

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento/PPGRHS

CARLOS ALBERTO INACIO DA SILVA

**"ANÁLISE DE APLICABILIDADE DA INTERFACE DO MODELO HIDROLÓGICO
SWAT-SIG NO ESTUDO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA BACIA NO
NORDESTE DO BRASIL"**

MACEIÓ
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento/PPGRHS

CARLOS ALBERTO INACIO DA SILVA

“ANÁLISE DE APLICABILIDADE DA INTERFACE DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT-SIG NO ESTUDO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA BACIA NO NORDESTE DO BRASIL”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Rosangela Sampaio Reis

MACEIÓ
2014

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Maria Auxiliadora G. da Cunha

S586a Silva, Carlos Alberto Inacio da Silva.
“Análise de aplicabilidade da interface do modelo hidrológico Swat-sig no estudo da Produção de sedimentos em uma Bacia no Nordeste do Brasil” / Carlos Alberto Inacio da Silva. – 2014.
52 f. : il. tabs., gráfs. e mapas color.

Orientadora: Rosangela Sampaio Reis.
Dissertação (Mestrado em Engenharia: Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2014.

Bibliografia: f. 49-52.

1. Bacia hidrográfica. 2. Modelagem hidrossedimentalógica. 3. SWAT.
I. Título.

CDU: 556.51(812/813)



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamentos – PPGRHS



**ANÁLISE DE APLICABILIDADE DA INTERFACE DO MODELO
HIDROLÓGICO SWAT-SIG NO ESTUDO DA PRODUÇÃO DE
SEDIMENTOS EM UMA BACIA NO NORDESTE DO BRASIL**

CARLOS ALBERTO INÁCIO DA SILVA

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 27 de janeiro do ano de 2014.

Banca Examinadora:

Prof.ª. Dra. Rosângela Sampaio Reis
(Orientadora - PPGRHS /UFAL)

Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragozo Júnior
(PPGRHS/UFAL)

Prof. Msc. Gustavo Silva de Carvalho
(UFAL)

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo
(UFPE)

*Deixo esta minha esposa Solange Marcolino
que me incentivou nos momentos mais
difíceis e ao meu filho Nicolas Pedro que
chegou para iluminar nossas vidas e trazer
felicidade em sua chegada.*

Dedico a minha esposa Solange Marcolino, que me incentivou nos momentos mais difíceis e ao meu filho Nicolas Pedro que chegou para iluminar nossas vidas e dando forças com sua alegria.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço á Deus pela saúde, paz, alegria e oportunidades que sempre tive em minha vida, possibilitando assim, concretizar mais um importante passo profissional e pessoal.

À Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Instituto de Tecnologia - CTEC, pela acolhida e sua retribuição na minha formação.

Agradeço a minha orientadora Rosangela Sampaio Reis, pela paciência, dedicação, sabedoria e pelo estabelecimento de uma fácil e harmoniosa relação professor - aluno. Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento - PPGRHS, por suas honrosas contribuições ao longo do curso.

A minha mãe Marluse Inacio e ao meu pai Pedro Bezerra, pelo carinho, apoio em todos os momentos de minha vida. A todos os familiares que, na medida do possível, complementaram esse apoio.

A minha esposa Solange Marcolino de Melo, pelo apoio oferecido ao longo da execução da pesquisa e a quem amo muito.

Aos meus amigos mestrandos: Benicio Emanuel, Denis Duda, Jeilson Vieira, Wilson Francisco, em especial a Cledeilson Pereira e a todos os colegas do curso, pelo apoio, incentivo permanente e companheirismo.

RESUMO

Modelos hidrológicos vêm ao longo do tempo sendo utilizados em estudos ambientais, pois, auxiliam no entendimento das alterações de uso e ocupação do solo, bem como, podem prever alterações futuras no regime hidrológico das Bacias Hidrográficas. Diante deste fato, o presente estudo avaliou a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Mundaú utilizando o modelo SWAT. Para tanto, foram criados bancos de dados tabulares e espaciais exigidos pelo modelo, foi realizada a discretização da bacia em sub-bacias e foram feitas as simulações. Realizou-se a calibração e validação do modelo através da manipulação manual dos parâmetros mais sensíveis à bacia. Os dados simulados pelo modelo foram comparados aos dados observados de vazão e sedimentos, coletados na estação Fazenda Boa Fortuna. A comprovação da eficiência do modelo foi analisada através das estatísticas: *NASH* (coeficiente de Nash-Sutcliffe), *PBIAS* (percentual de tendência) e *RSR* (Razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão dos dados observados). Os resultados evidenciaram que o modelo SWAT apresentou uma boa capacidade de reproduzir a vazão escoada a nível diário. Em relação à simulação da produção de sedimentos o modelo não se ajustou adequadamente aos dados disponíveis.

Palavras-chave: Bacia Hidrográfica; Modelagem Hidrossedimentológica; SWAT.

ABSTRACT

Hydrological models over time have been used in environmental studies, therefore help in understanding the changes of use and occupation land, and can predict future changes in the hydrological regime of the Watershed. Considering this fact, the present study evaluated the production of sediments in the river basin Mundaú using the SWAT model. Thus, we created tabular database and spatial were required by the model, was held discretization of the basin and sub-basins and the simulations were made. It was made the calibration and validation the model by manual manipulation of the parameters most sensitive basin. The data simulated by the model were compared to the observed data of flow and sediment, collected at Station Farm Boa Fortuna. The evidence of the efficiency of the model was analyzed using statistics: NASH (Nash-Sutcliffe coefficient), PBIAS (percentage of trend) and RSR (ratio of the standard error of mean and standard deviation of the observed data). The results showed that the SWAT model showed a good ability to reproduce the flow drained to the daily level, relative to sediment production, the model did not fit adequately to the data available.

Keywords: River Basin; Modelling Hydrossedimentological; SWAT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre tipo de sedimento, condição de transporte e perfil de velocidade do fluxo.	15
Figura 2 - Localização da área de estudo	20
Figura 3 - Modelo Numérico de Terreno.....	21
Figura 4 - Classes de uso e ocupação do solo.....	23
Figura 5 - Painel fotográfico com os usos do solo predominante na bacia do rio mundaú	24
Figura 6 - Tipos de solos	25
Figura 7 - Classes de declividade na bacia do rio mundaú	26
Figura 8 - Isoietas das precipitações totais anuais da bacia do rio mundaú.....	30
Figura 9 - Processo de funcionamento do modelo SWAT.....	33
Figura 10 - Divisão das sub-bacias geradas na BHRM	37
Figura 11 - Calibração Vazão diária: simulada x observada	38
Figura 12 - Validação Vazão diária: simulada x observada.....	39
Figura 13 - Sensibilidade dos parâmetros para escoamento.....	40
Figura 14 - Calibração Sedimento diário: observado x simulado.....	42
Figura 15 - Validação Sedimento diário: observado x simulado	42
Figura 16 - Sensibilidade de parâmetros para escoamento	43
Figura 17 - Vazões diárias para os cenários climáticos simulados.....	44
Figura 18 - Comparação entre a concentração anual de sedimento	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre tipo de sedimento, granulometria e transporte	15
Tabela 2 - Propriedades físico-químicas do solo requerido pelo modelo SWAT	28
Tabela 3 - Estatísticas calculadas através do gerador climático	28
Tabela 4 - Estações Pluviométricas	29
Tabela 5 - Estações Climáticas	31
Tabela 6 - Estatísticas recomendadas para testar o desempenho do modelo SWAT.....	35
Tabela 7 - Valores das estatísticas para calibração e validação das vazões diárias.....	38
Tabela 8 - Valores das estatísticas para calibração e validação diária dos sedimentos .	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos.....	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Processos Hidrossedimentológicos	12
3.2 Modelagem Hidrossedimentológica	16
3.3 Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool).....	17
3.4 Estudos Hidrossedimentológicos na região da BHRM.....	19
4 METODOLOGIA	20
4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20
4.1.1 Modelo Numérico de Terreno (MNT)	21
4.1.2 Uso e Ocupação do Solo	22
4.1.3 Tipos de Solos	25
4.1.4 Classes de Declividade.....	25
4.2 DADOS DE ENTRADA.....	26
4.2.1 Modelo Numérico de Terreno	27
4.2.2 Uso e Ocupação do Solo	27
4.2.3 Tipos de Solos	27
4.2.4 Clima.....	28
4.3 Estações de monitoramento	29
4.4 Fator de Erodibilidade do solo (k)	31
4.5 Implementação do Modelo SWAT	32
4.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	34
4.7 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	35
4.7.1 Cenários Climáticos Futuros.....	35
5 RESULTADOS	36
5.1 Calibração e Validação das vazões diárias	37
5.2 Calibração e validação dos dados de sedimentos	41
6 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS	43
6.1 CENÁRIO CLIMÁTICO FUTURO.....	43
6.1.1 Vazões.....	44
6.1.2 Sedimentos.....	45
7 DISCUSSÃO	45
8 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo a degradação do solo e da água tornaram-se reflexos de uma série de intervenções antrópicas que vem ocorrendo na ocupação das bacias hidrográficas. São vários os fatores que tiveram papel importante nessas transformações, destacando-se: o crescimento populacional desordenado; a consolidação do estabelecimento de indústrias e o desenvolvimento de práticas agrícolas.

Tais fatores acabam por influenciar nos processos de desagregação e transporte das partículas do solo erodido, que vai desde a remoção da superfície do solo ou das paredes dos leitos dos córregos e rios, sob efeito do escoamento. Dentre as formas de erosão, a hídrica é, sobre grande parte do planeta, a mais importante forma de erosão (ZACHAR, 1982 *apud* MACHADO, 2002), sendo causada pela chuva e pelo escoamento superficial e sendo afetada por um grande número de agentes naturais e antropogênicos.

Os processos sedimentológicos fluviais incluem remoção, transporte e deposição das partículas, envolvendo toda a dinâmica da bacia de drenagem. Os deslocamentos dos sedimentos carregados pelo escoamento superficial e outros processos acabam provocando o remanejo e a redistribuição pela bacia de ponderáveis massas de partículas sólidas, a ponto de poderem alterar o ciclo hidrológico e afetar o uso, a conservação e a gestão dos recursos hídricos (ADRIOLO *et al*, 2008).

Portanto, o ciclo hidrológico é um fator preponderante na consolidação dos processos sedimentológicos, é ele quem dita o dinamismo que envolve toda essa interação. A bacia hidrográfica é um fator preponderante, pois, é tomada como a unidade de controle do ciclo hidrológico. Paralelo ao ciclo hidrológico, e totalmente vinculado, existe o ciclo hidrossedimentológico, que é aberto, pois ao contrário das moléculas da água, o sedimento não voltará de onde vem (Bordas e Semmelmann, 2000).

Assim, percebe-se a importância de se compreender a complexidade dos processos sedimentológicos em bacia hidrográfica. Neste contexto, (ADRIOLO *et al*, 2008) descreve que ultimamente a gestão integrada dos recursos hídricos, os riscos de degradação dos solos, dos leitos dos rios e dos ecossistemas fluviais e estuarinos, ou

da contaminação dos sedimentos por produtos químicos, têm levado pesquisadores e a própria sociedade a dar maior importância aos problemas decorrentes das alterações do ciclo hidrossedimentológico. Neste contexto a modelagem distribuída da produção e transporte de sedimentos torna-se importante para a gestão ambiental, pois apresenta as seguintes características:

- permite localizar espacialmente as áreas com processos erosivos mais acentuados, favorecendo a tomada de decisões com medidas locais e mais eficientes, pois atingem a fonte do problema;
- permite prever o transporte de sedimentos quantitativamente no tempo e no espaço, facilitando assim o planejamento da rede de monitoramento sedimentométrico e a frequência das campanhas de medição. O monitoramento do transporte de sedimentos no tempo e no espaço é uma atividade complexa e de custo muito elevado; e
- permite estimar variações na carga de sedimentos devido a alterações no uso do solo previstas no futuro, seja com a finalidade de manejo de bacias, seja para avaliar impactos de determinados usos agrícolas.

O entendimento desses fatores é necessário para a resolução de problemas práticos em ambientes ameaçados pela expansão populacional, comercial e industrial.

A elaboração de cenários de mudanças climáticas se faz necessário, uma vez que o aumento na temperatura ocasiona fortes impactos ambientais, consequentemente fazendo com que ocorra mudança nos processos hidrológicos e na cobertura do solo.

Como consequência do aumento na temperatura do globo, alguns impactos ambientais são recorrentes, pode-se destacar: a redução da cobertura de gelo nos polos, o aumento do nível do mar devido ao degelo das geleiras, eventos extremos de secas e chuvas e mudanças no regime de precipitação pluvial em diferentes regiões do globo. Segundo (Marengo & Valverde, 2007) esses são alguns exemplos de desastres naturais que poderão ter impactos decorrentes das mudanças climáticas devido à grande vulnerabilidade associada aos sistemas naturais.

Diversos estudos sobre mudanças climáticas no Brasil estão sendo realizados, uma vez que o clima do País também tem experimentado alterações, em particular na

região semiárida. Secas severas e enchentes são exemplos reais que servem de advertência para o futuro.

Na região Nordeste do Brasil, (Silva *et al.*, 1998) destaca que mesmo com aporte de chuva maior que em outras regiões do mundo, pode-se destacar a parte semi-árida, é periodicamente afetada pela ocorrência de secas com perdas parciais ou totais na agropecuária, além de comprometer o abastecimento de água devido principalmente à irregularidade da estação chuvosa na região, com predominância de chuvas intensas e de curta duração. Estudos recentes indicam que esta região vem sofrendo com fortes variabilidades climáticas (Pimenta *et al.*, 1998; Silva, 2004; Sousa Júnior, 2006).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliação do escoamento superficial e a concentração de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Mundaú aplicando o modelo SWAT.

2.2 Objetivos Específicos

Análise do desempenho do modelo na simulação dos dados hidrológicos e sedimentológicos por meio da calibração manual e métodos estatísticos;

Análise da simulação de cenários de cobertura do solo atual e de mudanças climáticas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processos Hidrossedimentológicos

Os processos hidrossedimentológicos são resultados da interação entre os processos hidrológicos e sedimentológicos. A água é um dos principais agentes causadores do desprendimento de partículas de rochas e solos, estas irão percorrer a encosta da bacia até atingir os cursos d'água e, finalmente, alcançar o exutório e irão

contribuir para a produção de sedimentos da bacia. Esses processos são definidos como: desagregação, erosão, transporte, sedimentação, depósito e consolidação.

A desagregação se refere ao desprendimento de partículas sólidas do meio do qual fazem parte, pode-se dar por meio de reações químicas, flutuações de temperatura, ações mecânicas ou outros fatores naturais que não envolvem diretamente o ciclo hidrológico (Bordas e Semmelmann, 2000).

Segundo Pereira (2003) quando há a ruptura do equilíbrio existente no solo, devido principalmente as forças provindas da chuva e do vento, ocorre a erosão hídrica. O autor também cita que as condições do terreno interferem na intensidade do processo erosivo. Dentre essas condições mais importantes são: a declividade do terreno, capacidade de infiltração da água no solo, à distância percorrida pelo escoamento superficial, a rugosidade superficial, a resistência do solo à ação erosiva da chuva e a percentagem de cobertura do solo existente à época da ocorrência da chuva.

A erosão pode ser entendida como um fenômeno de desgaste das rochas e solos, com desagregação, deslocamento ou arrastamento das partículas por ação da água ou outros agentes naturais (Carvalho, 2008). Para Bordas e Semmelmann (2000) a erosão é o início do processo de deslocamento das partículas sólidas da superfície do solo ou das paredes dos leitos dos rios.

Os processos erosivos são complexos e dependem de vários fatores. Contudo, tem que se levar em consideração alguns parâmetros:

- As formas de erosão:
 - ✚ Erosão Geológica (geomorfológica): o arranque das partículas e seu transporte ocorrem sem intervenção do homem.
 - ✚ Erosão Acelerada: provocada pela ação antropica. As enchentes, terremotos e outras catástrofes não antrópicas também fazem parte desse processo.

- Agentes Erosivos:

Esses elementos fazem parte do meio físico e afetam diretamente a erosão, podem ser ativos (água, vento, temperatura, insolação, ação humana, etc.), passivos (gravidade) e alto-passivo (chuva).

Segundo Carvalho (1994), existe quatro tipos de erosão que podem se processar: (i) erosão hídrica superficial, causada pelo escoamento superficial; (ii) erosão eólica, provocada pelo vento; (iii) remoção em massa, provocada pela gravidade e pela saturação de água no solo e (iv) erosão fluvial, ocasionada pela ação das correntes dos rios. No presente estudo foi somente analisada a erosão hídrica.

Segundo Bertoni (1999) os fatores que influenciam a erosão são: intensidade e duração das chuvas; estrutura e composição geológica do terreno (propriedades do solo); declividade do terreno e extensão do declive; cobertura vegetal; e tipo de uso e cobertura do solo.

O transporte de sedimento é um fenômeno complexo que depende de processos erosivos que ocorrem nas vertentes da bacia e no leito e margens dos rios, que fornecem material que, por sua vez, dependem da energia do fluxo para serem transportados (Santos *et al.*, 2001).

Segundo Carvalho (2008), o transporte de sedimentos se processa nos cursos d'água, sendo que de 70 a 90% desse material transportado ocorrem, principalmente, no período de fortes precipitações.

Os fatores que influenciam diretamente no transporte do material sedimentológico é sua forma, tamanho, peso das partículas e das forças exercidas pela ação do escoamento, sendo que essas devem ser menores que as exercidas pelas partículas (Carvalho, 2008).

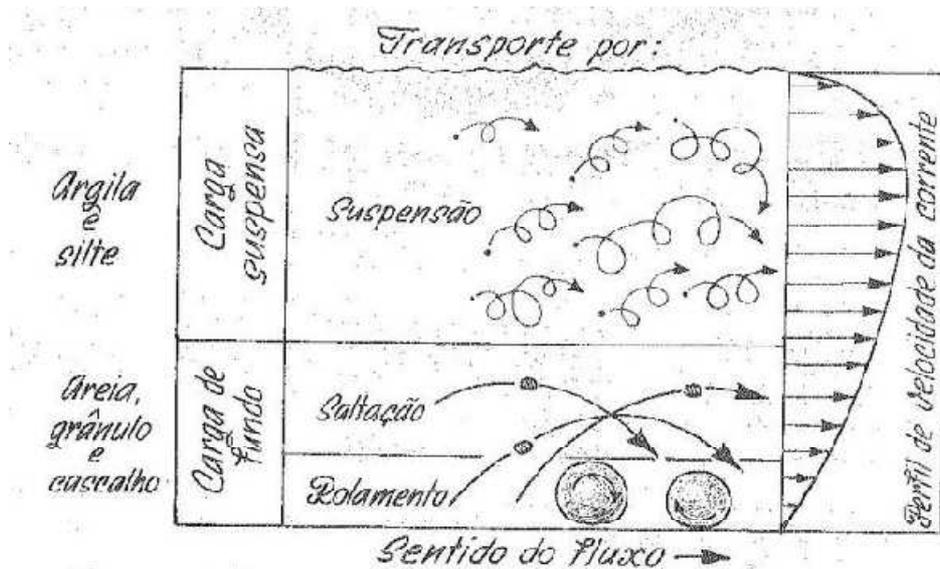
Sedimentação é o processo pelo qual as partículas mais finas transportadas em suspensão, tendem a restabelecer contato com o fundo do leito sob ação da gravidade. Neste processo verifica-se a resistência do meio fluido em que está envolto, que as impede ou freia sua queda para o fundo, sobretudo por efeito da turbulência.

O depósito de sedimentos ocorre quando as forças exercidas pela ação do escoamento se reduzem até que a condição de não poderem continuar seu deslocamento aconteça.

Portanto o transporte e depósito dos sedimentos dependem do peso da partícula. As partículas mais pesadas são deslocadas sobre o fundo por rolamento, deslizamento ou saltos curtos. As partículas mais leves são descoladas em suspensão (Figura 1).

Assim o depósito irá ocorrer quando a partícula tiver uma parada total do seu movimento.

Figura 1 - Relação entre tipo de sedimento, condição de transporte e perfil de velocidade do fluxo.



Fonte: Carvalho, 1994

A Tabela 1 mostra a relação do tipo de sedimento e granulometria da partícula com o transporte.

Tabela 1 - Relação entre tipo de sedimento, granulometria e transporte

Material	ϕ (mm)	Transporte
Argila	$0 < \phi < 0,002$	Em suspensão
Silte	$0,002 < \phi < 0,06$	Em suspensão
Areia	$0,06 < \phi < 2,0$	Em suspensão, rolamento, arraste e/ou saltação
Pedregulho	$2,0 < \phi < 60,0$	Rolamento, arraste e/ou saltação

ϕ = diâmetro da partícula.
(FONTE: Vestena, 2008)

Segundo Dickinson e Collins (1998), a quantidade de sedimento exportado pela bacia é geralmente pequena se comparada à quantidade mensurada ou estimada de solo erodido na bacia, devido grande parte dos mesmos ficarem depositados na própria bacia, nas bases dos declives, nos fundos de vales, nos canais de drenagem e nas áreas de inundações.

Consolidação tem sua formação em detrimento do depósito das partículas. E pode-se dizer que é o acúmulo de partículas sobre o fundo e a compactação do depósito resultante sob efeito do próprio peso dos sedimentos, da pressão hidrostática ou qualquer outro fenômeno que venha a aumentar a densidade dos depósitos (efeito do esvaziamento de uma represa, por exemplo).

3.2 Modelagem Hidrossedimentológica

Processos envolvendo erosão e sedimentação em bacias hidrográficas ocasiona diversos problemas, seja ele de cunho agrícola onde a remoção da camada superficial do solo reduz a sua produtividade. Bem como afeta a qualidade das águas superficiais, através do seu transporte e outros fatores associados à locomoção de diversos poluentes.

A modelagem da produção e concentração de sedimentos é fator preponderante para se determinar impactos ocasionados nas bacias hidrográficas, antes mesmo de se utilizar determinadas práticas de manejo do solo.

A ocorrência desses impactos será posteriormente repercutida nos corpos d'água devido à alta carga de sedimentos lançados nos rios. Esse excesso de sedimento modifica consideravelmente os processos hidrológicos, alterando também o equilíbrio da fauna e flora das águas e das calhas dos rios.

A realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas vem da necessidade de se compreender o funcionamento do balanço hídrico, os processos que controlam o movimento da água e os impactos de mudanças do uso da terra sobre a quantidade e qualidade da água.

Para auxiliar no monitoramento de bacias hidrográficas, modelos hidrológicos vêm sendo desenvolvidos. A grande limitação desses modelos é a quantidade de dados de entrada necessários para caracterizar a bacia em estudo.

Os modelos hidrológicos são representações matemáticas, que através de conjuntos de equações buscam descrever o comportamento de uma bacia hidrográfica. Estes consistem em instrumentos tecnológicos de grande utilidade nos estudos sobre o comportamento de bacias hidrográficas, seja este comportamento referente a uma variável isolada do ciclo hidrológico ou a varias delas, em conjunto (Neto *et al*, 2011).

O modelo hidrológico é uma ferramenta extremamente útil que permite, através da equacionalização dos processos, representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica (Tucci, 1998). Entretanto, é impossível ou inviável traduzir todas as relações existentes entre os diferentes componentes da bacia hidrográfica em termos matemáticos. De fato, ou essas relações são extremamente complexas a ponto de não existir uma formulação matemática capaz de descrevê-las completamente, ou apenas uma parte dos processos envolvidos nessas relações é parcialmente conhecida. Assim, na maioria dos casos, a modelagem hidrológica torna-se somente uma representação aproximada da realidade.

3.3 Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

O modelo, utilizado para o estudo proposto é o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), que de acordo com Srinivasan & Arnold (1994), é um modelo matemático de domínio público desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – USDA, em conjunto com a Universidade A&M do Texas – TAMU.

Pode-se destacar do modelo matemático sua característica distribuída (quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e, ou, do tempo) possibilitando um número de diferentes processos físicos que pode ser simulados em bacias hidrográficas com o intuito de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e sub-superficial, sua produção de sedimentos e também a qualidade da água em bacias hidrográficas.

Segundo Arnold *et al.* (1998) tem base física e característica semi-contínua que opera continuamente em intervalo de tempo diário. Uma visão global dos componentes do modelo SWAT.

O SWAT foi desenvolvido para prever o impacto das alterações no uso, no tipo e no manejo do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos, carga de poluentes e qualidade da água em bacias hidrográficas (Reungsang *et al.*, 2009), sendo amplamente difundido e estudado em todo o mundo (Zhang *et al.*, 2009 e Cibirin *et al.*, 2010, nos EUA; Lino *et al.*, 2009 e Baltokoski *et al.*, 2010, na América do Sul; Galvan *et al.*, 2007, na Europa; Alansi *et al.*, 2009 e Santos *et al.*, 2010, na Ásia; e Xie *et al.*, 2010, na África).

Uma das grandes vantagens do modelo SWAT é o seu acoplamento através da interface *arcswat* aos sistemas de informação geográfica – SIG. Segundo Neto *et al.*, (2011) esta associação permite uma maior rapidez na organização e definição dos dados de entrada, visualização por meio de cartas digitais do terreno das características físicas da bacia e também uma maior interação e compreensão do modelo.

Segundo BONUMÁ *et al.*, (2011), a simulação da produção de sedimentos pode ser comparada aos dados observados obtidos através das estações de monitoramentos. Os dados obtidos com a simulação podem servir para prever a perda de solo devido ao sistema de manejo utilizado e também para o planejamento ambiental. A modelagem da produção de sedimentos é essencial para determinar impactos, antes mesmo da utilização na área em questão, de determinada cultura ou prática agrícola.

Como resultado satisfatório na simulação da produção de sedimentos utilizando o modelo SWAT, deve-se primeiramente analisar os componentes que integram o balanço hídrico. Visto que, os sedimentos têm uma forte ligação com um dos principais componentes hidrológicos do modelo, que é o escoamento superficial, que atua diretamente no seu transporte. Assim sendo, se a resposta não for aceitável, os outros processos não serão.

A utilização do modelo SWAT para prever os impactos ocasionado na simulação de cenários de uso e ocupação do solo está fortemente ligado aos processos hidrológicos e de transporte de sedimentos, visto que, eles afetam diretamente o escoamento superficial.

3.4 Estudos Hidrossedimentológicos na região da BHRM.

Devido aos diversos processos erosivos, muitos danos aos ecossistemas terrestres e principalmente aos ecossistemas aquáticos têm impactado também a economia das cidades e das comunidades ribeirinhas que utilizam atividades pesqueiras ou turísticas como meio de sustento. Esses impactos no meio ambiente e na economia tem despertado o interesse de estudos nesses processos. A Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú tem sido abordada em diversos estudos de processos sedimentológicos, tendo essa região grande importância econômica e ambiental.

No estudo “Simulação da produção de sedimentos para Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú através do modelo SEDNET”, por Farias (2011), foi utilizado o modelo *Sediment River Network* (SedNet) na referida bacia para simular a produção de sedimentos em dois diferentes cenários de uso e cobertura do solo. Foram utilizados, para a simulação, bancos de dados espacializados da bacia, constituído de informações geográficas, pedológicas, hidrológicas e climáticas. No referido estudo compararam-se os resultados obtidos através da análise de cenários sem ações antrópicas e com uso e cobertura atual do solo da bacia, mostrando uma significativa produção de sedimentos devido às ações antrópicas. Nesse estudo também foi analisada a simulação da sensibilidade da carga total de sedimentos em suspensão com a variação do parâmetro HSDR (taxa de entrega de sedimentos de encosta) e com a variação de RC (coeficiente de escoamento), verificando-se por esse modelo, significativa sensibilidade com o parâmetro HSDR e menor sensibilidade com o parâmetro RC.

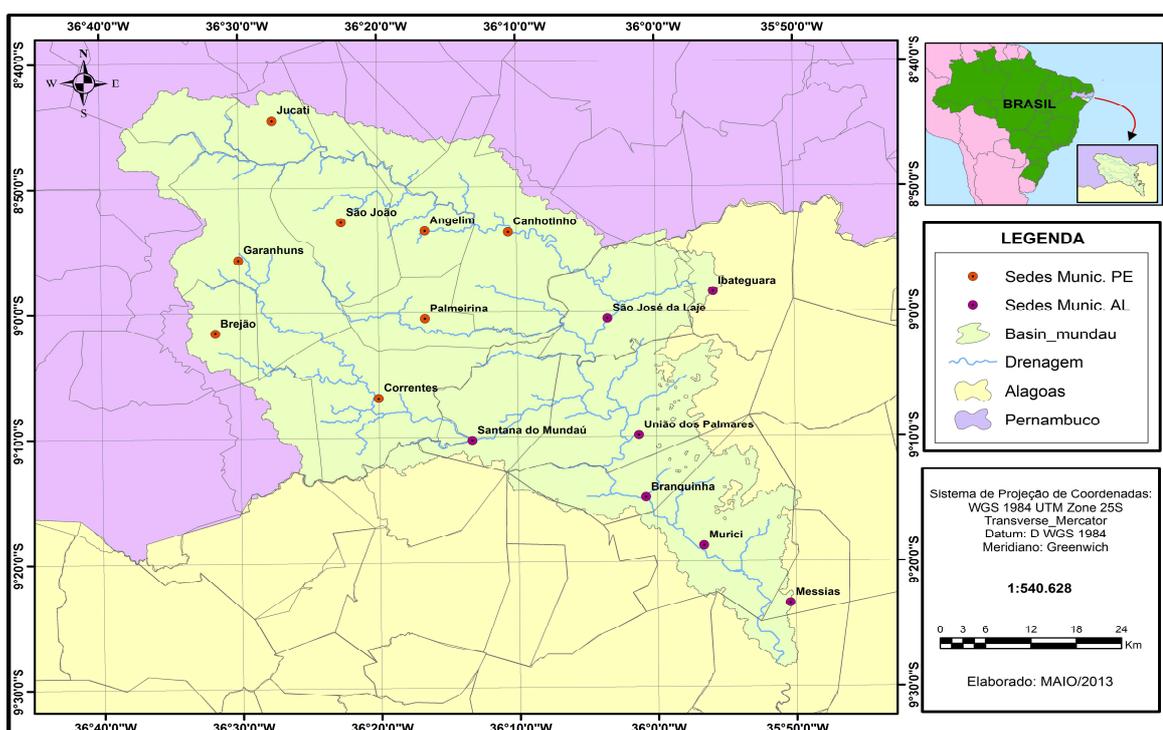
Conejo (2004), citou no Plano de Ações e Gestão Integrada do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba, que simulações hidrodinâmicas realizadas indicam que a vazão de sedimentos aportada pelo rio Mundaú à lagoa de mesmo nome é pequena, não significativa em relação ao porte da lagoa. No entanto, esses sedimentos decantam na parte superior da lagoa Mundaú, muito próximo da foz do rio, o que tem gerado a formação de um delta com ampliação contínua.

4 METODOLOGIA

4.1 Descrição da Área de Estudo

A bacia do rio Mundaú (Figura 2) possui uma área de 4.126 km². No trecho Pernambucano compreende uma área de 2.155 km², abrangendo 15 municípios, sendo que, entre estes 8 oito possuem sedes municipais dentro da bacia. Na porção Alagoana possui 1.971 km², também abrangendo 15 municípios e tendo entre estes 10 com sede municipal na bacia. A bacia está inserida na Mesorregião do Agreste Pernambucano e na Mesorregião do Leste Alagoano.

Figura 2 - Localização da área de estudo



Fonte: Autor, 2012

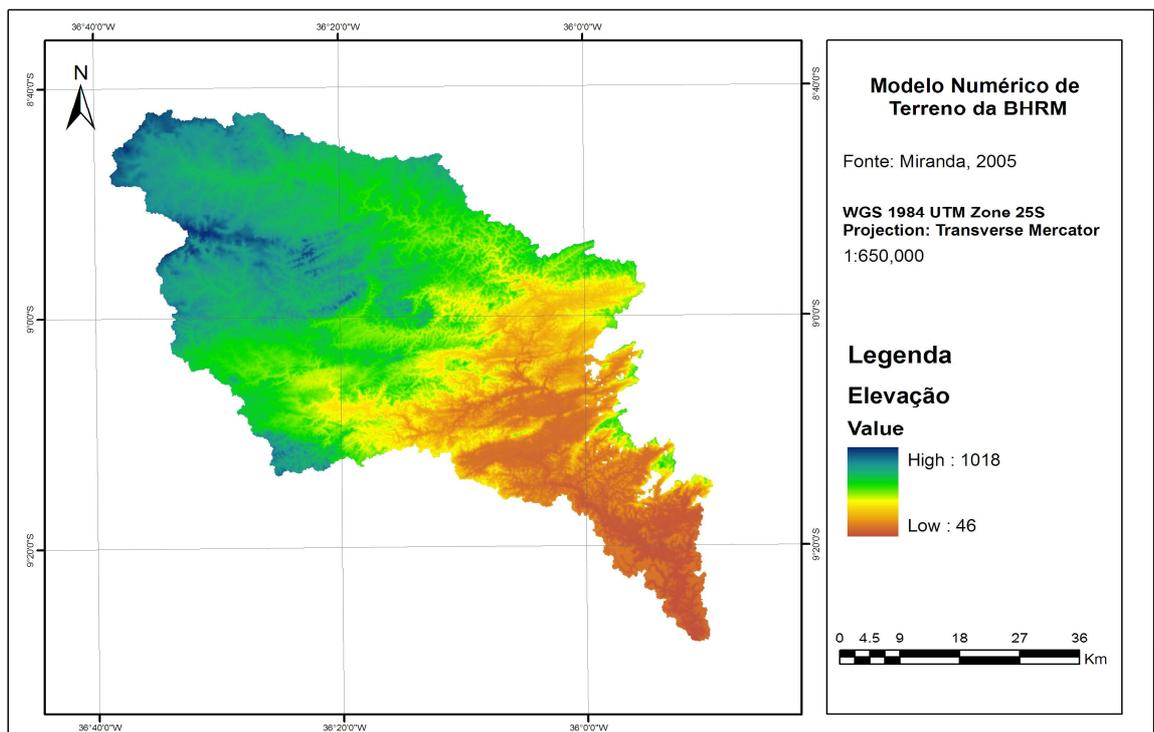
O clima predominante na bacia, segundo a classificação de Köppen, é do tipo BSh, caracterizando-se por apresentar precipitação anual média em torno de 800mm e temperatura média anual superior a 18°C. As temperaturas médias mensais mais

elevadas ocorrem no período de novembro a março e as mais baixas no período de maio a setembro.

4.1.1 Modelo Numérico de Terreno (MNT)

O modelo numérico do terreno (MNT) é um dos dados espaciais básicos requeridos pelo modelo SWAT (Figura 3). O mesmo foi obtido a partir da Empresa Monitoramento por Satélite (Miranda, 2005). O MNT tem o formato GEOTIFF (16 bites), com resolução espacial de 90 metros e Sistema de Coordenadas Geográfica, datum: WGS-84. De posse dos dados foi elaborado um mosaico com as Cartas (SC-24-X-B, SC-25-V-A, SC-24-X-D e SC-25-V-C).

Figura 3 - Modelo Numérico de Terreno



Fonte: Autor, 2012 - Adaptado de Miranda, 2005.

4.1.2 Uso e Ocupação do Solo

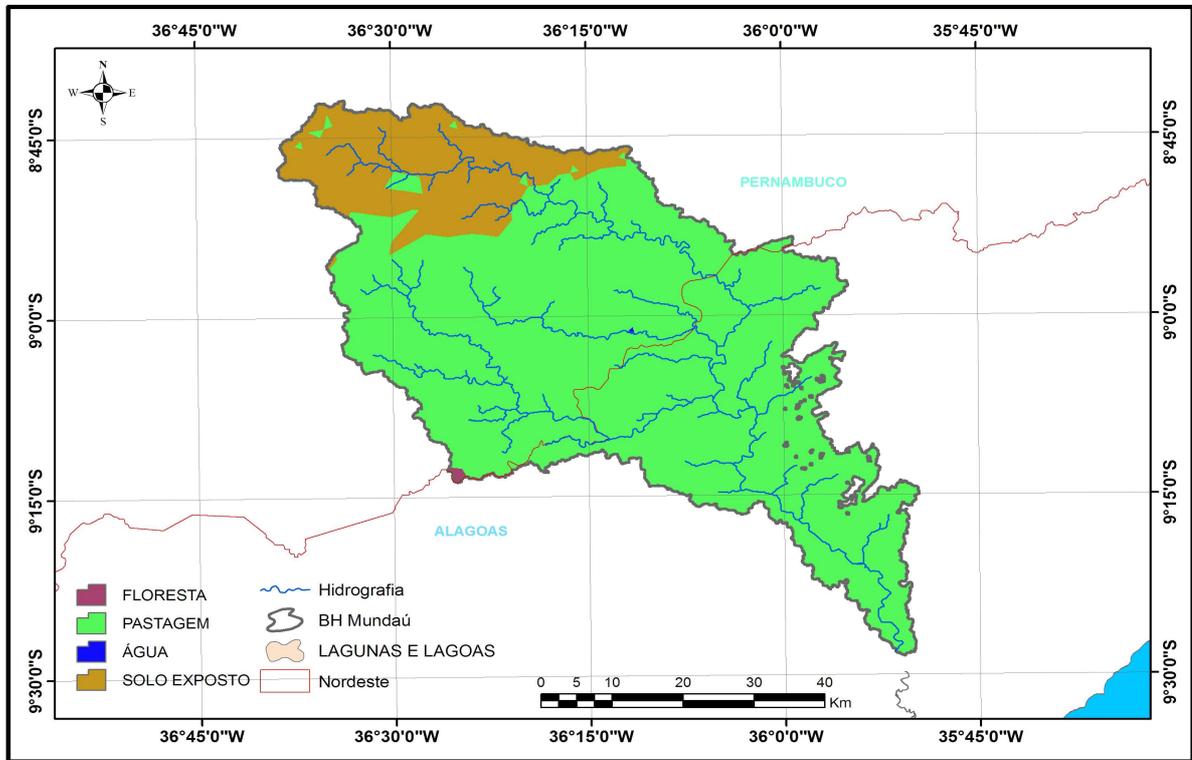
Para a elaboração do mapa de uso do solo BHRM foram utilizadas imagens do satélite L5, com instrumento TM e Órbita/Ponto: 214/66, possuindo 7 bandas, sendo que foram utilizadas para esse estudo apenas as bandas 3, 4 e 5, datada de 17/03/2011, empregando-se o método de classificação supervisionada.

A etapa seguinte consistiu na segmentação das imagens com o software *ARCGIS*, objetivando a elaboração do mapa de uso e cobertura do solo da bacia.

Para esse estudo foram definidas quatro classes de uso do solo: i) água (corpos de água naturais); ii) mata (floresta nativa em diferentes estágios de crescimento e de regeneração); iii) cana (crescimento: brotação, perfilhamento: formação, crescimento dos colmos e maturação); iv) solo exposto (solos em época de preparo para o plantio, áreas urbanizadas e estradas (Figura 4 e 5).

Em seguida, baseado na resolução espacial da imagem e no conhecimento prévio da região onde a bacia está localizada, foi realizada a classificação supervisionada. Para a classificação das imagens foi empregado o método máxima verossimilhança. Este método descreve os valores dos *pixels* de uma amostra de treinamento por uma função de densidade de probabilidade. Assim, o classificador (algoritmo) examina a probabilidade de um *pixel* pertencer a uma determinada classe e o classifica na que apresentar maior probabilidade (Crosta, 1999).

Figura 4 - Classes de uso e ocupação do solo



Fonte: EMBRAPA, 2012

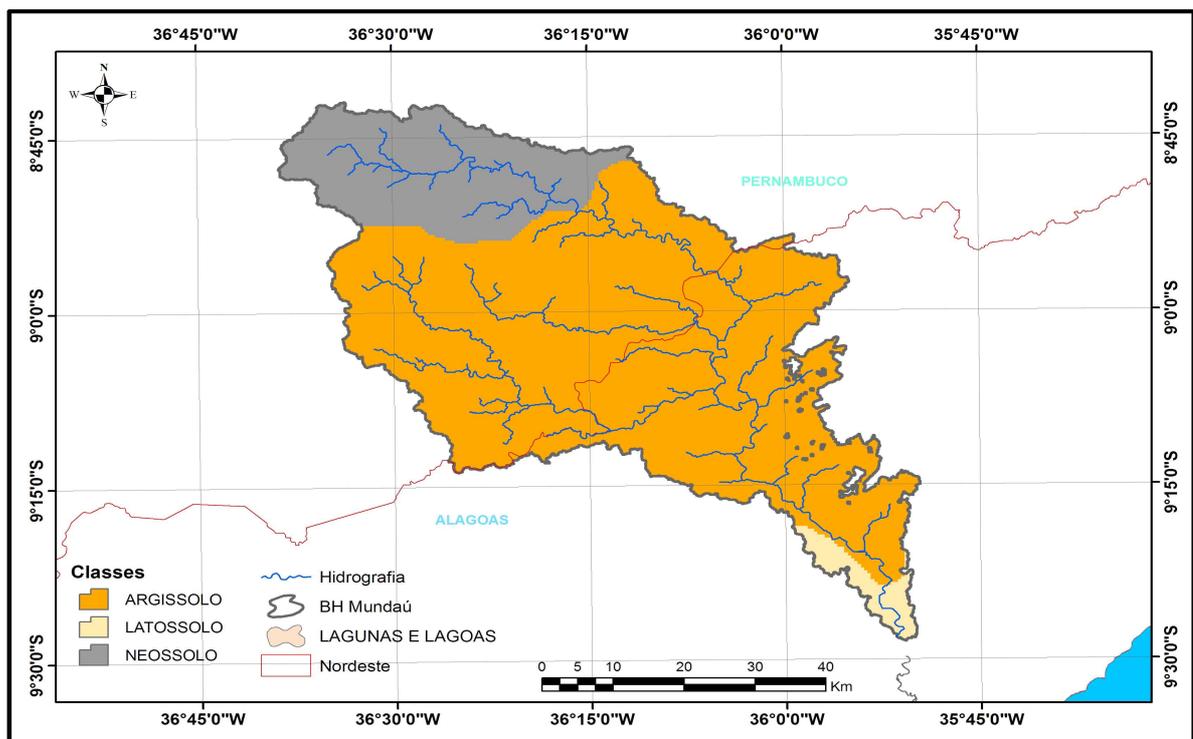
Figura 5 - Painel fotográfico com os usos do solo predominante na bacia do rio mundaú



4.1.3 Tipos de Solos

Em relação aos solos da bacia, o mapa foi elaborado de acordo com dados da Embrapa solos e estão distribuídos da seguinte forma: em 69% da área encontra-se o solo do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo, em 17% Neossolo Regolítico e em 14% Latossolo Amarelo (Figura 6).

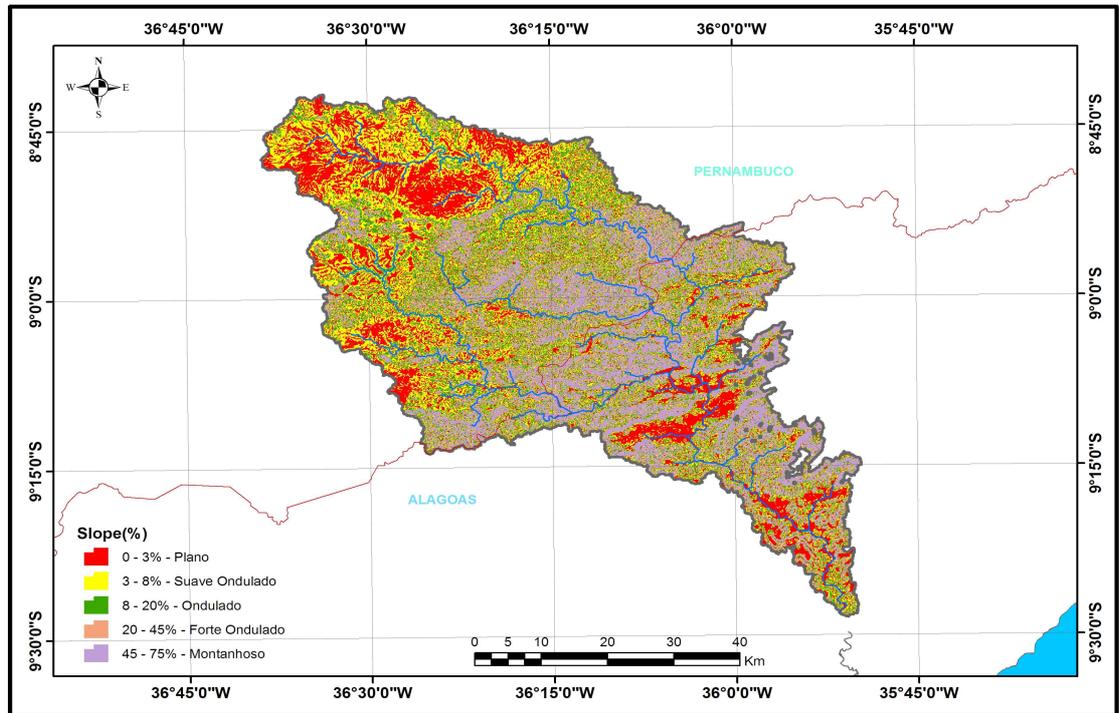
Figura 6 - Tipos de solos



4.1.4 Classes de Declividade

Na bacia domina uma topografia movimentada, de relevo ondulado, forte ondulado, apresentando alguns trechos de tabuleiros, além das pequenas várzeas de relevo plano e encostas de relevo suave ondulado (Figura 7).

Figura 7 - Classes de declividade na bacia do rio mundaú



Fonte: Autor, 2012

4.2 DADOS DE ENTRADA

Para a entrada dos dados no sistema, inicialmente foram levantadas informações sobre o uso e ocupação do solo atual, bem como dados hidroclimáticos úteis à caracterização hidrológica e alimentação do modelo. Na sequência, foram realizadas simulações e calibrações de dados de vazões mensais e diárias, e também da produção de sedimentos.

O SWAT requer uma grande quantidade de informação para a modelagem hidrológica. Neste trabalho utilizamos os seguintes dados:

- 1- Modelo numérico de terreno;
- 2- Uso e ocupação do solo;
- 3- Tipos de solos;
- 4- Clima.

4.2.1 Modelo Numérico de Terreno

No processo de simulação de uma bacia o modelo numérico do terreno, que pode ser definido como a representação matemática de uma superfície ou feição altimétrica através das coordenadas X, Y e Z. Foi utilizado para a elaboração de um mosaico que serviu de entrada para no modelo para discretização das subbacias.

4.2.2 Uso e Ocupação do Solo

O SWAT possui um amplo banco de dados com diversos tipos de uso do solo e cobertura vegetal. Para tanto, utilizamos o tipo de uso com as nomenclaturas equivalente a cada uso disponível no banco de dados do SWAT.

4.2.3 Tipos de Solos

A partir do mapa de solos foram generalizados os três principais tipos de solos. Os dados tabulares das propriedades físico-químicas do solo (Tabela 2), oriundos dos grupos de solos da (FAO *et al*,2008), considerando os níveis categóricos de solo superficial (0 – 30 cm) e subsolo (30 – 100 cm), de solos requeridos pelo modelo SWAT são divididos em duas partes: i) parâmetros do tipo de solo; e ii) parâmetros da camada do solo.

- i) Parâmetros do tipo de solo são os seguintes: a) nome do solo; b) número de camadas; c) grupo hidrológico do solo; d) profundidade total; e) porosidade do solo.
- ii) Parâmetros de cada camada são os seguintes: a) profundidade da camada; b) densidade do solo seco na camada; c) capacidade de água disponível na camada; d) carbono orgânico; e) condutividade hidráulica saturada da camada (Fetter, 1988); f) porcentagem de argila; g) porcentagem de silte; h) porcentagem de areia; i) porcentagem de rocha; j) albedo e k) fator de erodibilidade da camada (k).

Tabela 2 - Propriedades físico-químicas do solo requerido pelo modelo SWAT

Propriedades físico-químicas do solo	Latossolo		Argissolo		Neossolo	
	0 – 30 (cm)	30 – 100 (cm)	0 – 30 (cm)	30 – 100 (cm)	0 – 30 (cm)	30 – 100 (cm)
Capacidade de armazenamento	0.13	0.13	0.14	0.14	0.10	0.15
Areia (%)	81.10	80.15	60.00	54.15	68.7	35.55
Silte (%)	6.70	6.65	20.15	18.05	21.75	10.30
Argila (%)	12.2	13.2	19.85	27.80	9.55	9.15
Carbono Orgânico	0.57	0.31	0.86	0.40	0.66	0.15
Densidade de massa úmida	1.56	1.55	1.54	1.45	1.57	2.50
Albedo	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14
Condutividade Hidráulica	2.78E-09	2.78E09	2.78E-09	2.78E-09	2.78E-09	2.78E-09
Erodibilidade do solo	0.107227	0.109481	0.160775	0.150764	0.171799	0.165315
Condutividade elétrica	0	0	0	0	0.11	0.1

Fonte: (FAO *et al*,2008)

4.2.4 Clima

No SWAT está incluído o modelo gerador climático WGEN (Sharpley & Williams, 1990). Este gerador tem a funcionalidade de calcular as estatísticas das variáveis climatológicas das estações utilizadas (Tabela 3).

Tabela 3 - Estatísticas calculadas através do gerador climático

RAIN_YRS	Números de anos utilizados para calcular a precipitação máxima de 30 minutos
TMPMX	Média das temperaturas máximas do ar para cada mês (°C)
TMPMN	Média das temperaturas mínimas do ar para cada mês (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão das temperaturas máximas do ar para cada mês (°C)
TMPSTDMN	Desvio padrão das temperaturas mínimas do ar para cada mês (°C)
PCPMM	Média das Precipitações para cada mês (mm)
PCPSTD	Desvio padrão das Precipitações para cada mês (mm/dia)
PCPSKW	Coeficiente Skew para a precipitação diária no mês
PR_W(1)	Probabilidade de dia úmido seguido de um dia seco no mês
PR_W(2)	Probabilidade de dia úmido seguido de outro dia úmido no mês
PCPD	Número médio de dias com chuva no mês
RAINHHMX	Precipitação máxima de 30 minutos (mm)
SOLARAV	Radiação solar média diária no mês (MJ/m ² /dia)
DEWPT	Ponto de orvalho médio diário no mês (°C)
WNDVAV	Média diária de velocidade do vento para cada mês (m/s)

4.3 Estações de monitoramento

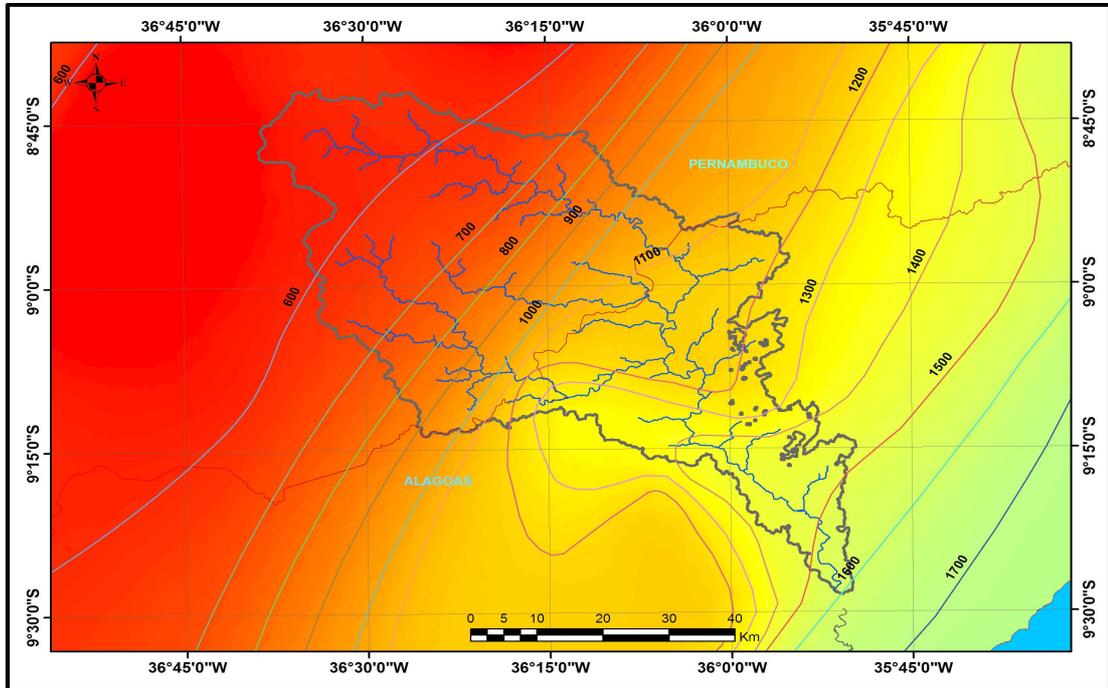
As Estações (Tabela 4) com os dados pluviométricos diários estão localizadas dentro dos limites e no entorno da bacia do rio Mundaú. O levantamento dos dados hidrológicos foi realizado através do acesso aos dados disponibilizados no Hidroweb, pertencente à Agência Nacional de Águas (ANA, 2005).

Tabela 4 - Estações Pluviométricas

Código	Nome	Estado	Municípios
836008	Caetés	Pernambuco	Caetés
835073	Ibateguara	Alagoas	Ibateguara
836009	Canhotinho	Pernambuco	Canhotinho
836020	Jucati	Pernambuco	Jupi
836021	Jurema	Pernambuco	Jurema
836022	Lajedo	Pernambuco	Lajedo
836026	Paquevira	Pernambuco	Canhotinho
935005	Maceió	Alagoas	Maceió
935012	Murici - Ponte	Alagoas	Murici
935021	Rio Largo	Alagoas	Rio Largo
935023	Satuba	Alagoas	Satuba
935024	Saúde	Alagoas	Maceió
935054	Pilar	Alagoas	Pilar
936003	Brejão	Pernambuco	Brejão
936004	Correntes	Pernambuco	Correntes
936008	Poço Comprido	Pernambuco	Correntes
936010	Atalaia	Alagoas	Atalaia
936014	Capela	Alagoas	Capela
936033	Munguba	Alagoas	Santana do Mundaú
936040	Porangaba	Alagoas	Atalaia
936044	Rocha Cavalcanti	Alagoas	União dos Palmares
936045	Santana do Mundaú	Alagoas	Santana do Mundaú
936047	São José da Laje	Alagoas	São José da Lage
936049	Santa Efigênia	Alagoas	Capela
936053	União dos Palmares	Alagoas	União dos Palmares

Na (Figura 8) são apresentadas as isoietas de precipitação total anual da bacia que foram adquiridas do Atlas Pluviométrico do Brasil (Versão 2.0 – Atualizada em novembro de 2011).

Figura 8 - Isoietas das precipitações totais anuais da bacia do rio mundaú



Fonte: CPRM, 2011

Foi realizado o preenchimento de falhas nas séries para cada ano, através do método do inverso do quadrado da distância. O inverso do quadrado da distância é uma técnica baseada no inverso da distância ponderada, utilizada para a interpolação de pontos de dispersão. A técnica é baseada na suposição de que a superfície de interpolação deve ser influenciada pelos pontos mais próximos e menos pelos pontos mais distantes. A superfície de interpolação é uma média ponderada dos pontos de dispersão e o peso atribuído a cada ponto de dispersão diminui à medida que a distância entre o ponto de interpolação e o ponto de dispersão aumenta.

Os dados climáticos foram obtidos das estações climáticas de Garanhuns e Maceió (Tabela 5), através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) do Ministério da Agricultura, onde são disponibilizadas séries temporais de temperaturas mínimas e máximas, velocidade do vento, umidade relativa do ar e insolação, todos para o intervalo de 1979 a 2010.

Tabela 5 - Estações Climáticas

Estação	Código	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Garanhuns – PE	82893	-8.88°	-36.51°	822.76
Maceió - AL	82994	-9.66°	-35.7°	64.50

4.4 Fator de Erodibilidade do solo (k)

A estimativa da erodibilidade do solo (k) foi calculada pela (equação 1) proposta por Williams (1995):

Equação 1

$$KUSLE = f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand} \quad (1)$$

Onde:

f_{csand} – fração de solos com alto conteúdo de areia grossa (equação 2);

f_{cl-si} – fração de solos com alta razão de silte e argila (equação 3);

f_{orgc} – fração de solos com alto conteúdo de carbono orgânico (equação 4);

f_{hisand} – fração de solos com conteúdo extremamente alto de areia (equação 5);

Equação 2

$$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 \cdot \exp \left[-0.256 \cdot m_s \cdot \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right)$$

Equação 3

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}$$

Equação 4

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.0256 \cdot orgC}{orgC + \exp[3.72 - 2.95 \cdot orgC]} \right)$$

Equação 5

$$f_{\text{hizand}} = \left(1 - \frac{0.7 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + \exp\left[-5.51 + 22.9 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)\right]} \right)$$

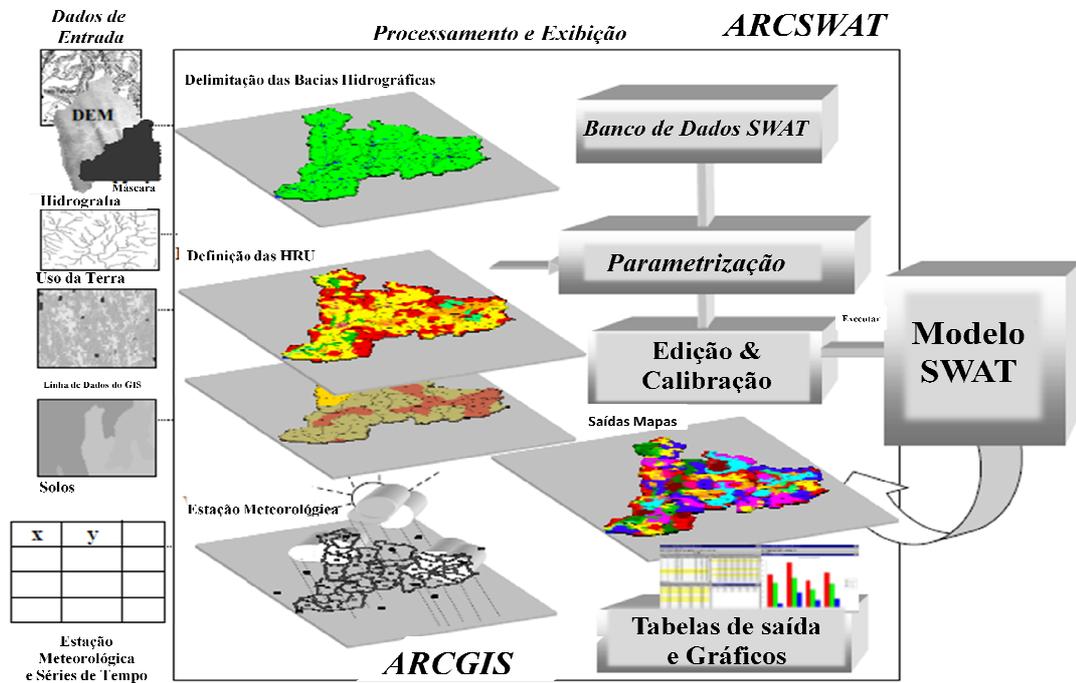
onde m_s é o teor de areia por cento (0,05-2,00 mm de diâmetro de partículas), m_{silt} é a quantidade de lodo por cento (0,002-0,05 mm de diâmetro de partículas), m_c é o teor de argila por cento (<0,002 mm de diâmetro de partículas), e $orgC$ é a porcentagem teor em carbono orgânico da camada (%).

4.5 Implementação do Modelo SWAT

O modelo foi usado acoplado ao ArcGIS versão 9.3, através da extensão ArcSWAT 2009. A (Figura 7) mostra o esquema dos componentes de entrada e de saída de dados do modelo SWAT.

Para o funcionamento do modelo SWAT, esse processo ocorre primeiramente na geração dos planos de informação cartográficos - PI's, realizado no Arcgis, e os dados alfanuméricos e dos PI's necessários para o modelo SWAT, ocorre via interface apropriada, o Arcswat.

Figura 9 - Processo de funcionamento do modelo SWAT



Fonte: Salles, 2012

A bacia hidrográfica subdivide-se em dois níveis principais, no modelo SWAT: As sub-bacias e as unidades de respostas hidrológicas (HRU's). A divisão das sub-bacias é delimitada geralmente através de um ponto onde se encontra a estação de coleta dos dados, sendo definida a partir do MNT (geralmente o mais usual), ou em análise topográfica.

O número de sub-bacias, o SWAT usa o conceito de área mínima de drenagem requerida para se formar um curso d'água. Ou seja, é sugerido pelo modelo um valor baseado na relação da área da bacia.

Por sua vez as HRU's são subdivididas através da combinação de uso do solo, tipo de solo e da declividade. Nas HRU's o (escoamento, sedimentos e nutrientes), são calculados separadamente, e por fim, somados para se obter o valor final para cada sub-bacia.

4.6 Calibração e Validação do Modelo

A calibração e validação do modelo SWAT foram realizadas através da comparação entre as vazões mensais simuladas pelo modelo e as vazões mensais observadas na estação fluviométrica Fazenda Boa Fortuna, referentes aos períodos de 1998 a 2002 para calibração e de 2003 a 2007 para validação do modelo. Para os sedimentos foi usado um período de 1998 a 2002 para calibração e de 2003 a 2007 para validação do modelo. Nesta etapa optou-se pela calibração manual, que de acordo com Tucci (2005), é obtida por tentativas até que os valores dos parâmetros melhor representem os valores observados pelo modelo utilizado. Ou seja, o ajuste por tentativas é o processo em que há variáveis de entrada e saída, e através das tentativas são obtidos os parâmetros com maior representatividade dos valores observados.

Dentre os critérios de eficiência referidos pela literatura, adotou-se as recomendações de Moriasi *et al.* (2007), onde são sugeridos o coeficiente de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), o Percentual de Tendência (PBIAS) e a razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão dos dados observados (RSR), cuja formulação se apresenta nas equações 6, 7 e 8, respectivamente.

O coeficiente NSE caracteriza a magnitude relativa da variação dos resíduos comparados com a variação dos dados observados ou medidos.

O desvio percentual (PBIAS) indica a tendência para os valores previstos serem superiores ou inferiores aos valores observados. O valor ideal é 0%, sendo que valores positivos indicam modelos com resultados tendencialmente superiores aos valores medidos, enquanto valores negativos de PBIAS indicam modelos com previsões inferiores às observações Gupta *et al.*, (1999).

Equação 6

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{med})^2} \right]$$

Equação 7

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs})} \right]$$

Equação 8

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{OBS}} = \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{med})^2}} \right]$$

Onde:

Q_{obs} = Vazão observada;

Q_{sim} = Vazão simulada;

Q_{med} = Média das vazões observadas Em geral, a calibração do modelo pode ser avaliada como satisfatório se $NSE > 0,50$ e se $PBIAS < 25\%$ para vazão, $PBIAS < 55\%$ para os sedimentos. Como podemos observar através da (Tabela 6).

Tabela 6 - Estatísticas recomendadas para testar o desempenho do modelo SWAT

Desempenho do SWAT	NSE	PBIAS
Muito bom	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$NSE \leq 0.50$	$\pm 25 \geq PBIAS$

RSR – Razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão dos dados observados
 NSE – Nash-Sutcliffe Efficiency
 PBIAS – Percentual de Tendência

4.7 Cenários de Simulação

4.7.1 - Cenários Climáticos Futuros

Na simulação dos cenários climáticos futuros, que compreende no período atual a 2040, para a bacia do rio mundaú. Foi gerado e avaliado um cenário futuro de acordo

com o relatório sobre mudanças climáticas (Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas - PBMC). Este mesmo relatório se baseia em uma metodologia utilizada pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).

O cenário avaliado leva em consideração os valores de entrada no modelo, como: precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima.

Então, os cenários foram os seguintes:

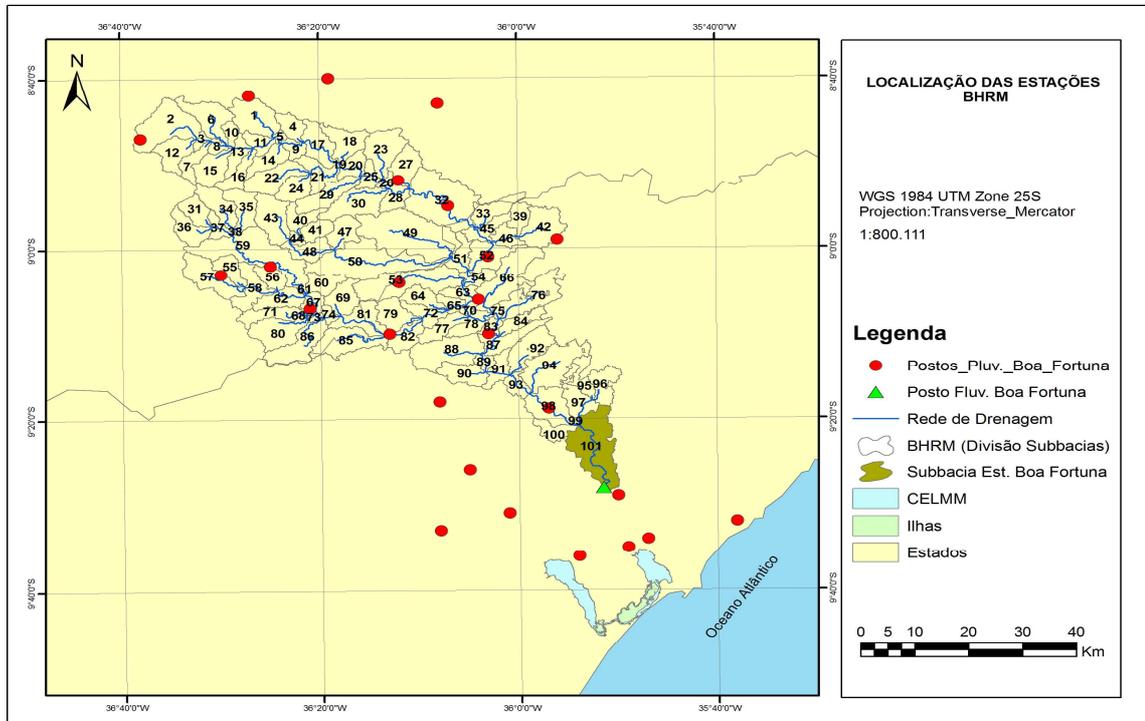
- Cenário Atual: dados climáticos do período das estações climatológicas utilizadas no período de 1979 a 2010.
- Cenário Futuro: considerado um cenário pessimista, este sofre um decréscimo nos valores de precipitação na ordem de -10% e um acréscimo nos valores de temperatura entre 0,5° e 1°C.

5 Resultados

No processo de calibração procurou-se levar em conta as simulações realizadas considerando toda bacia, recebendo contribuições de todas as sub-bacias delimitadas, objetivando assim, uma melhor precisão dos dados. O ponto escolhido para descarga foi à estação Fazenda Boa Fortuna, onde estão dados coletados de vazão e sedimentos para comparação com os dados simulados.

A partir das informações anteriores foram geradas as sub-bacias pelo modelo, num total de 101. A Figura 10 apresenta a divisão das sub-bacias correspondente ao ponto de descarga do rio, a sub-bacia de número 101 (Fazenda Boa Fortuna). Assim como a rede de drenagem utilizada para a simulação, de área aproximadamente igual a 682.98 km.

Figura 10 - Divisão das sub-bacias geradas na BHRM



5.1 Calibração e Validação das vazões diárias

Analisando os dados de vazões diárias simuladas em relação ao observado, medidos no período de janeiro de 1998 a dezembro de 2002, para calibração e os dados medidos de janeiro de 2003 a dezembro de 2007 para validação do modelo, comprovado pelo método gráfico (Figuras 9 e 10) e as estatísticas empregadas (Tabela 6), pode-se observar que o modelo obteve boa capacidade de representar as vazões observadas na BHRM. Baseado em Moriasi et al. (2007).

O ajuste diário das vazões obteve uma representação satisfatória para o mesmo período de calibração e validação dos dados diários, como mostra as (Figuras 11 e 12) e as estatísticas empregadas (Tabela 7).

Tabela 7 - Valores das estatísticas para calibração e validação das vazões diárias

Simulação/ Estatística	Antes da Calibração		Antes da Validação		Após Calibração		Após Validação	
NSE	0.24	Insatisfatório	0.06	Insatisfatório	0.64	Satisfatório	0.53	Satisfatório
PBIAS (%)	44.15	Insatisfatório	58.84	Insatisfatório	2.80	Muito Bom	21.35	Satisfatório

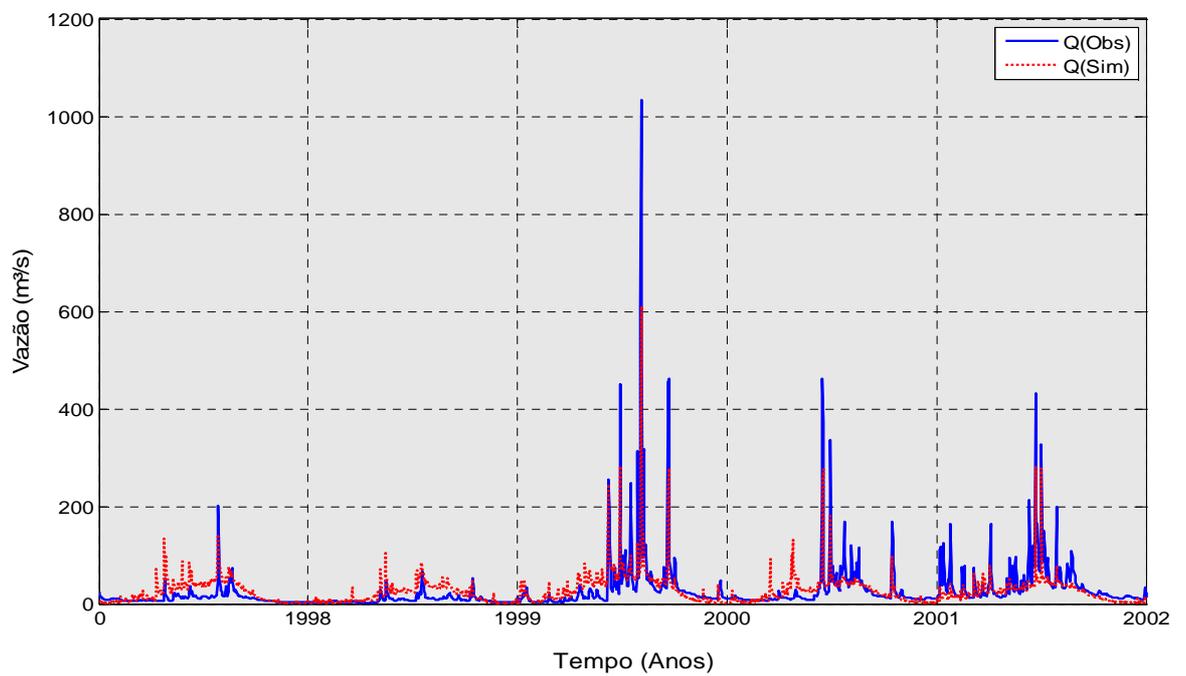
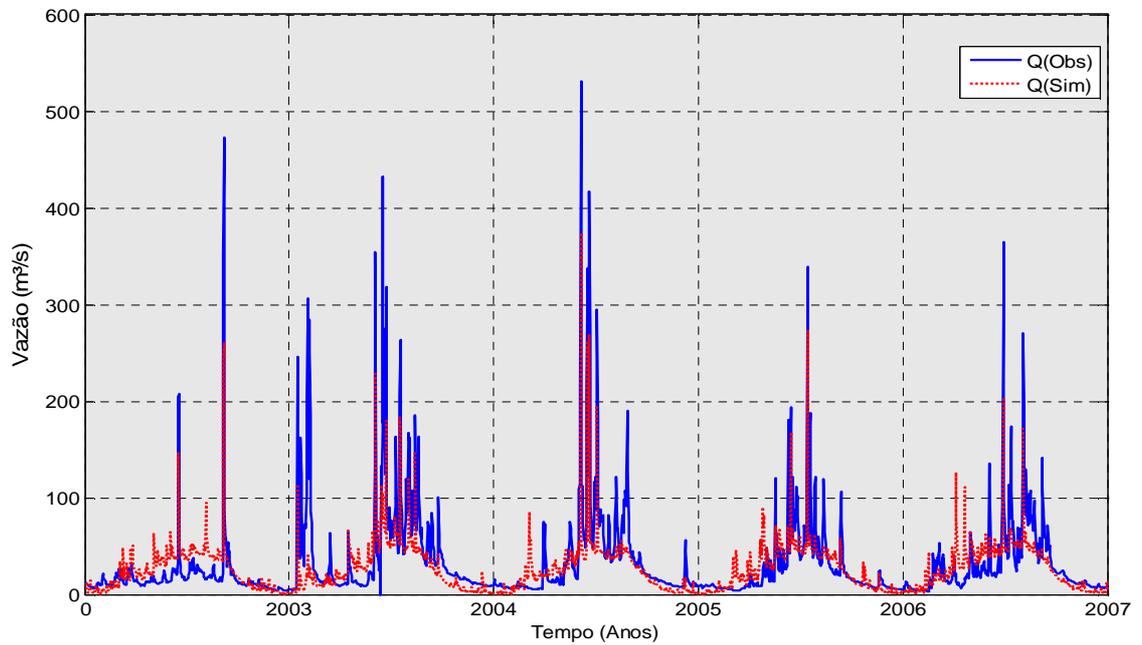
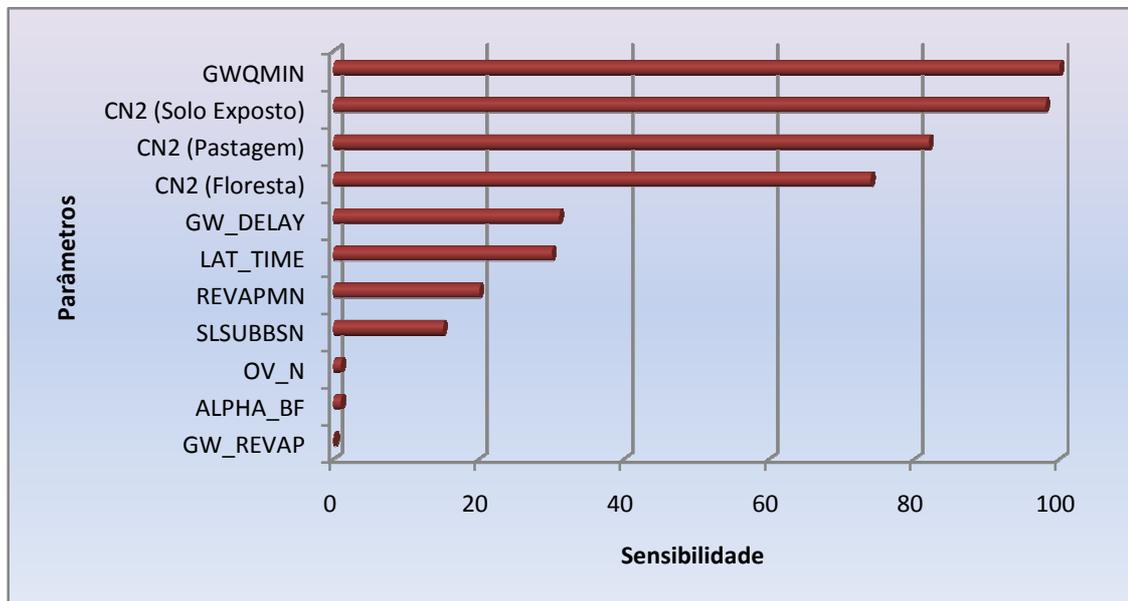
Figura 11 - Calibração Vazão diária: simulada x observada

Figura 12 - Validação Vazão diária: simulada x observada

Na (Figura 13), apresentam-se os parâmetros que foram alterados, seus valores, para obtenção de um bom ajuste do modelo. Após cada modificação dos parâmetros e consequentemente sua simulação, era realizada a comparação pelo método gráfico e pelas estatísticas dos resultados obtidos pelo modelo em relação aos dados observados das vazões, até chegar ao resultado satisfatório.

Figura 13 - Sensibilidade dos parâmetros para escoamento



onde:

GWQMN= Profundidade mínima do aquífero superficial para que ocorra escoamento de origem subterrânea;

CN2= Curva-número;

GW_DELAY= Período de tempo que a água se move da camada de solo mais profunda até o aquífero superficial;

LAT_TIME: tempo de retorno do fluxo lateral (dias);

REVAP_MN: profundidade de água no aquífero para que ocorra percolação (mm);

SLSUBBASIN: comprimento de rampa médio para a sub-bacia, adotado como sendo o mesmo valor utilizado para o comprimento de rampa do escoamento lateral (m);

OV_N= "n" de Manning para fluxo superficial (rugosidade da bacia);

ALPHA_BF= Fator de resposta às variações na recarga do aquífero (dias);

GW_REVAP: variável que controla a quantidade de água que se move do aquífero para a zona de raízes;

5.2 Calibração e validação dos dados de sedimentos

Na etapa de calibração e validação do modelo com os dados de sedimentos, foram selecionados os dados diários compreendidos entre os anos de 1998 a 2007 da estação Fazenda Boa Fortuna, pois a mesma é a única dentro da bacia que possui dados observados de sedimentos. Por outro lado, deve-se salientar que estes dados são medições pontuais, pois são medições em períodos aleatórios, realizados pela Agência Nacional de Águas.

Alguns autores considera um bom ajuste do modelo os valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE), é o caso de Moriasi *et al.* (2007), outros autores avaliam como satisfatório se $NSE > 0,50$ e se PBIAS 25% para vazão, PBIAS 55% para os sedimentos

Krysanova *et al.* (1998), considera um bom ajuste do modelo os valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) devem estar entre 0,7 e 0,8. Conforme observado na Tabela, tanto para vazão como para produção de sedimentos, os resultados de COE obtidos ficaram inferiores a 0,8, representando assim um ajuste satisfatório do modelo SWAT para a bacia do rio mundaú.

A simulação inicial foi realizada sem calibração e comparada com os dados observados. O ajuste a nível diário mostrou-se “Satisfatório”, apresentando o desempenho do modelo (Tabela 9), e (Figura 13 e 14).

Tabela 8 - Valores das estatísticas para calibração e validação diária dos sedimentos

Simulação/ Estatística	Antes da Calibração		Antes da Validação		Após Calibração		Após Validação	
NSE	-1.05	Insatisfatório	-1.22	Insatisfatório	0.63	Satisfatório	0.53	Satisfatório
PBIAS(%)	62.16	Insatisfatório	75.09	Insatisfatório	0.19	Satisfatório	20.57	Satisfatório

Figura 14 - Calibração Sedimento diário: observado x simulado

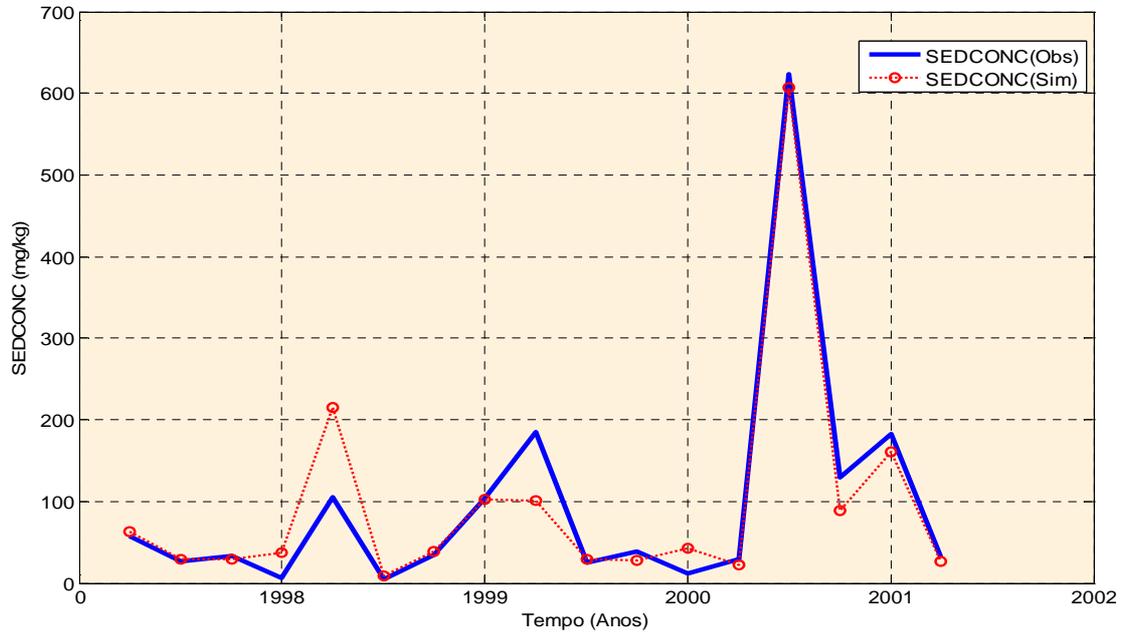
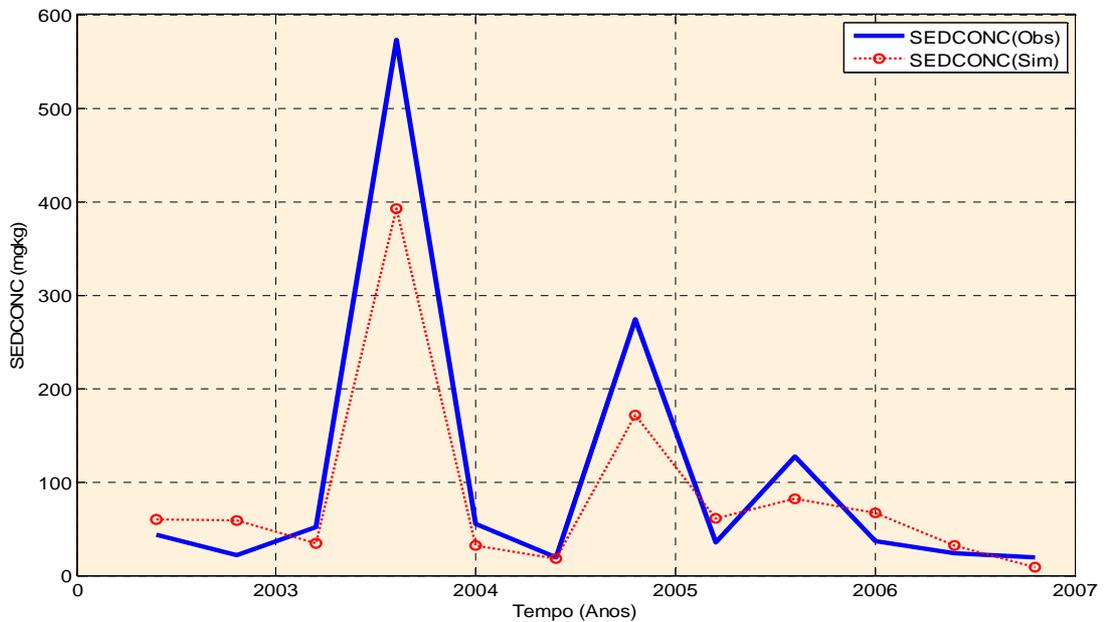


Figura 15 - Validação Sedimento diário: observado x simulado

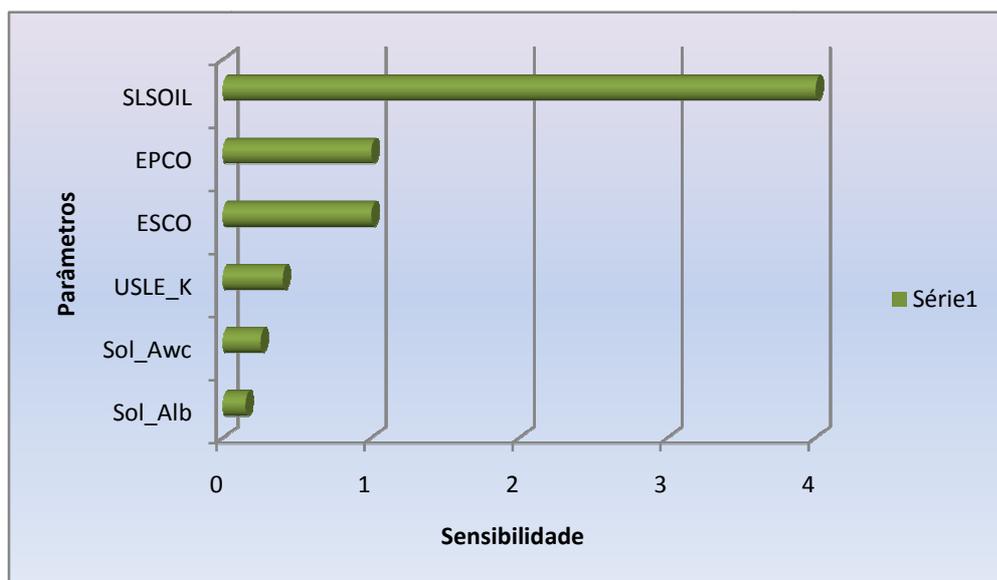


A comparação entre a produção diária de sedimento simulada e a observada,

mostra que o modelo reproduziu a distribuição e tendência das concentrações observadas, porém por ser uma série curta e pontual, com valores dispersos e medições aleatórias para a calibração e validação, alguns picos não produziram adequadamente a reprodução dos dados observados. Apesar disso, a concentração de sedimentos também apresentou uma calibração satisfatória.

O ajuste dos parâmetros dos dados de concentração de sedimentos seguiu orientações contidas no manual do SWAT. Os parâmetros testados e a variação dos valores encontram-se na (Figura 16).

Figura 16 - Sensibilidade de parâmetros para escoamento



6 Simulação de Cenários

6.1 Cenário Climático Futuro

O resultado referente à proposta de cenários futuros é apresentado de acordo com o relatório sobre mudanças climáticas (Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas - PBMC), que integra a avaliação de várias comunidades científica, este modelo segue a

metodologia usada pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).

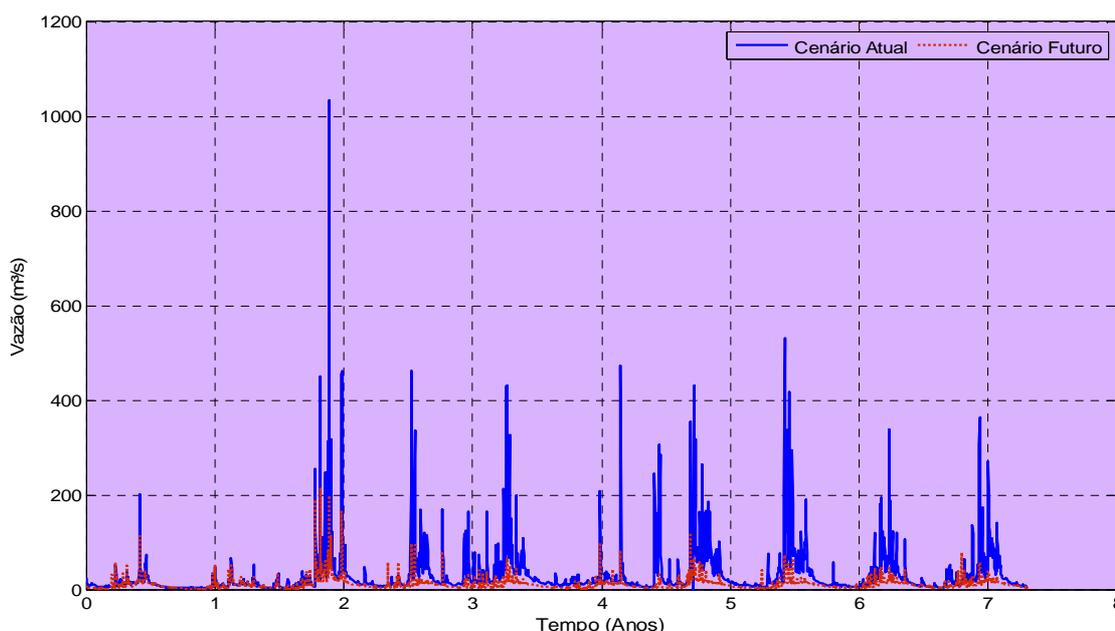
Com base neste relatório foi proposto um cenário futuro para a área em estudo, através de projeções adotadas para a Porção Nordeste do Brasil, este cenário tem uma projeção intermediária relativo ao período que compreende (2041 a 2070), mantendo a tendência de aquecimento entre 0.5° e 1°C e diminuição pluviométrica entre -10% no nordeste do Brasil.

6.1.1 Vazões

Os valores de vazão simulados pelo SWAT para o período total de trinta anos são comparados e apresentados na (Figura 17). O cenário Futuro correspondeu ao período até 2040 a 2100 e o Atual de 1998 a 2007.

O cenário futuro simulado apresentaram valores menores em relação ao cenário atual, sendo obtidas reduções bem significativas. Esses resultados de diminuição nos valores de vazão para os cenários futuros também foram encontrados em outros trabalhos. Fontaine et al. (2009) que avaliaram o impacto das mudanças climáticas sobre a produção de água na bacia Spring Creek (rio Missouri), na Dakota do sul.

Figura 17 - Vazões diárias para os cenários climáticos simulados

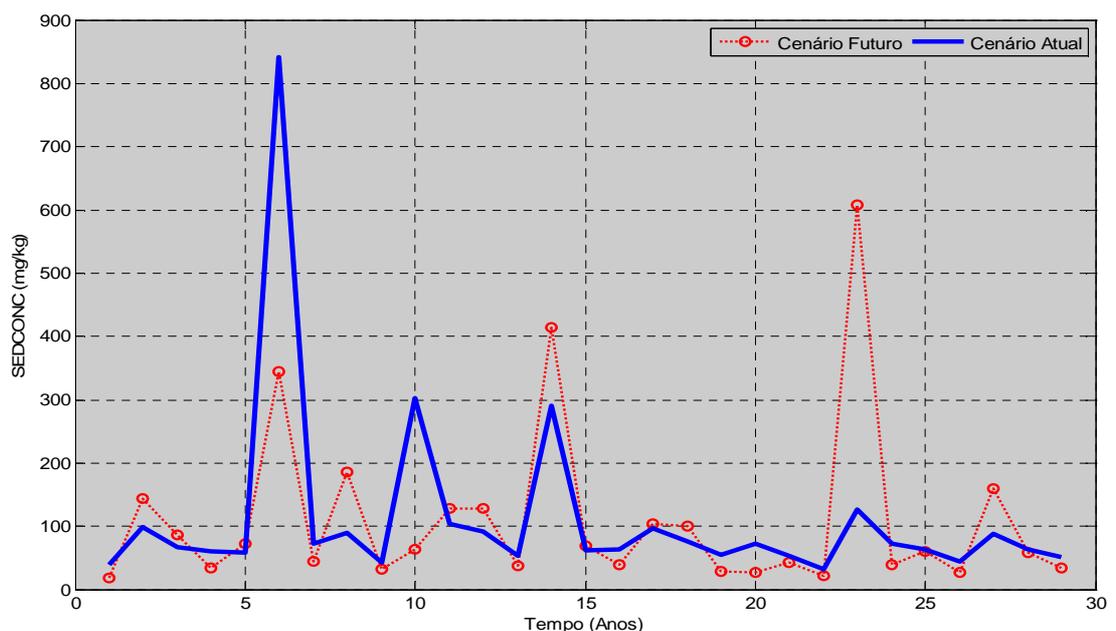


6.1.2 Sedimentos

Na (Figura 16) é apresentado a comparação da concentração de sedimentos diária, entre o cenário atual e o cenário climático futuro que compreende o ano a partir dos dias atuais até o ano de 2040). Podemos observar que o cenário futuro tende a acompanhar o atual.

Podemos observar também a evolução das concentrações de sedimentos ao longo dos anos simulados para os dois cenários. Onde o cenário atual apresenta maiores valores das concentrações de sedimentos. Isto pode ser explicado observando o regime de precipitações mais intensas tendem a gerar maior produção de sedimento e conseqüentemente maiores concentrações.

Figura 18 - Comparação entre a concentração anual de sedimento



7 Discussão

O uso do modelo hidrológico SWAT está vinculado ao objetivo de cada trabalho: alguns buscam avaliar o comportamento hidrológico, outros aplicam na avaliação da propagação de nutrientes e pesticidas. Neste trabalho, objetivou-se a análise da produção de sedimentos baseado nos efeitos do uso e ocupação do solo.

Nesse contexto, foram analisados alguns trabalhos que contemplam a aplicação do modelo SWAT na perspectiva de reproduzir a capacidade de sua eficiência no comportamento hidrossedimentológico de algumas bacias hidrográficas pelo Brasil.

No escopo deste trabalho, os valores das estatísticas (NSE e PBIAS) para calibração dos dados de vazões diárias, recomendados por Moriasi *et al.*(2007) para avaliar o desempenho do SWAT, indicam que o modelo representou satisfatoriamente as peculiaridades do escoamento superficial.

O ajuste a nível diário da concentração de sedimentos simulado pelo modelo obteve também representação satisfatória. Pode-se perceber através dos cálculos das estatísticas. Mesmo que as medições foram realizadas aleatoriamente durante uma série de dados de 30 anos, medidos pela Agência Nacional de Águas.

Bonumá *et al.* (2011) avaliaram o desempenho do modelo para a simulação do escoamento superficial e a produção de sedimentos na Bacia do Arrio Lino, obtendo valores de calibração de sedimentos a nível diário “insatisfatório”. Dentre os fatores apontados para tal resultado destacam-se a dificuldade na calibração dos parâmetros e a incoerência na série de dados.

Alguns autores também utilizaram o modelo SWAT para avaliar a simulação e produção de sedimentos, tais como: Malutta (2012) e Baldissera (2005). Esses autores obtiveram valores estatísticos relevantes para atestar o bom desempenho do modelo.

Com relação à análise de sensibilidade dos parâmetros do SWAT, utilizados na calibração, pode-se observar que os parâmetros GWQMN, CN2, LAT_TIME e GW_DELAY, foram os que demonstraram ser de grande importância na simulação do escoamento superficial e da produção de sedimentos, , foram os mais sensíveis no desenvolvimento da simulação na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú.

Quanto aos cenários climáticos, às mudanças deverão impactar o regime hidrológico da bacia em longo prazo, esses impactos podem variar de acordo com a escala de tempo considerada.

Ao analisar as limitações do modelo na simulação dos dados sedimentológicos na Bacia Hidrográfica do rio Mundaú, através da calibração e validação do modelo. Percebe-se que para as simulações dos cenários propostos, observou-se que no

período entre (1998 a 2007), o modelo foi sensível as alterações do uso e ocupação do solo e para as mudanças climáticas adotadas.

8 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como proposta a utilização da interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Mundaú, tendo como referência dados de vazões e sedimentos através da modelagem hidrológica e técnicas usuais na literatura para calibração e validação do modelo.

Com base nos resultados obtidos pelos métodos gráficos e estatísticos, podemos afirmar que o modelo hidrológico SWAT produziu bom ajuste do escoamento superficial a nível diário e que os parâmetros mais sensíveis são ligados a configurações de aquíferos e escoamento de base.

Quanto à simulação da concentração de sedimento, podemos observar que o modelo apresentou um desempenho satisfatório, subestimando na maioria do tempo os resultados obtidos na calibração e validação do modelo a nível diário.

Tomando como base os resultados apresentados nas simulações dos cenários propostos, observou-se que tanto para os dados hidrológicos quanto para os dados sedimentológicos o modelo, apesar das deficiências na calibração, foi sensível às alterações no uso e ocupação do solo.

Ao analisarmos os ajustes das calibrações e validações para as vazões diárias, percebe-se através dos resultados das estatísticas e pelo método de visualização gráfica que o modelo representou satisfatoriamente as vazões simuladas em relação às observadas.

Para o cenário climático proposto grandes alterações acarretarão em maiores impactos no regime hidrológico e na disponibilidade hídrica da bacia. As mudanças climáticas irão impactar o regime hídrico da bacia em longo prazo, gerando eventos extremos mais intensos, principalmente enchentes;

Mais vale salientar que mesmo com uma boa representação do modelo, o hidrólogo deve perceber que há limitações nessa análise, no que concerne aos valores obtidos, visto que, na modelagem muitas incertezas são atribuídas às alterações e avaliações de impactos ambientais nas bacias.

Contudo, para que haja um melhor desempenho da aplicação do modelo SWAT na estimativa da concentração de sedimentos na bacia estudada, faz-se necessário uma estruturação de monitoramento, para comprovação da eficácia de aplicação de modelos.

Referências

ADRIOLO, M. V. **Calibração do modelo swat para a produção e transporte de sedimentos.** In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, Belo Horizonte - MG, 21 a 25 de abril de 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Séries Históricas.** HidroWeb - Sistema de Informações Hidrológicas, 2005. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: Agosto de 2012.

ALANSI, A.W.; AMIN, M.S.M.; ABDUL HALIM, G.; SHAFRI, H.Z.M. & AIMRUN, W. **Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia.** Hydrol. Earth System Sci. Discuss., 6:7581-7609, 2009.

CONEJO, J. G. L.; NETO, P. L. V.; LOPES, R. P. **Elaboração do Plano de Ações e Gestão Integrada do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/Manguaba-CELMM.** Brasília: ANA, SPR, 2004. 58p.

ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. **Large area hydrologic modeling and assessment – Part 1: Model development.** *Journal of the American Water Resources Association*, v. 34, p. 73–89, 1998.

BALDISSERA, G. C.; **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL) para a Bacia Hidrográfica do rio Cuiabá/MT.** Universidade Federal do Mato Grosso/MT. 2005.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, R. E. & OLIVEIRA, M. P. **Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR).** R. Bras. Ci. Solo, 34:253- 261, 2010.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** 4ª edição. São Paulo: Ícone, 1999. 355 p.

BONUMÁ, N. B. *et al.* **Simulação da Vazão e da Produção de Sedimentos Utilizando o Modelo SWAT.** In: Engenharia de Sedimentos - Na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento. Porto Alegre - RS: ABRH, 2011, v. , p.325 -341.

BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. **Elementos de engenharia de sedimentos**. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ABRH), 2000. p. 915-943.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372 p.

Carvalho, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CIBIN R.; SUDHEER, K.P. & CHAUBEY, I. **Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model** *Hydrol. Process.* 2010. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/hyp.7568. p.1133-1148.

DICKINSON, A.; COLLINS, R. Predicting erosion and sediment yield at the catchment scale. *Soil Erosion at Multiple Scales*. v. 20, p. 317-342, 1998.

EMBRAPA, 2011. **Mapa de solos do Brasil**. disponível em: http://mapoteca.cnps.embrapa.br/geoacervo/det_mapa.aspx

FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2008. **Harmonized World Soil Database (version 1.0)**. FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.

FARIAS, Vera Núbia Carvalho de. **Simulação da produção de sedimentos para Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú através do modelo SEDNET**. Universidade Federal de Alagoas, 2011.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 1988. 2. ed. New York: Macmillan Publishing, 1988.

FONTAINE, T.A. et al. Hydrological response to climate change in the Black Hills of South Dakota, USA. **Hydrological Sciences Journal**. v. 44, p. 27 – 40, 2009. 81 Disponível em: <<http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t911751996>>. Acesso em: 16 Fevereiro. 2014.

GALVAN, L.; OLIAS, M.; VILLARAN, R.F. & SANTOS, J.M.D. **Aplicación del modelo hidrológico SWAT a la cuenca del rio Meca (Huelva, España)**. *Geogaceta*, 42:63-66, 2007.

GUPTA, H. V., S. SOROOSHIAN, AND P. O. YAPO. 1999. **Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration**. *J. Hydrologic Eng.* 4(2): 135-143.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em Outubro de 2010.

KRYSAKOVA, V.; MULLER-WOHLFEIL, D.; BECKER, A. **Development and Test of Spatially Distributed Hydrological Water Quality Model for Mesoscale Watersheds**. *Ecological Modeling*, v. 106, p. 261-289, 1998.

LINO, J.F.L.; CORSEUIL, C.W.; KOBIYAMA, M.; MALUTTA, S.; UDA, P.K.; BORTOLOTTI, N.L. & SANTOS, I. **Análise da vazão da bacia hidrográfica do rio Preto com o modelo SWAT**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., Campo Grande, 2009. Anais... Campo Grande, 2009. 20p.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 154 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2002.

MALUTTA, S. **Estudo Hidrossedimentológico da Bacia Hidrográfica do rio Negrinho – SC com o modelo SWAT**. Universidade Federal de Santa Catarina – SC. 2012.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. **Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4**. *Revista Multiciência*, v. 8, p.5-28, 2007.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 27 abr. 2014.

MORIASI, D. N. *et al.* 2007. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation**. *Transactions of the ASABE*, St. Joseph, v. 50, n. 3, p. 885- 900.

NETO, A. A. M., et al. **Aplicabilidade do modelo SWAT a um sistema hidrológico complexo de clima semiárido**. LHC / EESC-USP. 2011.

PBMC, 2012: Sumário Executivo do Volume 1 - **Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 para o 1o Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Volume Especial para a Rio+20. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil, 34 pp.

PBMC, 2013: **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Sumário Executivo GT1. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil. 24 p.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. da; MATOS, A. T. de. **Desprendimento e arraste do solo pelo escoamento superficial**. *Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, p.423-429, 2003.

Pimenta, M. T.; Santos, M. J.; Rodrigues, R. A. **Susceptibilidade à desertificação**. *Revista Florestal*, v.11, n.1, p.27-33, 1998.

REUNGSANG, P.; KANWAR, R.S.; JHA, M.; GASSMAN, P.W.; AHMAD, K. & SALEH, A. **Calibration and validation of SWAT for the upper Maquoketa River Watershed**. Intern. J. Agric. Eng., 16:35-48, 2009.

SALLES, L. A. Calibração e Validação do modelo para predição de vazões na bacia do Ribeirão Pipiripau. Brasília/DF. 2012.

SANTOS H, T.; KOLLADI, R. & SURYA, T. **Influence of Scale on SWAT Model Calibration for Streamflow in a River Basin in the Humid Tropics**. Water Res. Manage., 2010. Published online: 12/06/2010. DOI 10.1007/s11269-010-9676-y.

SANTOS, I.; FILL, H.D. ; SUGAI, M.R.V.B.; BUBA, H.; KISHI, R.T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F. **Hidrometria Aplicada**. Porto Alegre: Editora da ABRH, 2001. 371 p.

SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R. **EPIC – Erosion productivity impact calculator, 1. model documentation**. Washington: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1990. 145 p. (Technical Bulletin, 1798).

SILVA, V. de P. R.; Correia, A. A.; Coelho, M. S. **Análise de tendência das series de precipitação pluvial do Nordeste do Brasil**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.2, n.1, p.111-114, 1998.

SILVA, V. de P. R. **On climate variability in Northeast of Brazil**. Journal of Arid Environments, v.58, n.4, p.575-596, 2004.

SRINIVASAN, R. and ARNOLD, J. G. **Integration of the basin-scale water quality model with GIS Water Resources Bulletin**, v 30, n03, p. 453-462, 1994.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1998.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.

VESTENA, L.R. Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2008. 264f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

XIE, H.; NKONYA, e. & WIELGOSZ, B. **Evaluation of the SWAT model in hydrologic modeling of a large watershed in Nigeria**. Water Res. Manage., 2010. Africa WRM.

ZHANG, X.; SRINIVASAN, R. & BOSCH, D. **Calibration and uncertainty analysis of the SWAT model using genetic algorithms and bayesian model averaging**. J. Hydrol., 374:307-317, 2009.

WILLIAMS, J. R. **The Epic Model: In computer models of watershed hidrology.**
Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO. p. 909-1000. 1995.