solo, do mapa pedológico e das classes de declividade da bacia permitiu a formação das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs); essas por sua vez, possuem uma única combinação dos mapas e classes supracitados.

3.6.1. Parâmetros climáticos do modelo

Para a alimentação do modelo, os dados climáticos foram divididos em dois tipos: dados diários e dados mensais. Os dados diários de precipitação (PCP), temperatura máxima (TMP_{máx}) e mínima do ar (TMP_{mín}), radiação solar (SLR), velocidade do vento (WND) e umidade relativa (HMD). Os dados diários da precipitação pluvial, temperatura máxima, mínima e umidade relativa do ar foram obtidos de 9 estações meteorológicas distribuídas na área de estudo (Tabela 5 e Figura 4) para o período de 1970 a 2010, tais estações compõem a rede de monitoramento meteorológico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tabela 5. Localização e informações referentes as estações meteorológicas

Estação	Longitude (graus)	Latitude (graus)	Altitude (m)	Tipo	Série (anos)	Fonte
Bebedouro	-40,37	-9,15	365	WXGEN	1970-2010	Embrapa-CPATSA
Cabrobó	-39,31	-8,50	342	Meteorológica	1970-2010	INMET
Custódia	-37,65	-8,16	796	Meteorológica	1970-2010	INMET
Ingazeira	-37,47	-7,55	1160	Meteorológica	1970-2010	INMET
Morro do Chapéu	-41,22	-11,22	939	Meteorológica	1970-2010	INMET
Ouricuri	-40,03	-7,90	441	Meteorológica	1970-2010	INMET
Petrolândia	-38,30	-8,88	732	Meteorológica	1970-2010	INMET
Remanso	-42,10	-9,63	400	Meteorológica	1970-2010	INMET
Verdejante	-38,98	-7,95	450	Meteorológica	1970-2010	INMET

Na ausência de dados diários de temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa, o modelo SWAT preenche tais falhas a partir do gerador climático WXGEN (Sharpley & Williams, 1990) tendo como referência os dados mensais da estação climatológica de Bebedouro, PE (-9,15°; -40,37°), a qual está inserida na unidade de pesquisa da EMBRAPA SEMIÁRIDO (CPATSA) e seus respectivos dados climatológicos são apresentados na Tabela 6.

Os dados mensais necessários para o gerador climático são valores médios e desvios dos registros climatológicos da área de estudo. Deve-se ressaltar que as estimativas de dados de precipitação serão calculadas através do programa computacional *pcpSTAT* desenvolvido por Liersch (2003a) e a temperatura do ponto de orvalho foi utilizado o programa computacional *dew* também desenvolvido por Liersch (2003b). A precipitação máxima em meia hora foi definida após encontrar os maiores valores de precipitação para cada mês do

período de dados e, em seguida, foram utilizados os fatores para desagregação propostos por Oliveira et al. (2000) por serem os mais próximos encontrados da área de estudo.

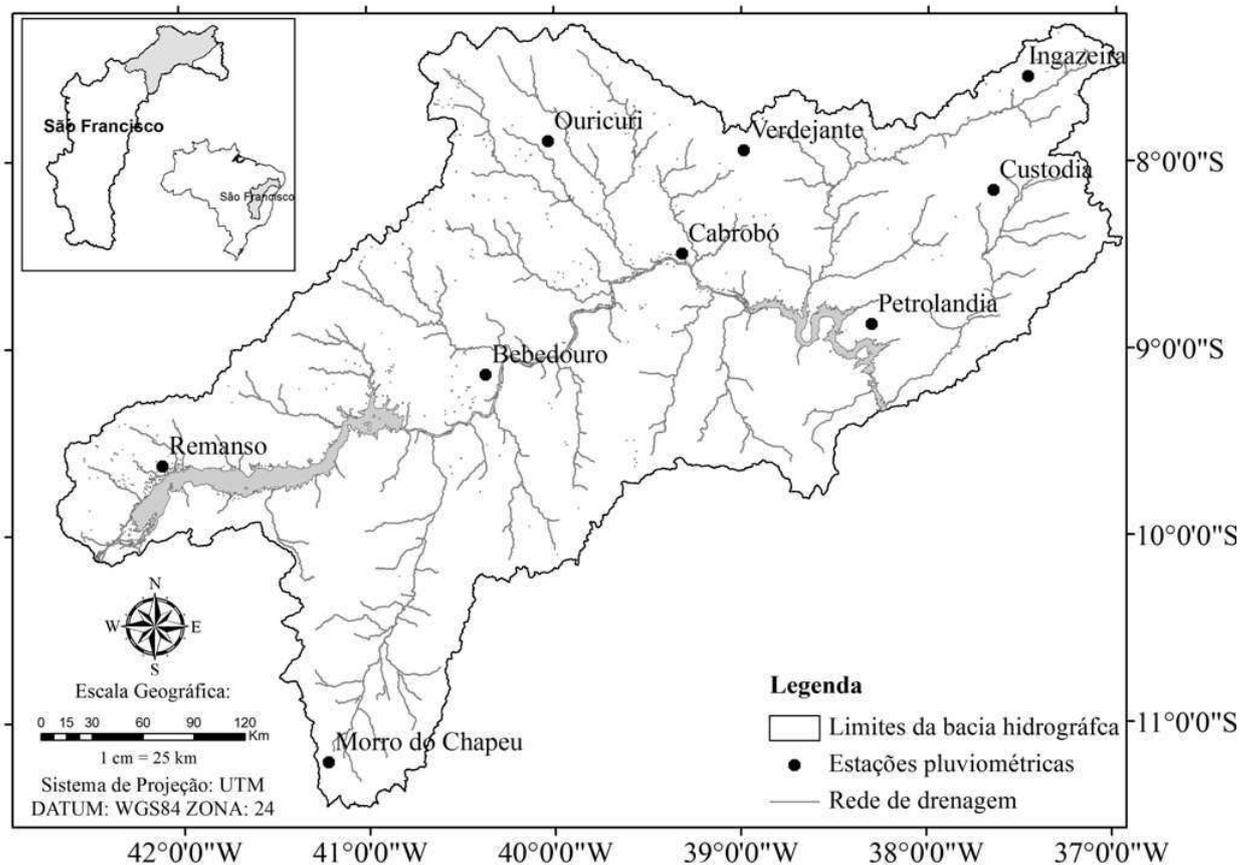


Figura 4. Localização das estações meteorológicas

As variáveis climáticas solicitadas pelo gerador climático WXGEN são:

- Localização geográfica da estação;
- Número de anos dos dados acumulados;
- Média mensal de temperatura máxima diária (TMPMX);
- Média mensal de temperatura mínima diária (TMPMN);
- Desvio padrão para a temperatura máxima diária de cada mês (TMPSTDMX);
- Desvio padrão para a temperatura mínima diária de cada mês (TMPSTDMN);
- Média mensal da precipitação total (PCPMM)
- Desvio padrão para a precipitação diária do mês (PCPSTD);
- Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos para o determinado mês (PR_W1);
- Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos para o determinado mês (PR_W2);
- Média mensal de dias de precipitação (PCPD);
- Valor máximo de meia hora de chuva em todo o período de registros de um determinado mês (RAINHHMX);

- Média de radiação solar diária para um determinado mês (SOLARAV);
- Média diária do ponto de orvalho para determinado mês (DEWPT), e
- Média diária da velocidade do vento para determinado mês (WNDV).

Tabela 6. Dados utilizados pelo gerador climático WXGEN

Variável	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX (°C)	35,4	34,8	35,4	35,4	33,6	31,6	31,3	32,2	35,2	35,4	36,1	35,6
TMPMN (°C)	17,8	18,0	17,9	17,1	15,9	14,7	14,0	14,3	16,2	17,3	18,4	17,5
TMPSTDMX (°C)	3,1	6,8	6,9	4,1	4,7	5,4	5,7	4,4	8,8	1,6	1,7	2,2
TMPSTDMN (°C)	3,9	4,8	4,7	3,4	2,6	1,7	1,5	1,6	5,6	4,7	4,3	4,3
PCPMM (mm)	81,8	80,8	126,8	78,3	23,2	11,0	8,0	3,6	5,6	11,4	41,7	65,3
PCPSTD (dia)	9,0	9,7	10,8	9,7	3,3	1,8	1,8	0,9	1,7	3,2	6,6	7,1
PCPSKW (mm)	7,3	8,1	4,7	6,9	9,0	11,0	14,9	10,4	13,5	17,6	8,1	6,4
PR_W1 (dia)	0,16	0,20	0,22	0,18	0,10	0,12	0,08	0,04	0,03	0,04	0,09	0,12
PR_W2 (dia)	0,62	0,58	0,59	0,53	0,62	0,50	0,55	0,66	0,75	0,71	0,61	0,58
PCPD (dia)	10	10	11	9	7	6	5	4	4	4	6	7
RAINHHMX (mm)	54,3	63,4	37,4	47,5	19,8	11,8	13,9	6,2	10,8	24,8	34,3	30,8
SOLARAV (MJ m ⁻²)	18,8	18,3	17,8	16,6	14,8	13,9	14,4	16,6	19,3	20,2	19,9	19,1
DEWPT (°C)	20,0	20,3	20,8	20,6	19,4	18,2	17,2	16,9	17,2	17,9	18,8	19,5
WNDV (m s ⁻¹)	1,8	1,7	1,5	1,6	1,9	2,3	2,6	2,8	3,0	2,7	2,4	2,0

Os dados de vazão para a BHSRSF foram adquiridos da Agência Nacional de Águas (ANA). A Figura 5 apresenta as estações fluviométricas que serão utilizados nesse estudo. Foram utilizadas séries históricas distintas para cada estação fluviométrica tendo em vista que a disponibilidade e consistência dos dados observados.

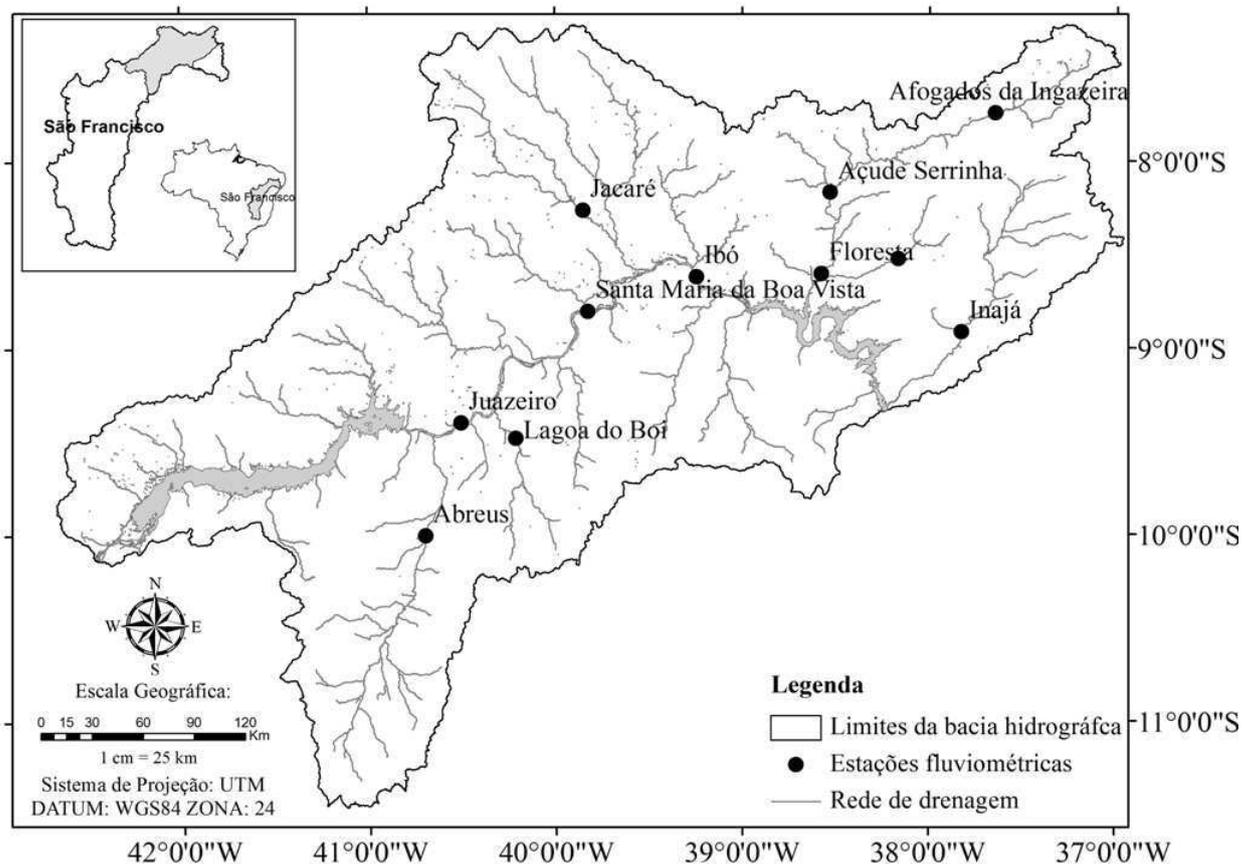


Figura 5. Localização das estações fluviométricas

3.6.2. Parâmetros de solo do modelo

O banco de dados do modelo SWAT possibilita a inserção de novas informações referentes às características dos solos da bacia, dessa forma foi possível adicionar as classes de solos presentes na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco - BHSRSF e seus respectivos parâmetros que foram obtidos após a coleta de amostras de solos na área de estudo (Figura 6) e as análises foram efetuadas no Laboratório de Solos da Universidade Federal de Campina Grande.

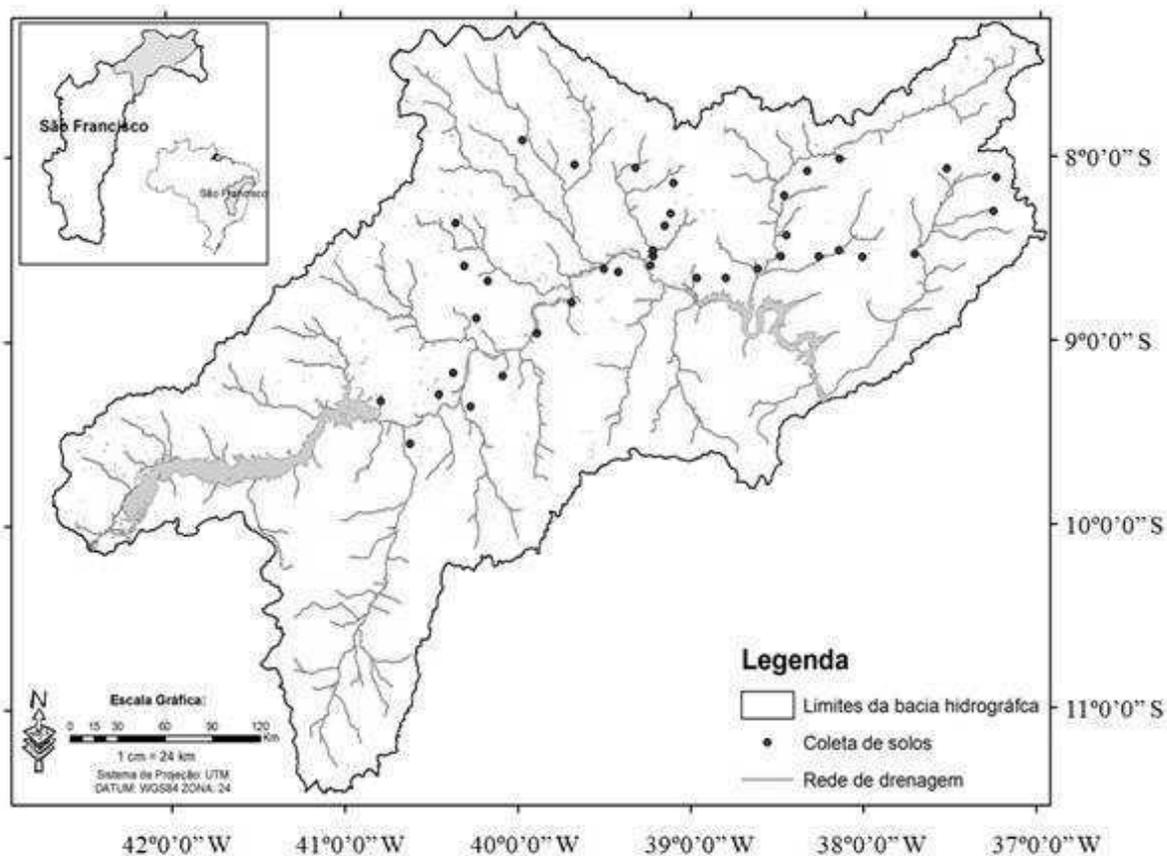


Figura 6. Distribuição dos pontos de obtenção das amostras de solos na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

O banco de dados pedológico requer informações das características físico-hídricas de cada classe de solo (Tabela 7), como:

- Grupos de saturação ou hidrológico (HYDGRP);
- Profundidade máxima de solo que a raiz alcança (SOL_ZMX);
- Porosidade (ANION_EXCL);
- Profundidade da camada (SOL_Z);
- Densidade aparente (SOL_BD);
- Capacidade de água disponível no solo (SOL_AWC);
- Condutividade hidráulica saturada (SOL_K);
- Erodibilidade (USLE_K);
- Albedo, sendo este relativo à parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo; considerando sua cobertura vegetal (SOL_ALB);
- Conteúdo de carbono orgânico (SOL_CBN), e
- Percentagem de argila; silte; areia e rocha.

Tabela 7. Características físico-hídricas médias dos solos na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

SNAM	Argilossolo	Argilossolo	Argilossolo	Latossolo	Latossolo	Luvissolo	Neossolo	Neossolo	Neossolo	Neossolo	Planossolo	Planossolo	Cambissolo	Vertissolo
	Amarelo	Vermelho	Vermelho Amarelo	Amarelo	Vermelho Amarelo	Crômico	Flúvico	Litólico	Quartzarênico	Regolítico	Háplico	Nátrico	Háplico	Cromado
LAYERS	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
HYDGRP	B	B	B	B	C	B	C	B	A	A	B	B	B	C
SOL_ZMX	600	400	400	400	400	600	400	400	400	400	600	400	600	400
ANION_EXCL	0,42	0,45	0,41	0,45	0,45	0,49	0,42	0,41	0,42	0,5	0,48	0,46	0,5	0,5
SOL_CRK	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
SOL_Z	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
SOL_BD1	1,59	1,59	1,66	1,53	1,54	1,38	1,52	1,62	1,6	1,55	1,43	1,46	1,37	1,52
SOL_AWC	0,06	0,16	0,05	0,1	0,03	0,14	0,11	0,1	0,07	0,06	0,13	0,12	0,13	0,12
SOL_K1	5,7	5,7	5,7	12,5	2,2	5,7	2,5	5,6	79,1	56,6	10,8	10,8	6,7	2,2
SOL_CBN	1,3	1,3	1,1	1,1	6,9	1,1	5,93	0,84	0,43	0,39	0,7	0,7	1,15	5,03
CLAY	10	13	5	13	10	19	11	3	2	5	17	16	26	56
SILT	15	19	12	8	4	27	16	13	1	24	22	14	55	40
SAND	75	68	84	79	86	54	73	84	97	71	61	70	19	4
ROCK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
USLE_K	0,14	0,14	0,14	0,13	0,12	0,15	0,16	0,17	0,14	0,18	0,18	0,18	0,16	0,13

3.6.3. Unidade de resposta hidrológica - HRU

A bacia foi dividida em sub-bacias. Cada sub-bacia pode ser parametrizada pelo SWAT usando uma série de Unidades de Resposta Hidrológicas; as quais correspondem a uma única combinação de uso da terra e do solo. Uma ou mais combinações de uso da terra/solo podem ser criadas para cada sub-bacia. Subdividir a bacia em áreas contendo combinações únicas possibilita ao modelo considerar diferentes condições hidrológicas para diferentes usos e solos. O escoamento foi calculado para cada HRU e propagado para obter o escoamento total para a sub-bacia. O modelo fornece duas opções de distribuição de HRU's:

- *Dominant* HRU: em cada sub-bacia; a combinação uso do solo e o tipo de solo que apresentarem maior extensão; será considerado para toda a área da sub-bacia; e os demais tipos serão descartados;
- *Multiple* HRU's: múltiplos HRU's serão estabelecidos. Serão criadas várias combinações de usos e tipos de solos para cada sub-bacia gerada; de acordo com o nível de sensibilidade escolhida pelo usuário do programa.

A elaboração das HRU's envolve dois passos: primeiro os usos do solo das sub-bacias foram identificados. Uma vez que esses usos a serem modelados forem determinados; os diferentes tipos de solos foram selecionados. Dessa forma; cada HRU estabelecida apresentou uma combinação única entre um tipo de uso do solo com um tipo de solo; caso a escolha seja a "*Dominant* HRU". Para as simulações realizadas nesse trabalho foi escolhido o método das múltiplas HRU's para evitar a perda ou alteração das informações reais relacionadas aos usos do solo e aos tipos de solos que foram encontrados.

3.7. Reservatórios e entrada dos dados

O modelo SWAT possibilita a inserção de reservatórios na configuração da bacia hidrográfica, tendo em vista o impacto que os mesmos propiciam a vazão natural e as condições locais do ambiente, para realização desse estudo foram incorporadas duas principais barragens ao longo do curso do Rio São Francisco: Sobradinho e Itaparica-Luiz Gonzaga.

O modelo em sua rotina interna exige a vinculação do reservatório a uma única sub-bacia, sendo assim foi observado que os reservatórios existentes apresentam a confluência de mais de uma sub-bacia. Com isto vinculou-se o reservatório ao trecho que possuísse maior área de

drenagem, conforme a delimitação originada pela discretização da bacia feita pelo próprio SWAT. Os dados de volume e área dos reservatórios foram obtidos a partir da CHESF (2005), e são mostrados na Tabela 8. Os dados mínimos requisitados pelo modelo para simular um reservatório são:

- MORES - Mês de início de operação do reservatório;
- IYRES - Ano de início da operação do reservatório;
- RES_ESA [ha] - Área superficial do reservatório como nível de água emergencial;
- RES_EVOL [10^4m^3] - Volume do reservatório como nível de água emergencial;
- RES_PSA [ha] - Área superficial do reservatório como nível de água normal;
- RES_PVOL [10^4m^3] - Volume do reservatório como nível de água normal;
- RES_VOL [10^4m^3] - Volume do reservatório no primeiro dia de simulação, e
- RES_RR [$\text{m}^3\text{ s}^{-1}$] - Vazão média anual de saída do reservatório.

Tabela 8. Características físicas e hidrológicas dos reservatórios inseridos na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

Parâmetros	Valores	
	Sobradinho	Itaparica – Luiz Gonzaga
MORES	Novembro	Junho
IYRES	1979	1988
RES_ESA [ha]	421400.000	82.800
RES_EVOL [10^4m^3]	3400000.000	1.078.200
RES_PSA [ha]	354471.765	27.254
RES_PVOL [10^4m^3]	2860000.000	354.900
RES_VOL [10^4m^3]	-	-
RES_RR [$\text{m}^3\text{ s}^{-1}$]	2.060	2.400

3.8. Análise morfométrica da bacia hidrográfica

Para a extração das redes de drenagem o MDE foi utilizado o SIG ArcGis 9.3, com a finalidade de gerar os “mapas de direção e acumulação de fluxo”, foi necessário primeiro converter o MDE para o formato GRID. Com o MDE no formato GRID foi possível gerar os mapas contendo as direções de fluxo e o fluxo acumulado, através do módulo de análise hidrológica do ArcGis 9.3. O mapa de fluxo acumulado foi classificado e as drenagens acima de 1000 foram extraídas. O valor 1000 foi um limite arbitrário adotado nesse estudo que se refere ao número mínimo de células do terreno necessárias para gerar células de drenagem. O método

empregado para delimitação automática do limite da BHSRSF foi de acordo com a ordem da hierarquia fluvial com base na proposta de classificação de Strahler (1952). Em seguida foi delimitada a BHSRSF juntamente com suas subdivisões através do Menu “Hydrology” na ferramenta “Watershed”.

Posteriormente utilizando recursos do SIG foram calculados alguns parâmetros físicos tais como: área, perímetro, comprimento das redes de drenagens, número de segmentos dos rios, e tais dados foram à base para diversos cálculos para determinar alguns parâmetros físicos da bacia hidrográfica em estudo (Tabela 9).

Tabela 9. Características morfométricas que foram avaliadas na BHSRSF

Característica Morfométrica	Descrição	Equação	Fonte
Dd - Densidade de drenagem	Relação entre o comprimento da rede de drenagem (Cr) e a área da bacia (A)	$Dd = Cr / A$ (km/km ²)	Horton (1945)
Dh – Densidade hidrográfica	Relação entre o número de segmentos de rios (Nt) e a área da bacia (A)	$Dh = Nt/A$ (km ²)	Christofolletti (1969)
T - Razão de textura	Relação entre o número de segmentos de rios (Nt) e o perímetro da bacia (P)	$T = Nt/P$ (km)	França (1968); Smith (1950)
Kf - Fator de forma	Relação entre a área da bacia (A) e o comprimento do eixo da bacia (L).	$Kf = A/L^2$ (m ² /m)	Horton (1945)
Kc - Coeficiente de compacidade	Relação entre o perímetro (P) da bacia e a área da bacia (A).	$Kc=0,28(P/\sqrt{A})$ (m/m ²)	Lima (1969)
IC - Índice de circularidade	Relação entre a área da bacia (A) e o perímetro (P) da bacia.	$IC = 12,57 (A/P^2)$	Müller (1953)

3.9. Análise de sensibilidade

Condições hidrológicas variam muito entre as diferentes vertentes. [Por exemplo, Arnold et al. (2000) em aplicação do modelo SWAT encontraram que as três bacias diferentes dentro da Bacia do Alto Rio Mississippi-EUA apresentaram diferenças claras em relação à sensibilidade hidrológica. Assim, a análise de sensibilidade é um instrumento para previsão dos parâmetros (Tabela 10) que possuem maior impacto sobre as simulações hidrológicas e sedimentológicas

elaboradas diretamente pelo modelo ArcSWAT (Neitsch et al., 2005) proporcionando um conhecimento da influência do parâmetro sobre o modelo o que possibilita a racionalização de etapas de calibração, bem como a fixação de parâmetros aos quais o modelo é pouco sensível.

Arnold et al. (2000) avaliaram na análise de sensibilidade os parâmetros da curva número, capacidade de água disponível do solo, e coeficiente de evaporação do solo, e estes também foram encontrados por serem muito sensíveis em estudo utilizando o modelo SWAT (Panagopoulos et al., 2011; Cibin et al., 2010; Zhang et al., 2009; Kim et al., 2010 e Muleta & Nicklow, 2005).

Tabela 10. Parâmetros passíveis de calibração do modelo SWAT

Parâmetros	Descrição
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base (dias)
BIOMIX	Eficiência da mistura biológica do solo (adm.)
BLAI	Índice de área foliar Máximo ($m^2.m^{-2}$)
CANMX	Quantidade de água máxima interceptada pela vegetação (mm)
CH_COV	Fator de cobertura do canal
CH_EROD	Fator de erodibilidade do canal
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal ($mm.h^{-1}$)
CH_N2	Coefficiente de Manning para o canal principal (adm.)
CN2	Curva número inicial para condição de umidade AMC II (adm.)
EPCO	Coefficiente de compensação de absorção de água pelas plantas (adm.)
ESCO	Coefficiente de compensação da evaporação de água no solo (mm)
GW_DELAY	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero (dias)
GW_REVAP	Coefficiente de ascensão da água a zona saturada (adm.)
GWQMN	Nível limite da água no aquífero raso para a ocorrência do fluxo de base (mm)
RCHRG_DP	Coefficiente de percolação da água para o aquífero profundo (adm.)
REVAPMN	Prof. limite da água no solo para a ocorrência da ascensão da água na zona não saturada (mm)
SLOPE	Declividade media da sub-bacia ($m.m^{-1}$)
SLSUBBSN	Comprimento médio da encosta da sub-bacia (m)
SOL_ALB	Albedo do solo (adm.)
SOL_AWC	Armazenamento de água no solo ($mm.mm^{-1}$)
SOL_K	Condutividade hidráulica do solo saturado ($mm.h^{-1}$)
SOL_Z	Profundidade da camada do solo (mm)
SPCON	Parâmetro linear para calcular a quantidade máxima de sedimentos que pode ser depositado durante o transporte de sedimentos pelo canal
SPEXP	Parâmetro exponencial para calcular a quantidade máxima de sedimentos depositada durante o transporte de sedimentos pelo canal
SURLAG	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial direto (dias)
USLE_C	Fator de cobertura da USLE
USLE_K	Fator de erodibilidade do solo da USLE

Para a análise de sensibilidade o modelo SWAT utilizou a combinação do *Latin Hypercube* (LH) e o *One-Factor-At-a-Time* (OAT). O LH utilizou o método de Monte Carlo, permitindo uma análise mais robusta na sensibilidade, pois requer um grande número de variáveis associadas (Neitsch et al., 2005). O conceito das simulações do *Latin-Hypercube* foi baseado na simulação de Monte-Carlo, porém utilizou um método de amostragem estratificada que permitiu a estimação mais eficiente das estatísticas dos parâmetros de saída. O método subdividiu a distribuição de cada parâmetro em “N” intervalos cada qual com a probabilidade de ocorrência igual a 1/N. Os valores aleatórios dos parâmetros foram gerados de forma que cada série foi amostrada apenas uma única vez e então o modelo foi executado “N” vezes com a combinação aleatória dos parâmetros Griensven et al. (2002).

No OAT apenas os parâmetros de entrada foram modificados durante os *looping* que o modelo realiza na análise. Em cada rodada somente um parâmetro foi mudado por vez; assim com as mudanças no resultado em cada rodada o modelo pode encontrar a solução para as ambigüidades que são atribuídas ao parâmetro de contribuição que foi alterado Griensven et al. (2002). Portanto, a mudança na saída do modelo pode ser ambigüamente atribuída aos parâmetros modificados pela média elementar parcial do $S_{i,j}$ definido pela Equação (15).

$$S_{i,j} = \frac{[SSE(\phi_1, \dots, \phi_i \times (1 + f), \dots, \phi_p) - SSE(\phi_1, \dots, \phi_i, \dots, \phi_p)]}{f} \quad (15)$$

em que:

$S_{i,j}$: efeito parcial do parâmetro ϕ_i ao redor do LH ponto j;

f : fração que o parâmetro ϕ_i é alterado (predefinição constante); e

SSE: somatório do erro quadrado.

O somatório do erro quadrado definido pela Equação (16) foi utilizado como função objetiva para a análise de sensibilidade.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (X_{t,obs} - X_{t,sim})^2 \quad (16)$$

em que:

$X_{t,obs}$: vazão média diária observada ($m^3 s^{-1}$); e

$X_{t,sim}$: vazão média diária simulada ($m^3 s^{-1}$).

Os parâmetros foram aleatoriamente aumentados ou diminuídos com a fração de f e considerado o parâmetro “ p ”. O desempenho do fator “ p ” envolve $p+1$ obtendo o parcial efeito de cada parâmetro em uma rodada. O efeito final foi estimado pela média do conjunto de “ m ” efeito parcial. O resultado final foi fornecido por meio de um ranking o LH que estimou o alcance por meio de $m \times (p+1)$ para cada rodada na simulação. A análise de sensibilidade forneceu um ranking dos parâmetros que possuem relação direta com as componentes da vazão fluvial e do aporte de sedimentos.

3.10. Calibração e validação do modelo

Em virtude da grande quantidade de equações representam os processos físicos e dinâmicos no modelo SWAT, principalmente os associados a perda de solos e previsão de vazão diversos componentes presentes no modelo necessitam de ajustes que possibilitem sua melhor descrição de cada simulação. Sendo necessária assim a utilização dos resultados oriundos da análise de sensibilidade (van Griensven et al., 2006): *Latin-Hypercube* (LH) e *Onefactor at a time* (OAT).

A calibração é uma ferramenta que permite ao usuário editar o desempenho global das variáveis de entrada do modelo (Sammons & Neitsch, 2000). De acordo com Arnold et al. (2000) o primeiro passo de uma calibração tradicional foi dividir os valores medidos em duas séries temporais, sendo uma para calibração e outra para validação. No início da simulação ocorreram grandes incertezas; devido ao desconhecimento das condições iniciais principalmente a umidade do solo justificando a utilização de um período de aquecimento do modelo comumente conhecido como “warm up”, para que, ao iniciar a simulação as variáveis de estado estejam livres da influência das condições iniciais (Mello et al., 2008; Zhang et al., 2007; Von Stackelberg et al., 2007). Para tanto, utilizou-se dos três primeiros anos da série de dados, período que compreende os anos de 1990 a 1992.

A natureza distribuída do SWAT faz com que o processo de calibração do modelo seja computacionalmente intenso por causa das representações em HRU’s e os parâmetros associados a cada HRU. Como exemplo dessa complexidade, se há 100 HRUs e 10 parâmetros do modelo a serem calibrados a calibração envolverá essencialmente $10 \times 100 = 1000$ parâmetros fazendo com que haja a necessidade de um processo automático de calibração. Para a calibração automática o modelo utiliza o método *Shuffled Complex Evolution - University of Arizona* – SCE-UA (Arnold et al., 2005).

Essa calibração foi efetuada por meio da rotina de autocalibração existente no próprio modelo, considerando-se as faixas de valores de cada parâmetro (Neitsch et al., 2005; van

Griensven et al., 2006). A rotina emprega o método Parasol (Parameter Solutions method), que tem por base o algoritmo genérico Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) (Duan et al., 1994). No SCE-UA as variáveis são otimizadas usando o critério de otimização global a partir de dados de entrada que compõem a calibração do modelo. O SCE combina a sistemática evolução dos parâmetros em direção à melhoria global compatível com os dados medidos. De acordo com Sorooshian (1991) o algoritmo SCEUA opera com uma população de pontos que evolui em direção ao ótimo global de uma única função por meio de sucessivas interações e avaliações da função objetivo.

Na etapa inicial foi gerada de forma aleatória uma população de pontos espalhados entre os limites máximos e mínimos definidos para cada parâmetro. Essa população foi separada em conjuntos (chamados de complexos) que evoluem baseados no processo de “reprodução”. Quanto maior a população maior são as chances de se encontrar o ótimo global da função objetivo, porém maior é o tempo de processamento e o número de interações necessárias para a convergência do algoritmo (Baltokoski, 2008).

A etapa de validação dos valores obtidos pelas simulações consistiu na análise dos hidrogramas observados e simulados para três estações fluviométricas inseridas na área de estudo como também dos dados observados e estimados pelo SWAT de ETP para nove estações meteorológicas e por fim a verificação da acurácia dos dados através dos índices estatísticos que serão descritos seguidamente.

3.11. Análises estatísticas

3.11.1 Dados dos MDE's, vazão e evapotranspiração potencial

Primeiramente, avaliou-se o desempenho de modelos digitais de elevação, ou seja, os dados de altitude quando comparados a dados obtidos por sistemas de posicionamento global (GPS), sabendo-se que a qualidade do MDE vai influenciar diretamente na discretização da bacia hidrográfica, geração da rede de drenagem e formação das HRU's. A precisão da simulação da vazão mensal foi importante porque eventos de chuvas intensas contribuem para a geração de cargas de sedimentos, como também a componente da ETP interfere diretamente no balanço hídrico da bacia hidrográfica. Tendo como objetivo avaliar no período simulado a acurácia de tais variáveis, foram utilizados dados de vazão oriundos de três estações fluviométricas inseridas na área de estudo como também dos dados observados e estimados pelo SWAT de ETP para nove estações meteorológicas, para calibrar os coeficientes e para avaliar o desempenho do modelo SWAT. Os anos foram escolhidos de acordo com as menores omissões principalmente

no que se referem os dados de vazão. Quando se relacionam, pela regressão, valores estimados com valores observados, podem-se obter informações da precisão e da exatidão, que, conjuntamente, indicam a consistência dos dados estimados com os observados. Foram obtidos os coeficientes dos modelos a partir do método dos mínimos quadrados da diferença entre os valores observados e os estimados.

Para avaliar o desempenho de cada modelo na estimativa dos valores de altitude, vazão e ETP, respectivamente, foram utilizados os seguintes índices estatísticos:

a) Raiz quadrada do quadrado médio do erro normalizado (RQMDN) de acordo com a Equação (17):

$$RQMDN = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 \right]^{0,5}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i} \quad (17)$$

em que:

- E_i - valor estimado
- O_i - valor observado
- n - número de observações

A RQMDN varia entre 0 a infinito sendo que, quanto menor, melhor a estimativa, entretanto, este índice não faz distinção quanto aos dados serem subestimados ou superestimados (Jacovides & Kontoyiannis, 1995).

b) O erro médio absoluto (EMA) representa o módulo da diferença entre o valor observado e o valor estimado foi determinado pela Equação (18):

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - E_i| \quad (18)$$

em que:

- E_i - valor estimado
- O_i - valor observado
- n - número de observações

Similar ao RQMDN, quanto menor o valor do erro médio absoluto de EMA melhor a estimativa, porém valores positivos indicam a quantidade média de superestimativa dos modelos, e negativa, o contrário.

c) O erro médio percentual $EMP(\%)$ diz respeito ao percentual de vies dos valores simulados em relação aos observados. Quanto mais próximo de zero for o valor deste coeficiente melhor o modelo representará a realidade, ou seja, menor a tendência nas estimativas e, além disso, serve também como indicativo se o modelo é pobre em representatividade (Moriassi et al., 2007). Liew et al. (2007) apresentaram a seguinte classificação: $|EMP| < 10\%$, muito bom; $10\% < |EMP| < 15\%$, bom; $15\% < |EMP| < 25\%$, satisfatório e $|EMP| > 25\%$, o modelo é inadequado. O erro médio percentual foi obtido pela Equação (19):

$$EMP(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - E_i}{E_i} \right| \times 100\% \quad (19)$$

em que:

- E_i - valor estimado
- O_i - valor observado
- n - número de observações

O coeficiente de determinação (R^2) entre os valores de ETP, vazão e altitude do MDE estimados foram avaliados pelo teste t-Student, dado pela Equação (20):

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (20)$$

em que:

- n - número de observações
- r - coeficiente de correlação

No presente estudo, foram utilizados os níveis de significância de 1 e 5% de probabilidade.

3.13. Simulação de cenários

Dentre as vantagens da utilização de modelos matemáticos, uma das mais importantes refere-se à elaboração de cenários, ou seja, a possibilidade de alterar as configurações dos parâmetros de entrada do modelo no intuito de gerar novos conjuntos de condições virtuais, as quais permitem, antecipadamente, a visualização das conseqüências geradas por determinado grupo de fatores hipotéticos (Xavier, 2009). Diante da necessidade de planejar adequadamente o aproveitamento dos recursos de solo na região semiárida, a utilização de modelos hidrossedimentológicos é imprescindível na geração de cenários alternativos de uso solo, que leve em consideração as práticas de conservação, buscando minimizar as perdas do solo e maximizar o escoamento superficial.

Com o intuito de analisar o quanto as alterações no uso e ocupação do solo interferem nos processos de escoamento superficial e produção de sedimentos e avaliar uma alternativa de uso em bases conservacionista, três cenários serão gerados:

- Condições de referência: a BHSRSF com o uso e cobertura do solo atual, que servirá de base para comparação com os cenários;
- Cenário 1: a BHSRSF com a substituição da cobertura de pastagem por vegetação característica da região (Caatinga arbórea e sub-arbustiva) simulando um cenário de preservação da bacia.
- Cenário 2: a BHSRSF com a substituição da cobertura de pastagem por cultivo de milho simulando um cenário de uso agrícola.
- Cenário 3: a BHSRSF com a substituição da cobertura de pastagem por solo exposto simulando um cenário de degradação do ambiente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise do modelo de elevação digital

O perfil topográfico do trecho de coleta dos dados de altitude através do GPS, como também a distribuição dos pontos extraídos dos MDE através do SIG ArcGIS 9.3 é apresentado na Figura 7. Observa-se que na grande maioria dos pontos há uma pequena tendência de subestimação dos valores oriundos dos MDE; tal fato pode ser justificado pela resolução espacial das imagens dos sensores remotos em comparação com a precisão dos dados obtida pelo GPS.

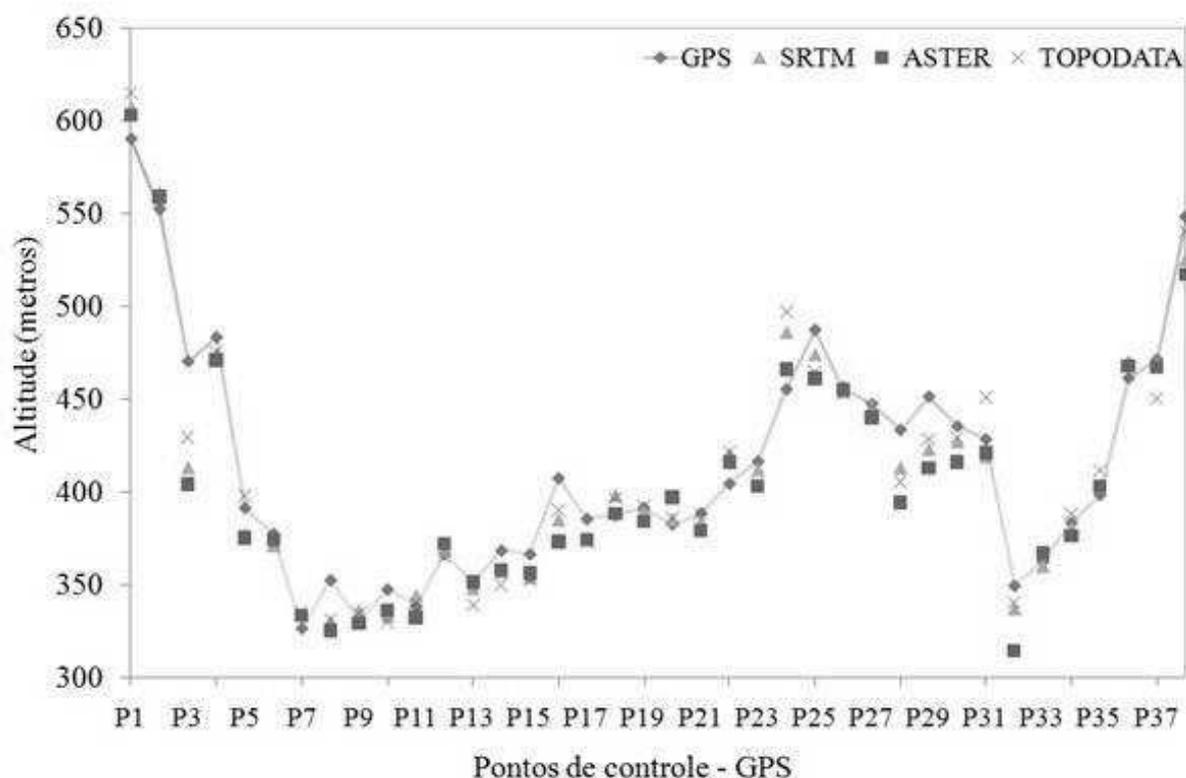


Figura 7. Perfil topográfico do trecho de coleta das amostras de solos na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

Os erros médio percentual (EMP) e absoluto (EMA) provenientes dos dados utilizados na metodologia são apresentados na Tabela 11. Os resultados obtidos apontam erro médio percentual e erro médio absoluto de 3,37% e 14,18 m, respectivamente, para os valores estimados a partir de dados do MDE aster. Para o MDE topodata são verificados os valores de 2,98% e 12,53m, sendo referentes ao EMP e EMA, respectivamente. Os menores erros associados foram obtidos para o MDE srtm, sendo observado EMP igual a 2,71% e EMA de 11,45m.

Tabela 11. Análise estatística dos modelos de elevação digital

MDE	Altitude (metros)			R ²	EMA (m)	EMP (%)	RQMDN (%)
	Média	Máx.	Mín.				
Aster	404,5	603,0	314,0	0,926*	14,18	3,37	4,7
Topodata	410,8	615,0	329,8	0,941*	12,53	2,98	2,2
SRTM	409,0	607,0	330,0	0,945*	11,45	2,71	2,1

*Significativos ao nível de 1% de probabilidade

4.1.1. Discretização da bacia e análise morfométrica

O modelo SWAT tem como base a interação de um SIG que possibilita a entrada de “layers” das mais diversas informações com objetivo da caracterização da bacia hidrográfica, enquanto a discretização da bacia consiste em delimitar em sub-bacias com intuito de obter o maior número de informações pontuais (outlets) em toda área analisada. Como a interface ArcSWAT possibilita a escolha de como será feita a delimitação da bacia hidrográfica, neste estudo optou-se pela inserção da área limitante da BHSRSF gerando um raster de contorno para que assim fosse delimitada a área real. A partir da delimitação da área da bacia foi possível definir qual a área mínima de contribuição da rede de drenagem para formação de um segmento de rio e por consequência a rede de drenagem; quanto menor a área da célula de drenagem maior será a quantidade de sub-bacias que farão a composição da área total da bacia hidrográfica. Entretanto o modelo possui limitações computacionais para o processamento das simulações, que também estão associadas a qualidade do MDE inserido para discretização da bacia; sendo assim nem sempre o maior número de sub-bacias garante o êxito na geração dos resultados.

Assim, neste estudo foram delimitadas 52 sub-bacias conforme espacializadas na Figura 8. A parte final na delimitação na área de contribuição hídrica da bacia é feita pela definição do exutório, que consiste na escolha do ponto de convergência de todas as componentes do escoamento superficial e de base para bacia analisada.

Definida a área de contribuição da bacia hidrográfica e sua rede de drenagem foram inseridos os layers de uso e ocupação do solo, tipos de solos e configuração dos intervalos de declividades a serem considerados para formação das Unidades de Respostas Hidrológicas – HRU’s. Assim foram determinadas 299 HRU’s e, assim, a escolha das características para formação das HRU’s foi extremamente importante, tendo em vista que o processo delimita quais as componentes de ocupação do solo, do tipo de solo e da declividade são os mais representativos para cada HRU’s e para a análise de sensibilidade e calibração do modelo. No término das primeiras simulações as parametrizações serão feitas ao nível das HRU’s.

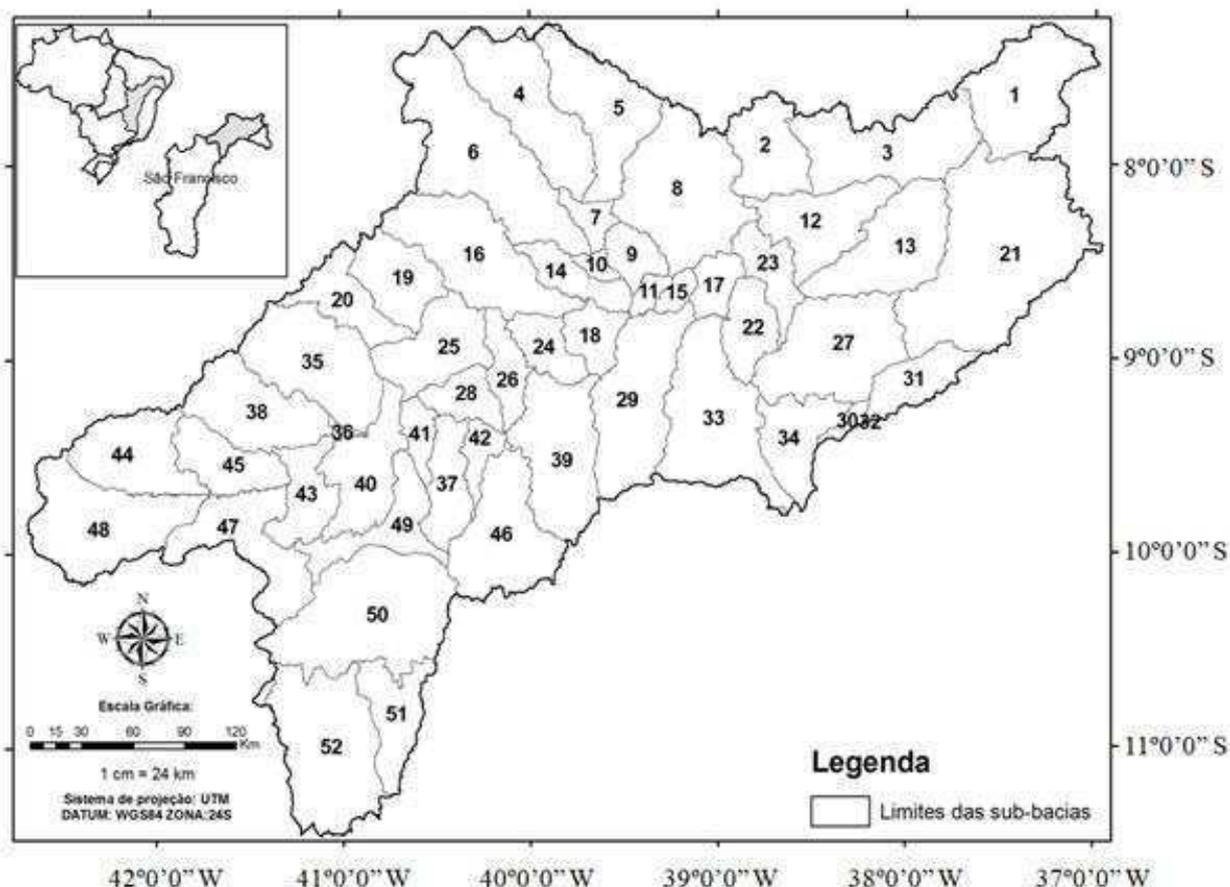


Figura 8. Delimitação da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF) realizada pelo ArcSWAT

A bacia de drenagem da BHSRSF apresenta uma área de 110.446,00 km², com perímetro total de 3.834,8 km e 3028 segmentos de rios, formando uma rede de drenagem de 22.283,6 km e o seu rio principal possui uma extensão de 720 km (Tabela 12). As características da rede de drenagem da bacia mostram que a densidade de drenagem é de 0,2 km/km², que segundo a classificação de Christofolletti (1969) é baixa, pois menor do que 7,5 km/km² tem essa classificação Já para Villela & Mattos (1975), esse índice pode variar de 0,5 km/km², em bacias com drenagem pobre, a 3,5 km/km² ou mais, nas bacias excepcionalmente bem drenadas, indicando, portanto, que a bacia em estudo apresenta baixa drenagem de acordo com essa classificação também.

Tabela 12. Características dimensionais da rede de drenagem da bacia de drenagem Bacia Hidrográficas do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

Parâmetros	Valores
Área da bacia (A)	110.446,00 km ²
Perímetro da bacia (P)	3.834,8 km
Comprimento do eixo da bacia (L)	490 km
Comprimento do Rio principal (R)	720 km
Comprimento da rede de drenagem (Cr)	22.283,6 km
Número de segmentos de rios (Nt)	3028
Densidade de drenagem (Dd)	0,2 (km/km ²)
Padrão de drenagem	Dendrítico
Razão de textura (T)	0,79 (km)
Fator de forma (Kf)	0,46 (m ² /m)
Coefficiente de compacidade (Kc)	3,2 (m/m ²)
Índice de circularidade (IC)	0,09

O coeficiente de compacidade encontrado para bacia foi maior do que 1 (3,2) e o fator de forma foi considerado baixo, 0,46. Por meio desse resultado pode-se afirmar que a bacia de drenagem do Submédio Rio São Francisco, em condições normais de precipitação, ou seja, excluindo-se eventos de intensidades anormais, é pouco susceptível a enchentes. Assim, há uma indicação de que a bacia não possui forma circular, possuindo, portanto, uma tendência de forma alongada, elíptica (Santos, 2001). Também o coeficiente de compacidade indica que a bacia não possui forma próxima à circular, isto é, apresenta forma alongada. Tal fato pode, ainda, ser comprovado pelo índice de circularidade, cujo valor é de 0,09. Conforme se pode observar na Figura 9, o padrão de drenagem predominante nessa bacia é do tipo dendrítico. Esse tipo de drenagem é bem ramificado e se assemelha a uma árvore, e desenvolve-se em terrenos com predomínio de rochas mais resistentes.

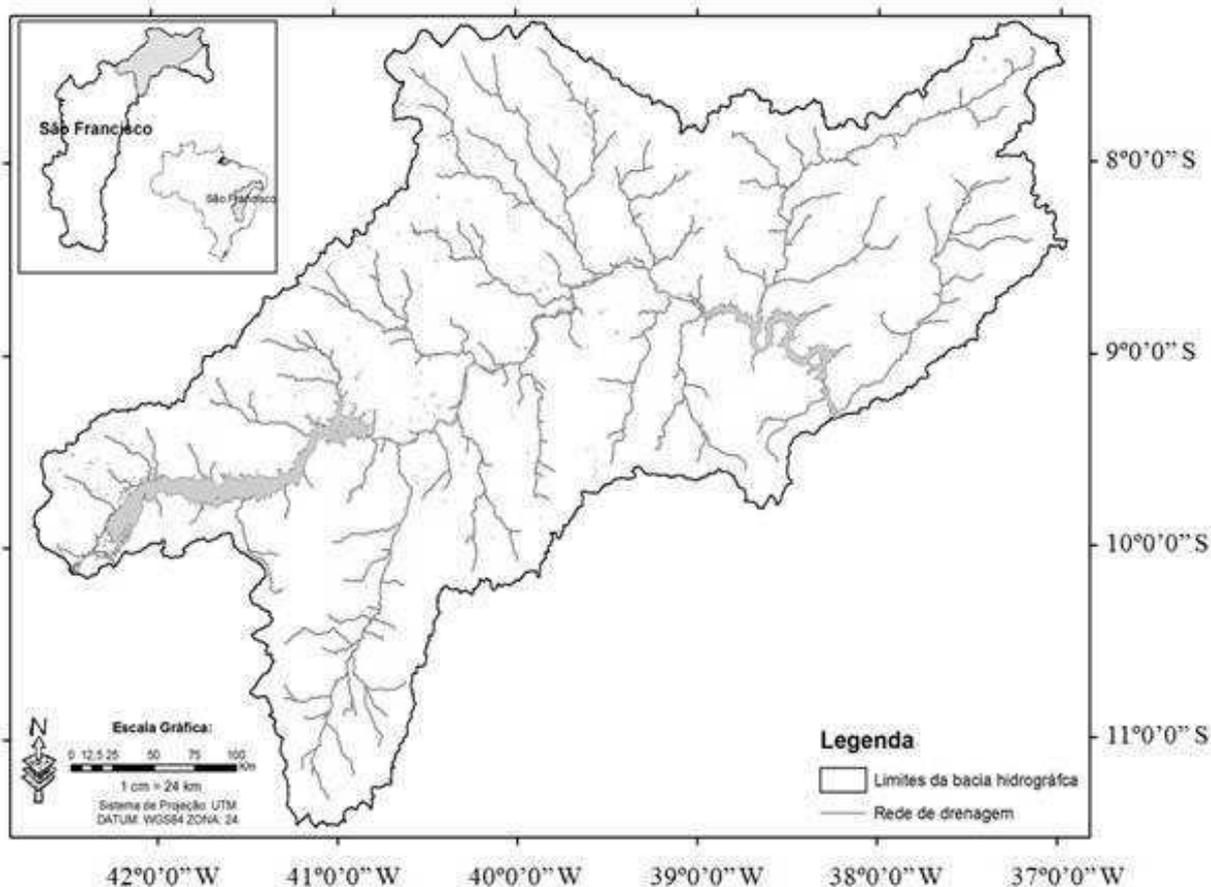


Figura 9. Rede de drenagem da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

A BHSRSF possui considerável variação de altitude, mínima de 173m e máxima de 1280m, apresentando uma altitude média de 506m e uma amplitude de 1107m (Figura 10). Isso evidencia que algumas regiões da bacia em questão favorecem uma maior perda de água por escoamento superficial em função da rampa do declive. Áreas que apresentam altitude entre 350 e 400 metros correspondem a 17.605km², ou 15,9% do total, e localizam-se principalmente na parte central da bacia na calha da drenagem do rio São Francisco. Já as altitudes entre 400 e 450m correspondem a 24.705km², 22,4% da área total. Áreas com altitudes superiores a 450m correspondem a mais de 60.000km², 56% do total da área da bacia. Trentin & Robaina (2005) comentam que o mapa hipsométrico tem fundamental importância na análise da energia do relevo, indicando condições mais propícias à dessecação para as áreas de maior altitude e de acumulação para as áreas de menor altitude.

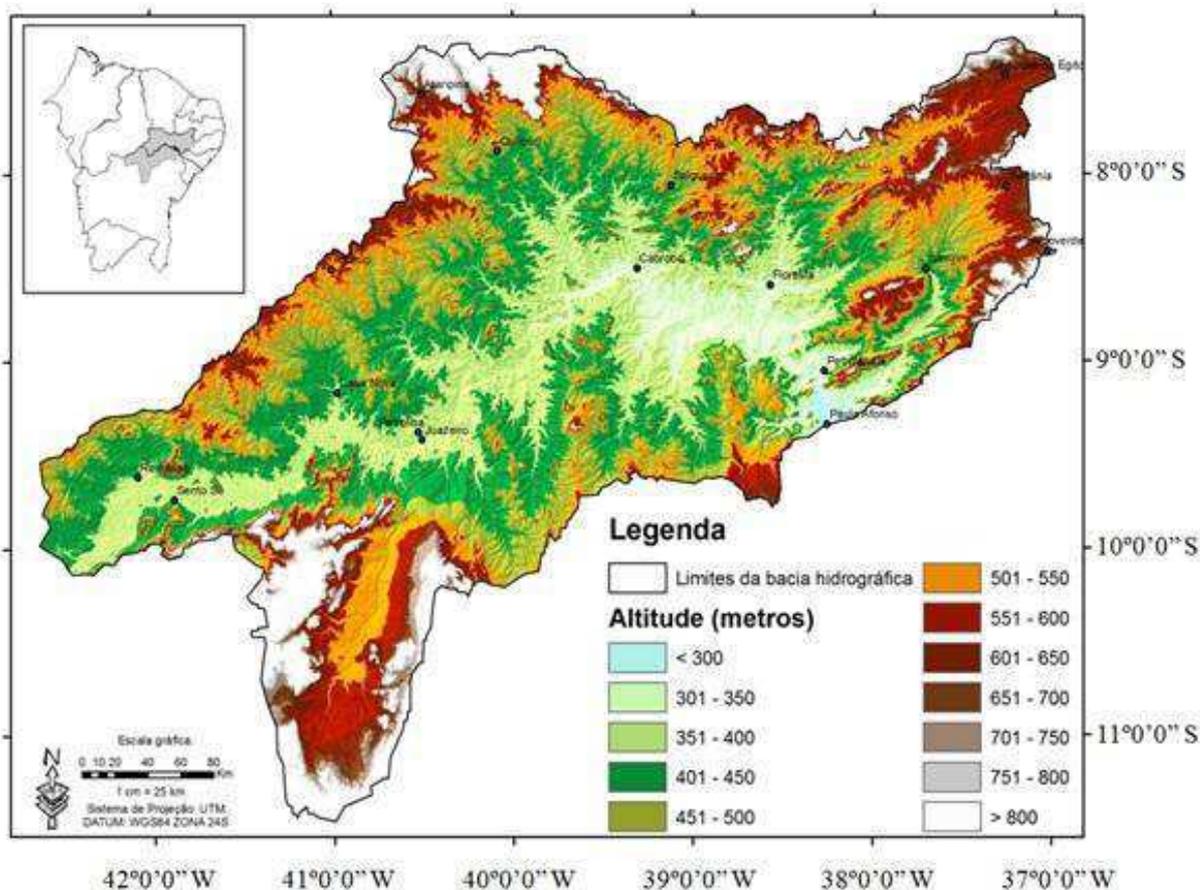


Figura 10. Mapa altimétrico da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

A declividade máxima foi de 146%, já a declividade média apresentada foi de 4,4% (Figura 11), mais da metade da área da bacia (83%) apresentou declividades menores que 6%, o que corresponde, segundo classificação de De Biase (1993), o relevo de várzea e plano a suave ondulado, correspondendo a mais de 90.000km². Em seguida, há declividades no intervalo de 6 a 12%, que ocorrem em uma área de 11.044 km², correspondente a 10,0% da área total. Essa classe compreende áreas com suave ondulado e ondulado, onde a erosão hídrica não oferece problema e somente as práticas de conservação (preparo do solo e cultivo em nível) são necessárias, exceto em solos erodíveis (arenosos) com comprimento de rampa muito longo.

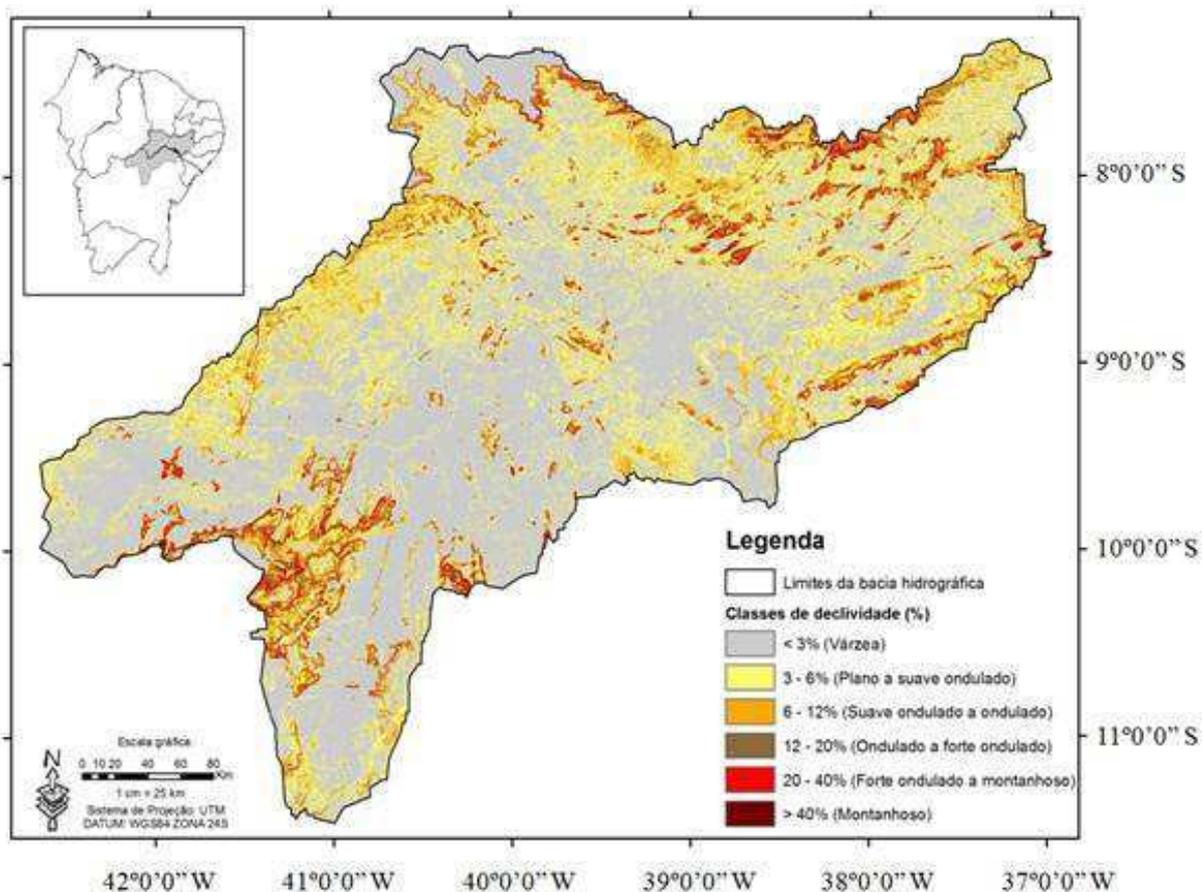


Figura 11. Mapa da declividade da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

De acordo com a distribuição das classes de uso de solo identificadas na área em estudo (Figura 12), observa-se que a Caatinga Arbórea e Arbustiva, Caatinga Sub-arbustiva e Pastagem dominam a paisagem ocupando uma área, de 60.385,7; 18.998,5 e 22.737,5 km², respectivamente, totalizando cerca de 102.121,8 km², área correspondente a 92,5% da área total da bacia. Os cultivos irrigados são encontrados na parte sul da bacia próximo ao rio São Francisco, tal área corresponde a 3.079,1 km² representando menos de 3% da área total.

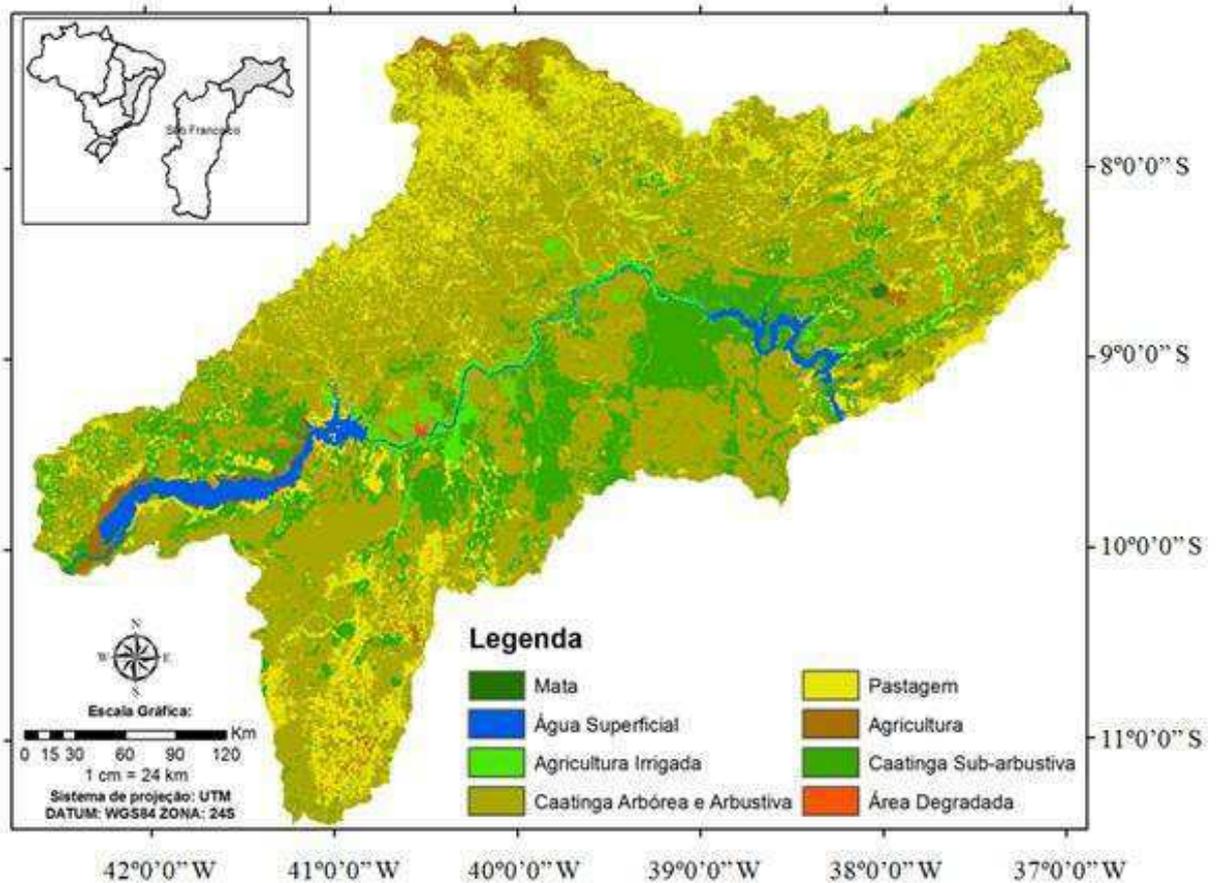


Figura 12. Mapa de uso e ocupação atual da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

A bacia hidrográfica do Submédio Rio São Francisco apresenta predomínio de três classes de solos (Figura 13), sendo mais de 26.463 km², ou seja, 24%, do total da área da bacia pertencentes a classe de Luvisolo Crômico, enquanto a classe de Argilossolo Vermelho-Amarelo representa pouco mais de 13.000 km², sendo que a última classe de solo é a do Neossolo Quartzarênico apresentando 11,1% da área total.

A caracterização pedológica da área de estudo é de grande importância tendo em vista que diferentes tipos de solo podem apresentar susceptibilidade diferenciada à erosão, mesmo para condições semelhantes de declividade, cobertura vegetal e práticas de manejo. Essas diferenças são devidas às propriedades do próprio solo e são denominadas erodibilidade do solo (Bertoni & Lombardi Neto, 1985). Os mesmos autores classificam o fenômeno como sendo a vulnerabilidade do solo ou a sua susceptibilidade à erosão, que é a recíproca da sua resistência à erosão. As propriedades do solo que mais influenciam a sua erodibilidade são aquelas que afetam a taxa de infiltração da água no solo, associada à sua resistência ao cisalhamento.

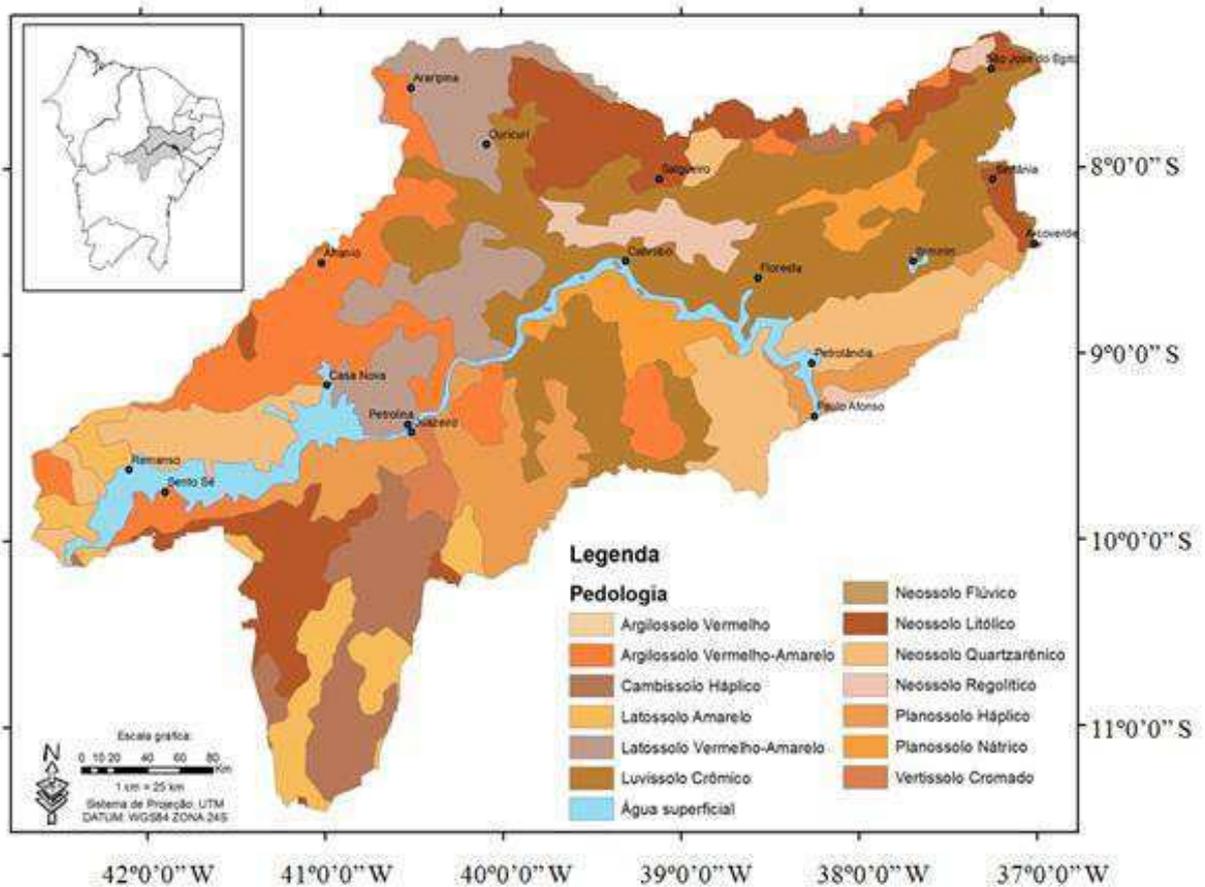


Figura 13. Mapa pedológico da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

4.2. Análise ambiental e risco de degradação na bacia

4.2.1. Variáveis meteorológicas e evapotranspiração potencial

Observando a Tabela 13, verifica-se que no período de 1970 a 2010 a precipitação total anual média para as estações meteorológicas utilizadas foi de 428,5 mm, os maiores valores dessa variável foram observados na estação de Remanso (627,5 mm) localizada na parte oeste da BHSRSF, enquanto que os menores para estação de Custódia (272,4 mm), que, como constatado por Santos et al. (2010), caracteriza-se pela má distribuição no tempo e no espaço, apresentando um período de estiagem que ocorre de julho a dezembro e um período chuvoso, de janeiro a abril, com valores máximos situados entre 451,3 e 270,7 mm, respectivamente. O desvio-padrão da precipitação pluvial se apresenta mais elevado nesse período, uma vez que quanto maior a variabilidade das chuvas, maior será o seu desvio-padrão. Enquanto que o regime de precipitação varia sazonalmente e espacialmente para diferentes partes da bacia, o padrão de evapotranspiração é mais estável. A evapotranspiração potencial (ETP) é alta na BHSRSF quando comparada as demais regiões do Brasil, que é justificado pelas características do clima

semiárido que somada à elevada disponibilidade energética, na forma de radiação solar direta, aumenta a demanda evapotranspirativa da região. Tal oferta energética condiciona uma pequena oferta hídrica à região. A demanda da evapotranspiração é elevada para todas as estações meteorológicas, principalmente para Remanso, Bebedouro e Cabrobó que apresentam em média valores de ETP da ordem de 1395, 1348 e 1306 mm ano⁻¹.

O grande contraste climático e fisiográfico dentro da BHSRSF produzem grandes variações na disponibilidade de água para o abastecimento e destinando ao uso agrícola onde precipitação não está disponível ou confiável, a agricultura é apenas bem sucedida, se houver estrutura de irrigação no lugar. mesmo quando a infra-estrutura existe um padrão espacial na variabilidade dos produção agrícola (Maneta et al. de 2009).

Tabela 13. Características climáticas das estações meteorológicas inseridas na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

Estação meteorológica	Temperatura média do ar (°C)	Precipitação pluvial (mm ano ⁻¹)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Umidade relativa (%)	Evapotranspiração potencial (mm ano ⁻¹)
Bebedouro	27,3	364,1	4,4	53	1348
Cabrobó	27,1	449,5	4,1	54	1306
Custódia	24,8	272,4	4,0	62	1082
Ingazeira	24,3	471,5	4,3	64	1042
Morro do Chapéu	24,0	453,8	4,8	63	1105
Ouricuri	26,1	386,7	4,3	55	1265
Petrolândia	27,0	309,3	4,1	58	1238
Remanso	27,0	627,5	3,8	52	1395
Verdejante	26,1	521,7	3,7	57	1232

4.2.2. Índice de erosão da chuva

A erosividade média anual para as estações meteorológicas inseridas na BHSRSF foi de 4.100 MJ ha⁻¹ mm⁻¹ hora⁻¹, que pode ser verificada a partir da Tabela 14. Tal valor caracteriza o parâmetro R da USLE, que de acordo com a classificação proposta por Carvalho (2008) é considerada como erosividade moderada.

A variabilidade da média mensal do coeficiente de chuva (RC) é caracterizada pela sazonalidade da precipitação, esperasse assim que os maiores valores do RC sejam encontrados no período de maior intensidade da precipitação, ou seja, de acordo a distribuição da média mensal da precipitação foi observado que o valor médio mínimo de RC foi de 0,3 mm, nos meses de agosto e setembro, enquanto o valor máximo para o mês de março em torno de 32 mm. Os

extremos dos valores médios anuais do fator R foram de 5315 MJ ha⁻¹ mm⁻¹ hora⁻¹, para a estação meteorológica de Remanso e o de 2843 MJ ha⁻¹ mm⁻¹ hora⁻¹, para a estação de Custódia.

Tabela 14. Variabilidade média mensal do coeficiente de chuva e erosividade média anual para as estações meteorológicas inseridas na BHSRSF

Estação meteorológica	Coeficiente de chuva (mm)												Fator R MJ ha ⁻¹ mm ⁻¹ hora ⁻¹
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Bebedouro	23,0	19,5	42,1	16,4	1,9	0,4	0,4	0,0	0,3	1,0	6,6	13,2	4527
Cabrobó	24,6	22,9	37,9	21,7	3,6	0,7	0,6	0,4	0,2	0,8	1,3	11,1	4367
Custódia	9,9	8,4	20,9	15,8	5,1	1,1	1,1	0,5	0,2	0,6	0,4	1,6	2843
Ingazeira	10,1	14,4	33,1	27,6	6,2	1,7	0,9	0,3	0,4	0,5	0,5	2,5	4031
Morro do Chapéu	17,8	12,5	22,4	3,5	1,3	0,5	0,3	0,3	0,5	3,8	19,1	24,6	4127
Ouricuri	19,8	17,3	33,2	21,4	2,0	0,3	0,2	0,1	0,4	1,1	1,9	5,9	3893
Petrolândia	13,0	20,0	21,5	10,0	2,9	1,1	1,3	0,9	0,2	0,7	0,7	7,2	3172
Remanso	28,0	23,5	39,0	15,5	1,7	0,4	0,0	0,0	0,3	2,6	12,2	20,6	5315
Verdejante	19,4	23,6	38,1	27,3	5,2	0,8	0,5	0,3	0,5	1,1	1,1	9,3	4626
Média	18,4	18,0	32,0	17,7	3,3	0,8	0,6	0,3	0,3	1,3	4,9	10,6	4100
DP	6,38	5,33	8,3	7,84	1,79	0,46	0,43	0,27	0,13	1,1	6,63	7,79	750
CV (%)	34,6	29,6	25,9	44,3	53,7	59,1	72,8	83,4	39,7	82,5	136	73,3	18
Máx.	28,0	23,6	42,1	27,6	6,2	1,7	1,3	0,9	0,5	3,8	19,1	24,6	5315
Mín.	9,9	8,4	20,9	3,5	1,3	0,3	0,0	0,0	0,2	0,5	0,4	1,6	2843

O risco de erosão hídrica apresenta grande variabilidade espaço-temporal, tendo em vista da grande variação nos regimes de precipitação registrados na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco fazendo com que o RC também apresente grande variabilidade. O fator R encontrado para estação meteorológica de Bebedouro inserida na região semiárida do nordeste do Brasil, apresentou valor médio (4.527 MJ ha⁻¹ mm⁻¹ hora⁻¹) sendo inferior aos valores encontrados por Dias & Silva (2003) para localidade de Fortaleza, CE (6.774 MJ ha⁻¹ mm⁻¹ hora⁻¹), e em estudo realizado para o Estado da Paraíba por Maia Neto & Chaves (1997), encontraram valores de erosividade variando entre 2.000 a 8.000 MJ mm ha⁻¹ hora⁻¹. Para estudos realizados nas regiões sul e sudeste pode-se citar os trabalhos de Rufino et al. (1993) que encontrou valores de R superiores a 10.000 MJ ha⁻¹ mm⁻¹ hora⁻¹ e Bertoni & Lombardi Neto (1990), na região de Campinas-SP (7.000 MJ ha⁻¹ mm⁻¹ hora⁻¹).

Em estudos realizados para região agreste do estado de Pernambuco, mais especificamente para localidade de Caruaru-PE, (Albuquerque et al., 1994) encontrou valores do índice de erosão próximos a 2.100 MJ ha⁻¹ mm⁻¹ hora⁻¹ e (Margolis et al., 1985) verificou valores em torno de 2.060 MJ ha⁻¹ mm⁻¹ hora⁻¹. Os resultados de Silva et al. (1985) para as regiões Agreste e Sertão

do Estado de Pernambuco verificaram para o índice de erosividade valores médios anuais de 2.780 e de 3.700 MJ ha⁻¹ mm⁻¹ hora⁻¹, respectivamente.

De modo geral os valores do fator de erosividade encontrados em estudos realizados na região semiárida do Nordeste, são classificados em grande maioria como de erosividade moderada a moderada-forte, são os casos de Lopes & Brito (1993) para região de Petrolina, PE - Juazeiro, BA (erosividade moderada), Albuquerque et al. (2001), para localidade de Sumé, PB erosividade (moderada) e Chaves et al. (1997) encontraram para localidade de Patos, PB, a classificação de erosividade moderada-forte conforme Carvalho (2008).

Em outras pesquisas que objetivaram a determinação da correlação entre (Precipitação pluvial) x (Rc) pode-se citar (Almeida et al., 2011) para localidade de Cuiabá, MT, com $R^2 = 0,91$, (Cassol et al., 2008) para São Borja, RS, com $R^2 = 0,84$ e Colodro et al. (2002), para Teodoro Sampaio, SP encontraram $R^2 = 0,96$. A relação entre o coeficiente de chuva mensal e a precipitação (Figura 14) para as estações meteorológicas utilizadas neste estudo apresentaram ajustes tipo potência com R^2 variando de 0,9793 a 0,9945. Tais valores do coeficiente de determinação foram encontrados para as estações de Ouricuri (Figura 14b) e Ingazeira (Figura 14a), respectivamente. Almeida et al. (2011) encontraram R^2 de 0,91 para essas duas variáveis.

Na Figura 15 observa-se a distribuição mensal da erosividade da chuva e da precipitação pluvial para as estações meteorológicas da BHSRSF, identifica-se que o período de janeiro a abril apresentou elevada precipitação e conseqüentemente maior intensidade de erosão.

É possível identificar ainda que os índices de erosividade sejam praticamente nulos nos meses que correspondem as estações da primavera (setembro a novembro). Isso se deve a baixa quantidade de chuva registrada nesse período. Diferentemente das características das precipitações ocorrentes de fevereiro a maio, que são intensas e torrenciais. As Figuras (15g e h) caracterizam pelos maiores valores do índice de erosividade apresentados em ambos os casos para o mês de março nas estações de Bebedouro e Remanso, em que se verificam valores da ordem de 1400 MJ ha⁻¹ mm⁻¹ hora⁻¹. Em contrapartida os menores índices de erosividade foram observados em Custódia e Petrolândia (Figuras 15e e f).

A variabilidade espaço-temporal da erosividade está diretamente associado a irregularidade da distribuição da precipitação pluvial, tanto espacial quanto nos níveis acumulados. Os valores de erosividade representam o potencial de degradação do impacto da gota de chuva sobre o solo, remetendo assim a importância da manutenção da cobertura natural dos solos da região.

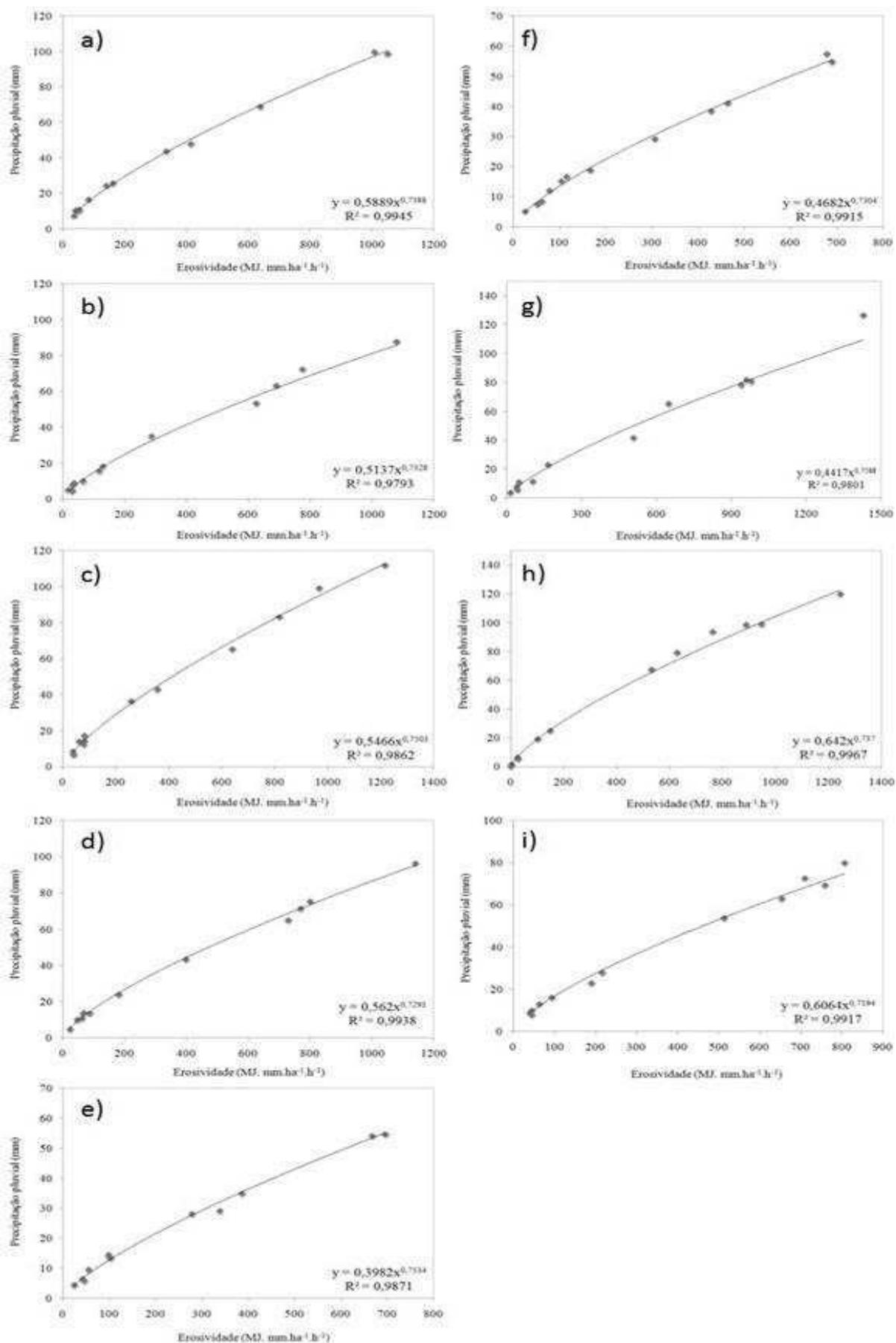


Figura 14. Relação entre a precipitação e o índice de erosividade médio mensal para estação meteorológica da Ingazeira (a), de Ouricuri (b), de Verdejante (c) de Cabrobó (d) de Custódia (e) de Petrolândia (f) de Bebedouro (g) de Remanso (h) e do Morro do Chapéu (i)

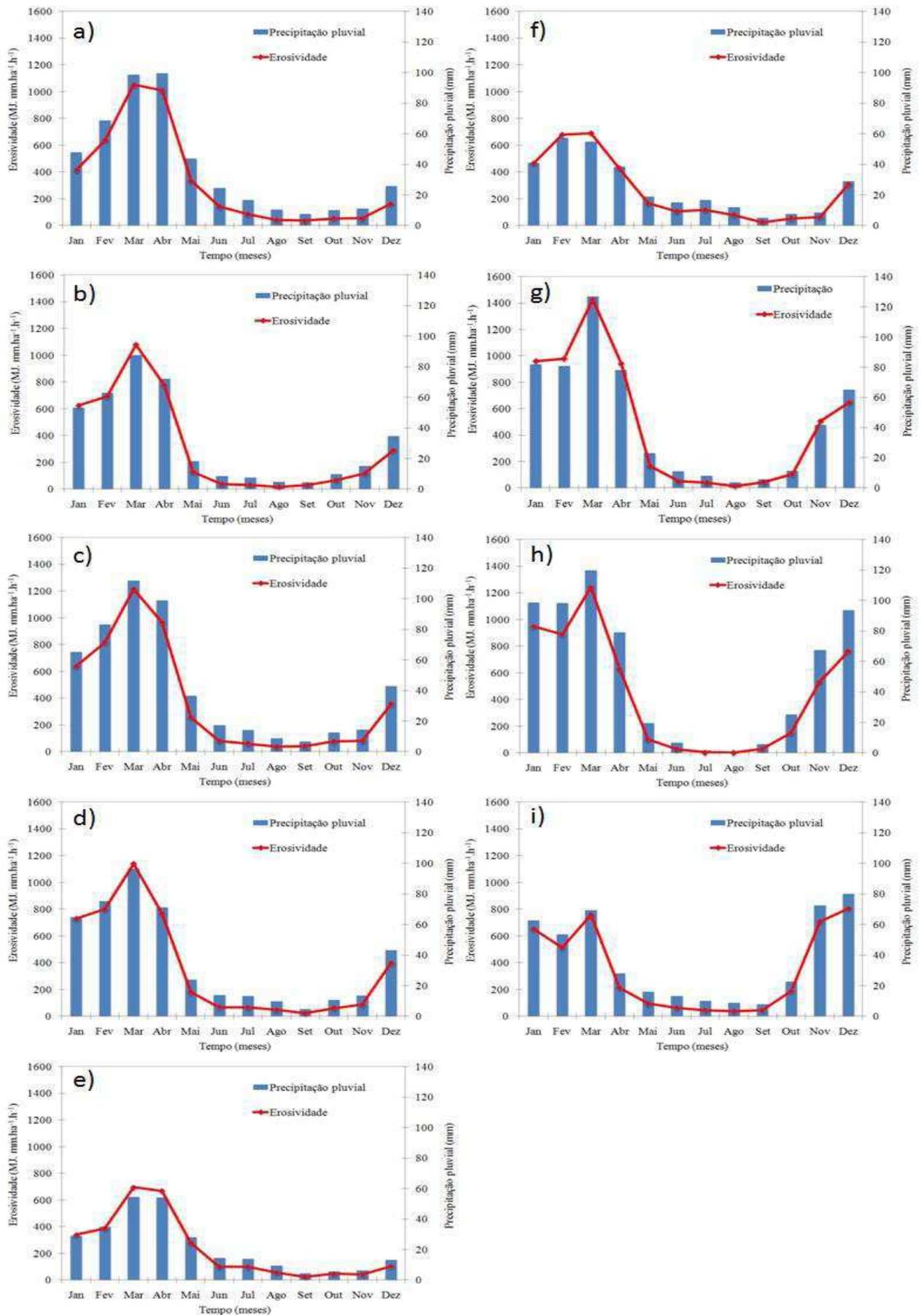


Figura 15. Médias mensais do índice de erosividade e da precipitação pluvial para estação meteorológica da Ingazeira (a), de Ouricuri (b), de Verdejante (c) de Cabrobó (d) de Custódia (e) de Petrolândia (f) de Bebedouro (g) de Remanso (h) e do Morro do Chapéu (i)

4.2.3. Risco de erosão do solo e relevo

O potencial erosivo dos solos em grande parte da BHSRSF (Figura 16) apresenta médio risco de vulnerabilidade associado às manchas de solos do tipo Argilossolo Vermelho-Amarelo, Luvisolo Crômico e Planossolo Nátrico. As áreas de risco moderado são referentes à mancha de solo do tipo Cambissolo Háplico localizado na parte sudoeste da bacia. Por fim, localizam-se com maior predominância as áreas com alto risco nas porções norte, leste e oeste, em detrimento da presença dos solos Vertissolo Cromado, Neossolo Regolítico, Neossolo Litólico e Neossolo Quartzarênico que apresentam grau 3 segundo a metodologia de Ross (1994). Em estudo realizado para a região do Alto Rio Pardo, no município de Pardinho-SP Ribeiro & Campos (2007), aplicando a metodologia de Crepani (1996), identificaram que 95% da bacia apresentam grau de vulnerabilidade média e moderadamente estável.

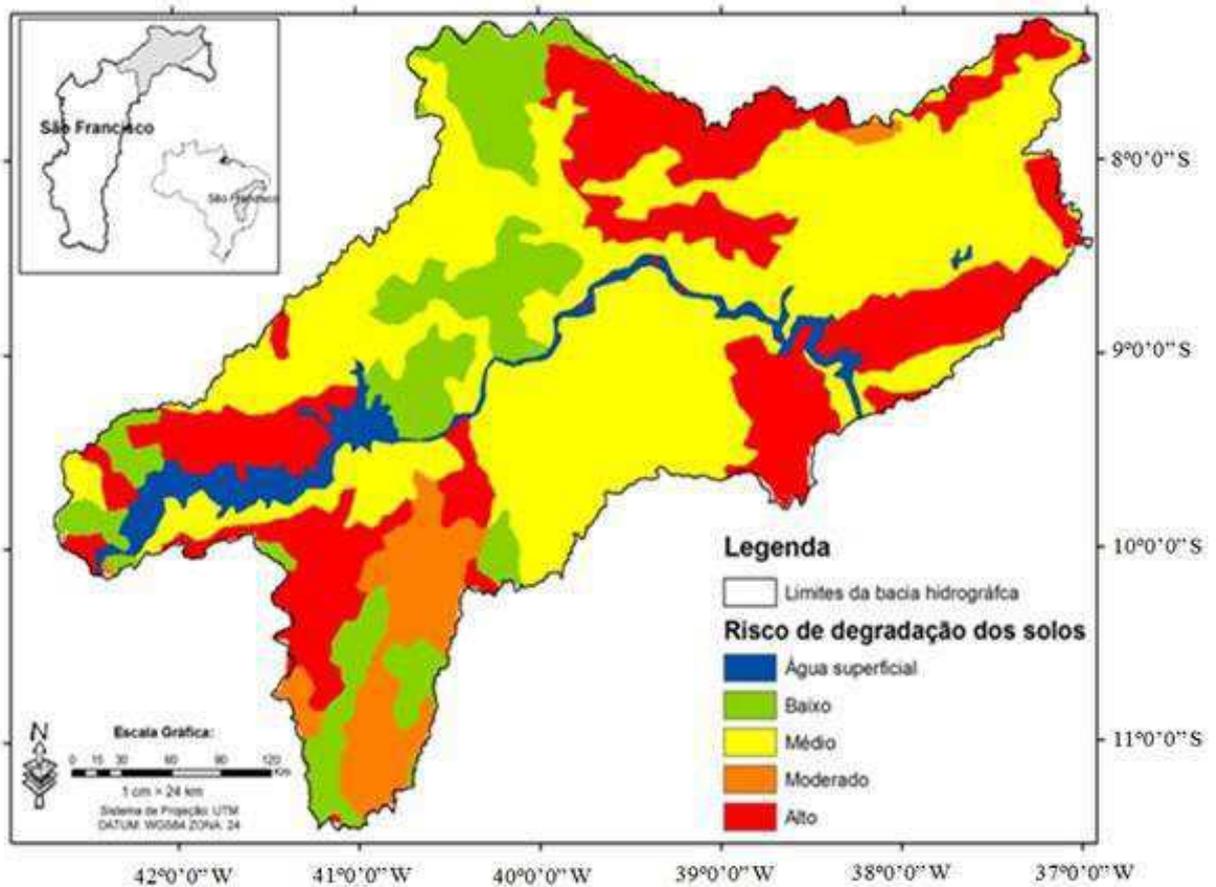


Figura 16. Distribuição espacial do risco de degradação dos solos para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

A vulnerabilidade associada ao declive da BHSRSF (Figura 17) resulta do grau de inclinação da rampa, que é diretamente responsável pela produção do escoamento superficial e sedimentos. As áreas com declives inferiores a 3% formam o domínio da paisagem da bacia, representando certo grau de estabilidade (Ross, 1994). Entretanto, declives acentuados também são verificados, principalmente próximos a Chapada do Araripe e próximo aos divisores topográficos do reservatório de Sobradinho, como também na bacia hidrográfica do Pajeú nos limites com o Estado da Paraíba, onde se localiza o município de Triunfo, PE. Tais regiões são caracterizadas por declives superiores a 20%, ou seja, apresentam alto risco a degradação do ambiente.

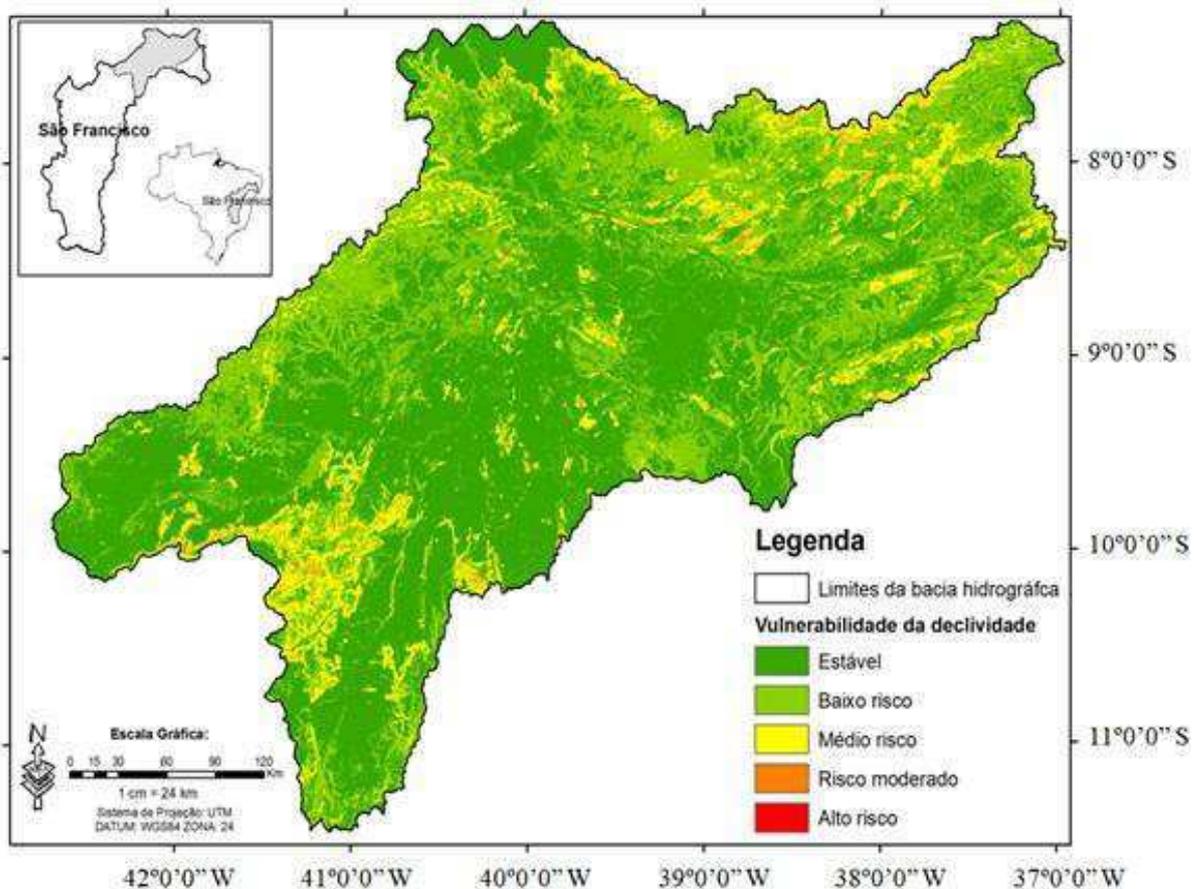


Figura 17. Distribuição espacial da vulnerabilidade da declividade para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

4.3. Calibração e validação do modelo SWAT

A diversidade de parâmetros que controlam o processamento físico e dinâmico das simulações do processo hidrológico do modelo SWAT são funções de entradas das mais diversas variáveis; assim, buscou-se estabelecer algumas modificações que direcionassem a uma maior

homogeneidade com a área de estudo. Para tal, ajustaram-se valores que regem a recarga do aquífero subterrâneo, o número de Manning e o fator de erodibilidade dos canais, além do coeficiente de atraso do escoamento superficial. Muito desses parâmetros que não podem ser obtidos diretamente a partir de dados disponíveis pode ser estimado através de um processo de calibração. A análise de sensibilidade foi realizada alterando um input do parâmetro de uma só vez para que assim fosse avaliado o impacto nos dados de saída do modelo.

O processo de ranqueamento dos parâmetros pela análise de sensibilidade aperfeiçoa a identificação dos elementos mais sensíveis que têm uma significativa influência sobre os dados de saída das simulações de vazão e produção de sedimentos fazendo com que a calibração torne-se mais eficaz. A análise de sensibilidade foi realizada com base nos resultados gerados pelas primeiras simulações, para ajustes iniciais foram utilizados dados de vazão da estação fluviométrica do Juazeiro, como resultados identificou-se 15 parâmetros sensíveis associados aos processos hidrológicos e são em sua maioria relacionados ao escoamento superficial e de base (Tabela 15).

Tabela 15. Parâmetros sensíveis selecionados após a análise de sensibilidade

Parâmetros	Mín.	Máx.	Processo
ALPHA_BF	0	1	Escoamento de base
CH_COV	0,05	0,2	Produção de sedimentos
CH_EROD	0	1	Produção de sedimentos
CN2	-25	25	Escoamento Superficial e sedimentos
ESCO	0,001	1	Evapotranspiração
GW_DELAY	1	500	Escoamento de base
GW_REVAP	0,02	0,2	Escoamento de base
GWQMN	0	5000	Escoamento de base
SLOPE	-0,5	1	Escoamento Superficial
SLSUBBSN	-0,5	1	Escoamento Superficial
SOL_AWC	-0,5	2	Escoamento de base e evapotranspiração
SOL_K	-0,5	1	Escoamento de base
SURLAG	1	16	Escoamento Superficial
USLE_C	0	0,5	Produção de sedimentos
USLE_K	0	0,5	Produção de sedimentos

Os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade as simulações foram calibrados utilizando os dados medidos mensais das vazões da estação fluviométrica do Juazeiro no período de 1993-1995. Todos os parâmetros selecionados pela análise de sensibilidade foram calibrados utilizando o método da tentativa-e-erro com base na literatura de referência e técnicas de

calibração descritas no manual de usuário do SWAT. A validação do modelo é o processo de realização de simulações com um conjunto de dados diferente do conjunto de dados utilizados para calibração, mantendo constantes os parâmetros ajustados, que é usado para testar se os parâmetros ajustados foram apropriados para a bacia de estudo. O escoamento foi calibrado e validado primeiro devido à sua influência na produção de sedimento, em seguida, foi feita a validação da componente da evapotranspiração potencial tendo em vista o preenchimento dos critérios do balanço hídrico da bacia hidrográfica. Para tanto, foram utilizados dados de ETP das estações meteorológicas de Bebedouro, Afogados da Ingazeira, Morro do Chapéu e Petrolândia distribuídas na área de estudo.

4.3.1. Vazão

Os dados mensais das vazões da estação fluviométrica do Juazeiro utilizados para validação compreendem o período de janeiro 1995 a dezembro de 2004 e são mostrados na Figura 18. O modelo descreveu razoavelmente bem o comportamento das vazões para sub-bacia em que a estação fluviométrica está inserida durante todo período analisado, entretanto a curva da vazão simulada (Q_{sim}) apresenta uma tendência significativa de superestimativa principalmente nos períodos de maior fluxo oriundo das precipitações na região (janeiro-abril). A superestimativa dos valores simulados pode estar associado aos valores de alguns parâmetros relacionados ao escoamento superficial, que foi a principal componente de recarga das vazões dos rios analisados neste estudo. Dessa forma, pode-se inferir que um dos fatores mais importantes selecionado pela análise de sensibilidade foi o Cn_2 que reflete as composições do tipo de solo e cobertura e que teve influência na simulação das vazões. Sendo assim, com exceção de alguns episódios de picos de cheia os valores simulados pelo modelo conseguiram reproduzir, com fidelidade, o comportamento do hidrograma, as estimativas da vazão mostraram-se eficazes no primeiro momento, apresentando-se como alternativa para preenchimento de falhas ou análise de séries de dados hidrológicos.

A escolha da estação do Juazeiro para calibração e validação dos dados do modelo SWAT deve-se ao fato que a mesma é a primeira estação após o represamento do reservatório de Sobradinho, que regulariza a vazão em torno de $2000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ tornando mais eficaz o processo de parametrização das HRU's inseridas na sub-bacia e por consequência otimizam os resultados no que se referem aos processos hidrossedimentológicos.

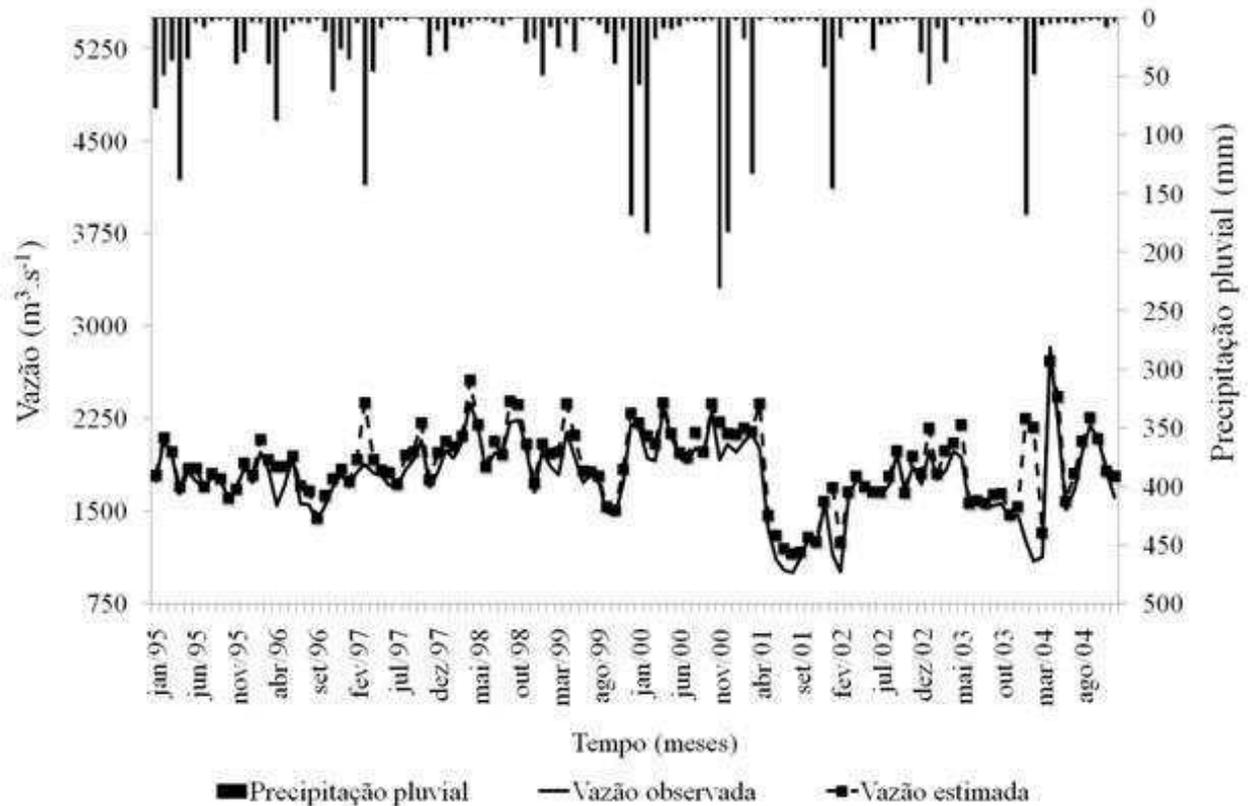


Figura 18. Valores mensais da precipitação e vazões observadas (Q_{obs}) e simuladas (Q_{sim}) para validação, com dados da estação fluviométrica do Juazeiro (1995 a 2004)

A estatística quantitativa dos resultados das vazões observadas (Q_{obs}) e simuladas (Q_{sim}) para o período de calibração e validação, com dados da estação fluviométrica do Juazeiro são apresentados na Tabela 16. Os valores encontrados dos parâmetros estatísticos EMA e R^2 para o período da calibração (EMA = $-76,9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $R^2 = 0,95$) diferiram quando comparados aqueles para validação (EMA = $16,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $R^2 = 0,77$), a partir do R^2 pode-se inferir que as simulações realizadas pelo modelo apresentaram desempenho melhor durante o período calibração quando comparado com o período de validação.

Tabela 16. Análise estatística das vazões observadas (Q_{obs}) e simuladas (Q_{sim}) para o período de calibração e validação, com dados da estação fluviométrica do Juazeiro

Período de análise	Qobs			Qsim			EMA (m^3s^{-1})	EMP (%)	RQMDN (%)
	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.			
Calibração	2487,1	5040,3	1858,3	2412,6	5031,3	1799,8	-76,9	-3,2	3,8
Validação	1775,0	2831,0	999,3	1791,4	2724,7	1039,4	16,4	0,8	8,5

Os valores mais baixos em relação ao R^2 (Figuras 19 e 20) poderiam ser justificados devido à alta variabilidade do escoamento superficial no período de validação. O EMP (%) corresponde ao percentual de viés das vazões simuladas com relação às vazões observadas. Esta estatística de precisão apresentou pequenos desvios demonstrando ter ocorrido uma subestimativa da vazão na ordem -3,2% no período de calibração e uma superestimativa de 0,8% durante a validação. De acordo com Liew et al. (2007) este resultado indica boa adequação do modelo SWAT nesta bacia. Além disso, os valores de RQMDN foram de 3,8 e 8,5% para os períodos de calibração e validação, respectivamente. As estimativas apresentaram assim que os valores de R^2 são significativos aos níveis de probabilidades de 1 e 5% pelo teste t-Student

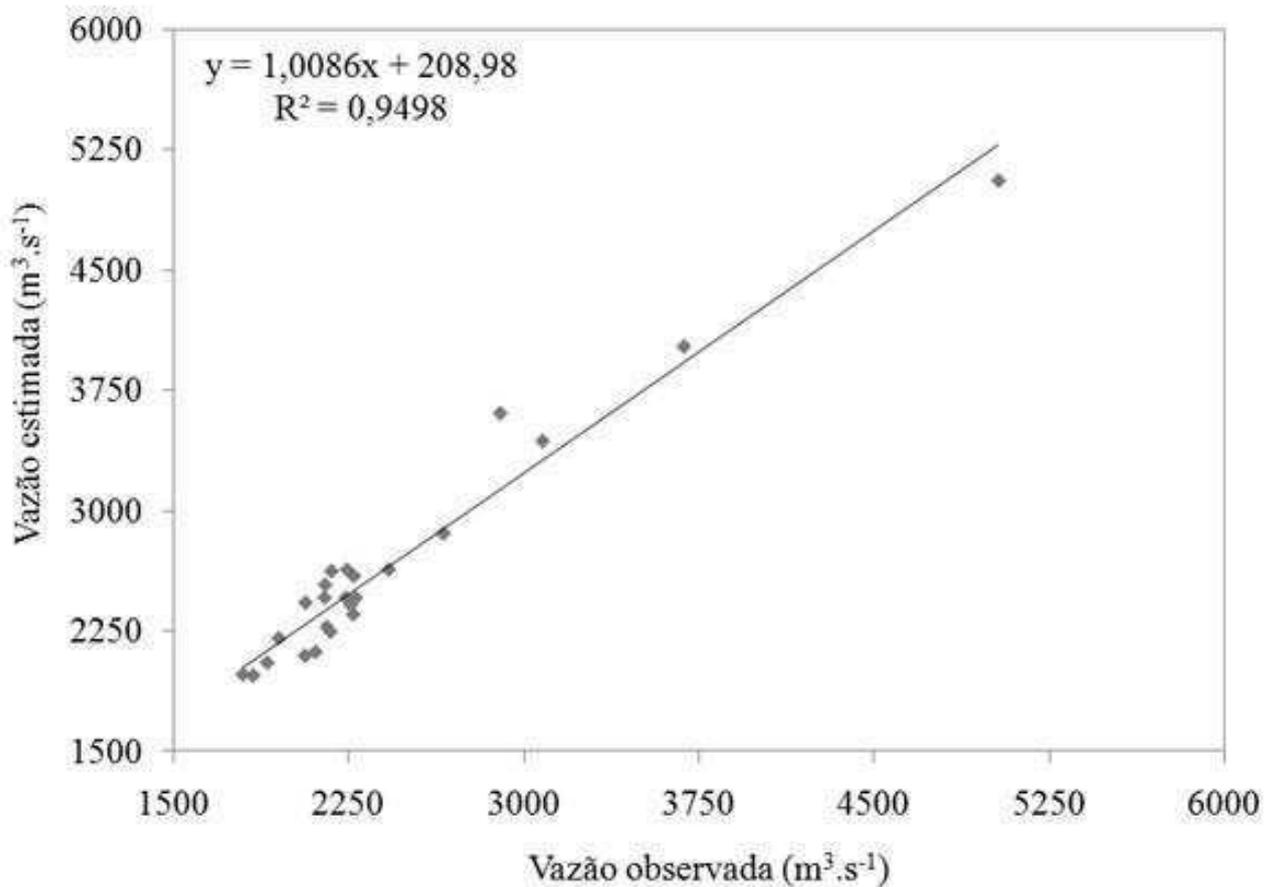


Figura 19. Relação entre as vazões observadas (Q_{obs}) e simuladas (Q_{sim}) para o período de calibração, com dados da estação fluviométrica do Juazeiro

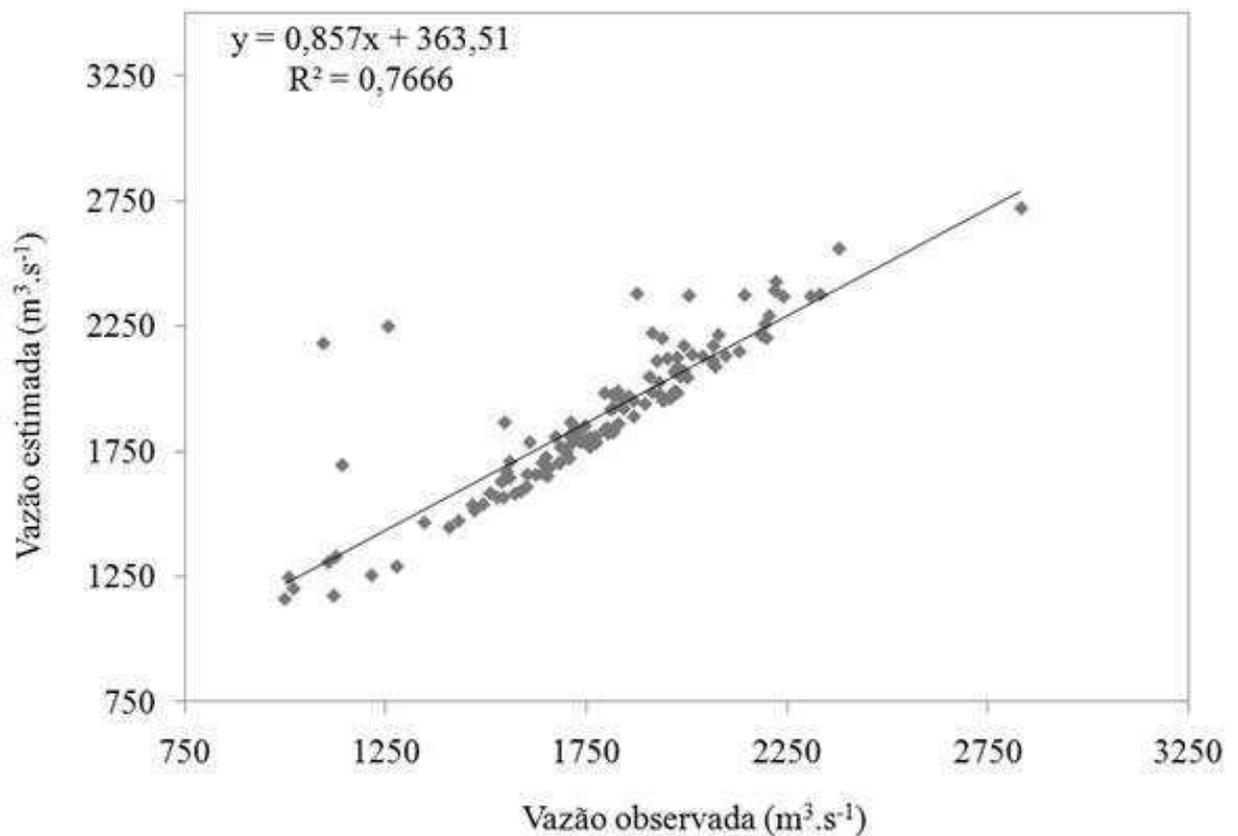


Figura 20. Relação entre as vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para o período de validação, com dados da estação fluviométrica do Juazeiro

A representação espacial de dados hidrometeorológicos tem grande impacto sobre a precisão da simulação do modelo em grandes áreas, principalmente para componentes do balanço hidrológico que possuem grande variabilidade espaço-temporal. Tal questão torna-se ainda mais relevante quando as análises são realizadas em regiões semiáridas. Portanto, para representar a variabilidade espacial do clima, buscou-se validar os dados simulados de vazão para mais duas estações fluviométricas inseridas na BHSRSF, pois se considerou que o output de uma única estação poderia limitar o desempenho do modelo neste estudo. As comparações entre as descargas observadas (Qobs) e simuladas (Qsim), para as estações de Abreus e Floresta são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17. Análise estatística das vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para o período de validação, com dados da estação fluviométrica de Abreus e Floresta

Estações	Qobs			Qsim			EMA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	EMP (%)	RQMDN (%)
	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.			
Abreus	0,7	2,7	0,08	0,7	2,0	0,06	-0,02	30,9	45,1
Floresta	12,4	103,4	0,9	7,4	78,0	0,3	4,1	45,5	70,7

O desempenho com relação à vazão simulada foi ainda examinado usando critérios estatísticos, aplicado para o período de validação. O período de validação para as estações possuem séries históricas distintas, Abreus (1993-2000) e Floresta (2005-2006), sendo verificado o melhor desempenho para a estação fluviométrica de Floresta. Para essa estação ainda é possível verificar a tendência de subestimativa dos valores simulados em torno dos 45%, todavia o menor número de observações minimiza a variabilidade natural dos dados, ou seja, o maior período de análises para estação de Abreus facilita a verificação da consistência do modelo SWAT. Para ambas as estações o modelo apresentou dificuldade em simular os picos de cheia, apresentando RQMDN da ordem de 45 e 70%, para as estações de Abreus e Floresta, respectivamente.

As simulações das vazões para estação fluviométrica de Abreus apresentaram grande variabilidade ao longo do período de validação (1993 a 2000), assim como pode ser observado pela Figura 21, verifica-se a alternância de ciclos de subestimativa e superestimativa caracterizando que as HRU's pertencentes a sub-bacia na qual está inserida a estação possuem configurações distintas das parametrizações utilizadas para calibração.

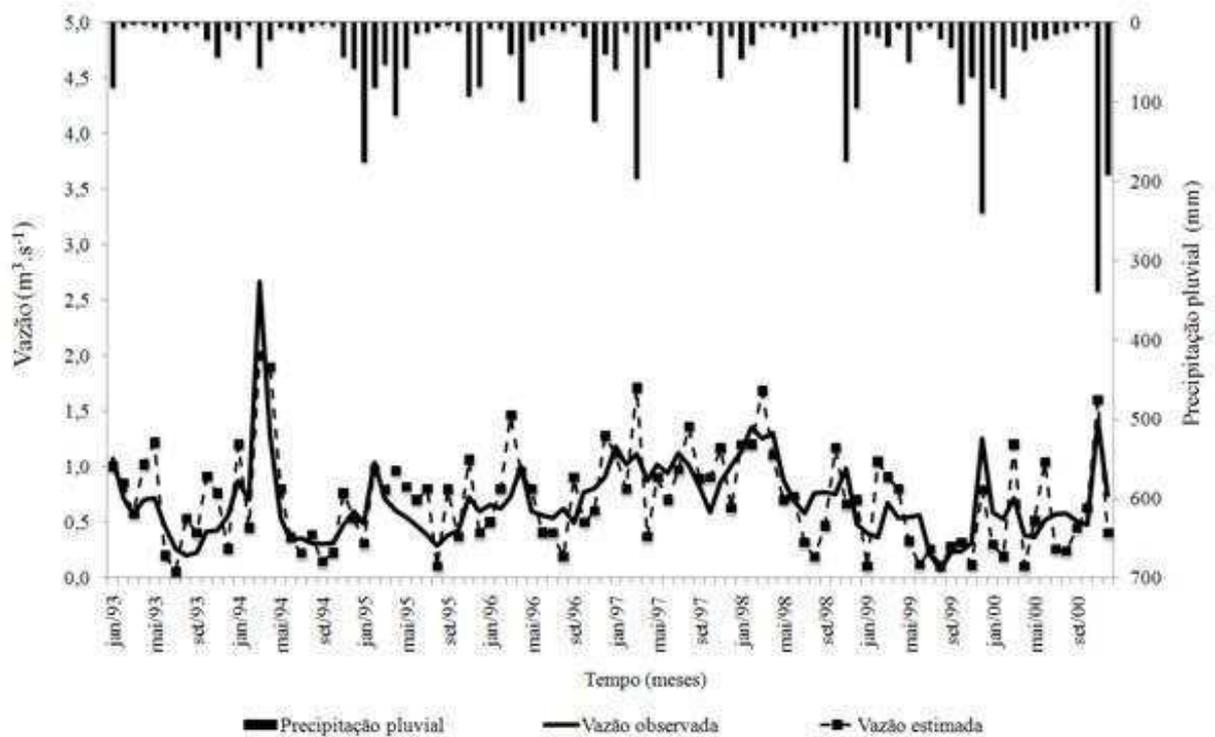


Figura 21. Valores mensais da precipitação e vazões observadas (Qobs) e simuladas (Qsim) para validação, com dados da estação fluviométrica de Abreus (1993 a 2000)

O modelo ainda conseguiu descrever os perfis de pico de vazão, seguindo os períodos de cheia e foi assim encontrado para o coeficiente de determinação (R^2) o valor de 0,50 (Figura 22). Apesar de inferior aos encontrados para estação do Juazeiro, tal coeficiente ainda se mostrou significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste t-Student. Dentre as configurações que possam ajudar a descrever o comportamento anômalo das HRU's, verifica-se a predominância do tipo de solo Cambissolo Háplico (53%) que garante a sub-bacia permeabilidade rápida; com relação à textura, o solo foi classificado como médio a franco arenoso, com $USLE_K = 0,1584$. O principal tipo de cobertura é de caatinga arbórea e arbustiva cerca de 50% da área total, a classe de declive mais representativa (78%) é a de várzea.

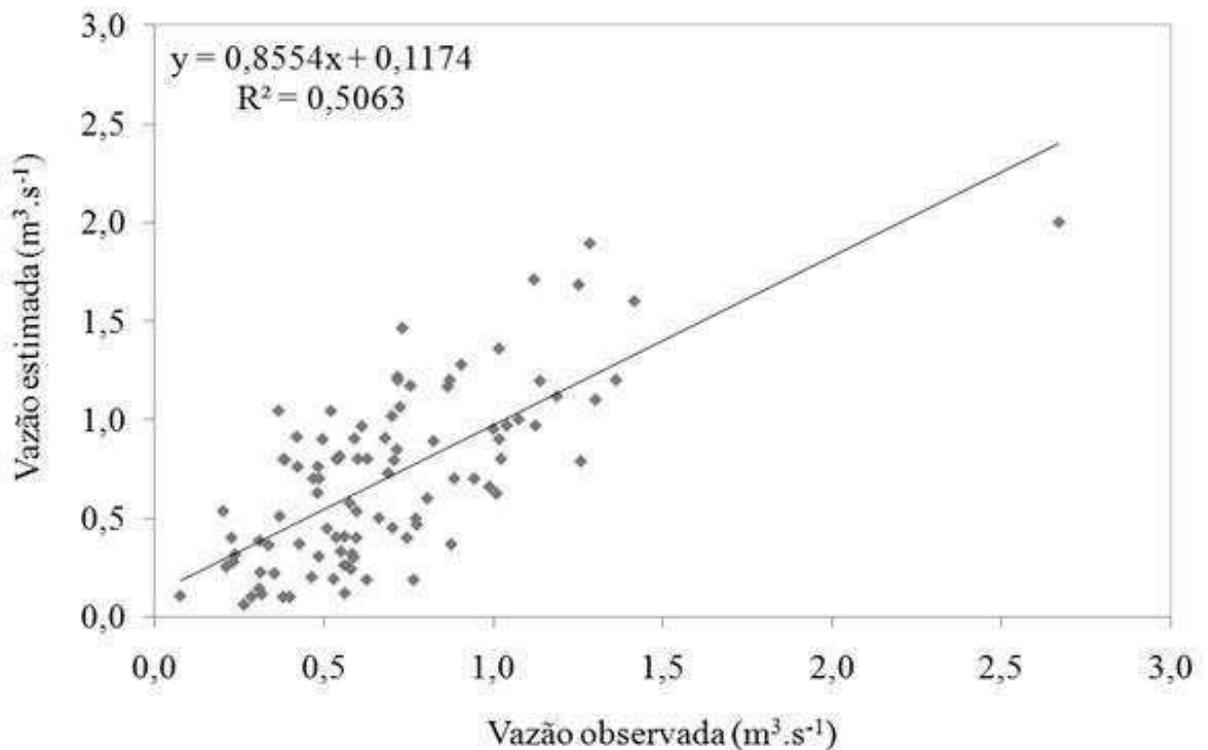


Figura 22. Relação entre as vazões observadas (Q_{obs}) e simuladas (Q_{sim}) para o período de validação, com dados da estação fluviométrica de Abreus

O hidrograma representativo do período de validação (jan-2005 a dez-2006) para estação fluviométrica de Floresta é apresentado na (Figura 23), a partir da mesma é possível observar grande concentração das vazões de pico no mês de abril de 2005 e 2006, em especial o ano de 2005 apresentou intensa concentração da precipitação neste mês (350 mm) com vazões observadas da ordem de $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, apesar da intensidade da precipitação o modelo não conseguiu converter em resposta vazões compatíveis, resultando assim uma limitação no que se refere a eventos extremos, outro fator associado deve-se a demanda evapotranspirativa da região e a

grande capacidade de geração de escoamento superficial que não consegue fazer a recarga da vazão com tanta eficiência quando comparada a recarga do aquífero raso.

O período chuvoso (janeiro-abri) do ano de 2006 não apresentou a mesma concentração de chuvas registrada em 2005, entretanto as recargas consecutivas resultantes do acumulado de três meses que resultaram em pouco mais de 300 mm de precipitação garantiram maior concentração do pico de vazão ($100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Os fatores de cobertura do solo como também o fator de umidade também são componentes que pode alterar a conversão de chuva em vazão.

De modo geral verificou-se uma boa correspondência das vazões observadas (Q_{obs}) e simuladas (Q_{sim}) (Figura 24), principalmente para valores de pequena escala, em ambos os anos observa-se subestimativa da Q_{sim} para os períodos de cheia.

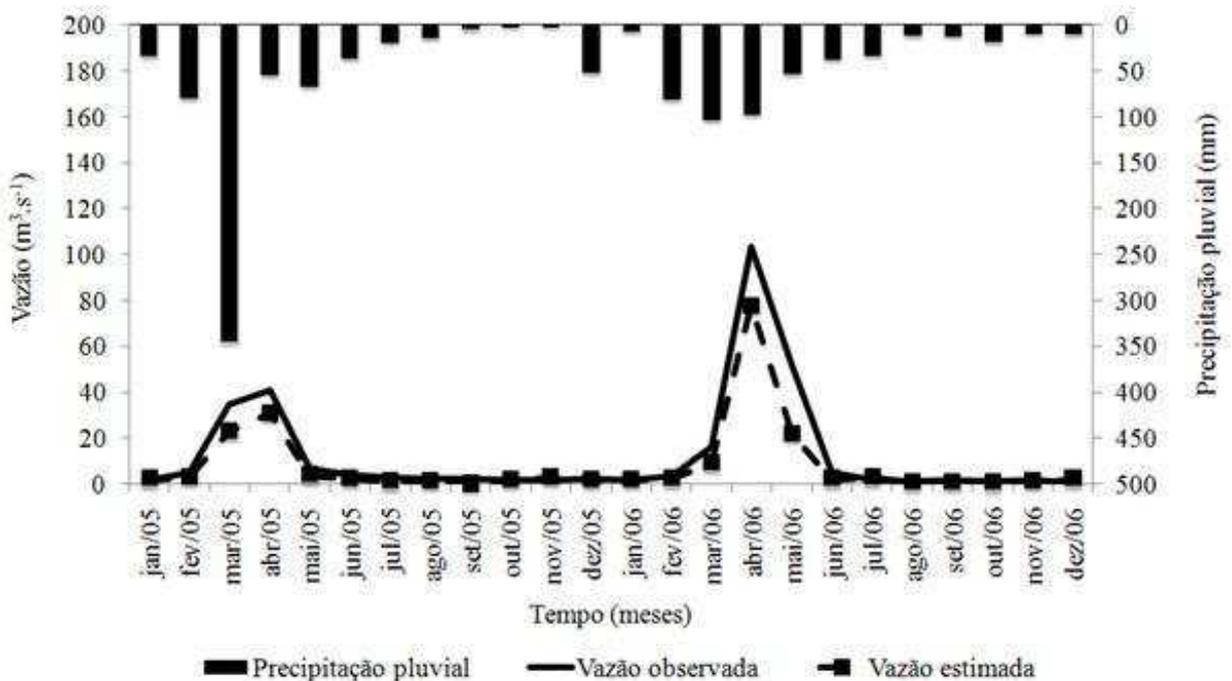


Figura 23. Valores mensais da precipitação e vazões observadas (Q_{obs}) e simuladas (Q_{sim}) para validação, com dados da estação fluviométrica de Floresta (2005 a 2006)

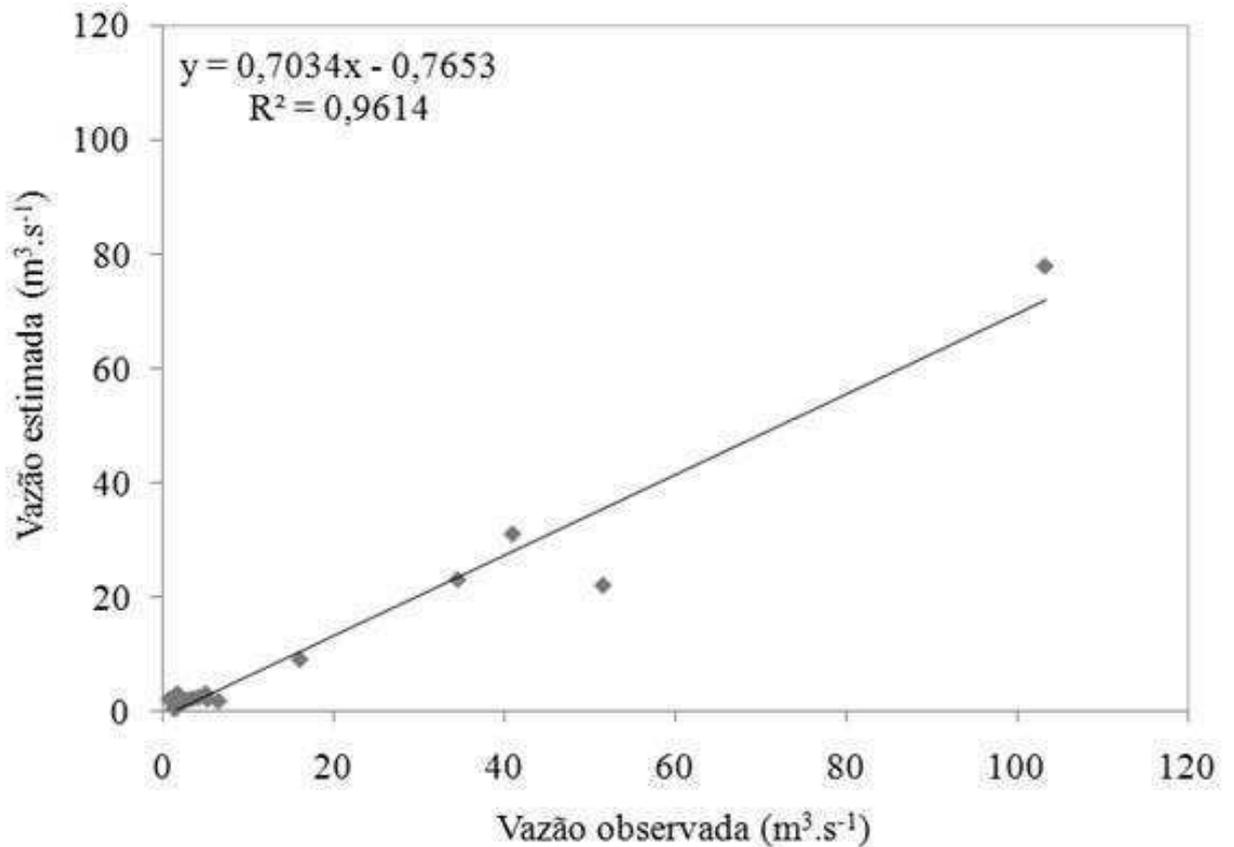


Figura 24. Relação entre as vazões observadas (Q_{obs}) e simuladas (Q_{sim}) para o período de validação, com dados da estação fluviométrica de Floresta

4.3.2. Evapotranspiração potencial

A sensibilidade do modelo foi abordada em relação à distribuição das componentes que compõem a superfície (relevo, solos e cobertura do solo) como também as variáveis que condicionam o tempo e clima. A partir da análise de sensibilidade foi possível verificar que dentre os principais parâmetros selecionados, a estimativa da ETP com valores coerentes seria de grande importância tendo em vista a demanda natural do ambiente semiárido; tal forçante atua diretamente nos processos de REVAP como também na transferência de água para os canais, fazendo retiradas substanciais do escoamento superficial (Runoff). Como já mencionado, neste estudo foi selecionado no modelo SWAT e o método de estimativa da ETP proposto por Penman-Monteith, entretanto na indisponibilidade das variáveis de entrada para todas as localidades utilizadas na validação de tal componente foi também utilizado o método de Linacre. Para tanto foram utilizadas nove estações meteorológicas distribuídas na área de estudo (Tabela 18).

Para análise do desempenho na estimativa da ETP foi tomado como modelo de referência o método de Linacre (ETP – Calculada) e o método simulado (ETP – SWAT), os resultados obtidos para os 2 métodos foram comparados utilizando critérios estatísticos, aplicados para o período de validação. O período de validação para as estações possuem séries históricas (jan-1993 a dez-2010). A Tabela 18 exhibe a relação entre as estimativas de ETP pelo modelo SWAT e o método de Linacre para BHSRSF, os valores médios diários obtidos pelo método de Linacre foram de $5,7 \text{ mm dia}^{-1}$, enquanto os estimados pelo modelo SWAT foram de $5,2 \text{ mm dia}^{-1}$. De acordo com os índices estatísticos houve em média subestimativa dos valores de ETP simulados pelo SWAT, a magnitude do EMA foi de $0,5 \text{ mm dia}^{-1}$, o EMP foi de 9,8% e o RQMDN foi de 9,4%. As estações de Custódia e Ingazeira foram as únicas que apresentaram superestimativa nos valores de ETP, foram verificados valores médios de $\text{EMA} = 0,4 \text{ mm.dia}^{-1}$. Ambas estações localizam-se na parte nordeste da BHSRSF e pela análise climatológica feita no item 4.2.1 (Tabela 13) apresentaram as menores temperaturas e as maiores umidades relativas. O valor de $1,2 \text{ mm dia}^{-1}$ do índice EMA para estação de Remanso indicou a maior subestimativa para análise da ETP.

Tabela 18. Análise estatística dos modelos de evapotranspiração potencial (ETP)

Estação meteorológica	ETP – Linacre (mm dia ⁻¹)	ETP – SWAT (mm dia ⁻¹)	EMA (mm dia ⁻¹)	EMP (%)	RQMDN (%)
Bebedouro	6,2	5,3	0,9	18,1	16,4
Cabrobó	6,0	5,2	0,8	14,4	15,1
Custódia	5,0	5,4	-0,4	-6,9	-8,6
Ingazeira	4,8	5,2	-0,4	-6,8	-8,8
Morro do Chapéu	5,1	4,7	0,4	9,8	9,5
Ouricuri	5,9	4,9	1,0	19,4	18,7
Petrolândia	5,8	5,4	0,4	7,7	9,2
Remanso	6,5	5,3	1,2	22,7	20,7
Verdejante	5,7	5,1	0,6	10,0	12,6

A Figura 25 apresenta a relação entre as estimativas de ETP pelo modelo SWAT e Linacre para as estações meteorológicas utilizadas neste estudo observa-se que para Ingazeira (Figura 25a), a relação entre as estimativas de ETP pelo modelo SWAT e o método de Linacre foi bem superior a de Bebedouro ($R^2=0,83$) Figura 25g, sendo R^2 superior a 0,90 que foi estatisticamente significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t-Student. O valor mínimo simulado para Ingazeira foi de $3,5 \text{ mm dia}^{-1}$, enquanto que o observado foi de $3,1 \text{ mm.dia}^{-1}$, enquanto os máximos foram $6,5$ e $6,3 \text{ mm dia}^{-1}$, para o modelo SWAT e o método de Linacre, respectivamente. Os valores médios simulados superestimaram os observados na ordem de $0,4 \text{ mm dia}^{-1}$, o que representa cerca de 7%. De acordo com Fietz et al. (2005) os valores

médios diários da evapotranspiração potencial (ETP) variaram de 3,16 a 5,09 mm dia⁻¹ para as condições da região de Dourados, Estado do Mato Grosso do Sul. Segundo os autores o método de Penman-Monteith foi o que estimou mais satisfatoriamente a evapotranspiração potencial (ETP) diária. O método de Hargreaves-Samani apresentou um desempenho satisfatório, enquanto o método de Camargo obteve desempenho insatisfatório.

Em trabalho semelhante, Oliveira et al. (2001), para algumas localidades de Goiás e Distrito Federal, avaliaram diferentes métodos de estimativa da ETP e compararam com o método de FAO Penman-Monteith. Para as localidades estudadas, os resultados mostraram que os valores da ETP foram mais bem estimados pelos modelos de Penman e Hargreaves seguidos da Radiação e que ambos os modelos superestimaram a ETP, quando comparados com o de Penman-Monteith.

A (Figura 25f) indica a relação entre os dados mensais da ETP estimada pelo modelo SWAT e pelo método de Linacre para a região de Petrolândia. Os valores médios foram subestimados pelo SWAT com EMA de 0,4 mm dia⁻¹, representando pouco mais de 6,4%. O valor médio simulado foi da ordem de 5,4 mm dia⁻¹, apresentando valor máximo e mínimo de 6,9 e 2,8 mm dia⁻¹, respectivamente. A análise do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,90$) permite verificar que as estimativas atenderam satisfatoriamente os critérios estatísticos com níveis de significância utilizados neste estudo.

Através da (Figura 25i) é possível avaliar a eficiência do modelo SWAT em estimar a ETP para localidade do Morro do Chapéu para o período (jan-1993 a dez-2010) utilizando-se o método de Linacre. O $R^2=0,87$ indica a boa relação entre os valores encontrados entre SWAT e o método de Linacre na estimativa de ETP. Para essa localidade foi verificada subestimativa de 0,3 mm dia⁻¹ do modelo SWAT em comparação ao método de referência, o EMP foi de 7,8%, enquanto o RQMDN foi da ordem 9,5%.

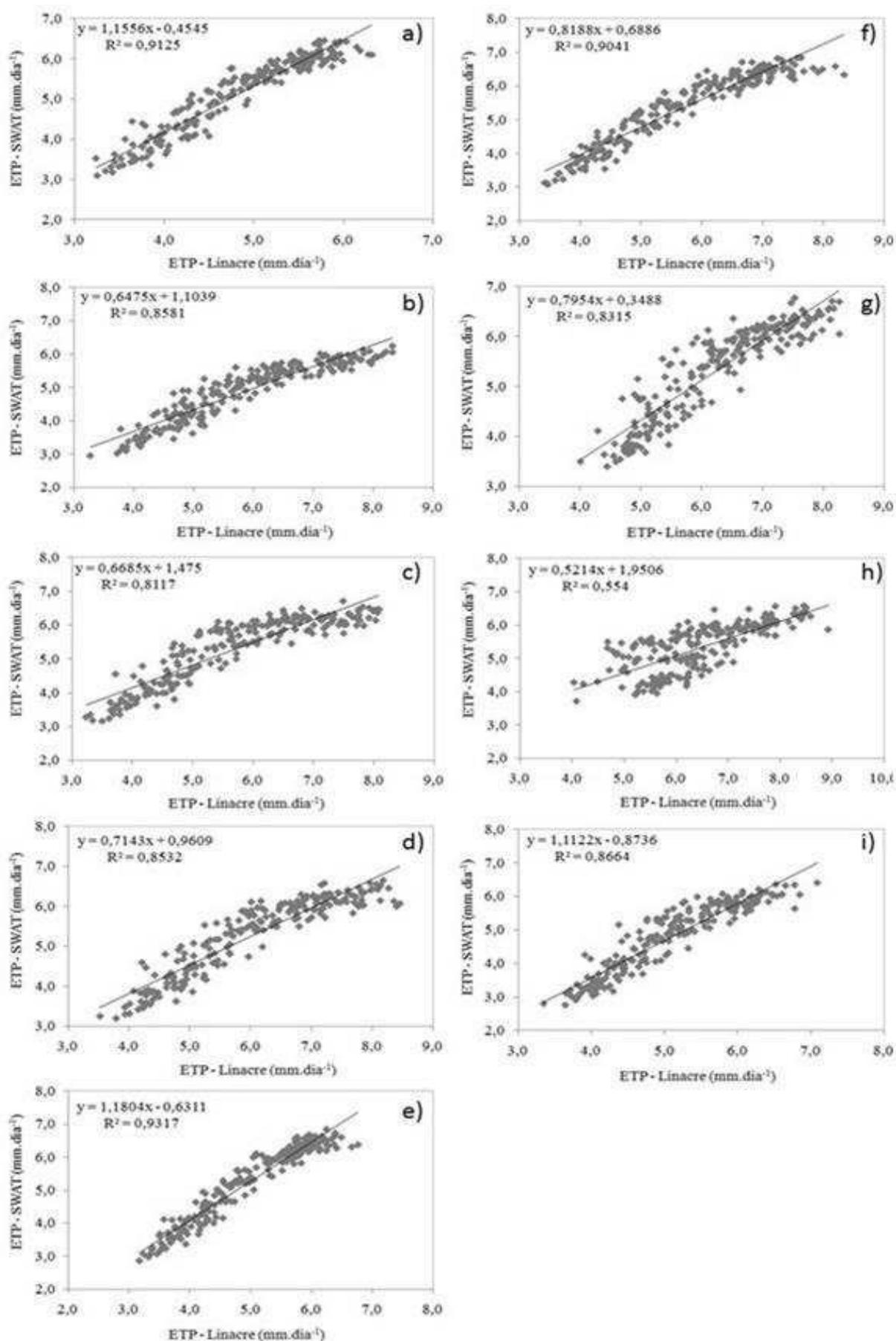


Figura 25. Relação entre as estimativas de ETP pelo modelo SWAT e Linacre para estação meteorológica da Ingazeira (a), de Ouricuri (b), de Verdejante (c) de Cabrobó (d) de Custódia (e) de Petrolândia (f) de Bebedouro (g) de Remanso (h) e do Morro do Chapéu (i)

4.4. Escoamento superficial e aporte de sedimentos

Cenário atual de uso de solo

As simulações realizadas neste estudo para avaliar o impacto da mudança na cobertura do solo sobre o aporte de sedimentos nas condições atuais de uso de solo foram realizadas no período de 1993 a 2010. A precipitação total anual média para o referido período foi de 410,9 mm para BHSRSF, sendo o maior registro observado para o ano de 2000, com total de 698,0 mm, enquanto 1993 foi o ano de menor pluviosidade, com 128,2 mm (Tabela 19).

Tabela 19. Valores médios mensais e anuais da precipitação pluvial (mm) para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
1993	36,6	6,6	2,2	7,0	24,1	5,1	2,3	3,6	3,0	14,8	16,4	6,5	128,2
1994	37,2	8,4	40,4	86,6	10,3	9,9	6,7	2,9	2,4	2,8	31,5	39,4	278,4
1995	63,5	82,8	54,5	140,8	47,0	7,6	11,9	2,7	2,7	2,6	58,3	33,1	507,4
1996	15,1	13,4	61,4	185,3	25,9	9,2	5,7	10,8	3,1	18,7	59,7	23,9	432,0
1997	47,8	15,9	174,9	110,1	26,7	3,6	5,1	8,3	1,1	7,4	21,4	15,6	438,0
1998	44,8	16,7	24,0	5,2	4,4	8,3	7,9	2,8	0,6	2,3	29,1	27,9	174,1
1999	46,5	23,1	37,8	15,1	47,1	5,5	4,2	6,7	16,7	54,0	47,8	196,7	501,3
2000	79,8	172,4	36,2	50,6	10,7	33,9	9,4	12,2	14,2	2,8	105,4	170,4	698,0
2001	8,1	27,8	83,2	5,4	4,2	16,3	14,5	12,3	2,2	10,2	4,2	38,0	226,5
2002	191,2	43,8	10,9	7,4	21,9	18,9	12,2	6,6	2,5	1,8	4,0	55,5	376,6
2003	83,1	13,7	86,9	3,7	15,2	5,0	8,4	4,3	4,4	1,7	12,6	8,2	247,1
2004	319,4	109,3	27,7	11,2	10,7	11,4	17,3	10,7	2,7	1,8	13,0	11,2	546,3
2005	56,0	125,5	122,1	21,3	38,3	19,5	13,4	8,4	1,9	0,8	4,6	37,4	449,3
2006	1,2	61,3	85,6	45,9	23,1	25,3	20,1	8,4	6,3	11,1	11,0	8,0	307,4
2007	6,3	243,4	10,0	12,1	12,1	8,5	9,1	18,1	5,5	1,3	7,7	4,3	338,4
2008	32,2	79,6	200,0	118,2	32,1	15,0	18,4	12,6	3,9	2,5	2,9	25,9	543,5
2009	24,5	51,3	44,1	151,9	141,4	8,9	11,1	12,2	0,8	52,3	6,9	25,4	530,9
2010	85,3	80,9	114,0	135,5	11,9	30,1	12,0	8,0	7,7	57,5	3,8	126,7	673,3
Média	65,5	65,3	67,6	61,8	28,2	13,5	10,5	8,4	4,5	13,7	24,5	47,5	410,9
DP	76,8	64,3	55,7	62,4	31,1	8,9	5,0	4,2	4,4	19,5	27,4	56,9	163,3
CV (%)	1,2	1,0	0,8	1,0	1,1	0,7	0,5	0,5	1,0	1,4	1,1	1,2	0,4
Máx.	319,4	243,4	200,0	185,3	141,4	33,9	20,1	18,1	16,7	57,5	105,4	196,7	698,0
Mín.	1,2	6,6	2,2	3,7	4,2	3,6	2,3	2,7	0,6	0,8	2,9	4,3	128,2

DP - desvio padrão; CV- coeficiente de variação; Máx.- valor máximo da série. Mín. - valor mínimo da série

A distribuição dos totais acumulados da precipitação na região do submédio do rio São Francisco para os anos de 1995, 1996, 1999, 2000, 2004, 2008, 2010 e média 1993-2010 é apresentada na Figura (26). Esses anos fazem parte do período de simulação selecionado para análise. A configuração espacial da precipitação pluvial para o ano de 1995 é apresentada na Figura (26a), onde verifica-se que os maiores valores acumulados (> 960 mm) concentram-se na região oeste da bacia, e os menores na parte leste (< 220 mm). Segundo Mello et al. (1996) a variabilidade espaço-temporal da precipitação Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco – BHSRSF está condicionada diretamente a intensidade e ocorrência de dois sistemas meteorológicos a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). Tais sistemas atuam em épocas distintas do ano, sendo observados mais especificamente entre os meses de fevereiro a maio (ZCIT), e os VCAN's ocorrem na primavera, verão e outono, no período de outubro a abril, com máxima frequência nos mês de janeiro. Uma vez que o Submédio São Francisco está localizado no meio da região semiárida, ainda relacionada ao clima, cabe destacar que se trata de um território vulnerável e sujeito a períodos críticos de prolongadas estiagens, que apresenta várias zonas geográficas e diferentes índices de aridez (CBHSF, 2004).

As distribuições dos acumulados médios da precipitação pluvial para os anos de 1996 e 1999, Figuras (26b e c), apresentam intensificação dos núcleos de menor intensidade de precipitação (< 400 mm) na parte sudeste da bacia. Entretanto, são verificados áreas de maiores registros sobre a Serra do Araripe (> 700 mm). Para os demais anos analisados, verifica-se que em especial o ano de 2000 (Figura 26d) e 2010 (Figura 26g) ocorreram os maiores registros de precipitação, principalmente nas regiões oeste e noroeste da região para o ano de 2010 e, ainda, verifica-se a formação de um núcleo mais intenso sobre a parte central da bacia.

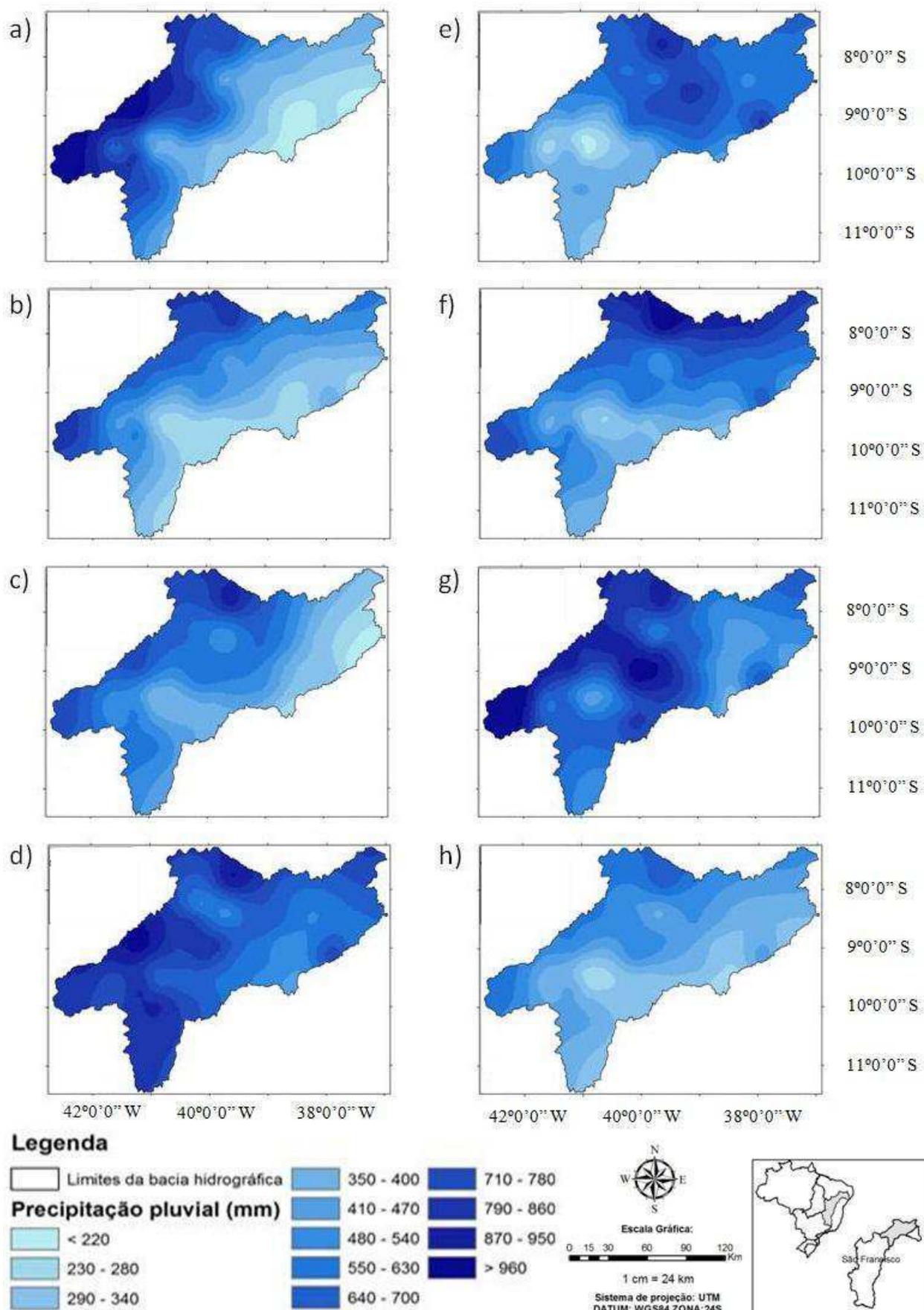


Figura 26. Distribuição dos totais acumulados da precipitação na região do submédio do rio São Francisco para os anos de (a) 1995, (b) 1996, (c) 1999, (d) 2000, (e) 2004, (f) 2008, (g) 2010 e (h) média 1993-2010

4.4.1. Escoamento superficial

Os resultados das simulações da variável em análise qual para o cenário atual de manejo apresentou grande variabilidade espacial no período de 1993-2010. A discussão é apresentada apenas para os anos em que foram verificados os maiores índices de precipitação (Figuras 27a a g), com os maiores valores registrados na parte noroeste da bacia (Figura 27h), com exceção do ano de 2004, que a distribuição concentrou-se na região leste. Observou-se que a forçante motriz do escoamento está diretamente associada à intensidade da precipitação, como também a sua distribuição espacial.

A análise conjunta dos mapas da distribuição da precipitação média para bacia (Figura 26h) e do escoamento médio (Figura 27h) permitem verificar tal correspondência. Entretanto, outras componentes de superfície influenciam diretamente a eficiência na produção do escoamento, que é o caso do declive, da cobertura e das classes de solos da região, por sua vez as respostas da porção noroeste da bacia podem estar associadas a cobertura predominante de pastagem que somados ao declive acentuado da Chapada do Araripe podem justificar as maiores intensidades.

A análise pedológica indica que as características granulométricas dos solos da região também têm o potencial na geração do escoamento como também na suscetibilidade à produção de sedimentos. Os solos predominantes na área de estudo são as classes de Luvisolo Crômico, Argilossolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Quartzarênico, que apresentam permeabilidade moderada, média a lenta e rápida, respectivamente, de acordo com a classificação do manual de solos da EMBRAPA (1999). Os solos arenosos como os Neossolos Quartzarênicos (antigas Areias Quartzosas) são caracterizados por terem grande quantidade de poros grandes (macroporos) que permitem a rápida infiltração e drenagem interna da água no perfil do solo (Brady & Weill, 2002). Principalmente nas áreas com cultivos irrigados, o uso de adubos e pesticidas é utilizado com maior importância alguns cuidados que devem ser tomados no momento da adubação para evitar a perda de dinheiro e tempo nesta atividade agrícola. Observa-se, ainda, que a porção sudoeste da bacia também apresenta valores significativos de escoamento superficial, em especial para o ano 2000 (Figura 27d), que correspondem ao ano mais chuvoso do período simulado. Apesar da predominância dos Neossolos Litólicos, que possuem permeabilidade alta, essa região apresenta declividades acentuadas, sendo considerado seu relevo de fortemente ondulado a montanhoso.

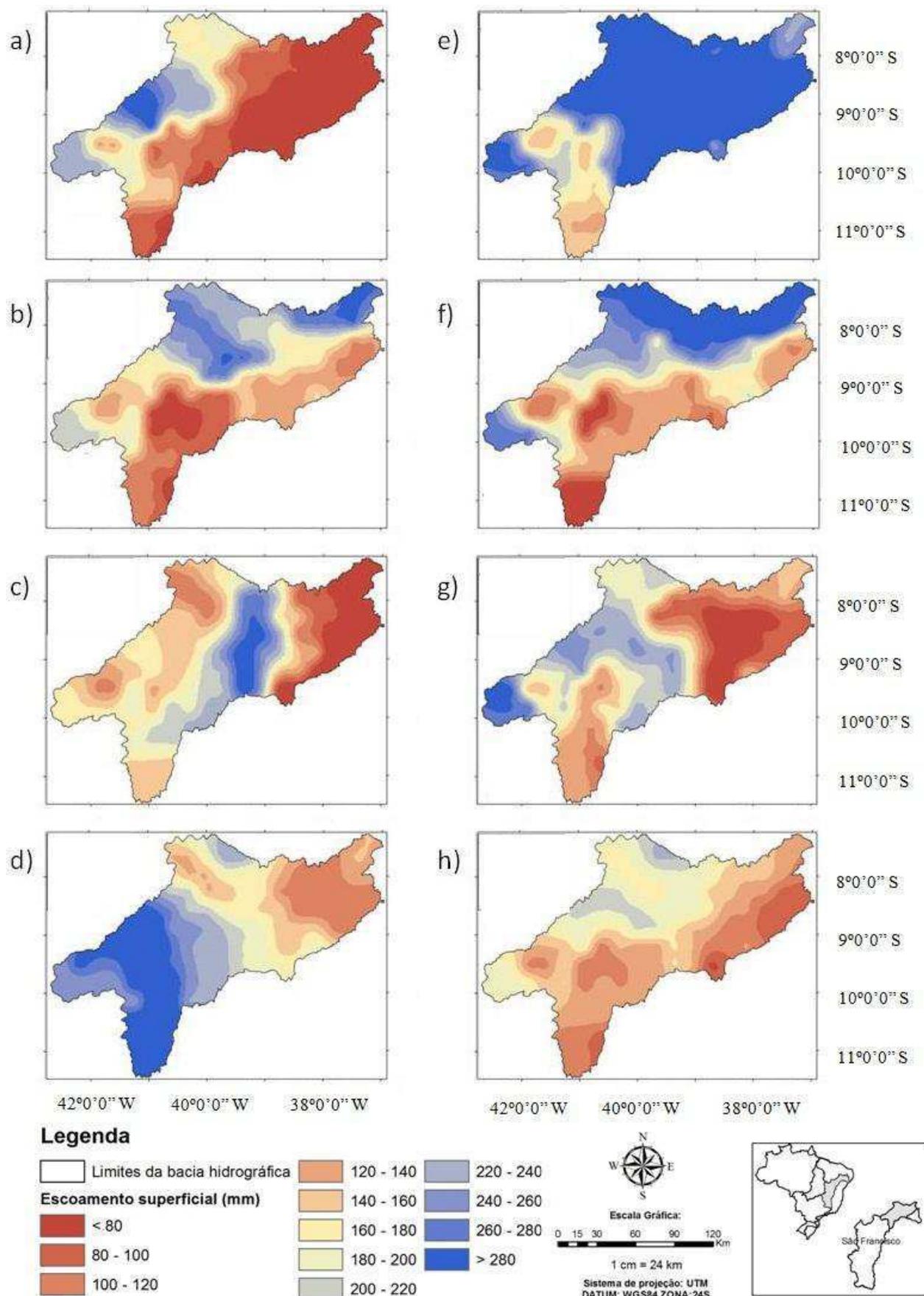


Figura 27. Escoamento superficial na região do submédio do rio São Francisco para os anos de (a) 1995, (b) 1996, (c) 1999, (d) 2000, (e) 2004, (f) 2008, (g) 2010 e (h) média 1993-2010

No entanto, a cobertura da região possui poucas intervenções antrópicas, sendo caracterizadas por domínios de caatinga arbórea e arbustiva, fazendo-se, assim, os eventos de precipitação ocorridos no ano 2000 como atípicos, o que favoreceram a maior intensidade de escoamento na região de estudo. Pode-se concluir que associações de fatores (declividade, uso do solo e tipo do solo) são extremamente complexas, interferindo sensivelmente no comportamento médio das componentes hidrossedimentológicas.

Dentre as funcionalidades do modelo SWAT destaca-se a composição das HRUs para cada sub-bacia permitindo combinações de solo, uso e declividade que interferem sensivelmente nos processos hidrológicos de superfície e subterrâneos. Para as condições atuais de uso de solo, verifica-se que nas sub-bacias com maior presença de atividades antrópicas, as contribuições do escoamento também são elevadas. Também é importante ressaltar que para gerar resultados consistentes, os dados de entrada do modelo devem possuir o maior número de observações possíveis mesmo esse recurso sendo limitado por condições de disponibilidade de informações ou de orçamento, pois a construção do banco de dados é a principal ferramenta para estudos que utilizam o SIG como sistema de gerenciamento de informações.

4.4.2. Aporte de sedimentos

Observou-se que as classes de solos apresentaram contribuições significativas na produção de sedimentos, pois a partir da distribuição espacial das classes de solos com suas respectivas predominâncias em cada região da bacia, verificou-se que o coeficiente de erodibilidade (fator K) da MUSLE apresentou valores distintos, ou seja, o risco de degradação dos solos apresentou níveis de vulnerabilidade classificados de baixo até alto segundo a metodologia de Crepani et al. (2001). Tal fator ainda é condicionado a atributos intrínsecos de cada solo como a suscetibilidade à desagregação e ao transporte das micro partículas de silte e argila, além da sua capacidade de infiltração em função da distribuição dos macro e micro poros. Desta forma, têm-se produção de sedimentos elevadas nas sub-bacias com a presença de solos Neossolo Regolítico e Neossolo Litólico, todavia as sub-bacias com presença de Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Amarelo são menos susceptíveis aos processos erosivos.

Tomando como referência a bacia do rio Brígida (Figura 28) que possui manchas de Neossolo Regolítico e Neossolo Litólico, verificou-se intensa exploração do ecossistema da região pela indústria do gesso, pela agricultura de sequeiro, pelas olarias, pelas pastagens e pelo fato de que alguns municípios ultrapassam o limite de densidade demográfica estabelecido pela ONU para regiões susceptíveis a desertificação que é de 20 hab km⁻². A área selecionada está localizada no oeste do Estado de Pernambuco, na parte central do Trópico semiárido brasileiro.

A Bacia do Rio Brígida faz parte da mesorregião do Sertão Pernambucano, e na discretização da Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco pelo modelo SWAT foi composta pelas sub-bacias (4, 5, 6, 7 e 10). De acordo com a referida figura ainda é possível observar dois pontos de coleta de solo e a paisagem associada.

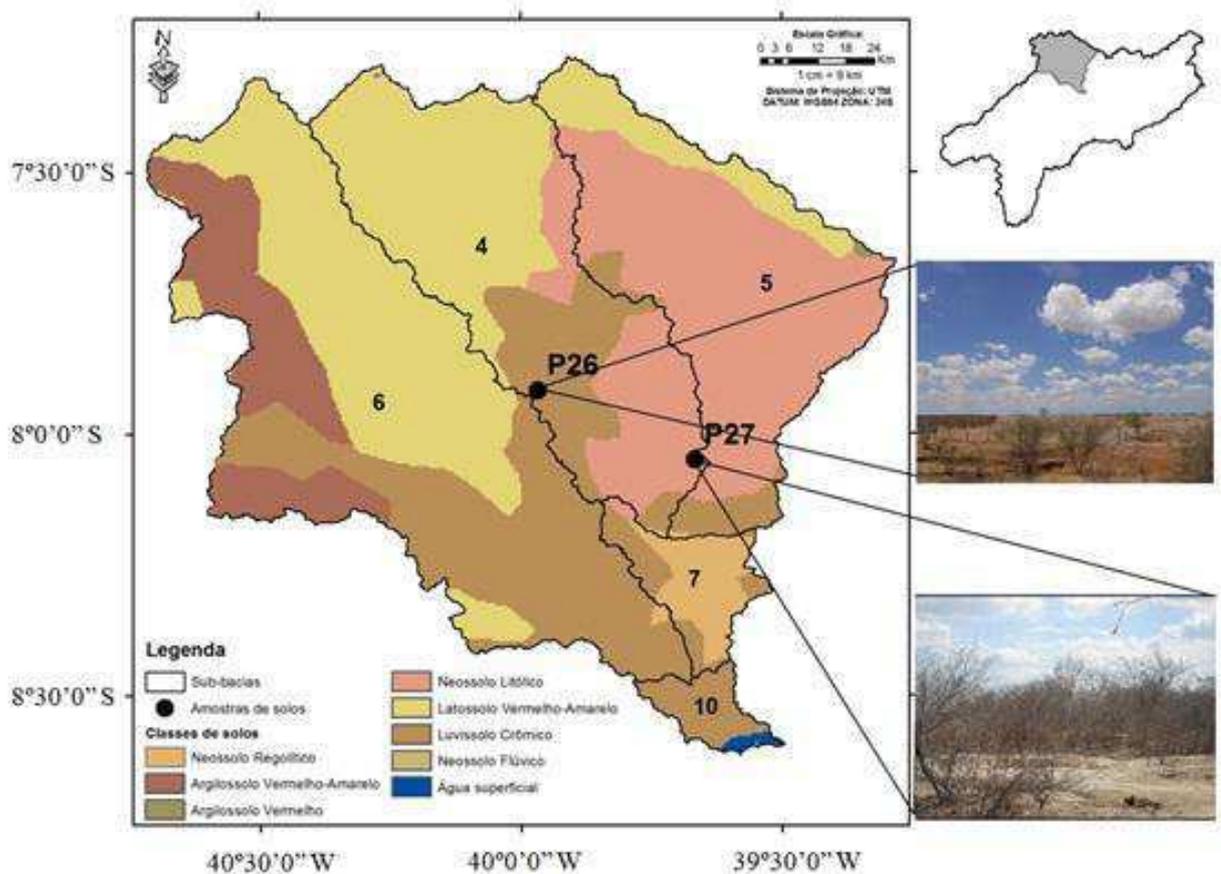


Figura 28. Distribuição das classes de solos da Bacia Hidrográfica do Rio Brígida

Na análise de aporte de sedimentos realizada no cenário atual de cobertura solo para BHSRSF (Figura 29), verificou-se que a região onde se insere a Bacia do Rio Brígida é uma das maiores produtoras de sedimentos (>18 t/ha), assim como também apresenta escoamento superficial bem acima da média para toda BHSRSF. As Figuras 29a e d) representam as simulações do aporte de sedimentos para os anos de 1995 e 2000, respectivamente. Observa-se que os maiores valores são registrados na região sudoeste da bacia, justificando assim a alta correlação com a estimativa do modelo para geração de escoamento. A partir da produção do sedimento a rede de drenagem torna-se responsável pela captação de todo material carreado ao longo da bacia, assim fatores como a declividade e a susceptibilidade de erosão dos solos são responsáveis pelo maior aporte de sedimentos. Dentro dessa temática Amorim et al. (2001) ressalta que a erosão hídrica pode ocorrer na forma laminar, sulcos e voçorocas. A erosão laminar se caracteriza pela remoção de camadas delgadas da superfície do solo, apenas sendo

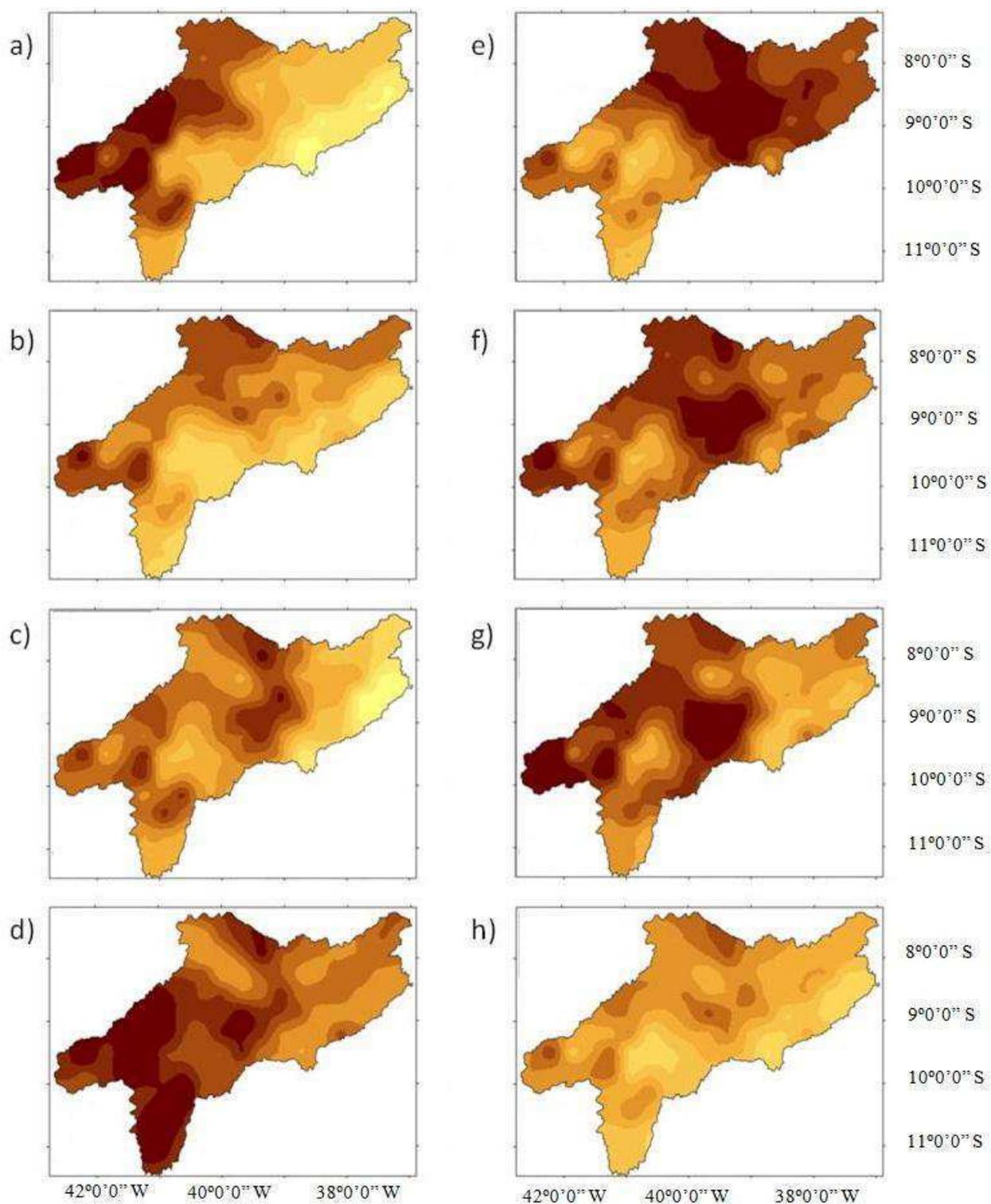
perceptível após uma grande quantidade de solo ter sido removida. Em complemento, caracteriza-se como voçorocas, o deslocamento de grande quantidade de solo com a formação de canais de grandes dimensões, impedindo o trânsito de máquinas e reduzindo a área de plantio (Pruski, 1996).

A partir do mapa de aporte de sedimentos na região do submédio do rio São Francisco para os anos de 1999; 2004; 2008 e 2010 (Figuras 29c; e; f e g), verifica-se que as áreas de alto risco ($> 20 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), ou seja, as maiores produtoras de sedimento encontram-se próximas a parte central da bacia. As áreas de baixo risco predominam na porção leste da bacia em face da maior presença de declividade associada à várzea, plano a suave ondulado, o que não propicia ao grande escoamento superficial e carreamento do material erodido.

A produção de sedimentos obtida neste trabalho é semelhante à encontrada por Machado (2002) que utilizou o SWAT na bacia do rio Marins em São Paulo, que possui uma área de 5.973 ha, e uso dominante de cana-de-açúcar e pastagem, tendo produção média de sedimentos entre 1999 e 2000 de 16.935 t/ha. Grossi (2003) na bacia do rio Pardo em Botucatu/SP, com área de 1.291,64 ha e uso predominante agrícola e pastagem, obteve uma produção de sedimentos média para o período entre 1997 e 2001 de $44 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

A relação entre totais pluviométricos e produção de sedimentos também foram encontrada em vários estudos, tal como por Machado (2002) na bacia do ribeirão Marins, em Piracicaba, utilizando o SWAT. Ele constatou que 94% dos sedimentos produzidos estavam associados ao período chuvoso. Tal relação também foi verificada por Behera et al. (2006) em uma bacia situada no Distrito de Mindinapore, no oeste de Bengali, na Índia, por Laurente et al. (2007) em uma bacia de 352 km² no oeste da França, por Jones et al. (2008) na bacia do rio Tigres e Eufrates, por He et al. (2008) no rio Hei na província de Shaanki, na China e por Zhang et al. (2008) na porção superior do rio Amarelo na China.

As regiões próximas ao exutório na porção sudeste da bacia não apresentaram valores significativos de produção de sedimentos. Isso é justificado por declividades estáveis ou de baixo risco de vulnerabilidade, sendo em sua maioria de várzea e plano à suave ondulado. A vegetação predominante é de pastagem e caatinga nas formas arbórea e sub-arbustiva. Porém, verifica-se a incidência de solos Planossolo Háplico, Neossolo Quartzarênico e Neossolo Regolítico que apresentam níveis de erosão classificados de médio a alto risco. Ressalta-se, ainda, que o regime pluviométrico na região é inferior aos 500 mm ano^{-1} , diminuindo a contribuição do (fator R) da USLE. De maneira geral, verifica-se uma relação direta do escoamento superficial e a produção de sedimentos quando analisado cada porção da bacia no mesmo período.



Legenda



Figura 29. Aporte de sedimentos na região do submédio do rio São Francisco para os anos de (a) 1995, (b) 1996, (c) 1999, (d) 2000, (e) 2004, (f) 2008, (g) 2010 e (h) média 1993-2010

4.5. Cenários de mudança no uso do solo

Cenário I

As configurações da cobertura do solo no cenário I para BHSRSF representa a bacia com substituição da cobertura de pastagem por caatinga sub-arbustiva, ou seja, as simulações realizadas pelo modelo SWAT serão realizadas em ambiente de recuperação da vegetação nativa. O resultado desse cenário é apresentado na Figura 30.

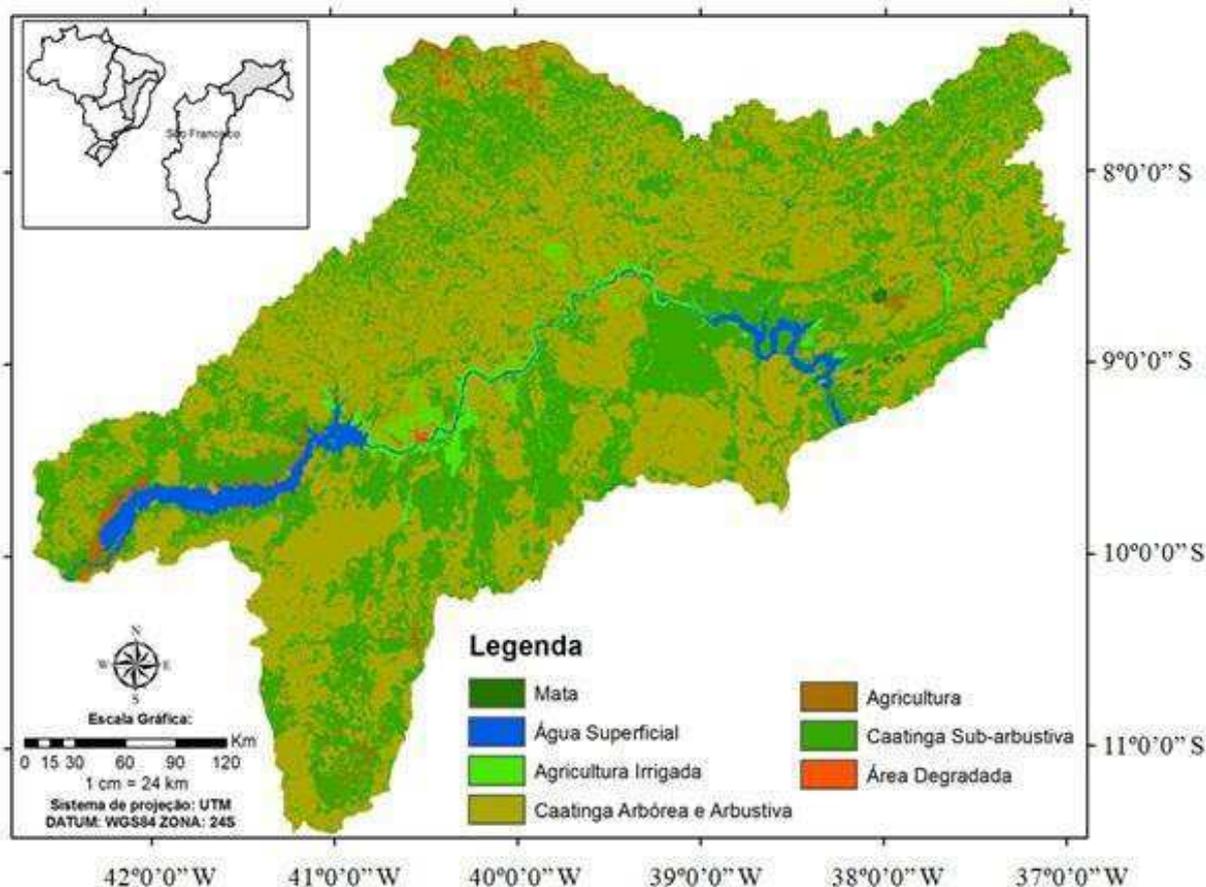


Figura 30. Uso e ocupação do solo nas condições do cenário I para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

Nesse cenário, verifica-se que houve uma sensível redução na produção do escoamento superficial quando comparado ao cenário atual de condições de solo, possivelmente em função das mudanças nas condições de superfície, reforçando a importância da manutenção de áreas preservadas de vegetação nativa. Todavia, a interface de solo/cobertura/relevo configura um sistema complexo de interações, principalmente pelas características fisiológicas da caatinga. Por essa razão, foi observado que os menores registros de escoamento superficial foram

proporcionais as áreas que possuíam a cobertura do tipo pastagem e no novo cenário possuem caatinga sub-arbustiva. Essa condição favorece o processo de infiltração e conseqüentemente e reduz o volume escoado, principalmente nas regiões leste e sudoeste da bacia (Figura 31). Esse tipo de vegetação não apresenta grande porte de desenvolvimento e pouca profundidade efetiva das raízes, favorecendo alterações nas componentes do balanço hídrico, pois aumentou as taxas de infiltração e, conseqüentemente, espera-se que a evapotranspiração apresente algum acréscimo. Na região noroeste, onde a presença dos solos litólicos, é mais marcante as taxas de escoamento ainda são as mais altas, em torno de 120 a 140 mm ano⁻¹.

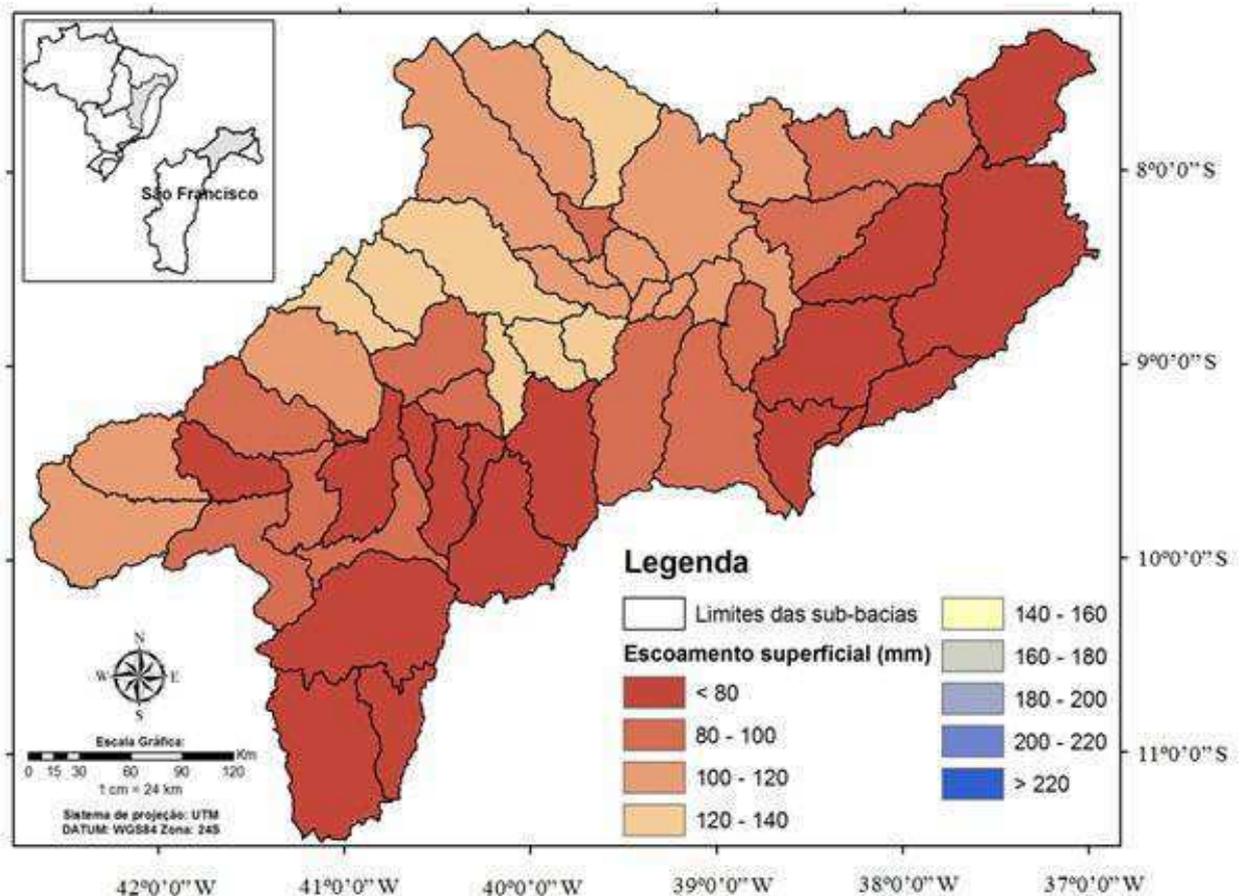


Figura 31. Escoamento superficial médio anual nas condições do cenário I para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

A variação do escoamento superficial e a mudança no uso do solo entre os Cenários I e condições atuais de cobertura de solo também modificaram as características na produção de sedimentos (Figura 32). Nota-se a alteração em todas as sub-bacias do aporte de sedimentos; todavia, algumas regiões apresentam reduções menos significativas, mesmo assim a proteção exercida pela vegetação diminui sensivelmente o impacto das gossas de chuva, tornando o solo menos propício aos processos de selamento e carreamento de sedimentos para rede de drenagem.

Segundo Bertoni & Lombardi Netto (1999), em estudo realizado para o estado de Estado de São Paulo as florestas contribuem apenas com $0,004 \text{ t ha}^{-1}$ na produção de sedimentos, enquanto a pastagem com $0,4 \text{ t ha}^{-1}$, e o algodão com $26,6 \text{ t ha}^{-1}$.

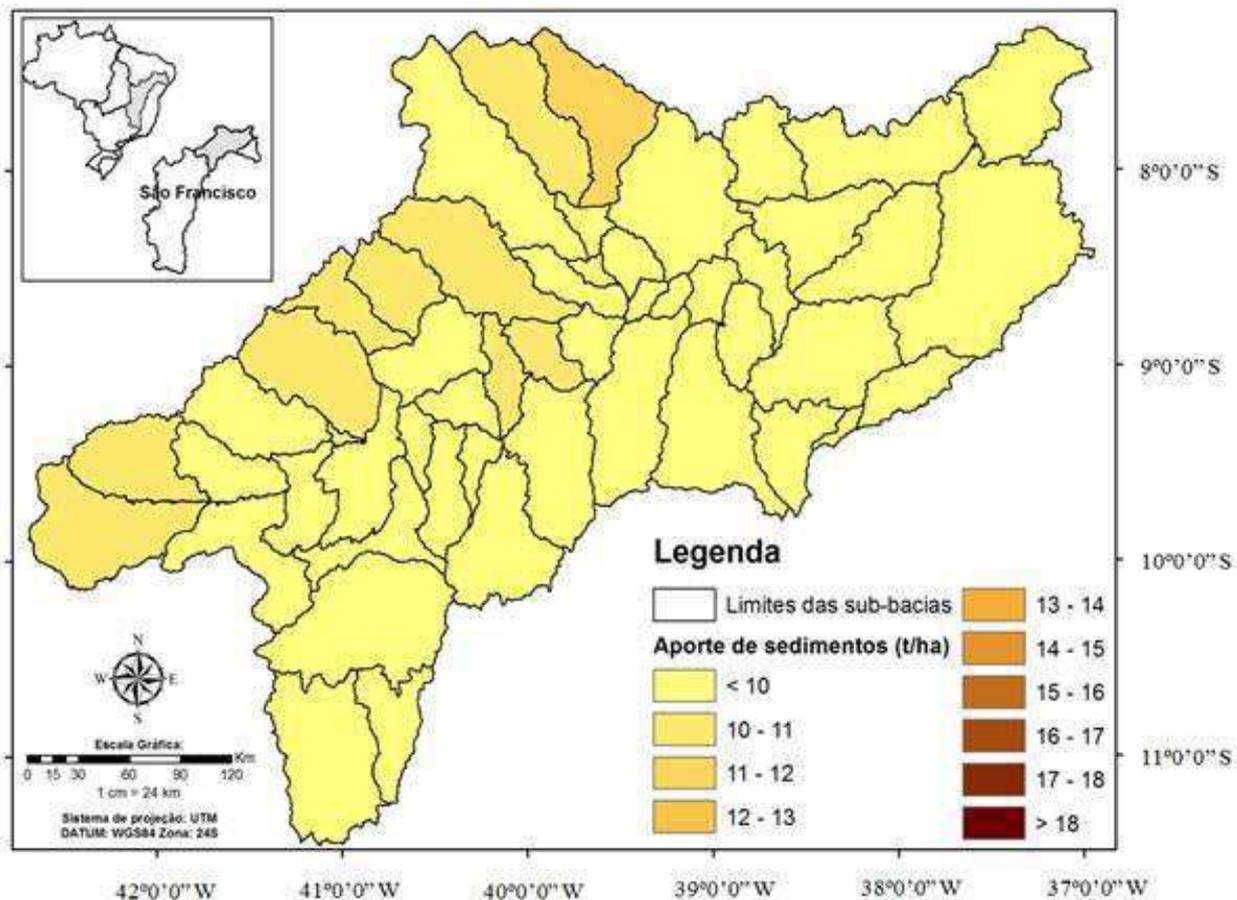


Figura 32. Aporte de sedimentos médio anual nas condições do cenário I para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

Cenário II

No cenário II é possível avaliar o impacto da intervenção antrópica com a substituição da cobertura de pastagem pelo cultivo de milho (Figura 33). Observa-se que as estimativas do escoamento superficial sofrem reduções, assim como no cenário de recuperação da vegetação, entretanto, a cultura do milho não apresentou o mesmo desempenho que a caatinga sub-arbustiva, na tentativa de aumentar as taxas de infiltração.

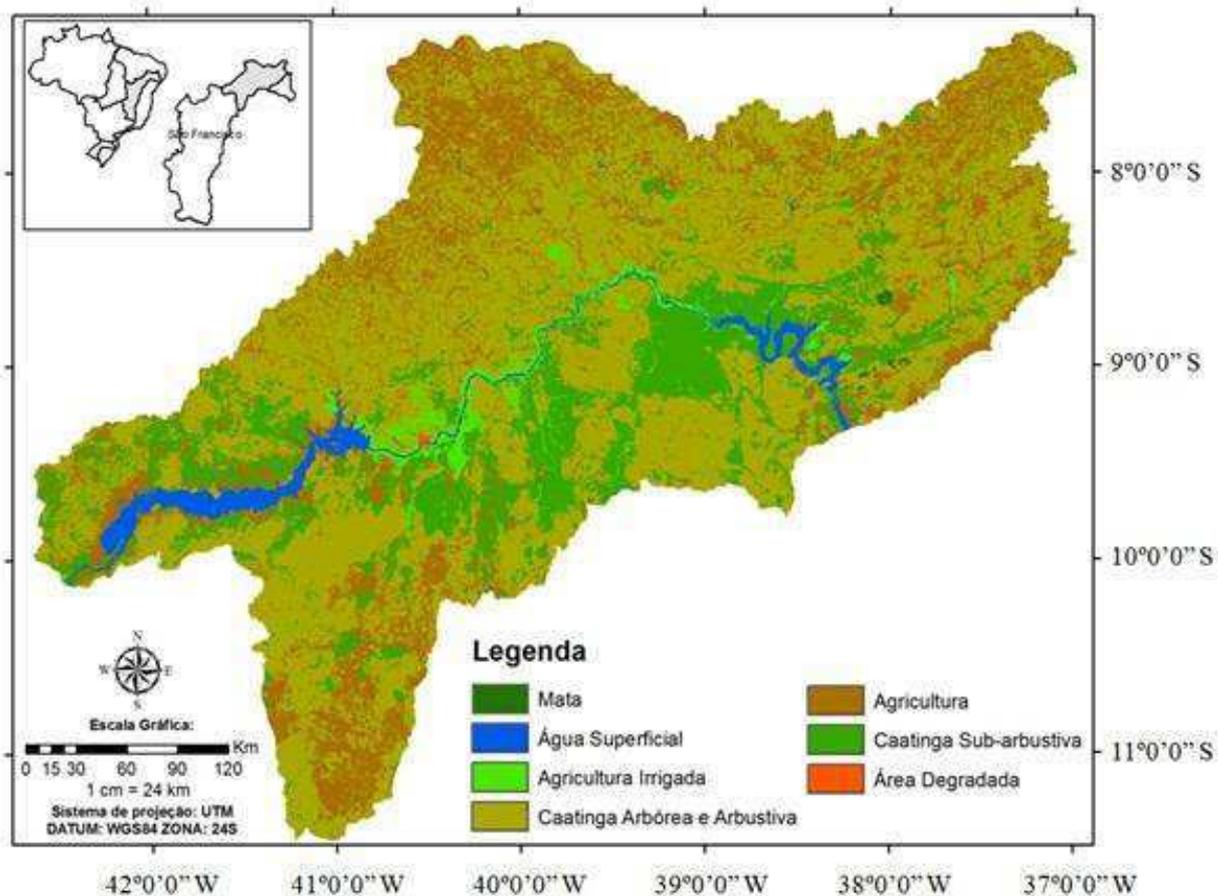


Figura 33. Uso e ocupação do solo nas condições do cenário II para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

Observa-se neste cenário uma redução no escoamento superficial nas sub-bacias localizadas na parte leste e sudoeste da BHSRSF, quando comparado ao cenário atual (Figura 34). Por outro lado, quando comparado ao cenário I, a mudança no uso do solo para o cultivo do milho aumentou o volume escoado para nas regiões que apresentam manchas de solos Luvissoilo Crômico e Argissolo Vermelho-Amarelo.

Provavelmente, a combinação entre o tipo de solo e o tipo de cultura adotada neste cenário tenha provocado a diminuição na taxa de escoamento nestas regiões, uma vez que o manejo do solo para este tipo de cultura pode ser realizado através do preparo convencional, significando o revolvimento das camadas superiores do solo. Em solos com textura média ou franco arenosa ou com textura arenosa este processo de revolvimento pode favorecer ainda mais a infiltração da água no solo, reduzindo a taxa de escoamento superficial.

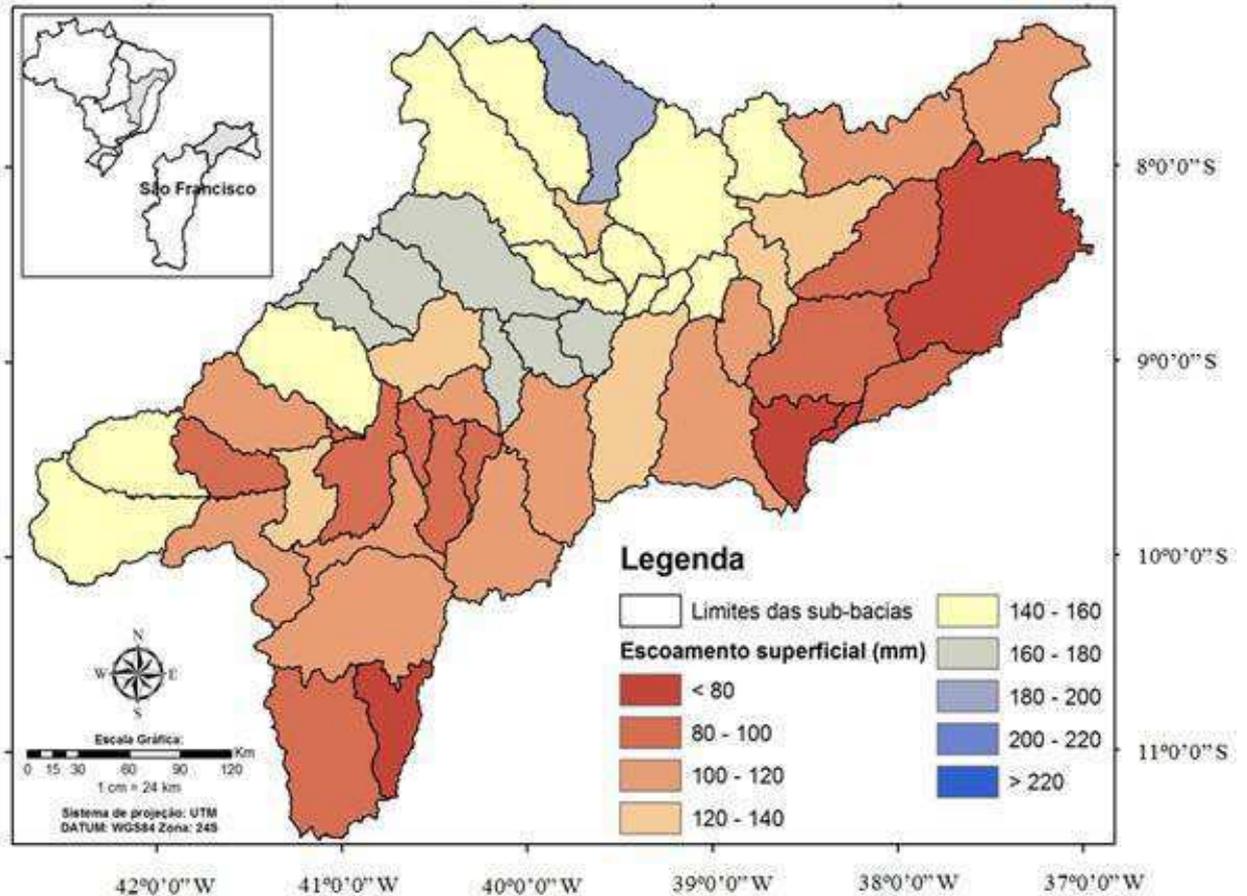


Figura 34. Escoamento superficial médio anual nas condições do cenário II para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

A distribuição do aporte de sedimentos para o cenário de uso agrícola apresenta grande variabilidade espacial, assim como verificado pela (Figura 35) o aumento nas taxas de produção de sedimento em quase toda bacia é decorrente em grande parte pelos volumes escoados sobre a superfície. Isso favorece o desprendimento das partículas de solo, através das tensões cisalhantes envolvidas no escoamento da água pela superfície do solo (Pruski, 2009). As partículas são carregadas até os rios aumentando a quantidade de sedimentos nos mesmos, caracterizando os processos de erosão hídrica. As sub-bacias localizadas na parte noroeste da bacia apresentam taxas superiores a $15 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, provocadas pelo declive acentuado, aliado aos solos litólicos.

A tendência entre o aumento da declividade e a produção de sedimentos observada em algumas URHs é compatível com o proposto por Morgan (1980) e por Hadley et al. (1985), que salientam que o acréscimo na declividade contribui para o aumento na velocidade do escoamento superficial e sua capacidade de erosão. Contudo, outros estudos (Evans, 1980 e Carson & Kirkby, 1972), dentre outros, salientam que é necessário ter cuidado com essa tendência, visto que, em severas declividades, é possível haver diminuição da erosão em função do decréscimo do material disponível. Também, o aumento do comprimento das encostas contribuiu para o

acréscimo na produção de sedimentos. Contudo, não existe consenso na literatura sobre o assunto, pois segundo Kramer & Meyer (1969) as encostas longas têm velocidade de escoamento alta, e, portanto, maior erosão que as encostas curtas. Já Young & Mutchler (1969) observaram que as encostas longas produzem mais sedimentos devidos principalmente ao aumento das ravinas. Por outro lado, Wischmeier (1969) e Wischmeier & Smith (1978) indicam que o aumento no comprimento da encosta tem efeito negligenciável sobre a produção de escoamento e sedimento.

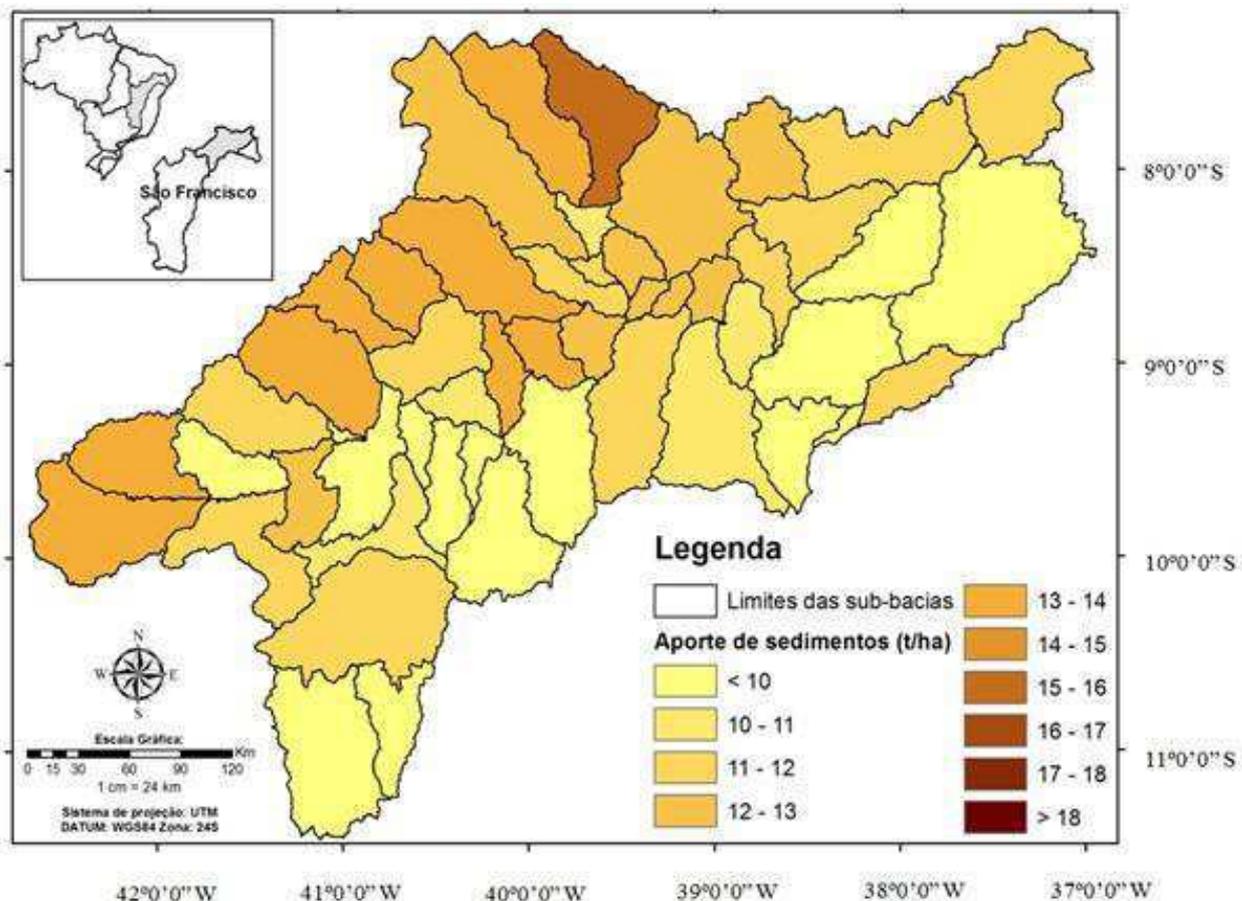


Figura 35. Aporte de sedimentos médio anual nas condições do cenário II para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

Cenário III

Para verificar o impacto da intervenção antrópica extrema, utilizou-se o cenário III que consiste em condições de substituição das áreas de pastagem por solo exposto. As áreas classificadas como áreas degradadas nas condições atuais de cobertura da superfície representavam apenas 158,4 km² ou 0,1% da área total da bacia, enquanto que no cenário de

degradação da bacia essa classe de cobertura apresenta-se com mais de 20%, ou seja, 22.896,0 km² (Figura 36)

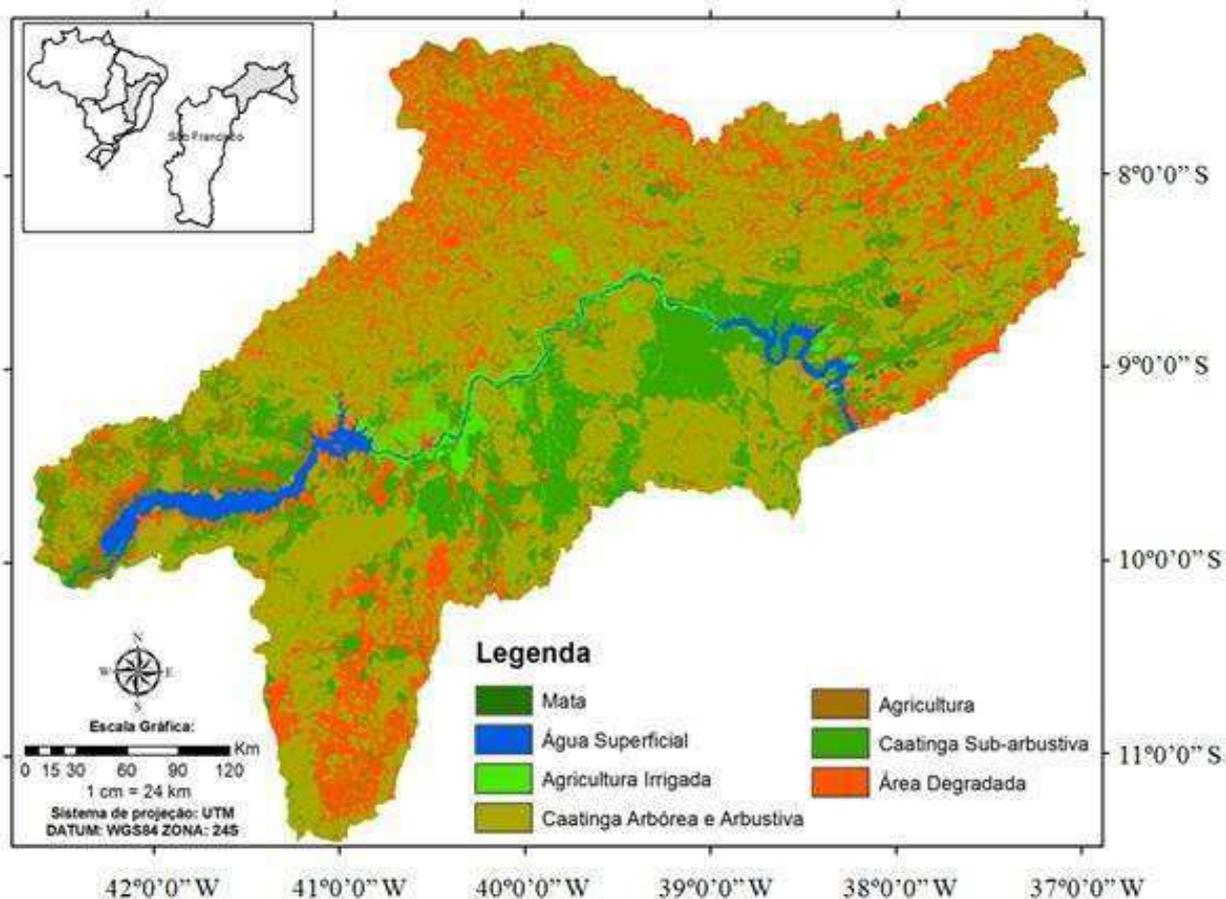


Figura 36. Uso e ocupação do solo nas condições do cenário III para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

As modificações propostas para o cenário em análise impactaram de modo geral toda BHSRSF. As respostas do modelo em função ao novo layer de uso do solo são verificadas nas Figuras 37 e 38, em que são representadas as simulações do escoamento superficial e aporte de sedimentos, respectivamente. O aumento das áreas sem nenhum tipo de proteção da superfície proporcionou a identificação de mais sub-bacias com valores de escoamento superficial superiores a 220 mm ano⁻¹, praticamente em 50% da bacia. Tendo em vista que o regime da precipitação não sofreu nenhuma alteração, as condições de superfície otimizaram o processo de transferência do fluxo hídrico resultante das chuvas.

Nesse contexto, as simulações de cenários alternativos de uso do solo realizadas por Machado et al. (2003), na microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, indicaram a importância do gerenciamento da paisagem em bacias hidrográficas, de forma global, identificando-se as “áreas ambientalmente sensíveis”, em que são necessárias práticas de

controle dos processos erosivos ou mudanças de uso da terra e não somente a proteção dispensada aos cursos d'água por meio da mata ciliar.

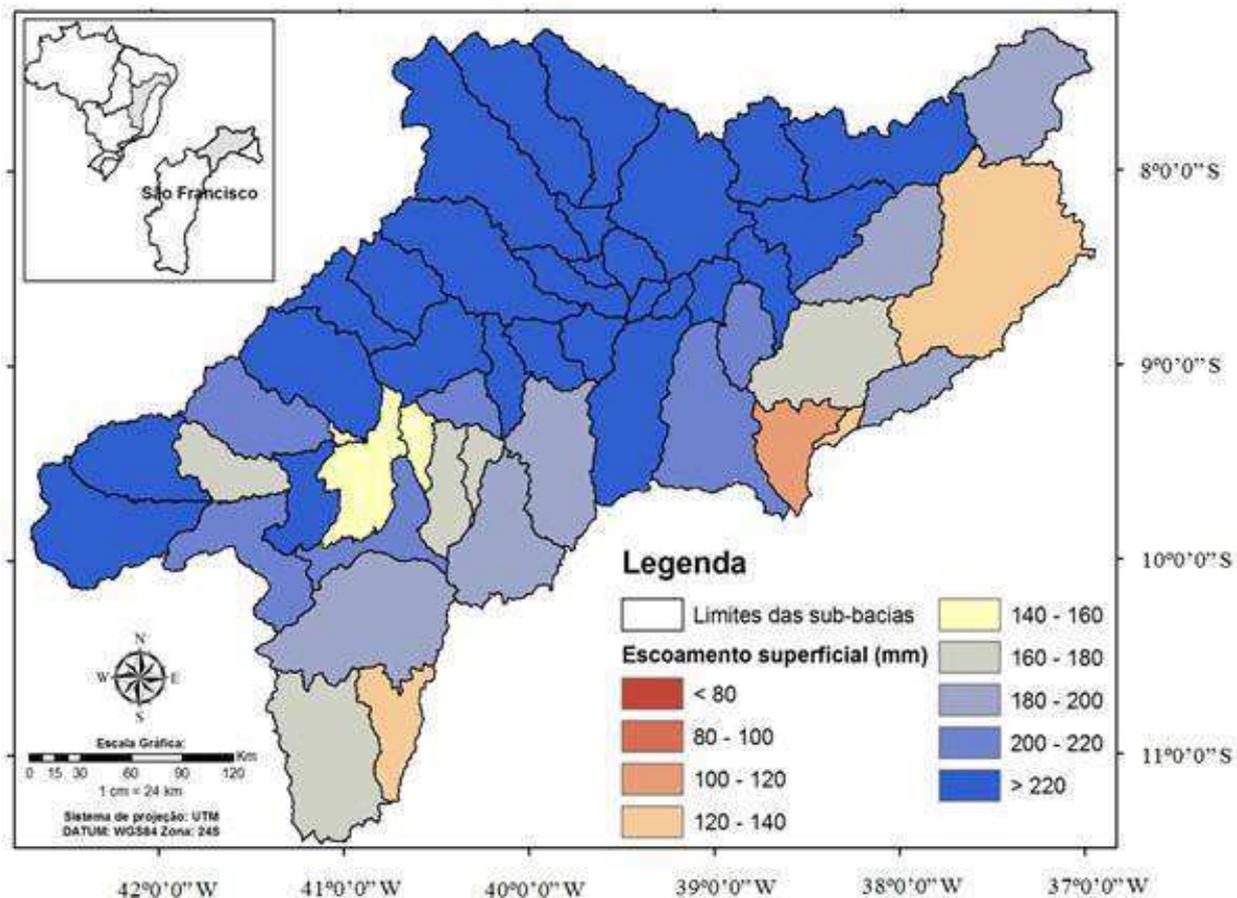


Figura 37. Escoamento superficial médio anual nas condições do cenário III para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

Os diferentes tipos de solos encontrados para BHSRSF proporcionaram diferentes tipos de substratos, ou seja, as respostas aos fluxos hidrossedimentológicos também foram condicionados à cobertura da vegetação como também ao declive. A interferência no balanço hidrológico das bacias hidrográficas pode ser sentido assim apenas com a remoção da cobertura vegetal de forma não gerenciada tornando um dos fatores da degradação do ambiente nas regiões semiáridas. Por outro lado, muitas vezes, a quebra desse equilíbrio natural entre o solo e o ambiente (remoção da vegetação, desvio de cursos hídricos, etc), promovida e acelerada pelo homem, expõe o solo a formas menos perceptíveis de erosão, que promovem a remoção da camada superficial deixando o subsolo (geralmente de menor resistência) sujeito à intensa remoção de partículas, o que culmina com o surgimento de voçorocas (Duque, 1980). Verifica-se, assim, como resposta ao incremento das áreas com maior potencial erosivo o proporcional aumento do aporte de

sedimentos, as regiões com maiores índices de produção de sedimentos localizam-se ao norte da bacia hidrográfica, cujas magnitudes superam as $18 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

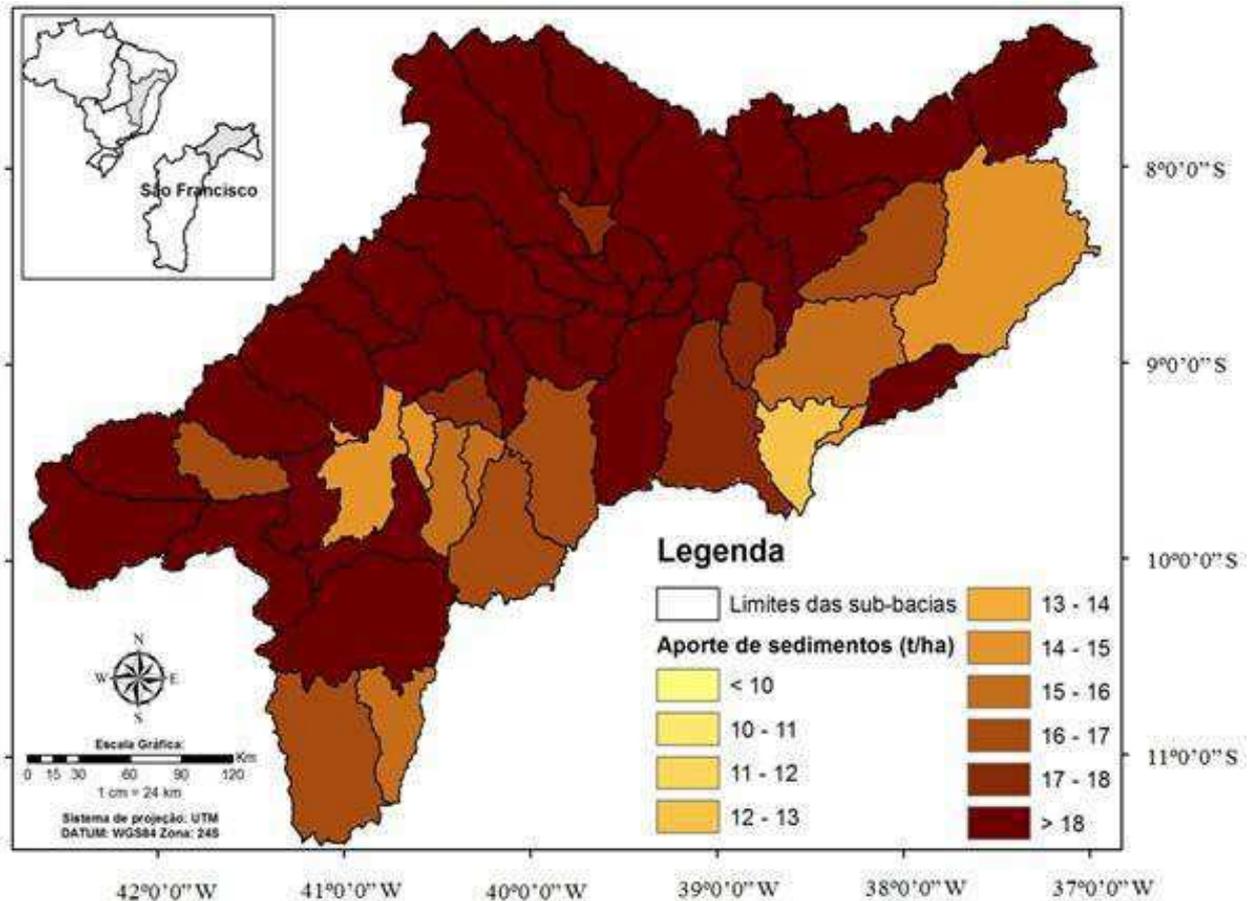


Figura 38. Aporte de sedimentos médio anual nas condições do cenário III para Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (BHSRSF)

4.6. Síntese dos cenários de mudança no uso do solo

A variabilidade média mensal das componentes do balanço hidrossedimentológico para o cenário atual e cenários de mudança da cobertura da superfície é apresentada na Figura 39, onde é possível observar quando comparamos o cenário atual de cobertura do solo com o cenário 1, em que as simulações são realizadas em condições de recuperação da vegetação a componente de produção de água (Figura 39a) sofre acréscimos significativos passando de 57 para 97 mm ano⁻¹, o que representa 69,2% de ganho na taxa de entrega de água para os canais e aquífero raso/subterrâneo. Para o cenário de uso agrícola também foi verificado ganhos na componente em análise, entretanto representou apenas 34%, menos que a metade do cenário 1, pode-se concluir assim que a substituição de pastagens por cultivos de milho ainda sim é uma alternativa para manutenção na produção de água na bacia.

Destaca-se, ainda, que a produção de água ou taxa de entrega de água aos canais da rede de drenagem da bacia hidrográfica, está relacionada ao escoamento superficial, que foi a principal componente da geração das vazões observadas nas simulações com modelo SWAT. Isso pode ser atribuído a uma limitação da recarga de água subterrânea da região semiárida do Nordeste do Brasil, devido principalmente as características geológicas/edáficas no que se refere a genesis da formação dos solos, tornando-os pouco profundos, com a presença de afloramentos rochosos na paisagem sertaneja. Já outra característica dessa sub-bacia é associada impermeabilidade dos solos devido ao seu alto teor de argila e silte. Segundo Tucci (1998) em bacias rurais das regiões Sul e Sudeste do Brasil, a precipitação é geralmente da ordem de 1.500 mm e, enquanto, estima-se que 68% é destinado a evapotranspiração, 6,4 a 16% ao escoamento superficial e de 16 a 25,4% refere-se ao escoamento subterrâneo. Através da análise dos resultados obtidos para o cenário de degradação verificou-se a redução próxima aos 40% da produção de água em comparação ao cenário atual de uso de solo indicando assim a importância da manutenção da cobertura do solo, como forma de proteção para os efeitos dos processos erosivos. A variação mensal da produção de água na BHSRSF está diretamente associada ao regime pluviométrico da região, em que se observam os maiores registros entre os meses de janeiro a maio.

Analisando as condições médias mensais das componentes do balanço hidrossedimentológico observou-se que evapotranspiração ETr (Figura 39b) representou cerca de 60% da precipitação nas condições do cenário atual, ou seja, cerca de 250 mm ano⁻¹ em média são perdidos para atmosfera para alimentação do ciclo hidrológicos. A comparação dos cenários 1 e 2 com o atual permitiu verificar que a substituição de pastagem por caatinga sub-arbustiva e milho, respectivamente, resultou no aumento da ETr em cerca de 15,8 e 26,1%, ou seja, a modificação na cobertura também interferiu na oferta hídrica disponibilizando mais água para os processos turbulentos do ar próximo a superfície. Para o cenário 3 houve redução de 11,7% da ETr tendo em vista que as regiões antes cobertas por pastagem agora apresentam o solo exposto. As taxa de evapotranspiração potencial (Figura 39c) não apresentaram grandes alterações, possivelmente pela grande demanda evapotranspirométrica da bacia, em detrimento da grande oferta de energia solar e por consequência das altas temperaturas presente o ano inteiro e apresentado pequena variabilidade espacial.

O complemento das componentes do balanço hídrico é associado também aos processos de manutenção da umidade do solo, infiltração e percolação/recarga das águas subterrâneas que representaram no cenário atual cerca de 15% da precipitação. A umidade do solo (Figura 39d) influência diretamente nos processos de evapotranspiração e escoamento superficial, em virtude das mudanças na cobertura da superfície propostas neste estudo verificou-se variações nessa componente, principalmente no cenário de recuperação da vegetação que apresentou aumento de

37,2 % em relação ao cenário atual, entretanto o cenário de degradação apresentou redução de 11,6%, por apresentar áreas de grande exposição a evaporação.

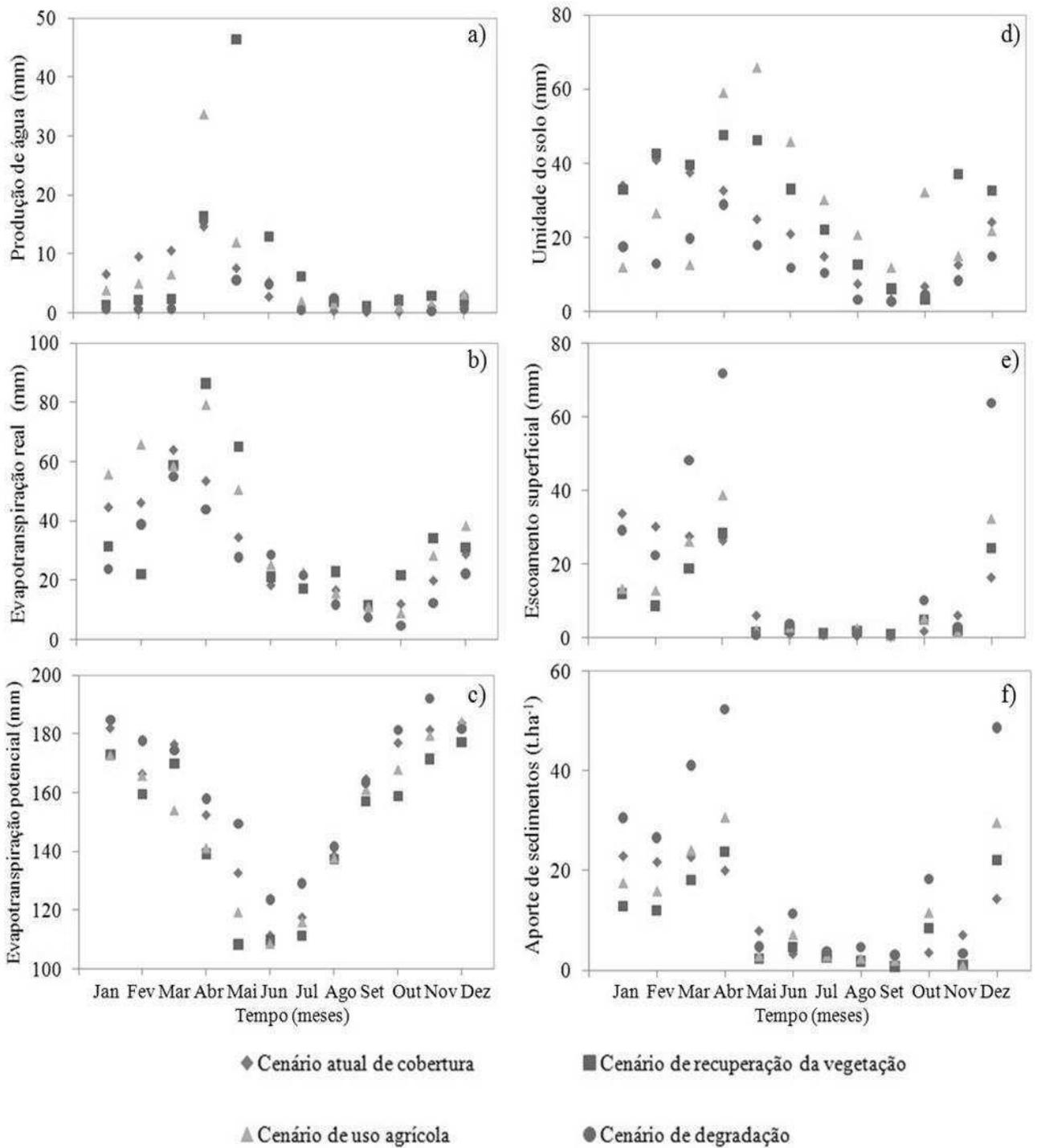


Figura 39. Variabilidade média mensal das componentes do balanço hidrossedimentológico para o cenário atual e cenários de mudança da cobertura da superfície (a) produção de água, (b) evapotranspiração real, (c) evapotranspiração potencial, (d) umidade do solo, (e) escoamento superficial e (f) aporte de sedimentos

Os valores médios de escoamento superficial para BHSRSF no cenário atual de uso de solo são da ordem de 152 mm ano^{-1} (Figura 39e), a variabilidade mensal dessa componente associa-se diretamente com os períodos secos e chuvosos na área de estudo, apresentando assim os maiores volumes no período de dezembro-abril. Como a cobertura da superfície atua diretamente na intensidade do fenômeno verificou-se significativas alterações nos cenários simulados neste estudo, a maior resulta das condições de degradação do cenário 3, onde a substituição da pastagem por solo exposto apresentou acréscimos de 68,8% no escoamento superficial da bacia, ou seja, ganho de 105 mm ano^{-1} o que resulta da perda na capacidade de infiltração da superfície. Todavia os cenários 1 e 2 apresentaram reduções de 29,4 e 7,7% em tal componente quando comparado ao cenário atual.

A ausência de cobertura na superfície torna o processo erosivo mais eminente principalmente em regiões que o período chuvoso é restrito a cerca de 3 a 4 meses ao longo do ano, fatores de erodibilidade e do relevo ainda propiciam maior predisposição a geração de sedimentos, a Figura (39f) apresenta o resultado das simulações para o aporte de sedimento no cenário atual de uso de solo e para os demais cenários de substituição da cobertura de pastagem, como esperado o maior impacto gerado foi verificado no cenário 3, que representava a degradação da BHSRSF em que observou-se o aumento de 93,7%, ou seja, passou-se de 128 para $249 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. O modelo SWAT ainda indicou aumento no aporte de sedimentos quando modificou-se a pastagem para cultivos de milho, tais resultados indicaram ganho da ordem de 14,4% ou $19 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, possivelmente justificado pelo manejo da cultura e falta de práticas conservacionistas. O cenário 1 de recuperação da vegetação mostrou-se como alternativa de redução em praticamente todas as componentes erosivas na BHSRSF tendo em vista a redução do escoamento superficial e aumento nas taxas de infiltração, como esperado o aporte de sedimentos também foi reduzido para $110 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ representando pouco mais de 86% do cenário atual de uso de solo.

5. CONCLUSÕES

Avaliando o potencial de uso dos MDEs dos produtos SRTM, ASTER e TOPODATA, para determinação da altitude, constatou-se uma aproximação satisfatória na obtenção de dados em campo a partir do GPS. O MDE srtm apresentou os melhores resultados, possivelmente em função do menor número de células para compor sua imagem, gerando assim áreas mais homogêneas que os demais modelos.

O modelo SWAT foi calibrado e validado com sucesso utilizando-se os valores de vazão de forma adequada para estação fluviométrica do Juazeiro, tendo-se obtido valores de EMP de -3,2% e 0,8% para os períodos de calibração e validação, respectivamente. A evapotranspiração potencial estimada pelo SWAT apresentou resultados satisfatórios para as estações selecionadas para validação, sendo que a estação de Bebedouro apresentou o pior desempenho com EMP de 18,1%. Já para as localidades de Petrolândia, Morro do Chapéu e Afogados da Ingazeira o EMP foi inferior a 10%.

A partir da determinação da relação entre o índice de erosividade médio mensal e o coeficiente de chuva para as estações meteorológicas da BHSRSF, foi possível verificar correlações significativas. O primeiro semestre do ano na região de estudo é caracterizado pela ocorrência de chuvas de elevado potencial erosivo, sendo os meses de janeiro, fevereiro e março aqueles que apresentaram maiores erosividades, sendo o valor médio anual de erosividade seja da ordem de $4.100 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. O maior valor para o fator R foi encontrado para a estação de Remanso ($5315 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) definido como potencial erosivo moderado a forte.

A modelagem do sistema ambiental para análise das componentes do balanço hidrossedimentológico utilizando o modelo SWAT apresentou desempenho satisfatório em regiões semiáridas, principalmente no que se refere a bacias hidrográficas que apresentam conflitos do uso de água e ocupação do solo e uso intensivo dos recursos naturais como um todo. O resultado das simulações para diferentes usos do solo possibilitou a identificação de áreas que apresentam o maior potencial a erosão hídrica, pedológica e associada ao relevo, como também toda a interação da interface do sistema solo-planta-atmosfera.

Os resultados das simulações realizadas para as componentes do balanço hidrossedimentológico na a BHSRSF nos 3 cenários de uso do solo foi possível verificar que as áreas ocupadas por alguma vegetação ou cultivo favoreceram o aumento da infiltração em virtude da maior cobertura da superfície promovendo a redução da intensidade do escoamento superficial e aporte de sedimentos, e ainda sim contribuindo também para o aumento na produção de água na bacia hidrográfica. A mudança da cobertura de pastagem para solo exposto verificada no cenário 3 indicou o impacto das alterações das características da superfície tendo

em vista as condições climáticas de regiões semiáridas, as componentes do escoamento superficial e aporte de sedimentos foram as mais sensíveis as alterações, apresentando alterações em seus valores em condições atuais de cobertura.

Apesar do SWAT ser uma ferramenta amplamente utilizada pela comunidade científica internacional e numerosos órgãos de gestão dos recursos naturais, ele pode representar a distribuição espacial da precipitação com limitações. Em primeiro lugar, a atribuição para cada sub-bacia das informações dos registros pluviométricos não garante que o indicador selecionado é o mais representativo da sub-bacia. A razão disso está associada ao fato que o modelo considera apenas uma informação para cada sub-bacia, tornando assim as informações homogêneas, o que destaca a importância do processo de discretização da bacia e a qualidade do MDE. Contudo, a para bacias hidrográficas de grande escala tais efeitos são minimizados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, A.W.; Lombardi Neto, F.; Srinivasan, V. S. Efeito do desmatamento da caatinga sobre as perdas de solo e água de um Luvissole em Sumé (PB). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 121-128, 2001.
- Amaral, J. F. (2003). Reformas estruturais e economia política dos recursos hídricos no ceará. <http://www.iplance.ce.gov.br.>, 15 Jun. 2012.
- Andrade-Lima, D. de. O domínio das caatingas. Recife: UFRPE: IPA, 1992. 48p.
- Aragão, R.; Srinivasan, V. S.; Lopes, W. T. A.; Silva, A. F. Avaliação do Modelo CHDM Utilizando Dados de uma Bacia Experimental no Semiárido Nordeste. In: VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2002, Maceió. Anais... Rio Grande do Sul: ABRH, 2002. CD-Rom
- Arnold, J. G.; Allen, P. M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records,” *J. American Water Resources Assoc.* vol. 35, pp. 411–424, 1999.
- Arnold, J. G.; Fohrer, N. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrological Processes*, v. 19, p. 563-572, 2005.
- Arnold, J. G.; Srinivasan, R.; Muttiah, R.S.; Williams, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.
- ASCE - American Society of Civil Engineers. Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management Committee, Irrigation and Drainage Division. *Irrig. Drain. Eng.*, v.119, p. 429-442, 1993.
- Bagnold, R. A. Bedload transport in natural rivers. *Water Resources Research*, v. 13, p. 303-312, 1977.
- Bakker, M. M.; Govers, G.; Kosmas, C.; Vanacker, V.; Oost, K. V.; Rounsevell, M. Soil erosion as a driver of land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 105, p. 467 - 481, 2005.
- Baldissera, G. C. Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT. Cuiabá: UFMT, 2005. 144p. Dissertação Mestrado
- Baltokoski, V. Modelo SWAT2005 aplicado às sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco/PR. Cascavel: UNIOESTE, 2008. 115p. Dissertação Mestrado
- Bertoni, J.; Lombardi, N. F. Conservação do solo. 5. ed. São Paulo: Ícone, 2005.

- Boardman, J.; Poesen, J. Soil Erosion in Europe: Major Processes, Causes and Consequences. In: J. Boardman and J. Poesen (Eds.), Soil Erosion in Europe. Chichester: John Wiley and Sons Ltd. 2006. p. 479 - 487.
- Brady, N. C.; Weill, R. Y. The nature and properties of soils. 13^a Edição. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 958p.
- Cardoso, C. A.; Dias, H. C. T.; Martins, S. V.; Soares, C. P. B. Caracterização Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. R. *Árvore*, Viçosa-MG, v.30, n.2, p.249-256, 2006.
- Carvalho Neto, J. G. Simulação hidrossedimentológica da bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT. Campina Grande: UFCG, 2011. 218p. Dissertação Mestrado
- Carvalho, N. de O. Hidrossedimentologia prática. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 600p.
- CBHSF – Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, ANA/GEF/PNUMA/OEA, Salvador, 2004, 337 p.
- Chen, J. M.; Chen, X.; Ju, W.; Geng, X. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs. *J. Hydrol.*, v. 305, n. 1 - 4, p. 15 - 39, 2005.
- CHESF-COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO. (2005). Dados Técnicos da Bacia do São Francisco. <<http://www.chesf.gov.br>> 10 Jul. 2012
- Christofolletti, A. Análise morfométrica das bacias hidrográficas. *Notícia Geomorfologia*, v. 18, n. 9, p. 35-64, 1969.
- Cibin, R.; Sudheer, K. P.; Chaubey, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. *Hydrological Process*, v. 24, p. 1133- 1148, 2010.
- Cirilo, J. A.; Campello Netto, M. S. C.; Montenegro, S. M. G. L.; Asfora, M. C. Caracterização do Semi-Árido Brasileiro. In: Cirilo, J. A.; Cabral, J. J. S. P.; Ferreira, J. P. C. L.; Oliveira, M. J. P. M.; Leitão, T. E.; Montenegro, S. M. G. L.; Góes, V. C. O uso sustentável dos recursos hídricos em regiões semi-áridas. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2007. p. 33-60.
- CODEVASF - COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA. Inventário de projetos. Brasília: rev. atual. 3. ed. 1999. 223p.
- Collischonn, W. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 270p. Tese Doutorado
- Corwin, D. L.; Lesch, S. M.; Oster, J. D; Kaffka, S. R. Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma*, v. 131, p. 369 - 387, 2006.

- Costa, M. H.; Botta, A.; Cardille, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins river, southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, v. 283, p. 206 - 217, 2003.
- Crepani, E.; Medeiros, J. S. de; Azevedo, L. G. DE.; Hernandez Filho, P.; Florenzano, T. G.; Duarte, V. Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico. São José dos Campos: INPE, 2001. 25p.
- Defries, R.; Eshleman, K. N. Land-use change and hydrologic processes: A major focus for the future, *Hydrol. Processes*, v. 18, p. 2183 - 2186, 2004.
- Degens, E.T.; Kempe, S.; Spitzzy, A. A biogeochemical portrait. In: Hutzinger, C. O. (Eds.), *Handbook of Environmental Chemistry*. Berlin: Springer-Verlag publisher. 1984. p. 127 - 215.
- Dhar, S.; Mazumdar, A. Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case study in India, *Hydrol. Process.*, v. 23, p. 2394 - 2406, 2009.
- Dougherty, M.; Dymond, R. L.; Grizzard, T. J.; Godrej, A. N.; Zipper, C. E.; Randolph, J. Quantifying long-term hydrologic response in an urbanizing basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 12, n. 1, p. 33 - 41, 2007.
- Dutra, K de R.; Teixeira, E. C.; Mendonça, A. S. F.: Determinação da estimativa de perda de solo por erosão superficial em bacia hidrográfica utilizando Sistema de Informações Geográficas – SIG. In: XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997, Foz do Iguaçu. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 1997. CD Rom
- EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: Embrapa, 1999. 412p.
- Fohrer, N.; Haverkamp, S.; Eckhardt, K.; Frede, G. Hydrologic response to land use changes on the catchment scale. *Phys. Chem. Earth*, v. 26, p. 577 - 682, 2001.
- França, G. V. Interpretação fotográfica de bacias e de redes de drenagem aplicadas a solos da região de Piracicaba. Piracicaba: ESALQ-USP, 1968, 151p. Tese Doutorado
- Gitau, M. W.; Veith, T. L.; Gburek, W. J. Watershed-level BMP selection and placement in the Town Brook watershed, N.Y. *J. American Water Resources Assoc.*, v. 42, n. 6, p. 1565 - 1581, 2006.
- Griensven, A., Francos, A., Bauwens, W. Sensitivity analysis and autocalibration of an integral dynamic model for river water quality. *Water Sci. Technol.* v. 45, p. 325-332, 2002.
- Guimarães, T.; Donasci, F. (2005). Queda da navegação é problema há seis anos. Folha de São Paulo. <http://www1.folha.uol.com.br>, 19 Jun. 2012.
- Heathwaite, A. L.; Dils, R. M.; Liu, S.; Carvalho, L.; Brazier, R. E.; Pope, L.; Hughes, M.; Phillips, G.; May, L. A tiered risk-based approach for predicting diffuse and point

- source phosphorus losses in agricultural areas. *Science of the Total Environment*, v. 344, n. 1 - 3, p. 225 - 239, 2005.
- Horton, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 56, p. 275 - 370, 1945.
- Hudson, N. Soil conservation. London: BT Batsford, 1995.
- Hundecha, Y. H.; Ouarda, T. B. M. J.; Bárdossy, A. Regional estimation of parameters of a rainfall-runoff model at ungauged watersheds using the “spatial” structures of the parameters within a canonical physiographic-climatic space, *Water Resour. Res.*, v. 44, p. 1427 - 1440, 2008.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2004). Mapa de solos do Brasil. <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas/tematicos/sistematizacao/pedologia/>, 20 abr. 2012.
- Inácio, E. dos B.; Cantalice, J. R. B.; Nacif, P. G. S.; Araujo, Q. R. de; BARRETO, A.C. Quantificação da erosão em pastagem com diferentes declives na microbacia do Ribeirão Salomea. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, p.355-360, 2007.
- INPI, Instituto Nacional da Propriedade Industrial, Ministério de Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior Indicação de Procedência Vale do Submédio São Francisco, Concessão: RPI nº 2009, de 07 de julho de 2009. <<http://www.inpi.gov.br/noticias>> 10 Jul. 2014
- Irmak, S., T. A. Howell, R. G. Allen, J. O. Payero, and D. L. Martin. Standardized ASCE Penman-Monteith: Impact of sum-of-hourly vs. 24-hour timestep computations at reference weather station sites. *Trans. ASAE*, v. 48, n. 3, p. 1063-1077, 2005.
- Izique, C. (2005). As águas vão rolar: Transposição do rio São Francisco divide opiniões e instiga polêmica entre governo e pesquisadores. <http://www.universiabrasil.net.>, 15 Jul. 2012
- Jacovides, C. P.; Kontoyiannis, H. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agricultural Water Management*, v. 27, p. 365 -371, 1995.
- Jayakrishnan, R.; Srinivasan, R.; Santhi, C.; Arnold, J. G. Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydrol. Process.*, v. 19, p. 749 - 762, 2005.
- Kiehl, E. J. Manual de edafologia, relações solo-planta. São Paulo, Ceres, 1979. 264p.
- Kim, N. W.; Lee, J. Enhancement of channel routing module in SWAT. *Hydrological Processes*, v. 24, n. 1, p. 96 - 107, 2010.
- King, K.; Arnold, J. G.; Williams, J. R.; Srinivasan, R. Soil and Water Assessment Tool – SWAT. Texas: USDA, Agricultural Research Service, 1996. 450p
- Lacerda, M. A. D.; Lacerda, R. D. O cluster da fruticultura no Pólo Petrolina/Juazeiro. *Revista de Biologia e Ciências da Terra. Campina Grande - PB*, v.4, n.1, 2004.

- Lane, L. J.; Kidwell, M. R.; Wertz, M. A. Watershed sediment yield and rangeland health. *International Journal of Sediment Research*, v.15, n.1, p.51-59, 2000.
- Liersch, S. The Program pcpSTAT: user's manual. Berlin. 2003a.
- Liersch, S. The Programs dew.exe and dew02.exe: user's manual. Berlin. 2003b.
- Liew, M. W.; Veith, T. L.; Bosch, D. D.; Arnold, J. G. Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS watersheds. *Journal of Hydrological Research*, v.12, p.173-189, 2007.
- Lima, W. de P. Manejo de Bacias Hidrográficas. Piracicaba: ESALQ-USP. 1969. 242p.
- Lin, Y. P.; Hong, N. M.; Wu P. J. Modeling and assessing land-use and hydrological processes to future land-use and climate change scenarios in watershed land-use planning, *Environ. Geol.*, v. 52, n. 3, p. 623 - 634, 2007.
- Lombardi Neto, E. Rainfall erosivity distribution and relationship with soil loss in Campinas, Brasil. West Lafayette: Purdue University, 1977. 53p. Master 's Dissertation.
- Ludwig, W.; Probst, J. L. River sediment discharge to the oceans: present-day controls and global budgets. *American Journal of Science*, v. 298, p. 265 - 295, 1998.
- Machado, R. E.; Vettorazzi, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins, SP. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 4, p. 735 - 741, 2003.
- Maneta, M.; Singh, V. P.; Torres, M.; Vosti, S.; Rodrigues, L.; Bassoi, L.; Young, J. Parsimonious crop water productivity index under unforced conditions for large basins. *Area* 41, n.1, p.94 - 106, 2009.
- Mather, P. M. *Computer Processing of Remotely-Sensed Images An Introduction*, School of Geography, The University of Nottingham, UK, 1999. 292p.
- McCuen, R.H. (1998) *Hydrologic Analysis and Design*. 2nd Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River.
- Mello, C. R. de; Viola, M. R.; Norton, L. D.; Silva, A. M.; Acerbi Jr, F. W. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. *Catena*, v. 75, p. 235-247, 2008.
- Mello, N. G. S.; Sakamoto, M. S.; Torsani, J. A. Um Estudo de Caso de Um Sistema Convectivo de Mesoescala Observado no Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9., 1996, Campos do Jordão. Anais... Campos do Jordão, 1996. p. 940-944.
- Melo, H. de A. Integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: uma avaliação metodológica. Campina Grande: UFCG, 2010. 119p. Dissertação Mestrado.

- Mendonça, J. K. S.; Guerra, A. J. T. Erosão dos Solos e a Questão Ambiental. In: Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil. Guerra, A. J. T. e Vitte, C. A. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil, 2004. p. 225-251.
- Menezes, A.; Gardini, A. (2005). Polemica marca projeto de transposição. <http://cienciaecultura.bvs.br>, 15 Abr. 2012.
- Moreira, M. C.; Cecílio, R. A.; Pinto, F. de A. de C.; Pruski, F. F. Desenvolvimento e análise de uma rede neural artificial para estimativa da erosividade da chuva para o Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.1069-1076, 2006.
- Moriassi, D. N.; Arnold, J. G.; Liew, M. W. van; Binger, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v.50, p.885-900, 2007.
- Moussa, R.; Voltz, M.; Andrieux, P. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, v. 16, p. 393 - 412, 2002.
- Muleta, M. K.; Nicklow, J. W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. *Journal of Hydrology*, v. 306, p. 127 – 145, 2005.
- Müller, V. C. A quantitative geomorphology study of drainage basin characteristic in the Clinch Mountain Area. New York: Virginia and Tennessee. Dept. of Geology, n. 3, p. 30, 1953.
- Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R.; Williams, J. R. Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation, Version 2005. Texas, USA, 2005.
- Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R.; Srinivasan, R.; Williams, J. R. Soil and Water Assessment Input/Output File Documentation. Version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service, Blackland Research Center - Texas AgriLife Research, 2010. 604p. (Texas Water Resources Technical Report, 365)
- Oeurng, C.; Sauvage, S.; Sanchez Perez, J. M. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *Journal Hydrology*, v. 401, p. 145 - 153, 2011.
- Oliveira, L. F. C.; Cortês, F. C.; Barbosa, F. O. A.; Romão, P. A.; Carvalho, D. F. Estimativa das Equações de Chuvas Intensas para Algumas Localidades no Estado de Goiás Pelo Método da Desagregação de Chuvas. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 20. p. 23 - 27, 2005.
- Ott, B.; Uhlenbrook, S. Quantifying the impact of land-use changes at the event and seasonal time scale using a process-orientated catchment model. *Hydrol. Earth System Sci.*, v. 8, n. 1, p. 62 - 78, 2004.

- Parajuli, P. B.; Mankin, K. R.; Barnes, P. L. Source specific fecal bacteria modeling using Soil and Water Assessment Tool model. *Bioresource Technology*, v. 100, p. 953 - 963, 2009.
- Pinto, M. (2005). Ministério Público quer paralisar transposição. <http://www.adital.com.br>, 19 Jun. 2012.
- Powell, M. D.; Reid, I.; Laronne, J. B.; Frostick, L. E. Bedload as a component of sediment yield from a semiarid watershed of the northern Negev. In: D. E. Walling & B. W. Webb (Eds.) *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*. Wallingford: IAHS Publ. 1996. p. 389 - 397.
- Pruski, F. F. *Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica*. 2. ed. Viçosa: UFV, 2009. 54p.
- Restrepo, J. D.; Kjerfve, B.; Hermelin, M.; Restrepo, J. C. Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River, Colombia. *Journal of Hydrology*, v. 316, p. 213 - 232, 2006.
- Ribeiro, F. L.; Campos, S. Vulnerabilidade à erosão do solo na região do Alto Rio Pardo, Pardinho - SP. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.6, p.628-636, 2007.
- Ross, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. *Revista do Departamento de Geografia, FFLCH/ USP, São Paulo*, n.6, p. 63-74, 1994.
- Sammons, N.; Neitsch, S. L. *Until interface for SWAT2000 – User guide*. SERVICE, GUAR, 14p. 2000.
- Santos, C. A. G., Srinivasan, V. S.; Silva, R. M. Evaluation of optimized parameter values of a distributed runoff–erosion model applied in two different basins. *IAHS Publ.*, v. 292, p. 101 - 109, 2005.
- Schultz, G. B.; Souza, R. M.; Santos, I. Simulação da produção e transporte de sedimentos com o modelo SWAT: Aplicação na Bacia do Altíssimo Rio Negro. In: Lima, J. E. F. W.; Lopes, W. T. A. *Engenharia de Sedimentos: na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento*. Rio Grande do Sul: ABRH, 2011. p. 365-382.
- Setegn, S. G.; Srinivasan, R.; Dargahi, B. Hydrological Modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia Using SWAT Model, *Open Hydrol. Journal.*, v. 2, p. 49 – 62, 2009.
- Sharma, P.; Rai, S. C. Streamflow, sediment and carbon transport from a Himalayan watershed. *Journal of Hydrology*, v. 289, p. 190 - 203, 2004.
- Sharpley, A. N.; Williams, J. R. *EPIC – Erosion Productivity Impact Calculator, 1, Model documentation*. Washington: Agricultural Research Service, 1990. 145p.
- Silva, F. B. R.; Riché, G. R.; Tonneau, J. P.; Souza Neto, N. C. de; Brito, L. T. L.; Correia, R. C.; Cavalcanti, A. C.; Silva, F. H. B. B. da; Silva, A. B. da; Araújo Filho, J. C. de; Leite, A. P.

- Zoneamento Agroecológico do Nordeste: diagnóstico e prognóstico. Recife: Embrapa Solos Escritório Regional de Pesquisa e Desenvolvimento Nordeste ERP/NE; Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2000. Documentos, 14
- Silva, P. C. G. da; Correia, R. C. Caracterização social e econômica da videira. In: Leão, P. C. de S.; Soares, J. M. A viticultura no semi-árido brasileiro. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2000. cap. 2. p. 19-32.
- Smith, K. G. Standards for grading texture of erosional topography. *American Journal of Science*, v. 248, p. 655-668, 1950.
- Sorooshian, S. Parameter estimation, model identification and model validation: conceptual type models. In: Bowles, D. S.; O'Connell, P. E. Recent advances in the modelling of hydrological systems. Dordrecht: Kluwer Academic, 1991. p. 443-467.
- Stone, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar energy*, v.51, p.289-291, 1993.
- Strahler, A. N. Hypsometric analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, v. 63, p. 111-1141, 1952.
- Teixeira, A. H. C. Informações Agrometeorológicas do Polo Petrolina, PE/Juazeiro, BA - 1963 a 2009. Série Documentos - Embrapa Semiárido, 2010 21p.
- Teixeira, A. H. C.; Azevedo, P. V. Zoneamento agroclimático para a videira européia no estado de Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria-RS, v. 4, n. 1, p. 139-145, 1996.
- Tricart, J. Ecodinâmica. Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN, 1977. 91p.
- Togrul, T.; Togrul, H. Global solar radiation over Turkey: comparison of predicted and measured data. *Renewable Energy*, v.25, p.55-67, 2002.
- Tsou, M. S.; Whittemore, D. O. User interface for ground-water modeling: ArcView Extension. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 6, n. 3, p. 251-257, 2001.
- Tucci, C. E. M.; Clarke, R. T. Environmental Issues in the La Plata Basin. *Water Resources Development*, v. 14, n. 2, p. 157-173, 1998.
- Uzeika, T. Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em pequena bacia hidrográfica rural. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 144p. Dissertação Mestrado
- Vente, J.; Poesen, J. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. *Earth-Science Reviews*, v. 71, n.1 – 2, p. 95 - 125, 2005.
- Verstraeten, G.; Poesen, J.; Vente, J.; Koninckx, X. Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology*, v. 50, p. 327 - 348, 2003.

- Von Stackelberg, N. O.; Chescheir, G. M.; Skaggs, R. W.; Amatya, D. M. Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó river basin, Uruguay. *Transactions of the ASABE*, v. 50, p. 455-468, 2007.
- Wahab, A. A.; AMIM, M. S. M.; Halim, G. A.; Shafri, H. Z. M.; Thamer, A. M.; Waleed, A. R. M.; Aimrun, W.; Ezrin, M. H. The effect of development and land use change on rainfall-runoff and runoff-sediment relationships under humid tropical condition: Case study of Bernam watershed, Malaysia. *European Journal of Scientific Research*, v. 31, n. 1, p. 88-105, 2009.
- Wang, X., Melesse, A.M. and Yang, W. Influences of Potential Evapotranspiration Estimation Methods on Swat's Hydrologic Simulation in a Northwestern Minnesota Watershed. *Transactions of the ASABE*, v. 49, p. 1755-1772, 2006.
- Ward, A. D.; Elliot, W. J. *Environmental Hidrology*. New York: Lewis Publishers, 1995. 328p.
- Wegehenkel, M.; Heinrich, U.; Uhlemann, S.; Dunger, V.; Matschullat, J. The impact of different spatial land cover data sets on the outputs of a hydrological model: a modelling exercise in the Ucker catchment, North-East Germany. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 31, n. 17, p. 1075 – 1088, 2006.
- Williams, J. R. The EPIC model. In: Singh, V. P. *Computer models of watershed hydrology*. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995. p. 909-1000.
- Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning*. Washington: USDA, Agriculture Research Service, 1978. 58p. *Agriculture Handbook*, 735.
- Xavier, C. F. *Avaliação da influência do uso e ocupação do Solo e de características geomorfológicas sobre a qualidade das águas de dois reservatórios da região metropolitana de Curitiba – Paraná*. Curitiba: UFPR, 2005. 167p. *Dissertação Mestrado*
- Zhang, H. G.; FU, S. H.; Fang, W. H.; Imura, H.; Zhang, X. C. Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River Basin of China. *Transactions of the ASABE*, v.50, p.911-918, 2007.