

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL  
ÁREA DE ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANITÁRIA

**INTEGRAÇÃO ENTRE MODELOS HIDROLÓGICOS E SISTEMAS DE  
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS: UMA AVALIAÇÃO  
METODOLÓGICA**

**HEBER DE ANDRADE MELO**

CAMPINA GRANDE, PB

2010

**HEBER DE ANDRADE MELO**

**INTEGRAÇÃO ENTRE MODELOS HIDROLÓGICOS E SISTEMAS DE  
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS: UMA AVALIAÇÃO  
METODOLÓGICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para a obtenção do Título de Mestre.

Área de Concentração: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária

Orientadora: Iana Alexandra Alves Rufino

**Campina Grande, PB.**

**2010**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M528i

2009 Melo, Heber de Andrade.

Integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: uma avaliação metodológica / Heber de Andrade Melo. — Campina Grande, 2009.

106f. : il. Color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadora: Iana Alexandra Alves Rufino.

1. Hidrologia – Metodologia. 2. Sistemas de Informações Geográficas. 3. Modelos Hidrológicos. 4. Sistema de Apoio à Decisão. I. Título.

CDU – 556.012(043)

**HEBER DE ANDRADE MELO**

**INTEGRAÇÃO ENTRE MODELOS HIDROLÓGICOS E SISTEMAS DE  
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS: UMA AVALIAÇÃO METODOLÓGICA**

Dissertação aprovada em 10 de fevereiro de 2010.

COMISSÃO EXAMINADORA:



Dr<sup>a</sup>. Iana Alexandra Alves Rufino

Orientadora

Universidade Federal de Campina Grande– UFCG



Dr. Vajapeyan Srirangachar Srinivasan

Examinador Interno

Universidade Federal de Campina Grande– UFCG



Dr. Cristiano das Neves Almeida

Examinador Externo

Universidade Federal da Paraíba - UFPB

Se clamares por conhecimento, e por inteligência alçares a tua voz, Se como a prata a buscares e como a tesouros escondidos a procurares, Então entenderás o temor do SENHOR, e acharás o conhecimento de Deus. Porque SENHOR dá a sabedoria; da sua boca é que vem o conhecimento e o entendimento. Ele reserva a verdadeira sabedoria para os retos. Pv. 2:3-7

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por sua divina inspiração, permanecendo comigo em todos os momentos e permitido com que eu alcance mais uma vitória. A Ele a honra, glória e louvor.

A minha família pelo exemplo, incentivo e oração.

A minha orientadora Iana Alexandra Alves Rufino por todos os momentos de discussões, ensinamentos, dedicação, e orientações que me fizeram crescer como profissional e pessoa.

Ao professor Carlos de Oliveira Galvão pelos ensinamentos, conselhos e, sobretudo, o exemplo de ética e sede do conhecimento.

Ao professor Ricardo Aragão que me auxiliou de forma significativa para elaboração desse trabalho.

Ao aluno Francisco Reis do Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental (LAHENA) que me auxiliou na utilização da ferramenta desenvolvida para o SNIRH.

Aos amigos Renato, Rodolfo e Marília que além da amizade e companheirismo dedicado foram de grande importância para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus colegas de turma: Marcondes, Augusto, Wendel, Eulina e Sâmea com quem compartilhei grandes momentos durante o período do mestrado.

A todos que fazem parte do laboratório de Hidráulica II com quem compartilhamos inúmeros momentos de descontração e aprendizado.

Por fim, a todos aqueles que diretamente ou indiretamente contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

## **RESUMO**

A utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) integrados aos modelos hidrológicos surgiu com o intuito de facilitar a manipulação de informações, equações matemáticas, mapas da região estudada e dados numéricos, além de permitir a visualização e avaliação dos resultados no contexto geográfico. Devido à grande variedade metodológica que tange a integração entre modelos hidrológicos e SIG, esse trabalho tem o objetivo de levantar as diversidades nas formas de unir essas duas ferramentas visando à sistematização dessas metodologias. Desse modo foram estabelecidos três critérios metodológicos de classificação baseados em uma extensa revisão bibliográfica realizada, de forma que a maioria das abordagens de integração existentes foi considerada e identificada nas classes estabelecidas. Para uma análise comparativa, utilizou-se o modelo KINEROS2 integrado a dois diferentes softwares SIG (ArcGIS e OpenJUMP) em abordagens distintas para uma mesma área de estudo: a bacia experimental de São João de Cariri. Os critérios de classificação desenvolvidos se mostraram eficientes e representativos das práticas existentes, tanto para usuários quanto para desenvolvedores, os quais, de acordo com a aplicação poderão escolher melhor as plataformas computacionais (SIG e Modelos) necessárias para alcançar o seu objetivo. Sob o ponto de vista metodológico as duas aplicações se mostraram eficientes dentro dos limites que as mesmas se propuseram, sendo apresentadas as vantagens da utilização do SIG no auxílio na modelagem hidrológica, através da automatização dos processos e interfaces gráficas que auxiliam a entrada de dados.

## **ABSTRACT**

Initially, the principal aim of Geographic Information Systems (GIS) integrated with hydrological models was to simplify the data management between the model, mathematical equations, maps of the region studied and numerical data, and to allow the spatial visualization and evaluation of results. Actually, there are many methodologies of integration of hydrologic models and GIS and this work has the objective to discuss the differences and difficulties of coupling these two tools (GIS and Models) developing the systematization of these methodologies. It was established three classification criteria based on a extensive bibliography review and the most of coupling methods was indentified and classified in these criteria. It was realized a comparative analysis using the KINEROS2 model with two different coupling approaches (ArcGIS and OpenJUMP) applied to the same study area: the experimental basin of São João do Cariri. The developed criteria are representative of actual practices for users and developers that can make a better choice about tools (GIS and Models) based on the specific application. Finally, the two applications evaluated was successfully considering the limits from each other propose tool and this work presents the advantages of using GIS integrated with hydrologic modeling especially by automating processes and graphical interfaces that support data entry.



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 -Classificação dos Modelos Hidrológicos .....	8
Tabela 3.1 - Critérios de classificação estabelecidos .....	45
Tabela 3.1 - Exemplos de integrações entre modelos e SIG enquadrados nos critérios estabelecidos.....	63
Tabela 3.2 – Informações relacionadas com a cobertura do solo .....	72
Tabela 3.3 – Valores dos principais parâmetros obtidos por diferentes metodologias: planos	73
Tabela 3.4 – Valores dos principais parâmetros obtidos por diferentes metodologias: canais	73
Tabela 3.5 - Comparação dos resultados das simulações aplicadas na BESJC.....	74
Tabela 3.6 – Classificação quanto aos critérios desenvolvidos.....	83
Tabela 3.7 – Avaliação das aplicações quanto ao critério de relacionamento entre os dados..	84
Tabela 3.8 - Avaliação das aplicações quanto à Modificação no Código Fonte.....	85
Tabela 3.9 - Forma de visualização dos resultados .....	86
Tabela 3.10 - Avaliação das aplicações quanto ao Grau de Complexidade .....	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – A Bacia hidrográfica como um sistema.....	6
Figura 2.2 – Componentes básicos de um SIG .....	14
Figura 2.3 - Esquema de determinação da direção de fluxo para um pixel a partir das cotas e distâncias relativas aos <i>pixels</i> vizinhos.....	23
Figura 2.4 - Indicação das oito direções de fluxo possíveis para cada pixel, com os respectivos códigos.....	23
Figura 2.5 - Processo de geração de rede drenagem.....	25
Figura 2.6 - Esquema ilustrativo das etapas da modelagem utilizando AGWA . .....	39
Figura 3.1 – Tipos de integração: a) Sem compartilhamento b) Com compartilhamento.....	45
Figura 3.2 – Esquema ilustrativo da Integração externa. ....	48
Figura 3.3 - Localização das mesoregiões e microrregiões do Estado da Paraíba .....	55
Figura 3.4 – Bacia Escola de São João do Cariri.....	56
Figura 3.5 – Composição colorida das bandas 234 do IKONOS associada ao MNT da BESJC.....	60
Figura 3.1 – Modelo Numérico do Terreno da Bacia Escola de São João do Cariri.....	67
Figura 3.2 – Rede de drenagem .....	68
Figura 3.3 – Direção de escoamento .....	68
Figura 3.4 – Delimitação automática da bacia e sub-bacia .....	69
Figura 3.5 – Discretização automática em planos e canais com CSA igual a 5%.....	70
Figura 3.6 – Imagem do sensor IKONOS de Junho de 2009, combinação bandas 123(RGB)	71
Figura 3.7 – Resultado da classificação supervisionada .....	71
Figura 3.8 -Produção de sedimentos – evento 24/04/2006 (kg/ha) .....	75
Figura 3.9 - Lâmina total escoada – evento 24/04/2006 (mm).....	75
Figura 3.10 – Escoamento superficial – evento 24/04/2006 (m <sup>3</sup> /s).....	76
Figura 3.11 - Hidrograma de vazão simulada no exultório da sub-bacia 1 – evento 24/04/2006 .....	77
Figura 3.12 – Interface gráfica desenvolvida para entrada dos dados do modelo: Dados Básicos.....	78
Figura 3.13 – Interface gráfica desenvolvida para entrada dos dados do modelo: Parâmetro .	79
Figura 3.14 – Interface gráfica desenvolvida para entrada dos dados do modelo: Precipitação .....	79

Figura 3.15 – Interface gráfica desenvolvida para entrada dos dados do modelo: Vazão observada.....	80
Figura 3.16- Tabela de resumo da simulação.....	81
Figura 3.17 - Tabela com valores de vazão simulados.....	81
Figura 3.18 - Hidrograma da simulação para cada elemento .....	81
Figura 3.19 - Resumo estatístico da simulação .....	82

# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	VI
RESUMO .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
LISTA DE TABELAS .....	IX
LISTA DE FIGURAS .....	X
ÍNDICE .....	XII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo geral.....	4
1.2 Objetivos específicos .....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Modelos Hidrológicos: considerações iniciais.....	5
2.2 Tipologias e classificações de modelos hidrológicos.....	7
2.3 Modelos Hidrológicos Distribuídos: o problema da espacialização.....	7
2.4 Sobre os Sistemas de Informações Geográficas (SIG).....	12
2.2.1 Componentes de um SIG.....	13
2.2.2 Tipos de dados em Geoprocessamento .....	15
2.5 Sistema de Informações Geográficas no apoio à modelagem hidrológica .....	16
2.2.3 O SIG na caracterização física da bacia hidrográfica.....	19
2.5.2 Aspectos técnicos e conceituais .....	25
2.6 Abordagens de Integração SIG & MH.....	27
3 METODOLOGIA.....	44
3.1 Sistematização das abordagens de integração.....	44
3.1.1 Quanto ao relacionamento entre os dados.....	45
3.1.2 Quanto à modificação no código fonte.....	47

3.1.3	Quanto ao grau de complexidade .....	52
3.2	Análise comparativa .....	54
3.2.1	Área de Estudo .....	54
3.2.2	Escolha das abordagens.....	56
3.3	Simulações .....	58
3.3.1	Aplicação 1 (ArcGIS–AGWA–KINEROS).....	58
3.3.2	Aplicação 2 (OpenJump–SNIRH–KINEROS).....	61
3.	Resultados e discussões .....	63
3.1.	Sistematização .....	63
3.2.	Aplicação 1 (AGWA-ARCGIS-KINEROS).....	67
3.2.1.	Delimitação e Discretização da Bacia .....	67
3.2.2.	Parametrização do tipo e cobertura do solo.....	70
3.3.	Aplicação 2 (OpenJUMP-SNIRH-KINEROS) .....	78
3.3.1.	Arquivos de entrada.....	78
3.3.2.	Execução e resultados .....	80
3.4.	Comparação entre as duas metodologias .....	83
4.	Conclusões e Recomendações .....	88
5.	Referências Bibliográficas.....	91
	ANEXOS.....	104

# 1 INTRODUÇÃO

A água é um dos principais componentes que proporciona a vida na terra. O desequilíbrio de suas condições naturais no âmbito quantitativo e qualitativo em decorrências de seu uso inadequado tem incentivado o desenvolvimento de novas tecnologias que auxiliem na gestão desses recursos. A tomada de decisão ligada com a gestão dos recursos hídricos passa necessariamente pelo estudo dos processos físicos que regem a distribuição e o movimento da água, ou seja, a investigação do ciclo hidrológico, que corresponde a um sistema fechado dentro de uma região em análise.

Nesse sentido modelos hidrológicos podem ser definidos como representações matemáticas do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou sub-superfície terrestre, permitindo a simulação de processos físicos nas suas dimensões temporais (PULLAR & SPRINGER, 2000).

A modelagem hidrológica é uma das ferramentas que o homem desenvolveu para melhor compreender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas (TUCCI, 2005). Devido à grande complexidade envolvida na utilização de modelos hidrológicos, muitas vezes é optado pela utilização de um modelo concentrado que represente a bacia de forma mais simplificada e uniforme. Tais modelos não levam em consideração os fenômenos hidrológicos no contexto geográfico, tendendo a serem menos representativos do que se pretende avaliar.

Devido a esse fato muitos pesquisadores têm optado pela utilização de modelos hidrológicos semi-distribuídos ou distribuídos procurando superar as limitações dos modelos não-distribuídos ou concentrados através da detecção de efeitos e anomalias locais (TUCCI, 2005). Porém os modelos distribuídos se apresentam complexos em sua operação e demandam grandes volumes de dados espacializados para descrição da variedade da bacia hidrográfica em estudo.

Além da dificuldade do modelo hidrológico em si, quando se trata dos problemas decorrentes de eventos extremos como enchentes, inundações e secas, é envolvida uma série de variáveis organizacionais, sociais, geográficas e temporais (RAFAELI NETO, 2000). Desse modo, para a tomada de decisão é necessário uma quantidade de informações que represente de forma significativa o problema em análise, para atingir a solução adequada.

Nesse sentido, a união entre a dificuldade na manipulação de dados para os modelos hidrológicos distribuídos com a necessidade de uma ferramenta que pudesse ser eficiente para a tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos criou um cenário ideal para que a integração entre modelos hidrológicos e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) obtivesse uma grande aceitação por pesquisadores da área.

Os Sistemas de Informações Geográficas por definição corresponde a uma tecnologia de uso geral para manipulação geográfica de dados em formato digital. Suas habilidades incluem: pré-processamento de dados em um formato apropriado para a análise, o apoio à análise espacial, na modelagem e pós-processamento dos resultados (GOODCHILD, 1993).

A utilização de SIG permite com que seja possível a extração de dados adequados, a partir de banco de dados, tornando-se passíveis de serem manipulados e analisados automaticamente sob forma de mapas. Essa característica gera um maior controle no gerenciamento dos dados de entrada para o modelo, permitindo-se desenvolver metodologias mais versáteis e buscando novas soluções para o estudo. Além disso, o SIG também permite uma visão integrada dos sistemas hídricos proporcionando uma interpretação de resultados no contexto geográfico (McKINNEY & CAI, 2002).

Assim a união entre a necessidade dos modelos hidrológicos com a capacidade dos SIG fez com que um número significativo de aplicações ocorresse ao redor do mundo, utilizando os mais variados tipos de modelos hidrológicos e softwares. Stuart & Stock (1993) aplicaram a integração entre o modelo TOPMODEL e o SIG SPANS (Spatial Analysis System) em uma região da Escócia, Tsou e Whitemore (2001) usaram os modelos MODFLOW e MT3D no ArcView, Santos & Zeilhofer (2005) aplicaram o modelo NGFlow com o SIG ArcView e Triana & Labadie (2007) desenvolveram um sistema integrado com os modelos QUAL2E e MODFLOW por meio do SIG ArcMap.

A união ainda não é perfeita, pois ainda existem algumas limitações conceituais que impedem com que essa integração seja aplicada com uma maior intensidade. Sui & Maggio (1999) como também Câmara *et al.* (1996) salientam que os modelos que representam espaço, tempo, escala e objetos em SIG não são compatíveis com a maioria dos modelos hidrológicos. Estes autores enfatizam limitações dos bancos de dados espaciais e não-espaciais utilizados em SIG na representação da característica dinâmica de fenômenos hidrológicos.

Porém o desenvolvimento da Tecnologia da Informação aliado com a demanda dos órgãos gestores por sistemas mais complexos contendo ferramentas que aperfeiçoem a tomada de decisão fez com que o processo de integração de SIG com modelos hidrológicos recebesse significativos avanços e melhoramentos por meio de novas implementações e desenvolvimentos (Martin *et al.*, 2005).

Devido à grande variabilidade de modelos hidrológicos e softwares envolvidos a definição de classes metodológicas de integração é essencial para que se possa obter a solução mais adequada para um estudo específico, extraindo os resultados de forma coerente dentro dos limites que o sistema proporciona. Nesse sentido, foram elaboradas estratégias de união dessas ferramentas para que se pudessem identificar os melhores caminhos para o desenvolvimento de sistemas integrados, além dos benefícios e limitações de tais produtos.

Diversos autores (GOODCHILD *et al.*, 1992; WATKINS *et al.*, 1996; FEDRA, 1993) têm procurado a identificação dessas classes, algumas vezes baseados em experiências próprias no desenvolvimento e uso desses sistemas, mas conforme comenta Rafaeli Neto (2000) devido a ausência de unificação e pela presença de muitos atributos nessas abordagens não é permitido uma análise comparativa entre as mesmas.



## **1.1 Objetivo geral**

Investigar as diferentes abordagens metodológicas de integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas (SIG) visando sistematizar e classificar as abordagens existentes, bem como experimentá-las em uma aplicação específica.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Realizar um levantamento exaustivo das diferentes metodologias de integração existentes na literatura nacional e internacional;
- Classificar de forma sistemática todas as formas de integração Sistemas de Informação Geográfica & Modelos Hidrológicos (SIG & MH) levantadas;
- Análise comparativa de duas abordagens em um caso específico (Bacia Experimental de São João do Cariri).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Modelos Hidrológicos: considerações iniciais

A modelagem hidrológica é uma das ferramentas que o homem desenvolveu para melhor compreender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas (TUCCI, 2005). Neste contexto, alguns conceitos devem ser considerados para o entendimento da modelagem hidrológica, como o conceito de *sistemas* e de *modelos*. De acordo com Dooge (1973) “sistema é qualquer estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado tempo de referência relaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação”.

Na análise de fenômenos ambientais como sistema, uma das maiores dificuldades se encontra na identificação dos elementos, atributos (variáveis) e suas relações, para que se possa definir com clareza a extensão abrangida pelo sistema em foco (CHRISTOFOLETTI, 1999).

O conceito de *modelo* segundo Haggett e Chorley (1975) *apud* Christofolletti (1999) “é uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes. Os modelos são aproximações altamente subjetivas, por não incluírem todas as observações ou medidas associadas, mas são valiosos por obscurecerem detalhes acidentais e por permitirem o aparecimento dos aspectos da realidade”.

Tucci (2005) define modelo como sendo a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar respostas para diferentes entradas. Sinteticamente o modelo é uma representação do sistema, onde os processos que ocorrem no sistema são representados de forma matemática, física ou analógica de modo a atingir um objetivo.

A bacia hidrográfica é um exemplo de um sistema que pode ser representado e estudado através da aplicação de modelos hidrológicos. Chow *et al.* (1994) e Xu (2002) definem como sistema hidrográfico uma estrutura de um volume no espaço, rodeada por uma fronteira, que aceita água e outras entradas e através das operações internas produz como resposta uma saída. A região é delimitada pela bacia hidrográfica e, como mostrada na Figura 2.1, o sistema é limitado verticalmente por dois planos um inferior e um superior. A chuva

corresponde à entrada, a qual é distribuída espacialmente ao longo do plano superior, a vazão da rede de drenagem corresponde à saída e é espacialmente concentrada na saída da bacia. A evapotranspiração real e o fluxo sub-superficial correspondem também às saídas. Nesse sentido, partindo-se da definição de sistema hidrológico, os esforços são dirigidos para desenvolvimento de modelos que representem de forma prática e com precisão o comportamento do sistema, levando em consideração suas particularidades.

Segundo Tucci (2005) devido à heterogeneidade física das bacias e a complexidade dos processos envolvidos, um grande número de modelos foram desenvolvidos, os quais, se diferenciam em função dos dados utilizados, da discretização, das prioridades da representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados. Ainda segundo este autor, o escoamento (processo) numa bacia hidrográfica (sistema) resulta da interação dos processos de precipitação, interceptação, evapotranspiração e infiltração, o qual pode ser estudado por uma ou mais equações, através de um modelo hidrológico matemático, por exemplo.

O processo de simulação consiste na fase prática do modelo. De acordo com Tucci (2005) a simulação é composta em três etapas: estimativa ou ajuste, verificação e previsão, onde “a estimativa dos parâmetros é a fase da simulação onde os parâmetros devem ser determinados. A verificação é a simulação do modelo com os parâmetros estimados onde se verifica a validade do ajuste realizado. A previsão é a simulação do modelo com os parâmetros estimados onde se verifica a validade do ajuste realizado.”

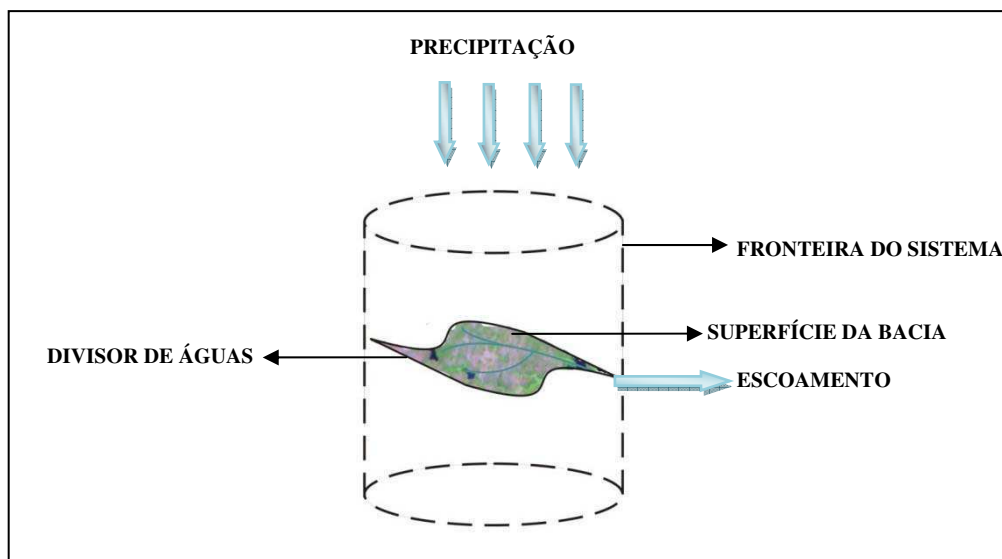


Figura 2.1 – A Bacia hidrográfica como um sistema. Adaptado de Chow *et al.* (1994)

## 2.2 Tipologias e classificações de modelos hidrológicos

A tipologia dos modelos é assunto que surge amiúde, muitas vezes confundindo a temática do modelo com as características de sua organização. Vários autores classificam os modelos conforme a área de estudo, ou melhor, conforme o sistema em análise. Segundo Tucci (2005), existem diversos critérios para se classificar os modelos utilizados em hidrologia, podendo ser classificados em: físicos, analógicos e matemáticos.

*Modelo matemático:* Esse tipo de modelo é representado por um conjunto de equações ou expressões matemáticas e argumentos lógicos os quais são usados para simular a natureza do sistema. São ditos também digitais, pois usualmente um programa computacional é desenvolvido para realizar os cálculos do modelo idealizado.

*Modelo físico:* Corresponde a uma representação de um sistema em escala por um protótipo, tomando como base a semelhança geométrica, cinemática e dinâmica entre o sistema e o protótipo.

*Modelo analógico:* Valem-se da analogia das equações que regem diferentes fenômenos para modelar, no sistema mais conveniente, o fenômeno mais complexo. A analogia entre as equações do escoamento hidráulico e de um circuito elétrico permite a representação do sistema hidráulico, complexo e caro, por um circuito de custos reduzidos.

Ao apresentar revisão introdutória a propósito da modelagem aplicada à modelagem hidrológica, Singh (1995) sintetiza classificações de modelos utilizados em estudos hidrológicos, pois são diferentes tipos e desenvolvidos para objetivos diferenciados. Todavia, os critérios de classificação são possíveis porque muitos modelos compartilham das mesmas similaridades, estruturas e pressuposições. Nessa perspectiva a tipologia dos modelos pode ser observada nos seguintes aspectos apresentados na Tabela 2.1.

## 2.3. Modelos Hidrológicos Distribuídos: o problema da espacialização

De acordo com Collischonn (2001) o modelo hidrológico distribuído está associado diretamente com os modelos de base física, e as condições que geraram os modelos distribuídos relacionam-se com a heterogeneidade dos processos físicos, com a necessidade de resposta em diferentes pontos da bacia, com a disponibilidade de informações sobre a superfície terrestre além do avanço da informática.

Tabela 2.1 -Classificação dos Modelos Hidrológicos

<b>Critério</b>	<b>Classificação</b>	<b>Sub-Classe</b>	<b>Característica</b>
<b>Descrição dos Processos</b>	Determinístico	Empírico	Não leva em conta a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo, utilizando observações e que não estão relacionadas com os fenômenos físicos.
		Conceitual (Semi-Conceituais & Físicos)	<i>Semi-Conceitual</i> - Não leva em conta a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo, procurando descrever todos os processos que envolvem um determinado fenômeno físico, mantendo um razoável empirismo. <i>Físico</i> – Também não levam em conta as chances de ocorrência, utilizando as principais equações diferenciais do sistema físico.
		Probabilístico	Considera a chance de ocorrência das variáveis e introduz o conceito de probabilidade em sua formulação, tendo a variável interveniente um comportamento puramente aleatório.
	Não Determinístico	Estocástico	Considera a chance de ocorrência das variáveis e introduz o conceito de probabilidade em sua formulação, mas além da componente aleatória tem outra que permite contemplar a seqüência temporal ou seqüência espacial dos valores da variável.
<b>Variabilidade Espacial</b>	Concentrado		Não leva em conta a variabilidade espacial, ou seja, quando os seus parâmetros e variáveis variam somente em função do tempo.
	Distribuído		Quando as variáveis e parâmetros do modelo variam também segundo o espaço.
<b>Variabilidade temporal</b>	Contínuo		Quando os fenômenos são contínuos no tempo. Mesmo que um sistema se modifique continuamente, a simulação no modelo é feita em intervalos de tempos.
	Discreto		Quando os fenômenos são representados em intervalos de tempo discreto.
<b>Dependência Temporal</b>	Estático		Quando, para um conjunto de dados de entrada produz-se um resultado oriundo da solução das equações do modelo em um único passo.
	Dinâmico		Quando utiliza o resultado de uma iteração como entrada para uma próxima iteração.
<b>Técnica de solução</b>	Numérico		Problemas gerais, independentemente da complexidade geométrica, dos parâmetros físicos e das relações constitutivas.
	Analítico		Problemas de geometria simples, parâmetros homogêneos e relações lineares

A escolha de um modelo hidrológico distribuído baseia-se no fato de que esse tipo de modelo representa os processos físicos de uma bacia hidrográfica em uma maneira mais detalhada que os modelos concentrados. O detalhamento maior dos modelos distribuídos está

ligado ao fato de que os mesmos utilizam dados espacialmente distribuídos como topografia, tipo de solo, cobertura do solo e parâmetros meteorológicos. No entanto, os modelos hidrológicos distribuídos físicos necessariamente requerem uma quantidade bastante extensa e detalhada de informações sobre a bacia para que possa realizar uma boa parametrização (BEVEN, 1991). De acordo com o mesmo autor, nem sempre o esforço relacionado com a parametrização e calibração do modelo são compensados, pois os resultados simulados são ligeiramente melhores (e às vezes piores) do que os resultados dos modelos empíricos ou concentrados.

Mesmo com as dificuldades relacionadas com a parametrização e calibração, os modelos distribuídos passaram a minimizar problemas não solucionados com os modelos concentrados (MENDES & CIRILO, 2001). Entretanto a aquisição e o manuseio com uma grande quantidade de informações espacialmente variadas passaram a representar uma limitação dos modelos hidrológicos. Nesse contexto a utilização de Sistema de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto minimizaram esse problema na modelagem hidrológica auxiliando no gerenciamento dos dados georreferenciados, fazendo parte até da estrutura de alguns modelos hidrológicos (COLLISCHONN, 2001; TUCCI, 2005; COELHO, 2006).

Alguns modelos hidrológicos distribuídos têm se destacado, sendo utilizados em uma grande quantidade de trabalhos, como os modelos TOPMODEL (BEVEN *et al.*, 1995), SHE (*Système Hydrologique Européen* – BATHURST *et al.*, 1995), SWAT (Soil Water Assessment Tool - Arnold *et al.*, 1994) e o modelo KINEROS (Woolhiser *et al.*, 1990), os quais são abordados a seguir com maior detalhe.

O modelo TOPMODEL utiliza relações físicas para representar a bacia hidrográfica e os processos hidrológicos. A estrutura do modelo se baseia na discretização em sub-bacias, mas utiliza um fator topográfico obtido em mapas detalhado. Este modelo requer o Modelo Digital de Elevação (MDE) que corresponde a base física fundamental para o modelo onde são extraídas a declividade e rede de drenagem. Além destas informações, os dados de evapotranspiração também são necessários para o cálculo do fluxo na rede de drenagem de uma bacia. Devido ao fato do modelo ser computacionalmente eficiente e pela facilidade de manipulação para a simulação distribuída, esse modelo tem se popularizado e conseqüentemente aumentado o número de aplicações (BEVEN, 1997; TUCCI, 2005).

O modelo SHE representa todos os processos por equações com embasamento físico e apresenta a desvantagem de necessitar de uma grande quantidade de dados que,

teoricamente, podem ser medidos em laboratório ou em experimentos na bacia, embora a altos custos. A bacia é discretizada em células, no formato de grade. Nestas células, são definidas as variáveis e as equações são resolvidas por métodos de diferenças finitas. A discretização varia de 50 x 50 m a 500 x 500 m na horizontal e de 5 cm a 5 m na vertical. Em cada célula e em cada nível da discretização vertical é necessário conhecer o valor da condutividade hidráulica e a capacidade do solo de reter a umidade. Uma estimativa de um coeficiente de Manning<sup>1</sup> é necessária para cada célula, tanto para o escoamento superficial como o escoamento em canal. A vegetação deve ser representada por dois parâmetros de resistência à evapotranspiração, um relativo à atmosfera e outro relativo a planta em si (BATHURST *et al.*, 1995 *apud* COLLISCHONN, 2001).

O modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) permite que diferentes processos físicos sejam simulados na bacia hidrográfica, com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água, em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas. Para satisfazer a estes objetivos o modelo: (i) é baseado em características físicas da bacia; (ii) usa dados de entrada normalmente disponíveis; (iii) é computacionalmente eficiente para operar sobre médias e grandes bacias (>1.000 km<sup>2</sup>); e (iv) é contínuo no tempo, sendo capaz de simular longos períodos (>100 anos) de forma a computar os efeitos das alterações no uso do solo. O SWAT utiliza a discretização da bacia, a qual pode ser dividida em sub-bacias que são parametrizadas usando uma série de Unidades Hidrológicas (Hydrologic Response Units – HRU's), as quais correspondem a uma única combinação de uso da terra e solos dentro da sub-bacia (MACHADO, 2002).

O modelo KINEROS – *Kinematic Runoff and Erosion Model*, (Woolhiser *et al.*, 1990) foi desenvolvido com o objetivo de simular a resposta hidrossedimentológica de bacias urbanas e rurais. O KINEROS é um modelo hidrossedimentológico cinemático, distribuído e de base física, que usa uma rede de planos e canais que representam os cursos d'água na bacia. Assim, a bacia é representada por uma cascata de planos e canais, nos quais são atribuídos parâmetros que variam espacialmente na bacia a qual foi aplicada o modelo. Consiste em um modelo chuva-vazão-erosão, voltado para eventos, distribuído e não linear. Existe conexão entre os elementos canais, podendo receber fluxo proveniente de um ou mais

---

<sup>1</sup> Parâmetro que representa a rugosidade da superfície no qual ocorre o escoamento.

canais em sua extremidade de montante. Cada elemento, plano ou canal, é caracterizado por um conjunto de parâmetro ou apenas parâmetro único (SMITH *et al.*, 1995).

O modelo KINEROS foi proposto por Woolhiser *et al.* (1990) que incorporaram ao modelo hidrológico de Rovey *et al.* (1977) componentes de erosão, transporte e deposição. As equações diferenciais que descrevem o escoamento superficial, o transporte de sedimentos e a deposição de sedimentos nesses planos e canais, são resolvidas pela técnica de diferenças finitas e estão apresentadas em Woolhiser *et al.* (1990) e Santos *et al.* (2005). O modelo é composto dos seguintes algoritmos:

- ✓ Infiltração do solo: o modelo de infiltração necessita de quatro parâmetros básicos para descrever as propriedades de infiltração, que são o de condutividade hidráulica efetiva saturada do solo  $K_s$  (m/s), a capilaridade integral do solo  $G$  (cm), profundidade do fluxo  $h$  (m) e o índice de distribuição dos tamanhos dos poros  $\lambda$ ;
- ✓ Escoamento superficial no plano: a modelagem do escoamento superficial na bacia é resolvida pelo modelo Kineros2 baseado na resolução de equações diferenciais parciais, as quais descrevem o fluxo e a profundidade do nível da água como sendo funções do tempo e do espaço;
- ✓ Escoamento superficial no canal: pode ser observado como um processo de escoamento uni-dimensional no qual o fluxo é relacionado a uma área de armazenamento;
- ✓ Erosão nos planos e canais: a dinâmica dos sedimentos em qualquer ponto ao longo do escoamento superficial é uma equação de balanço de massa similar ao escoamento cinemático da água.

A variação espacial da precipitação, infiltração, escoamento superficial, erosão e dos parâmetros podem ser inseridos no modelo. KINEROS pode ser utilizado para determinar os efeitos de diversos recursos artificiais, como o desenvolvimento urbano, pequenos reservatórios de detenção, ou canais.

O modelo KINEROS2 inclui novas características como: o algoritmo de infiltração que abrange o perfil do solo com duas camadas e incorpora um novo método baseado nas características físicas do solo, com a finalidade de redistribuir a água no solo durante os



períodos sem chuva; e o solo e os sedimentos são caracterizados por uma distribuição de até cinco classes de tamanho de sedimento (SMITH *et al.*, 1995).

## **2.4. Sobre os Sistemas de Informações Geográficas (SIG)**

As mais variadas áreas de estudo apresentam problemas em que a localização geográfica é de fundamental importância na resolução dos mesmos. Gestores, engenheiros, geólogos, hidrólogos entre outros se deparam com a necessidade de uma representação da superfície da terra além de ferramentas que auxiliem de forma coerente como lidar com as variáveis que representam um determinado fenômeno na superfície da terra. Nesse sentido o Geoprocessamento e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) vêm sendo um grande aliado no apoio a diferentes áreas, permitindo a análise de grandes quantidades de dados georreferenciados, de diferentes tipos e formatos, atuando de maneira isolada ou em conjunto. Mais do que isto, o geoprocessamento permite o tratamento desses dados, gerando informações e possibilitando soluções através de modelagem e simulações de cenários em um ambiente de SIG (ROCHA & LAMPARELLI, 1998).

Para Teixeira *et al.* (1992) os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) incluem-se no ambiente tecnológico que convencionou-se chamar de geoprocessamento, cuja área de atuação envolve a coleta e tratamento da informação espacial. A tecnologia ligada ao geoprocessamento envolve equipamentos e programas de computador com diversos níveis de sofisticação destinados à implementação de sistemas com fins didáticos, de pesquisa acadêmica ou aplicações profissionais e científicas nas mais variados ramos das geociências.

De acordo com Couclelis (1999) SIG é definido como a arte, ciência, engenharia e tecnologias associadas como a resposta às questões geográficas. O mesmo autor adota SIG genericamente como o termo que relaciona o uso de computador com o intuito de criar e representar de forma digital a superfície da terra.

Apesar das diferentes definições relacionadas com as aplicações dos SIG é possível identificar uma definição comum como sendo um sistema capaz de gerenciar dados geográficos, ou seja, atribuindo aos mesmos as capacidades de colecionar, editar, armazenar, integrar e analisar dados georreferenciados.

Pode-se dizer que o conceito de SIG evoluiu bastante nos últimos anos, à medida que este tipo de sistema abrange diferentes campos de pesquisa, dentre os quais se destacam: a informática, que enfatiza a ferramenta de banco de dados ou linguagem de programação; a geografia, que relaciona os mapas, além de outras que enfatizam aplicações com suporte à decisão (Miranda, 2005).

De acordo com Coppock e Rhind (1991), a definição clássica de SIG deve ser representante das áreas que os mesmos apóiam, ou seja, necessita-se de uma visão que vai além da automação da cartografia, estendendo o SIG com pacotes de propósito geral em estatística, tomada de decisão, bancos de dados e outros.

Nesse sentido cria-se a idéia de “SIG estendido”, que corresponde à ampliação das funcionalidades do SIG por meio da reunião de um conjunto de ferramentas interoperáveis de software voltadas a uma classe de problemas (TAYLOR, WALKER & ABEL, 1999 *apud* RAFAELLI NETO, 2000). A inserção de novas funcionalidades visa de uma forma geral melhorar a capacidade dos SIG de forma que os mesmos dêem suporte à tomada de decisão espacial, de uma maneira mais dinâmica atendendo a uma demanda que as propriedades tradicionais unicamente dos SIG não seriam suficientes para atender. Esse avanço é possível por meio de uma mudança de paradigmas, criando produtos mais flexíveis, sendo em alguns casos com arquitetura aberta de domínio público (SPRING, 1998; GRASS, 1999).

De um modo geral tem-se a ênfase do SIG no auxílio às análises e modelagens espaciais, nas quais, o SIG passa a ser visto mais como uma ciência de informação espacial do que uma tecnologia. Apesar das limitações dos sistemas atuais no que se diz respeito à análise espacial, essa tem sido a área de maior desenvolvimento, sendo essa uma importante abordagem que diferencia SIG dos outros sistemas de informações de dados espaciais (Miranda, 2005).

A principal característica que distingue o SIG dos outros sistemas corresponde a sua capacidade de armazenar e gerenciar dados espaciais. Essa capacidade está ligada diretamente com a sua estrutura e o com os seus componentes, que fazem com que o SIG possa manipular os dados geográficos.

### **2.2.1 Componentes de um SIG**

De acordo com Câmara Neto (1995) de uma forma geral o SIG apresenta os seguintes componentes em sua estrutura:

- ✓ Interface com o usuário, entrada e integração de dados;
- ✓ Funções de processamento gráfico e de imagens;
- ✓ Visualização e plotagem;
- ✓ Armazenamento e recuperação de dados (organização sob a forma de um banco de dados geográficos).

A interação do usuário com o sistema pode ser através de uma interface gráfica com menus ou através de uma linguagem de comandos, onde o usuário determina uma seqüência de operações a ser executada.

O SIG deve possuir mecanismos de processamento de dados espaciais, pois além dos processamentos convencionais, os dados muitas vezes se encontram em um padrão ou formato que precisarão ser convertidos para um formato interno. De acordo com Aronoff (1989) devido à diversidade de fontes e formatos, a entrada de dados é a maior restrição na implementação de um projeto em ambiente SIG, pois o investimento necessário para a construção de uma base de dados de grande porte pode ser de 5 a 10 vezes superior aquele necessário para aquisição de hardware e software juntos. Estes dados precisarão ser compatibilizados para que possam interagir diretamente com o componente do Sistema de Gerência de Banco de Dados (SGBD).

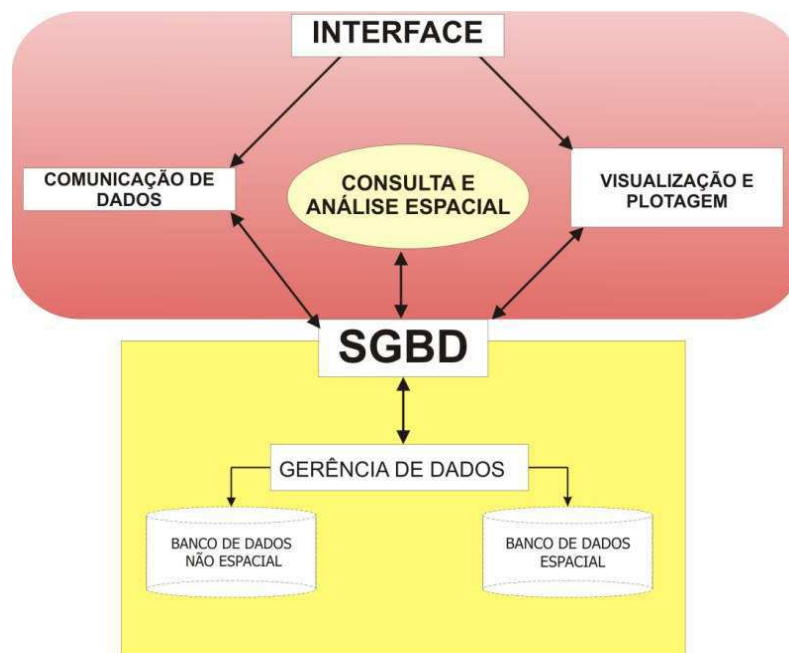


Figura 2.2 – Componentes básicos de um SIG adaptado de Camâra Neto (1995) e Rafaeli Neto (2000)

O Sistema de Gerência de Banco de Dados (SGBD) ou simplesmente “banco de dados” corresponde ao componente básico dos SIG. Esse componente garante a consistência e integridade do armazenamento dos dados e de seus inter-relacionamentos. Ele também implementa meios convenientes e eficientes para consultar e recuperar dados e computar informações contidas na base. Diferente dos outros sistemas convencionais, o banco de dados do SIG requer os serviços de um SGBD estendido, ou seja, que gerenciem dados geográficos, possuindo uma linguagem de consulta diferente dos sistemas convencionais que não são capazes de lidar com tais atributos. Assim o SGBD para o SIG deve proporcionar: modelos de dados geográficos, linguagem de consulta geográfica e processamento de consultas geográficas (RAMIREZ & SOUZA, 2007).

Os dados não espaciais também estão armazenados dentro da estrutura do SGBD, e armazenam informações que descrevem características ou atributos das entidades espaciais representadas no banco de dados espacial (RAFAELI NETO, 2000).

Uma extensão do SGBD corresponde ao Sistema Gerenciador de Banco de Dados Distribuído (SGBDD) que tem o objetivo de oferecer para usuários e programadores a noção de estarem operando com um único SGBD global, porém sendo composto de bases de dados e controles distribuídos por diversos SGBD locais interligados através de uma rede de computadores (RAMIREZ & SOUZA, 2007).

### **2.2.2 Tipos de dados em Geoprocessamento**

De acordo com Mendes e Cirilo (2001) os dados geográficos podem ser enquadrados em três categorias:

- ✓ Dado espacial, que refere à localização, à forma e às relações entre as entidades espaciais;
- ✓ Dado descritivo (atributos), que se refere às características da entidade espacial;
- ✓ Dado temporal, que se refere ao período ou época da ocorrência do fenômeno ou fato geográfico.

Segundo os mesmos autores os dados espaciais apresentam como características principais a sua posição em relação a uma determinada referência, o aspecto topológico que caracteriza o relacionamento de vizinhança ou de conexão entre os objetos e por fim o aspecto

amostral que caracteriza valores de grandeza física ou de outras propriedades, obtidas através de pontos de amostragem.

Um modelo de dados geográfico corresponde a uma abstração do mundo real, sendo esse modelo o conjunto das categorias citadas anteriormente. Os objetos definidos com o uso dos modelos podem ser representados por dois tipos: matriciais (*raster*) ou vetoriais.

A estrutura matricial (*raster*) descreve o espaço geográfico na forma de uma matriz de células, a cada uma das quais é atribuído um valor. Essa estrutura é regular, pois impõe limites precisos e cada célula tem as mesmas dimensões e forma geométrica. Para se criar um mapa temático nesse modelo, coleciona-se dados acerca de um tópico específico (tema) na forma de matriz, onde cada célula representa um atributo do tema. Essa matriz bidimensional é conhecida como “plano de informação”, as quais são únicas para cada tema que representam (uso da terra, cobertura vegetal, tipo de solo, hidrologia, entre outros) de maneira que os atributos são facilmente identificados (ARONOFF, 1995; MIRANDA, 2005).

Outro aspecto relacionado com a estrutura matricial refere-se resolução espacial de cada célula que consiste na representação da área de cada célula em relação à área da terra, esse valor terá reflexo nas análises realizadas (MIRANDA, 2005).

A estrutura vetorial descreve objetos na forma de vetores (pontos, linhas e áreas), sendo associado a cada uma destas entidades geométricas um conjunto de propriedades (atributos) de forma que as posições, comprimentos e dimensões dessas entidades possam ser definidos com exatidão (ARONOFF, 1995 e BURROUGH e McDONNELL, 1998).

## **2.5. Sistema de Informações Geográficas no apoio à modelagem hidrológica**

A eficiência do modelo hidrológico está intimamente ligada com a qualidade dos dados envolvidos nos processos de simulação. Uma das grandes dificuldades relacionadas com os modelos, principalmente os distribuídos, é a grande quantidade de dados envolvidos nos mesmos. Nesse sentido Tucci (2005) afirma que os SIG e o Sensoriamento Remoto auxiliam na aquisição dos dados físicos, fazendo parte da estrutura de entrada de alguns modelos.

Goodchild (1993) afirma que a tecnologia SIG desempenha várias tarefas, tais como: processamento de uma grande quantidade de dados armazenados em locais adequados, análise

e calibração de modelos, previsões e estimativas, pós-processamento dos resultados através da tabulação e mapeamento dos dados.

A utilização de sistemas de informações geográfica possibilita a aquisição, manuseio e integração de dados temáticos proporcionando uma caracterização espacial e temporal de áreas submetidas a processos erosivos em bacias hidrográficas (VALÉRIO FILHO & ARAÚJO JÚNIOR, 1995 apud GROSSI, 2003).

Essa ligação que relaciona a necessidade dos modelos hidrológicos com a capacidade dos SIG em atender tais necessidades faz com que a integração entre modelos hidrológicos e Sistemas de Informações Geográficas seja uma área de considerável interesse e em crescente desenvolvimento.

Para a modelagem hidrológica, os Sistemas de Informação Geográfica fornecem uma plataforma integrada para gerenciar, analisar e apresentar diferentes dados, podendo facilitar a compilação, calibração do modelo, e visualização dos parâmetros do modelo e dos resultados, contribuindo assim, para a geração de informações valiosas para a tomada de decisão (TSOU & WHITTEMORE, 2001).

De uma forma mais específica Whiteaker & Maidment (2004) definem “*Interface data Models*” como uma interface de ligação entre o SIG e o modelo de simulação. Devido à exigência da qualidade e da precisão dos dados utilizados no modelo, a interface com o usuário proporcionará de uma forma amigável a entrada das informações requeridas pelo modelo antes da simulação facilitando todo o processo.

De acordo com Mendes (1998), a utilização de técnicas de Geoprocessamento constitui-se um instrumento de grande potencial para o estabelecimento de planos integrados de conservação do solo e da água. Sob o ponto de vista da modelagem hidrológica os SIG possuem uma significativa capacidade de manipulação de funções que representam os processos ambientais em diversas regiões, de uma forma simples e eficiente, permitindo uma economia de recursos e tempo. A entrada de dados que são modelados por tais funções são advindas das mais variadas 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 (MACHADO, 2002).

A integração do SIG com os modelos hidrológicos e a sua aplicação em bacias hidrográficas permite a realização de um grande número de operações, como calibração,

simulação e comparação entre os modelos. O uso do SIG permite, portanto, subdividir a bacia hidrográfica em subáreas homogêneas (CALIJURI *et al.*, 1998).

Na hidrologia, a utilização inicial de SIG foi motivada pela necessidade de representações mais acuradas do terreno, porém com o avanço da tecnologia várias técnicas de modelagem hidrológica permitiram aos usuários de SIG uma extensão da capacidade básica de processamento de dados, evoluindo para uma sofisticada ferramenta no apoio da tomada de decisão (SUI & MAGGIO, 1999).

As primeiras iniciativas na investigação do processo de integração de SIG com modelos hidrológico ocorreram por volta dos anos 90, quando desenvolvedores de SIG passaram a incluir dentro dos softwares, funcionalidades de especial interesse para os hidrólogos (FOTHERINGHAM & ROGERSON, 1994; GOODCHILD *et al.* 1992; KOPP, 1996).

Muitas foram as dificuldades encontradas nas primeiras aplicações. Do ponto de vista das limitações, apesar das semelhanças encontradas entre os modelos distribuídos/semi-distribuídos e os métodos utilizados pelos desenvolvedores para aplicações de SIG, Stuart & Stocks (1993) apresentaram o SIG unicamente como uma ferramenta complementar para construção de modelos, restando ainda muitos obstáculos técnicos e humanos para ligação de modelo e SIG.

As primeiras pesquisas eram mais direcionadas às questões de desenvolvimento computacional propriamente dito, levantando críticas de diversos autores (SUI & MAGGIO, 1999; BIAN, 1997) acerca da ausência de uma abordagem que levasse em consideração os problemas conceituais envolvidos na integração, principalmente na incompatibilidade dos conceitos de espaço e tempo entre os SIG e os modelos hidrológicos.

De acordo com Eierman, Niederman & Adams (1995) o perigo de abordagens dirigidas diretamente para tecnologia, ou seja, sem levar em consideração os conceitos teóricos para um campo de estudo é que, enquanto fatos interessantes podem ser acumulados, nenhuma unificação de temas ou padrões previsíveis emerge. Segundo estes autores, delineamentos teóricos são importantes porque servem como base para acumulação e refinamento de conhecimento especialista; servem como mecanismo de relacionamento entre conjuntos diversos de fatos, para produzir maior entendimento.

A exigência relacionada com a questão conceitual na modelagem hidrológica diz respeito principalmente com o fato de que diferente dos outros modelos ambientais, modelos hidrológicos apresentam um conjunto bem estabelecido de normas e práticas amplamente aceita por engenheiros hidráulicos e hidrólogos, sendo o resultado da modelagem usado freqüentemente para fins de regulamentação (SUI & MAGGIO, 1999).

Nesse sentido um sistema integrado entre modelos e SIG não poderá ser guiado apenas por práticas de programação e tecnologias de banco de dados, mas também pela ciência da hidrologia, exigindo uma padronização das estruturas de dados, descrições dos metadados e ambos os regimes de interpolação temporal e espacial, de modo que os mesmos possam ser aplicados a vários modelos hidrológicos e em diversas escalas espaciais (WHITEAKER & MAIDMENT, 2004).

Apesar das limitações que os SIG possuem a visão de mapa que os mesmos pressupõem, ou seja, uma visão estática de representação tem sido modificada. O processo de integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas tem alcançado um significativo avanço, dentre os quais podem ser destacados:

- ✓ Desenvolvimento da modelagem dinâmica (BURROUGH, 1998) que tem o objetivo de realizar o processo de simulação dependente do tempo, como os modelos que simulam a vazão e o transporte de sedimentos;
- ✓ Modificação no código fonte permitindo o acoplamento de novas funcionalidades como mostra Fedra (2006) que defende a união do SIG com simulação dinâmica de modelagem e otimização;
- ✓ Mudança de paradigma através da utilização de código e software livre que auxiliaram na difusão e melhoria das geotecnologias, implicando no aumento da quantidade e qualidade de desenvolvimento de ferramentas no auxílio de problemas espaciais (UCHOA & FERREIRA, 2004).

O desenvolvimento de tecnologia da informação que por sua vez é aplicado na metodologia de desenvolvimento de modelos como a aplicação de novas arquiteturas;

### **2.2.3 O SIG na caracterização física da bacia hidrográfica**

A aplicação dos diversos estudos hidrológicos em bacias hidrográficas tem como objetivo o entendimento dos processos que controlam o movimento da água e a influência da



mudança no uso da terra sobre a quantidade e qualidade da mesma (WHITEHEAD E ROBINSON, 1993 apud RENNÓ & SOARES, 2001).

A importância de se adotar a bacia como unidade hidrológica está ligada ao fato de que suas características estão intimamente relacionadas com a produção de água. A área de uma bacia hidrográfica tem influência sobre a quantidade de água produzida e, a forma e o relevo atuam sobre o regime desta produção (ZAKIA, 1998).

Os caminhos que o fluxo da água percorre e a forma que se transportam os materiais ao longo da bacia hidrográfica são determinados com base na topografia, que de acordo com Moore (1993) constitui-se fator primordial para modelos que tratam da distribuição espacial e requerem dados baseados nas características topográficas desta bacia como limites das bacias e sub-bacias, inclinação do terreno, comprimento de rampa, forma do declive, orientação das vertentes, características dos canais de drenagem e conexões entre áreas que definirão como a água se move através da paisagem.

### ***Topografia***

Os atributos topográficos, que podem ser usados como medida indireta da variabilidade dos processos hidrológicos foram medidos manualmente durante décadas. Com o desenvolvimento de programas computacionais que passaram a gerar esses atributos de forma automática viabilizou-se a análise de bacias hidrográficas de grande porte, que normalmente possuem áreas de centenas de milhares de quilômetros quadrados, e a geração desses atributos de forma convencional seria muito tediosa e em alguns casos impossível (MENDES E CIRILO, 2001).

Através de cálculos matemáticos aliados às técnicas computacionais os atributos topográficos são gerados com base no modelo numérico do terreno (MNT) que do ponto de vista do geoprocessamento é considerado matéria prima para o processamento dos dados de entrada em diversos modelos hidrológicos. As principais formas de se estruturar um MNT são: grade regular; grades triangulares (TIN, *triangulated irregular network*) e curvas de nível. A estrutura ideal para um MNT depende do objetivo do uso do dado e de como ele pode se relacionar com a estrutura de um modelo (MOORE *et al.* 1991).

De acordo com Collins *et al.* (1981) a estrutura matricial para análise hidrológica é recomendado porque elas são computacionalmente eficientes e simples, além de serem compatíveis com dados de sensoriamento remoto e muitos sistemas de informação geográfica.

Porém apesar da eficiência da estrutura de grades regulares no processo computacional, as mesmas apresentam grandes desvantagens. De acordo com Rennó e Soares (2007) as grades regulares não conseguem representar facilmente mudanças abruptas de elevação, e o espaçamento da malha da grade afeta diretamente os resultados e causa grande mudança na eficiência computacional. As grades regulares tendem a produzir um caminho de fluxo na forma de *zig-zag*, e dependendo da resolução que a grade se encontra tendem a produzir uma representação não realista, afetando os cálculos posteriores.

O MNT representado por TIN (*Triangulated Irregular Network*) em circunstâncias de grandes variações são mais eficientes e flexíveis, mas também podem apresentar problemas na determinação de fluxos de água em regiões planas. Outra forma de representação consiste na utilização de curvas de nível, um método essencialmente vetorial e sob o ponto de vista da estimativa da rede de drenagem produzem linhas de fluxo mais naturais representando de melhor forma os processos hidrológicos em bacias hidrográficas (Rennó & Soares, 2001).

O processo de geração do MNT consiste em algumas etapas que podem ser descritas na seguinte ordem:

- ✓ Obtenção dos dados topográficos, que estão disponíveis normalmente em cartas, sob forma gráfica, em várias escalas, que são digitalizadas e vetorizadas por algum processo adequado ou então no caso de uma representação detalhada do relevo de pequenas áreas é utilizado o nivelamento composto, com o uso de nível de precisão, após estaqueamento feito com teodolito convencional ou estação total (GOMES & CARDOSO, 2008);
- ✓ Geração de grande quantidade de pontos que representam as curvas de nível da região em estudo;
- ✓ Interpolação matemática, gerando assim a superfície contínua que corresponde ao MNT.

Um modelo numérico de boa qualidade é de fundamental importância para a modelagem hidrológica, visto que a partir do mesmo serão gerados diversos produtos, havendo então alguma discrepância no processo inicial esse erro será acumulado afetando assim os resultados na modelagem hidrológica. Nesse sentido Mendes e Cirilo (2001) apresentam algumas fontes de erro que podem ocorrer no processo de geração do MNT: a

digitalização de isolinhas e pontos; a técnica de interpolação usada; discretização e escala dos mapas e erros próprios da medição ou técnica que georreferencia a variável nos mapas usados como base.

Diversos são os produtos que são derivados dos MNT, esses produtos são obtidos de acordo com a necessidade de aplicação e o estudo que se pretende investigar. Para a modelagem hidrológica que corresponde ao interesse deste trabalho, serão apresentados os seguintes produtos: declividade, aspecto, direção de escoamento, área acumulada, delimitação automática de bacias e sub-bacias e rede de drenagem.

### ***Declividade e Aspecto***

A declividade do terreno é definida como a taxa de diminuição da altura na direção onde ocorre a maior redução, ou seja, na direção do aspecto. O aspecto pode ser definido como a direção de máximo decrescimento da função que representa o terreno. A obtenção desses parâmetros ocorre em função contínua e diferenciável por meio da determinação do vetor gradiente da função  $Z(x, y)$  que representa o terreno. Desse modo o gradiente é o vetor de máximo crescimento da função e o aspecto é o inverso do gradiente, ou seja, a direção de máximo decrescimento da função, e a declividade é o módulo do vetor gradiente (Mendes e Cirilo, 2001).

Essas grandezas são de primordial importância na estimativa de parâmetros relacionadas para a modelagem hidrológica. A “incerteza” relacionada com esses produtos está totalmente ligada com a estrutura espacial do MNT, ou seja, os erros na geração do MNT são propagados para a declividade e o aspecto (HUNTER & GOODCHILD, 1997).

### ***Direção de Fluxo***

De acordo com Mendes e Cirilo (2001) o parâmetro relacionamento à direção da declividade do terreno chamado de aspecto discreto corresponde à direção de fluxo, o qual atribui a cada uma das células do MNT a direção do escoamento para cada uma de suas oito vizinhas imediatas. O aspecto discreto tem aplicação restrita basicamente ao cálculo de área acumulada, pois garante a continuidade do fluxo entre uma célula e outra.

O processo de geração automática da direção do escoamento pode ser realizado através de algoritmos, os quais muitos foram desenvolvidos para extrair essa característica em base no MNT discretizado em grandes regulares. Entretanto, de maneira geral, esses

algoritmos produzem feições artificiais e muitas vezes consideram as direções apenas em intervalos de 45°(RENNÓ E SOARES, 2007). O algoritmo que descreve a direção de escoamento foi desenvolvido por O’Callaghan & MarK (1984) e ficou conhecido como Algoritmo Deterministic 8 (D8). A Figura 2.3 apresenta um esquema simplificado de determinação da direção de fluxo para um pixel a partir das cotas e distâncias relativas aos *pixels* vizinhos.

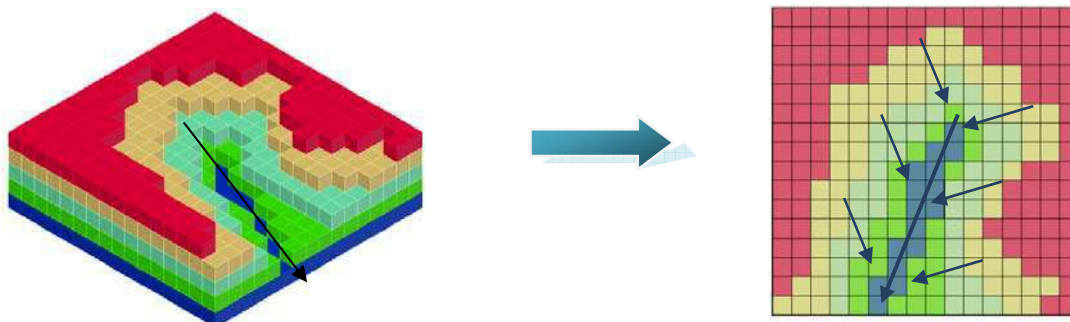


Figura 2.3 - Esquema de determinação da direção de fluxo para um pixel a partir das cotas e distâncias relativas aos *pixels* vizinhos.

### ***Área acumulada***

A área acumulada, sob o ponto de vista hidrológico, é uma medida que integra o fluxo superficial ou subsuperficial da água a montante de um ponto do terreno. A área acumulada é importante para definir sub-bacias, rede de drenagem automaticamente e índices de saturação, entre outros parâmetros de interesse hidrológico (Mendes e Cirilo, 2001).

A partir da matriz com as direções de fluxo, o qual atribui o sentido do escoamento de um pixel para um de seus oito vizinhos com base na diferença de cota ponderada pela distância entre eles (Figura 2.4) obtém-se a quantidade de pixel de montante que drenam para cada um dos pixels, gerando o plano de informação que corresponde à área acumulada (Paz *et al.*, 2005).

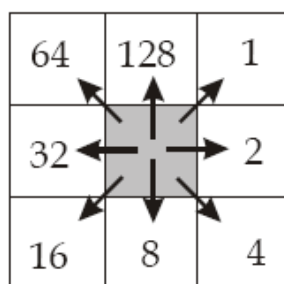


Figura 2.4 - Indicação das oito direções de fluxo possíveis para cada pixel, com os respectivos códigos

### ***Delimitação automática de bacias e sub-bacias***

A delimitação de bacias e sub-bacias consiste em um dos primeiros e mais comuns processos em análise hidrológica e ambiental. O processo automatizado oriundo do crescimento e desenvolvimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para a geração dessa característica da bacia substituiu as delimitações convencionais realizadas por meio de mapas e cartas em formato analógico, aumentando a confiabilidade e possibilitando uma reprodução dos resultados (CARVALHO, 2007).

Várias ferramentas têm sido desenvolvidas por meio de técnicas de geoprocessamento para realizarem a delimitação automática de bacias e sub-bacias hidrográficas. O trabalho de Carvalho (2007), por exemplo, realiza uma comparação entre dois métodos para delimitação automática de sub-bacias, mostrando-se o processo automatizado como uma eficiente técnica para auxiliar na caracterização física da bacia.

### ***Rede de drenagem***

A rede de drenagem se constitui em um importante indicador de alterações ocorridas na composição da paisagem de bacias hidrográficas, seja por mudanças na sua estruturação, forma ou por perda ou ganho de canais (COLLARES, 2000), e indica o grau de dissecação da superfície.

A rede de drenagem ou mapa de fluxo pode ser obtida por meio do MNT, a qual corresponde ao grupo de células onde a área acumulada supera determinado valor, e teoricamente coincide com a localização dos canais naturais de um terreno real. Em outras palavras o mapa de fluxo representa as células que recebem o escoamento de certo número de células, levando em consideração a declividade do terreno e a direção de fluxo. Conforme mostra a Figura 2.5. Nesse sentido o valor mínimo que define que a célula representará a rede de drenagem será configurado de acordo com a complexidade do estudo e também da resolução disponível do MNT.

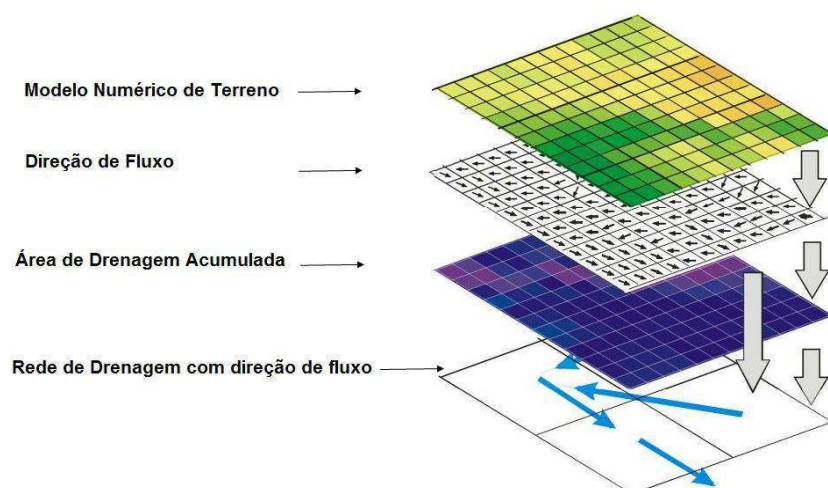


Figura 2.5 - Processo de geração de rede drenagem. Adaptado de Paz *et al.* (2005).

### 2.5.2. Aspectos técnicos e conceituais

De acordo com Chang *et al.* (2005) as incertezas da grande quantidade de dados de entrada influenciará necessariamente os resultados finais, nesse sentido, devido a complexidade dos dados espaciais é necessário o desenvolvimento de interfaces gráficas de usuário (GUI) para a diminuição das incertezas geradas pela entrada de dados, por meio de uma interface.

Com o desenvolvimento da informática várias melhorias nas linguagens e técnicas foram aplicadas para o aumento da eficiência dos softwares, inclusive o investimento em GUI. Nesse contexto os SIG absorveram diversas modificações em suas implementações fazendo com que sua integração com modelos hidrológicos alcançasse significativos avanços, principalmente na forma da integração. Assim para o entendimento claro do processo de integração, principalmente das abordagens que norteiam o assunto, é interessante o esclarecimento de alguns aspectos técnicos ligados às práticas de programação e computacionais envolvidas na integração.

#### ***Programação Orientada a Objetos (POO)***

Programação Orientada a Objetos é a programação implementada pelo envio de mensagens a objetos. Cada objeto irá responder às mensagens conhecidas por este, e cada objeto poderá enviar mensagens a outros, para que sejam atendidas, de maneira que ao final do programa, todas as mensagens enviadas foram respondidas, atingindo-se o objetivo do programa. Programação Orientada a Objetos, técnicas e artefatos ditos “orientados a objetos”

incluem linguagens, sistemas, interfaces, ambientes de desenvolvimento, bases de dados, etc. (TAKAHASHI, 1998).

### ***Arquitetura Orientada a Serviços***

A arquitetura orientada a serviços corresponde a um estilo de arquitetura cujo princípio fundamental preconiza que as funcionalidades implementadas pelas aplicações devem ser disponibilizadas na forma de serviços (KEEN *et al.*, 2004).

De acordo com Oliveira *et al.* (2008) a arquitetura orientada por serviços pode ser entendida como uma proposta de separação lógica das camadas de uma aplicação, visando a componentização da lógica do negócio, sendo essa explicitação responsável por permitir a interoperabilidade e o reuso. Nesse sentido a utilização dessa arquitetura é justificada pelas seguintes vantagens:

- ✓ Possibilita o gerenciamento automatizado de processos de negócio;
- ✓ Facilita a integração entre sistemas;
- ✓ Permite o reuso de sistemas;
- ✓ Favorece a adaptação de aplicações a mudanças tecnológicas.

### ***Web Service***

*Web Service* é uma solução utilizada na integração de sistemas e na comunicação entre aplicações diferentes. Com esta tecnologia é possível que novas aplicações possam interagir com aquelas que já existem e que sistemas desenvolvidos em plataformas diferentes sejam compatíveis. Os Web services são componentes que permitem às aplicações enviar e receber dados em formato XML. Cada aplicação pode ter a sua própria "linguagem", que é traduzida para uma linguagem universal, o formato XML. Essas aplicações tem a capacidade de interagir entre si sem a intervenção do ser humano, permitindo a automatização de tarefas que só podiam ser feitas através da interação dos humanos (CHUNG, 2003).

De acordo com Araújo e Rocha (2004) a aplicação dos *Web Services* surgiu como um novo paradigma para a criação de softwares, e tem sido explorado para criar um nível computacional sobre informações geográficas através da criação de serviços que visam a troca de informações entre clientes e servidores por meio de normas pré-definidas.

## 2.6. Abordagens de Integração SIG & MH

Um sistema baseado em computador é um conjunto ou disposição de elementos que é organizado para executar certo método, procedimento ou controle ao processar informações. Sob a ótica da computação o produto da integração entre SIG e modelos hidrológicos ou simplesmente Sistema de Apoio à Decisão Espacial - SADE é composto pelos subsistemas de software, hardware, dados e de procedimentos. O subsistema de software é composto por programas, estruturas de dados e documentação correlata que implementam o método, processo ou controle lógico do sistema. O subsistema de software pode ser classificado em software aplicativo, que executa as funções de processamento de informações, e software básico, que executa as funções de integração com outros elementos do sistema como, por exemplo, o hardware. As estratégias de desenvolvimento de SADE são metodologias para a incorporação de funções a softwares aplicativos (Pressman, 1995 apud Rafaeli Neto, 2000)

Nesse sentido os Sistemas de Informações Geográficas – SIG e os modelos hidrológicos funcionam como subsistemas que se relacionam de uma determinada maneira para atingir um objetivo específico. A forma como acontece esse relacionamento é investigada nesse trabalho e corresponde a uma etapa inicial para o processo de integração.

Desde as primeiras aplicações várias são as formas que se nomeiam a união entre esses subsistemas, sendo as mais difundidas as seguintes: *integrar* (Watkins *et al.*, 1996), *acoplar* (Goodchild *et al.* 1992), *conectar* (Watkins *et al.*, 1996) ou *interfacear* (Rodrigues & Raper, 1998).

Além das nomenclaturas que definem a integração entre SIG e modelos hidrológicos, diversas são as abordagens envolvidas no processo, abordagens essas que muitas vezes são elaboradas baseadas nas experiências dos próprios desenvolvimentos e uso do sistema pelos autores, havendo assim uma dificuldade na comparação entre abordagens de autores distintos. Nesse sentido é notável a inexistência de uma abordagem metodológica comum que possa ser suficiente para classificar a diversidade atual das aplicações do SADE.

De acordo com Martin *et al.* (2005) a ausência da padronização das terminologias, procedimentos nos formatos de desenvolvimento e intercâmbio de dados relacionados com a interface de ligação entre modelos hidrológicos e SIG está ligado com a falta de protocolos consistentes de dados e com a aparente falta de interesse pelos desenvolvedores de softwares comerciais para criação de normas universais de transferência de dados. Neste sentido são



apresentados a seguir alguns dos principais autores e suas respectivas abordagens metodológicas no processo de integração entre SIG e modelos hidrológicos.

***Stuart e Stocks (1993)***

O trabalho destes autores traz uma das primeiras tentativas de classificação das abordagens que envolvem a integração entre SIG e modelos hidrológicos. As limitações da época deste trabalho fazem com que seja apresentado o SIG unicamente como uma ferramenta para auxiliar na construção de modelos. Os autores apresentam o desenvolvimento de uma integração entre um modelo semi-distribuído (TOPMODEL) e um SIG comercial SPANS (Spatial Analysis System) através do desenvolvimento de uma ferramenta escrita na linguagem nativa do SIG para implementar elementos de entrada do modelo.

Os autores apresentam duas abordagens que caracterizam as integrações entre SIG e modelos hidrológicos: “*Loosely Coupled*” e “*Tightly Coupled*”.

O “*Loosely Coupled*” ou “acoplamento frouxo” é apresentado como um método mais flexível para o desenvolvedor, permitindo que haja modificações no código para uma melhoria em suas propriedades, principalmente na melhoria da capacidade nos cálculos matemáticos. A abordagem é caracterizada pelo funcionamento independente do SIG e o modelo. Nessa integração o SIG é utilizado para fornecer os parâmetros que são exportados para o modelo, depois da realização dos cálculos os dados são georreferenciados e reintroduzidos no SIG para a visualização. Nesse caso cada entidade é utilizada para um fim específico, não ocorrendo uma ligação entre os mesmos, pois um sistema deve ser encerrado antes da execução do outro. De acordo com os autores em relação ao investimento nos códigos existentes essa abordagem seria a melhor solução.

O “*Tightly Coupled*” ou “acoplamento firme” apresenta-se mais próximo de uma verdadeira integração. Caracteriza-se por um sistema único para o usuário final, com a presença de um modelo unificado de dados e com redução na transferência de dados. Essa abordagem está voltada para as aplicações propriamente ditas, sem preocupações com o desenvolvimento técnico ligados à modificações no código para atender algum objetivo específico, no qual o usuário não possui liberdade para tais modificações, restringindo-se apenas no uso da ferramenta integrada.

### ***Kopp (1996)***

Com uma visão voltada para o desenvolvimento da ferramenta, Kopp (1996) aborda os avanços e desafios no processo de integração de SIG e modelos hidrológicos. Os padrões da indústria de software e as ferramentas de desenvolvimento são mostrados como um dos principais fatores que influenciarão o avanço na integração entre SIG e modelos. Um fato importante levantado pelo autor refere-se à evolução do SIG que além de uma ferramenta utilizada para processamento e armazenamento de dados, passou a ser utilizado como interface gráfica de usuário (GUI) e um ambiente de desenvolvimento de aplicações.

De acordo com o autor a escolha do tipo de integração deve seguir critérios de acordo com cada aplicação. Apresenta três abordagens de integração: “*GIS based modelling*”, “*Data bridge*” e “*Embedded code*”.

A primeira abordagem envolve a utilização de ferramentas disponíveis no próprio SIG, ajustando modelos que sejam matematicamente e conceitualmente simples dentro do SIG, sem necessidade de um grande conhecimento dos desenvolvedores para essa aplicação. Consiste em uma abordagem simples, na qual o único software necessário é o SIG. De acordo com o autor, devido ao desenvolvimento de ferramentas específicas para hidrologia em SIG, essa abordagem possuía a tendência de popularizar-se.

A abordagem “*Data bridge*” é apontada como a forma mais comum de ligação entre SIG e modelos, que ocorre por meio da conversão entre os dados. Alguns desenvolvedores têm empregado esforços para a criação de programas personalizados que manipulam a transferência de dados espaciais para modelos e vice-versa.

De uma maneira mais aproximada de integração a abordagem “*Embedded code*” consiste, de uma forma geral, na inserção de um código de um programa para o outro. Devido à ausência de etapas intermediária de conversão de dados, essa abordagem permite a criação de um software mais rápido com aplicações interativas, que não era possível em outras abordagens. Uma característica fundamental dessa abordagem está relacionada com o desenvolvimento de interface de visualização (GUI) nos softwares, fazendo com que os usuários interajam com a ferramenta unicamente por meio de menus.

### ***Loague e Corwin (1998)***

Com o objetivo de avaliar a contaminação da água subterrânea por efeito de agrotóxicos, estes autores fazem utilização dos modelos PRZM-2<sup>2</sup> (*Pesticide Root Zone Model*; Mullins *et al.*, 1993), MODFLOW<sup>3</sup> (McDonald & Harbaugh, 1988) e MT3D<sup>4</sup> (Zheng, 1992) baseados em SIG.

As estratégias de ligação entre SIG e modelos ambientais mais comuns apresentadas pelos autores foram as seguintes: *loose coupling* (acoplamento livre), *tight coupling* (acoplamento firme) e abordagem de um sistema embutido.

O acoplamento livre envolve a transferência de dados de um sistema para o outro, no qual em um dos sistemas ocorre o armazenamento de um dos dados e no outro ocorre a leitura dos mesmos. O acoplamento livre apresenta como característica importante o fato da separação das funcionalidades que implementam o SIG e os que aplicam o modelos.

O acoplamento firme fornece uma interface comum para o SIG e o modelo, ou seja, o compartilhamento de informações entre os respectivos componentes é transparente. O sistema integrado passa a possuir um único banco de dados. No acoplamento firme o grau de ligação entre os modelos e o SIG passar a ser elevado, ao ponto que o modelo tem funções essencialmente parte do espaço construído na funcionalidade do SIG.

No sistema embutido o acoplamento de componentes do software ocorre dentro de um único pedido com memória partilhada, em vez de partilhar a base de dados e uma interface comum.

### ***Sui & Maggio (1999)***

Em um trabalho essencialmente analítico do processo de integração de SIG e modelos hidrológicos, os autores fazem uma análise dos avanços, problemas e desafios envolvidos no processo.

Apresentam como metodologias usuais de integração: (i) Inserir funcionalidades de SIG dentro de pacotes de modelos hidrológicos, (ii) inserir modelos hidrológicos dentro de

---

<sup>2</sup> Modelo hidrológico que simula o transporte de contaminante no solo.

<sup>3</sup> Modelo hidrológico de fluxo de água subterrânea.

<sup>4</sup> Modelo de transporte de contaminantes em 3D.

pacotes de SIG, (iii) loose coupling (acoplamento livre) e (iv) tight coupling (acoplamento firme).

“Inserir funcionalidades de SIG dentro de pacotes de modelos hidrológicos” é adotada principalmente por modeladores hidrológicos que fazem uso de SIG unicamente como ferramenta de mapeamento e usualmente consideram o SIG conceitualmente irrelevante para os fundamentos dos modelos hidrológicos. Possui como desvantagem os resultados de visualização e gestão dos dados que ficam muito abaixo dos softwares comercialmente disponíveis de SIG. Os esforços de programação também tendem a ser intensos e muitas vezes chegam a ser redundantes.

“Inserir modelos hidrológicos dentro de pacotes de SIG” é aplicada principalmente por meio de pacotes de software que são utilizados para uma variedade de necessidades na modelagem hidrológica, porém de maneira simplista e, segundo estes autores, esses modelos tendem a não se tornar padrão para a indústria e/ou não serem validados.

Acoplamento livre na visão de Sui e Maggio (1999) é aquele em que os modelos hidrológicos e os SIG são integrados através da troca de dados no formato ASCII ou binários, entre vários pacotes de software e sem uma interface de usuário comum. Essa abordagem caracteriza-se por pouco esforço na programação computacional, concentrando maior atenção no processo de troca de dados. Apresenta como vantagem a possibilidade de evitar a programação redundante, mas as conversões de dados entre diferentes pacotes podem ser tediosas e propensas a erros.

O acoplamento firme por sua vez caracteriza-se pela incorporação de modelos hidrológicos dentro de um pacote de SIG comercial quer através de macro ou de programação convencional. Esse tipo de integração apresenta um avanço em relação aos outros tipos de integração, uma vez que os usuários passaram a demandar aplicações específicas. O desenvolvimento de interfaces personalizadas estimulou a criação de uma grande variedade de pacotes de softwares, porém em linguagens, que de acordo com os autores, raramente são suficientemente potentes para implementar os modelos de forma sofisticada. De acordo com Goodchild *et al.* (1992) o desafio passa a ser o desenvolvimento de novos mecanismos para que todos os usuários tenham acesso a dados espaciais sem necessidade de se conhecer as estruturas de dados utilizados especialmente em SIG.

### ***Rafaelli Neto (2000)***

Um dos maiores problemas enfrentados em diversas regiões consiste na ocorrência das enchentes que são fenômenos de natureza espacial e temporal. Um Sistema de Suporte a Decisão Espacial (SADE) é sem dúvida uma poderosa ferramenta que auxilia no Gerenciamento de Desastres Naturais (GDN). Nesse sentido Rafaelli Neto (2000) desenvolveu um modelo conceitual de sistema de apoio à decisão espacial para gestão de desastres por inundações.

A metodologia proposta desenvolveu uma taxonomia por meio de três critérios de categorias: modelagem científica, dados e controle de integração. O primeiro diferencia quanto à proximidade física dos subsistemas envolvidos, sendo um sistema independente quando a proximidade entre eles é nula, conhecidos como “caixa preta”. A proximidade física é máxima quando um subsistema é incorporado no outro, fazendo como o código de um dos softwares absorva totalmente o código do outro. O critério de dados define as estratégias de acordo com os dispositivos e mecanismos utilizados para operar e acomodar os dados do subsistema. Podendo ser por meio de compartilhamento de dados ou por meio da transferência dos dados. A última categoria discrimina as estratégias conforme o nível de proximidade física entre os mecanismos de controle do processo de integração. O controle poderá ser incorporado no código de um dos sistemas.

Nesse sentido com base nas categorias descritas anteriormente, o autor define quatro classes de acoplamento: livre, próximo, rígido e pleno.

O acoplamento livre ou “loose coupling” é caracterizado por possuir uma modelagem científica independente, na qual, ocorre a transferência de dados entre os subsistemas e possui um controle da integração independente.

O acoplamento próximo ou “close coupling” também possui uma modelagem científica independente, funciona com transferência de dados e possui um controle de integração incorporado.

O acoplamento rígido ou “tight coupling” possui uma modelagem científica independente, apresentam um compartilhamento de dados e possui um controle de integração incorporado.

A integração plena ou “full integration” apresenta modelagem científica incorporada, possui compartilhamento dos dados e um controle de integração incorporado.

### ***Tsou e Whittemore (2001)***

Nesse trabalho ocorre a investigação do comportamento da água subterrânea do sudoeste do Kansas através da integração dos modelos MODFLOW e MT3D com o SIG ArcView<sup>5</sup>. Os autores propõem duas classificações de integração entre SIG e modelos hidrológicos: SIG/Modelo e Modelo/SIG.

A primeira abordagem SIG/Modelo ocorre através da utilização de um SIG para um pré e pós-tratamento de dados para ser inserido no modelo hidrológico e para posteriormente obterem-se os resultados de forma espacializada. De forma prática essa abordagem ocorre da seguinte forma, os dados armazenados em um banco de dados do SIG são transferidos como dados de entrada do modelo hidrológico e, após a simulação, os dados obtidos são transferidos para o SIG para que se possam visualizar os resultados.

A segunda abordagem consiste em inserir as equações que regem o comportamento do transporte do solo ou da água dentro do SIG, seja através de uma mudança no código fonte ou através de implementação de macros. Ao contrário da abordagem anterior, nenhuma conversão de dados acontece nessa abordagem, porém esse método requer uma significativa quantidade de modificações no desenvolvimento e muitas vezes a incorporação de procedimentos numéricos por muitas vezes complicados.

### ***Aplicações convencionais***

Muitos trabalhos se destacam pela forma tradicional de utilização do SIG como forma de visualização dos resultados do modelo hidrológico ou que não apresentam uma interface comum entre os dois sistemas.

Anderson (1998) integrou os softwares AutoCad v.12 (CADD - Computer Aided Design and Draft), ArcCAD v.11.2 e ArcView v.2.1b (SIG) com os softwares de modelagem ambiental 3DFEMWATER (A Three-Dimensional Finite Element Model of WATER Flow through Saturated-Unsaturated Media), o qual simula o fluxo de água na subsuperfície, e 3DLEWASTE (A Hybrid Three-Dimensional Lagrangian-Eulerian Element Model of

---

<sup>5</sup> ArcView é um SIG desktop desenvolvido pela Environmental Systems Research Institute, Inc.- (ESRI)

WASTE Transport through Saturated-Unsaturated Media), que modela o transporte de contaminantes.

Para realizar a integração o usuário deve proceder algumas operações básicas mapa-base no CADD 3D, construir o banco de dados no SIG, estabelecer o grid de elementos finitos para a área modelada e entrar com os pontos nodais no CADD 3D, ativar o modelo ambiental, converter os arquivos de saída ASCII para o banco de dados do SIG, criar isolinhas e renderizá-las a partir destes pontos, criar os temas do SIG (ArcCad) a partir das entidades do CADD, ligar o banco de dados aos temas do SIG, desenvolver análises espaciais, desenvolver saídas gráficas.

O WATERSHED (WATER, Soil, and Hydro-Environmental Decision Support System) corresponde a um sistema de apoio a decisão espacial, desenvolvido com o intuito de auxiliar no gerenciamento de bacias hidrográficas, dando suporte, sobretudo na solução de problemas ligados com a qualidade da água, afetada por fontes de poluição não pontuais. Esse sistema integra um SIG (GRASS - Geographic Resource Analysis Support System-USACERL, 1993) com um software aplicativo do modelo AGNPS (Agricultural Non-Point Source Pollution) através de um gerador de arquivo de entrada de dados no AGNPS (OSMOND *et al.*, 1997).

Com o objetivo de descrever um sistema de modelagem de qualidade de água em um ambiente SIG, Zeilhofer *et al.* (2003) apresentam uma integração entre o modelo QUAL2E<sup>6</sup> e o SIG ArcView (ESRI). Os componentes foram desenvolvidos para uma análise da Bacia do Rio Cuiabá, como parte do “Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental da Bacia do Rio Cuiabá - SIBAC”. A concepção do sistema foi realizada por meio da criação de um banco de dados externo ao SIG implementado em MS Access, esse banco está vinculado ao ambiente SIG a partir de uma conexão ODBC (SQL-connect) sendo utilizado para importação, digitação, armazenamento e processamento de dados alfanuméricos de: vazão, qualidade de água e climatológicos, ou seja, parte de um pré-processamento é realizado dentro do próprio banco de dados por meio de uma interface do SIBAC. O SIG é utilizado para criação de planos de informações (PI's), principalmente ligado com a caracterização física da bacia por meio do MNT, que compreende a outra etapa de pré-processamento. Alguns dados do modelo necessitam serem inseridos interativamente no sistema, como valores de velocidade do escoamento, vazão e profundidade dos canais para cálculo do coeficiente de dispersão

---

<sup>6</sup> Modelo de qualidade de água desenvolvido pela USEPA (1985).

longitudinal devido à ausência de uma automatização na integração com o modelo. Para a execução do modelo o usuário fornece os dados pré-processados e escolhe os trechos a serem avaliados, em seguida o script inicializa uma rotina externa (qualtran.exe) que gera um arquivo de entrada no formato ASCII (qualinp.run). Na fase final o usuário é solicitado a executar o QUAL2E, que gera um arquivo ASCII de saída, que é acessado pelo módulo de visualização (pós-processamento).

Yang *et al.* (1999) e Marsili-Libelli *et al.* (2001) fizeram avaliação da qualidade de água utilizando dados oriundos de sensoriamento remoto para entrada no modelo, o que permitiu a avaliação de uma grande área. Ambos os trabalhos utilizaram o MATLAB para atuar como ponte entre os resultados do modelo e o SIG. O modelo utilizado foi o QUAL2E, um modelo de qualidade de água, que devido à sua complexidade da simulação não poderia ser executado dentro de um ambiente SIG, o qual se utilizou o ERDAS.

### ***Experiências Recentes***

Com o desenvolvimento da computação e da Tecnologia da Informação novos conceitos de programação foram implementados nos softwares. Além do avanço computacional a demanda por novas funcionalidades aplicadas em sistema de apoio à decisão também cresceu trazendo como consequência a evolução dos sistemas. Nesse contexto, o acoplamento entre modelos hidrológicos e Sistemas de Informações Geográficas reflete este avanço tecnológico (Whiteaker & Maidment, 2004; Fedra, 2006). Algumas destas experiências são apresentadas a seguir.

### ***Utilização de SIG Livres***

Apesar da grande capacidade dos sistemas proprietários e comerciais, a busca por novos produtos que permitam a independência dos onerosos softwares vem crescendo na área das Geotecnologias. De acordo com Uchoa e Ferreira (2004) a criação do consórcio Open Geospatial (OGC4 Open Geospatial Consortium) e a revolução do software livre (Free Software Foundation) são movimentos que quebraram os paradigmas dos softwares proprietários, através das especificações estabelecidas que definem padrões que visam a interoperabilidade de ambientes. A quebra dos paradigmas é resultado da parceria voluntária entre diversos órgãos e instituições que aprimoraram a tecnologia existente.



O acesso ao código-fonte, um dos pré-requisitos para o software ser considerado “livre”, é um fator primordial que fez com que diversos pesquisadores pudessem desenvolver aplicações específicas para sua área de interesse. Nesse sentido alguns trabalhos têm mostrado o interesse na utilização de software livre no desenvolvimento de integrações entre modelos hidrológicos e SIG. Cirilo *et al.* (1997) implementaram um sistema de informações sobre recursos hídricos do estado de Pernambuco para a tomada de decisões político-administrativa e para democratização das informações.

Almeida (2006) desenvolveu um Sistema de Apoio à Decisão-DSS o ARENA (Análise de Recursos Naturais) que é composto por um Sistema de Informações Geográficas – SIG, o modelo hidrológico AÇUMOD, uma base de dados georeferenciada e módulos de acesso aos dados. Para o desenvolvimento do sistema, o SIG utilizado foi o JUMP (*Java Unified Mapping Platform*), que trata-se de um OpenGIS de código aberto que foi desenvolvido pela *Vivid Solutions*, uma empresa canadense. A utilização de um OpenGIS foi motivada por diversos fatores entre eles a avaliação de uma integração com SIG livre e a liberdade de modificação no código fonte para realizar o desenvolvimento necessário. A integração entre os modelos hidrológicos e o SIG mostrou-se eficiente, apesar da deficiência encontrada no SIG pela ausência de um ambiente de preparação e edição de camadas de informações que pode prejudicar tanto o processo de simulação quanto à análise espacial. O trabalho de Almeida (2006) avança na abordagem de acoplamento segundo Tsou & Whittemore (2001) indo além da utilização do SIG como pré e pós-processador de dados para o modelo realizando a simulação dentro do próprio sistema acoplado.

Com o objetivo de integrar diferentes modelos hidrológicos de transformação da chuva em vazão a uma base unificada Soares Júnior *et al.* (2008) apresentam uma proposta para criação de um sistema de apoio à decisão que acoplado a um SIG. Esse sistema possibilitará ao usuário acessar os modelos chuva-vazão e também os dados hidrológicos fornecidos pela Agência Nacional de Água (ANA). Todo esse trabalho faz parte do processo de implementação do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e poderá auxiliar na tomada de decisão sobre recursos hídricos em todo país.

Os modelos chuva-vazão acoplados ao SNIRH são do tipo concentrado e distribuído, em várias escalas temporais, possuindo uma interface que permite a extração automática de informações primárias e secundárias necessárias ao processamento dos modelos (UFPB, 2009).

Para o desenvolvimento dessa ferramenta optou-se pelo uso de um SIG livre e de código aberto (*OpenGIS*) que utilizasse os padrões e normas da OGC – *Open Geospatial Consortium* justificando-se pelo fato de ser um sistema de domínio público. O SIG utilizado foi o OpenJUMP que utiliza o código JUMP. De acordo com o autor as vantagens relacionadas com a utilização desse software são: o OpenJUMP pode acessar mapas remotamente através dos serviços padronizados do consórcio OGC – Open Geospatial Consortium, ou seja, através de WMS (Web Mapping Service), que poderá ser utilizada para o acesso da base cartográfica do SNIRH; a segunda que o mesmo permite a integração de aplicativos (plugins) desenvolvidos por usuários do sistema. Esta é a forma que outros modelos vêm sendo integrados ao OpenJUMP; e a terceira é que o ele foi desenvolvido em linguagem Java, baseado em conceitos da Programação Orientada a Objetos, o que facilita o acesso a seus códigos-fonte (UFPB, 2009).

A forma escolhida para o acoplamento dos modelos hidrológicos ao SIG foi através da utilização do SIG unicamente como pré e pós-processador dos dados, ou seja, foi desenvolvido um *plugin* internamente ao OpenJUMP de modo que apenas a forma de entrada e saída de dados dos modelos foi reestruturada, sendo inviável o acoplamento das equações dos modelos dentro da estrutura do SIG, pois caso isso ocorresse seria necessária a reimplementação de todos os modelos na linguagem Java (SOARES JÚNIOR *et al.*, 2008).

### ***Desenvolvimento de Extensões***

Apesar das vantagens da utilização de softwares livres, muitas vezes a escolha desse tipo de solução pode acarretar em outras conseqüências no desenvolvimento como a redução das funcionalidades para análise espaciais ou modelagem distribuída (CIRILO *et al.*, 1997), além da exigência de usuários experientes para tais funcionalidades. Nesse sentido alguns autores têm apontado para o desenvolvimento de aplicações a partir da programação de um software SIG comercial. Estes sistemas possuem linguagens de macro, que são voltadas para usuários pouco experientes em programação, permitindo abstrações de alto nível sem a necessidade de preocupação com detalhes do armazenamento interno ou detalhes de implementação (RAFAELI NETO, 2000).

Nessa mesma linha destaca-se o desenvolvimento de ferramentas que são integradas dentro de SIG comerciais para aplicação na gestão dos recursos hídricos. Essas ferramentas são desenvolvidas com o intuito de auxiliar principalmente na manipulação dos parâmetros de

entrada dos modelos acoplados, seja por meio de uma interface de acesso ao diretório ou através da geração dos parâmetros de forma automatizada.

O AGWA (Automated Geospatial Watershed Assessment) corresponde a um conjunto de ferramentas para auxiliar na modelagem hidrológica inseridas em um Sistema de Informações Geográficas. Foi desenvolvida através da cooperação de duas Universidades e duas agências governamentais dos Estados Unidos (MILLER *et al.*, 2007) e permite a delimitação e discretização automática de bacias e sub-bacias hidrográficas, além da geração de diversos cenários e possibilitando a comparação entre os cenários gerados. Os modelos hidrológicos implementados no AGWA são o SWAT (Soil Water Assessment Tool) e KINEROS (KINematic Runoff and EROSION Model), tendo sido desenvolvido como uma extensão para a plataforma ArcView 3.2 e ArcGIS 9.2 (MILLER *et al.*, 2007).

O AGWA consiste em uma ferramenta de análise do sistema hidrológico em geral, provendo condições para avaliação de bacias hidrográficas, mudanças no uso da terra e cobertura vegetal e condições hidrológicas, sendo de grande importância no processo de tomada de decisão na avaliação de impactos na bacia de estudo, uma vez que o mesmo permite a análise espacial com a criação de diversos cenários futuros e suas comparações (MILLER *et al.*, 2007).

A AGWA é um software de código aberto, distribuído gratuitamente pela internet ([www.tucson.ars.ag.gov/agwa/](http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/)) e foi desenvolvido como uma extensão para a plataforma ArcGIS em diversas versões. Apresenta como principal característica o fato de propor o auxílio na discretização, parametrização e calibração automática de modelos hidrológicos, desenvolvido com o intuito de proporcionar uma metodologia simples, direta e sistemática, utilizando dados de SIG como entrada. Os modelos hidrológicos implementados no AGWA são o SWAT (Soil Water Assessment Tool) e KINEROS (KINematic Runoff and EROSION Model). Os dados requeridos por ambos os modelos incluem modelo digital de elevação, mapas de uso e cobertura da terra, mapas de solo e dados de precipitação (MILLER *et al.*, 2007).

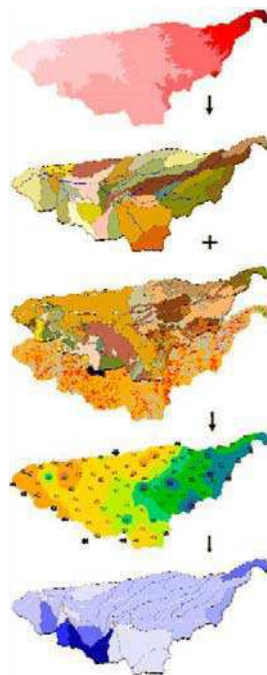


Figura 2.6 - Esquema ilustrativo das etapas da modelagem utilizando AGWA adaptado de Miller *et al.* (2007).

A execução do AGWA corresponde a um conjunto de processos que são bem definidos por Miller *et al.* (2007) podendo ser dividida em quatro etapas:

- ✓ Delimitação e subdivisão da área de drenagem da bacia;
- ✓ Parametrização dos tipos de solo e uso e cobertura da terra;
- ✓ Entrada de dados meteorológicos;
- ✓ Execução do modelo.

O HEC-GeoHMS é outra ferramenta que auxilia na modelagem hidrológica e corresponde a uma extensão para o ArcView 3.x utilizando o modelo hidrológico HEC-HMS desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers dos Estados Unidos da América. O HEC-GeoHMS no geral permite a delimitação automática da bacia com base no MNT ou em imagem de satélite, gerando os dados da caracterização física da bacia para entrada no modelo (SANTOS *et al.*, 2006).

Santos *et al.* (2006) utilizou a extensão HEC-GeoHMS com o objetivo de realizar um pré-processamento de dados de entrada (uso do solo, cobertura, solo, precipitação, topografia) e depois dos pré-processamento os dados são simulados no modelo Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC – HMS). Triana & Labadie (2007) apresentam GEO-MODSIM, que corresponde a uma extensão do MODSIM, que funciona dentro do

ArcGIS, dando suporte na entrada, análise e simulação dos modelos QUAL2E e MODFLOW com o objetivo de avaliar a bacia hidrográfica.

O programa BASINS 3.0 (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint) é um SIG de análise ambiental para uso em bacias hidrográficas que foi desenvolvido inicialmente pela EPA (Environmental Protection Agency) dos EUA. O programa além de dispor de ferramentas para automatização dos processos na modelagem permite ao usuário executar inúmeras avaliações hidrológicas, comparações qualitativas e quantitativas, impactos no uso do solo, podendo representar estes dados na forma de tabelas, gráficos e mapas. O BASINS 3.0 inclui os seguintes modelos HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran), Qual2E (Enhanced Stream Water Quality Model), Pload (Pollutant Loading Application Overview) e SWAT (Soil Water Assessment Tool). Todos os componentes do sistema BASINS 3.0 são integrados dentro de um único SIG, o ArcView GIS 3.2 (GROSSI, 2003).

O ArcGIS Hydro Data Model (ArcHYDRO) é um modelo de dados geográfico que descreve o sistema hidrológico. Um modelo de dados corresponde a um tipo de conceito expressado por meio de uma estrutura de dados, que descreve de forma simplificada a realidade por meio da ligação entre tabelas e um banco de dados em uma interface de SIG. Nesse sentido, o ArcHydro corresponde a mais uma ferramenta desenvolvida como extensão do ArcGIS que auxilia no processo de modelagem hidrológica através da integração de informações temporais e geoespaciais dentro de uma estrutura permitindo a caracterização do sistema hidrológico através de múltiplos modelos que estão inseridos dentro do Arc Hydro, além de ferramentas de análise e tomada de decisão (MAIDMENT, 2002).

Além dessas ferramentas citadas anteriormente, outros trabalhos (SIBAC, SANTOS & ZEILHOFER, 2005; WinVAST, CHANG *et al.*, 2005) têm demonstrado o interesse no desenvolvimento de extensões que além de auxiliarem no processo de automatização da manipulação dos dados envolvidos na modelagem, proporciona uma melhoria na qualidade das simulações, uma vez que essas extensões são desenvolvidas especificamente para essas aplicações.

Santos *et al.* (1999) e Cavalcante & Teixeira (2004) utilizaram a equação universal de perda de solo (USLE) dentro de um ambiente SIG por meio do ArcView associado à extensão *Spatial Analyst*. Esse modelo apresenta uma estrutura simples, e por meio do SIG

ocorreu o pré-processamento dos dados de entrada e o pós-processamento, gerando os resultados de forma espacializada.

Com o objetivo de fazer uma avaliação da qualidade de água, Tsanis e Boyle (2001) desenvolveram um sistema que utilizou um modelo em duas dimensões para avaliar o fluxo e o transporte de poluentes em lagos e em áreas costeiras. O acoplamento entre o modelo IDOR<sup>2D</sup> que funciona como extensão do ArcView, foi realizado através da utilização da linguagem de programação AVENUE que permitiu ao usuário a execução de rotinas em uma única interface bem definida, facilitando o processo de simulação do modelo.

Al-Abed *et al.* (2005) utilizam os modelos hidrológicos Spatial Water Budget Model (SWBM)<sup>7</sup> e Hydrologic Engineering Centre–Hydrologic Modelling System (HEC-HMS)<sup>8</sup> para serem aplicados no gerenciamento dos recursos hídricos da bacia do Rio Zarca na Jordânia. Aplicam-se nesse caso duas abordagens distintas no processo de integração, uma com compartilhamento de dados utilizando o modelo SWBM e com o modelo HEC-HMS junto com sua extensão HEC-GeoHMS, utiliza-se uma abordagem sem compartilhamento de dados.

De acordo com Pullar e Springer (2000) a principal limitação da integração consiste no fato de o SIG não realizar o cálculo da circulação da água em toda a superfície terrestre. Na aplicação apresentada pelos autores foi utilizado o modelo AGNPS com o ArcView e mostrou a deficiência dos algoritmos existentes no SIG para representar os caminhos de escoamento para todo o terreno.

### ***Interoperabilidade***

A interoperabilidade pode ser definida de várias formas. Do ponto de vista dos SIG o termo pode estar ligado aos seguintes fatores: transparência na indústria de software, livre troca de dados entre os sistemas, interface de usuário comum, simplificação nos formatos e padrões da indústria e transparência nos detalhes de implementação. Em fim a interoperabilidade visa facilidade na comunicação e transferências de dados entre os diversos SIG existente por meio de uma padronização dos sistemas (GOODCHILD *et al.*, 1997).

---

<sup>7</sup> Crop Modeling Systems Laboratory of the University of Florida

<sup>8</sup> US Army Corps of Engineers dos Estados Unidos da América

Nesse contexto vários trabalhos têm buscado o avanço no desenvolvimento dos SIG por meio de novas arquiteturas voltadas para a interoperabilidade e trazendo para dentro do sistema integrado funcionalidades que promovem a eficiência da modelagem.

Vários autores tem optado pela implementação da integração entre modelos hidrológicos e SIG baseados nos conceitos de Programação Orientada a Objetos (POO). (FEDRA, 1996; SANTOS & ZEILHOFER, 2005). De acordo com Almeida (2006) os aplicativos desenvolvidos por meio desse conceito “procuram descrever em forma de classes, os sistemas tais como a realidade, sendo os componentes de um sistema representados por classes e pacotes (conjunto de classes com finalidade comum). As classes procuram representar entidades artificiais ou naturais tal como estas se encontram dispostas em seus ambientes.”

Em uma aplicação superior à programação orientada a objetos o desenvolvimento baseado em componentes permite aplicações serem confeccionadas a partir de componentes pré-construídos ao invés de desenvolvê-las a partir do zero. As aplicações baseadas em componentes constituem-se um excelente caminho para a integração entre modelos hidrológicos e SIG, trazendo diversos benefícios para o sistema integrado, como por exemplo, a flexibilidade de substituição dos componentes mais adequados no sistema integrado e também a união de componentes pré-construídos para a simulação de diferentes cenários (BERNARD & KRUGER, 2000; WESTERVELT & SHAPIRO, 2000; FENG & SOROKINE, 2001).

Fallahi *et al.* (2008) mostra que a arquitetura orientada a serviços em um ambiente com um acoplamento frouxo consiste em uma nova forma de acoplamento de serviços de SIG na modelagem ambiental. Nesse trabalho é definida uma ontologia para o desenvolvimento de sistemas em formato de serviços por meio de uma padronização da arquitetura do sistema, visando à interoperabilidade semântica entre o SIG e a modelagem ambiental.

Utilizando-se da arquitetura orientada a serviços a *Web Service* tem sido uma aplicação muito encontrada na integração entre modelos hidrológicos e SIG. Wang *et al.* (2007) realizaram a integração entre o modelo de água subterrânea MODFLOW e MapGIS, um SIG desenvolvido pela China Geoscience University (Wuhan). Além da integração entre o modelo e o SIG foi desenvolvida uma plataforma de integração para a internet no qual os dados com informações temporais e espaciais ficariam disponíveis via WEB, facilitando a manipulação dos dados e conseqüentemente auxiliando na modelagem hidrológica. A

utilização da *web service* no desenvolvimento de Sistema de apoio a decisão tem sido comumente aplicado, devido á facilitação de acesso pelos usuários, nesse sentido Fedra (2002) apresenta o WaterWare, um sistema de informação com uma base de modelos de simulação inseridos em uma plataforma de SIG que faz avaliação de qualidade e quantidade de água, fazendo assimilação de dados em tempo real via WEB. Rao *et al.* (2007) apresenta o desenvolvimento de um protótipo de um sistema de apoio a decisão espacial via WEB para auxiliar o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) na gestão dos recursos hídricos e qualidade ambiental com a integração do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na plataforma do ArcIMS.



### **3 METODOLOGIA**

A metodologia para o desenvolvimento deste trabalho envolve inicialmente uma sistematização das abordagens de integração investigadas e apresentadas no capítulo anterior, através do desenvolvimento de critérios de classificação que permitam enquadrar estas e outras abordagens de forma a facilitar a compreensão e conseqüente adoção das mesmas. Num segundo momento este trabalho estabelece uma análise comparativa entre duas das classes de integração definidas através de um estudo de caso.

#### **3.1 Sistematização das abordagens de integração**

De acordo com Fedra (2006) a escolha da abordagem e os instrumentos utilizados no processo dependem do problema a ser solucionado, das informações e dos dados, além do tempo e recursos disponíveis em cada caso, não havendo uma melhor ou pior abordagem, mas sim a mais adequada. Nesse sentido a abordagem deve proporcionar informações suficientes para que o usuário proceda à escolha mais adequada para sua aplicação.

É apresentada uma sistematização das abordagens existentes de forma a facilitar a compreensão tanto das práticas que já vem sendo aplicadas desde as primeiras tentativas de integração, bem como as tendências futuras observadas. A importância desta sistematização das abordagens deve-se ao fato de que na literatura existente há uma grande diversidade de aplicações com maneiras diferenciadas de propor tal integração, dificultando muitas vezes a escolha por parte de pesquisadores e usuários.

A partir da extensa revisão bibliográfica realizada os seguintes critérios de classificação foram estabelecidos para o estudo destas abordagens de integração (Tabela 3.1).

- ✓ Relacionamento entre os dados;
- ✓ Modificação no código fonte;
- ✓ Grau de complexidade.

Tabela 3.1 - Critérios de classificação estabelecidos

<i><b>Critério</b></i>	<i><b>Classificação</b></i>	<i><b>Sub-classificação 1</b></i>	<i><b>Sub-classificação 2</b></i>
<i><b>Relacionamento de Dados</b></i>	Com compartilhamento		
	Sem compartilhamento		
<i><b>Modificação no código fonte</b></i>	Integração externa		
	Integração Interna	Modelo no SIG	Conectado
		SIG no modelo	Embutido
<i><b>Grau de complexidade</b></i>	Integração Básica		
	Integração Avançada		

### 3.1.1 Quanto ao relacionamento entre os dados

Essa abordagem classifica o acoplamento entre subsistemas de acordo com a proximidade entre os dados. Segundo Rafaeli Neto (2000), o compartilhamento de dados entre os subsistemas define o seu nível de proximidade lógica. A proximidade lógica está ligada com a forma de relacionamento entre os dados dos subsistemas. O Banco de Dados é o fator principal que influencia nesse tipo de caracterização, pois a relação que os dados têm com o banco é que determinará a classificação da integração.

Nesse sentido esse critério é subdividido em duas classes (Figura 3.1)

- ✓ Integração sem compartilhamento de dados
- ✓ Integração com compartilhamento de dados

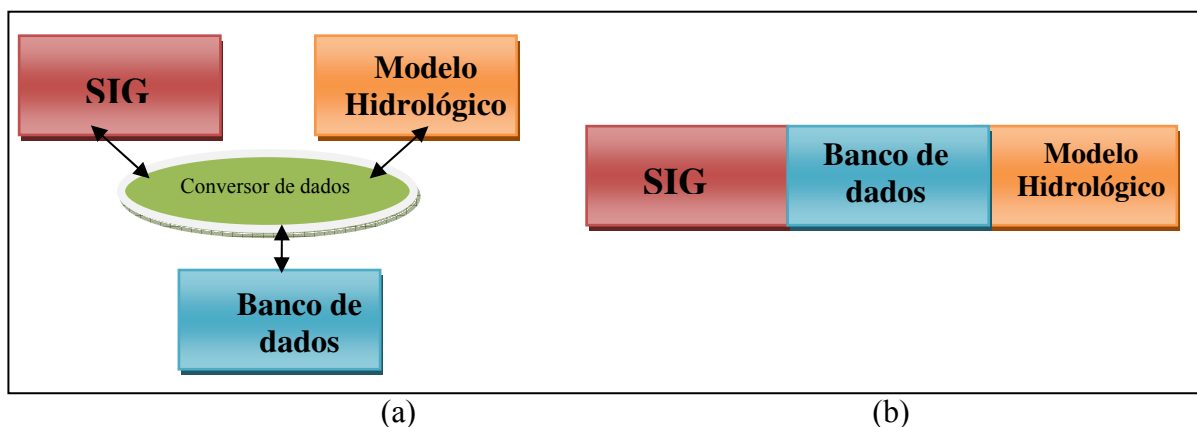


Figura 3.1 – Tipos de integração: a) Sem compartilhamento b) Com compartilhamento

### **3.1.1.1 Integração sem compartilhamento de dados**

Nesse caso a proximidade lógica é mínima ou nula, pois antes de serem utilizados pelos subsistemas, os dados são extraídos da estrutura de armazenamento (banco de dados ou memória) para um ou mais arquivos intermediários. Tais arquivos funcionam como ferramentas de modificação de formatos e estruturas para que os dados possam ser lidos pelo outro sistema. Em sistemas integrados que se enquadram nessa classe não existe um banco de dados único para o sistema acoplado, havendo necessidade de uma ou mais ferramenta (software) que por meio de uma decodificação permitem com que haja a transferência de dados do modelo para o SIG ou vice-versa.

O processo que envolve essa transferência de dados está relacionado com os diferentes formatos de entrada/saída que alguns modelos hidrológicos e os SIG possuem sendo necessária uma padronização dos mesmos para que haja a ligação. Neste sentido de acordo com Ramirez e Souza (2007) o banco de dados do SIG funcionará como gerenciador desses dados.

O trabalho de Anderson (1998) conforme descrito anteriormente também apresenta características que o enquadra nessa classificação “sem compartilhamento”.

### **3.1.1.2 Integração com compartilhamento**

Ocorre quando a proximidade lógica é máxima, ou seja, um subsistema acessa diretamente os dados armazenados conforme o modelo e a estrutura de dados do outro subsistema. Os dados acessados ficam imediatamente disponíveis para uso, sem necessidade de operações intermediárias de conversão ou tradução. Nesse tipo de abordagem todos os processos envolvidos com a manipulação e transferências dos dados relacionados com a modelagem permanecem ocultos do usuário final. Nesse caso diz-se que existe um compartilhamento entre os dados no sistema integrado.

A comunicação automática do SIG com o modelo, proporcionando a troca de dados automatizada, melhorando o desempenho computacional entre os dois sistemas de software, traduzindo-se em um ambiente de modelagem mais sofisticado (Martin, 2005).

### **3.1.2 Quanto à modificação no código fonte**

A integração entre um modelo hidrológico e um SIG tem se caracterizado sobretudo pela tecnologia presente no sistema. Um ambiente computacional avançado é um fator de grande importância para a eficiência do sistema.

O modelo e o SIG muitas vezes encontram-se em ambientes computacionais distintos, sendo necessário um ajuste nessa estrutura para que possa ser realizado o acoplamento entre as ferramentas. Nesse sentido foi estabelecido um critério que levasse em consideração a modificação no código fonte nos softwares envolvidos, de modo que fosse caracterizado essa forma de integração. Esse critério por sua vez foi dividido em duas formas: *Integração externa e Integração interna*.

#### **3.1.2.1 Integração externa**

Nessa classe não existem modificações no código fonte, assim o SIG e o modelo funcionam independentes, ou seja, não existe interface comum entre os dois subsistemas, havendo apenas uma transferência de dados. De uma maneira geral o processo ocorre conforme a Figura 3.2, no qual o SIG produz a entrada dos parâmetros relacionados com o modelo e gera como saída um arquivo que muitas vezes não se encontra compatível com a entrada do modelo hidrológico, sendo necessária a conversão do mesmo e após esse processo o arquivo de saída transforma-se em entrada do modelo no qual ocorre a execução. No processo seguinte os resultados da modelagem são gerados e são finalmente processados pelo SIG, no qual ocorre a espacialização dos resultados.

A integração externa apresenta um baixo esforço na programação, o que significa vantagem para usuários não avançados além da redução do custo e do tempo necessários para o desenvolvimento de sistemas sob essa abordagem. Como visto na Figura 3.2 o processamento relacionado com a compatibilização entre os diversos formatos dos arquivos de entrada para que haja a transferência dos dados e conseqüentemente a realização da simulação não ocorre de forma automática. Essa característica faz com que essa forma de integração proporcione uma maior vulnerabilidade quanto aos resultados da modelagem, uma vez que o processamento e conversão dos dados envolvidos para um determinado padrão em comum proporcionam uma maior susceptibilidade ao erro. Outra ineficiência dessa abordagem está relacionada com o nível de armazenamento e no desempenho do sistema.

Os arquivos de transferência configuram dispositivos de duplicação de armazenamento dos dados que serão utilizados pelos subsistemas. A construção destes arquivos usualmente exige operações de conversão além das operações rotineiras de leitura/gravação. A execução repetida de seqüências de transferência de dados em arquivos pode ser lenta e podem ser necessárias muitas operações de depuração para assegurar que os dados transferidos entre os subsistemas estejam corretos (Watkins *et al.*, 1996).

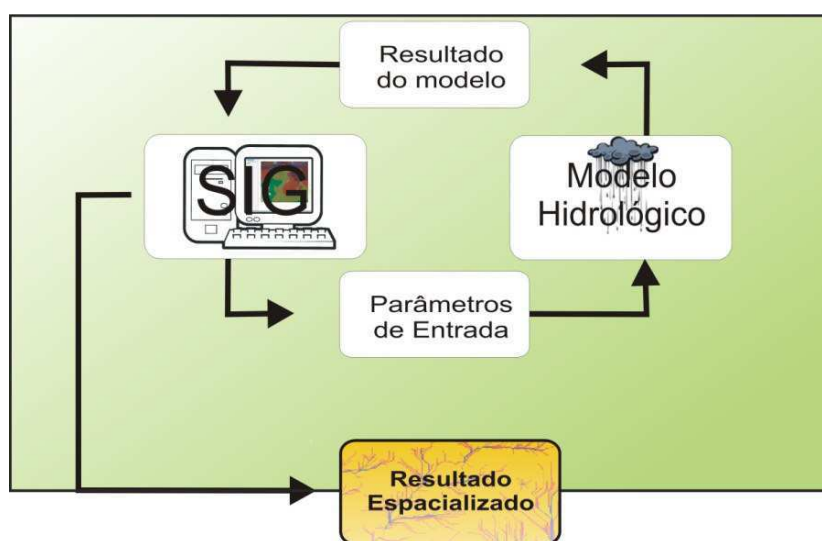


Figura 3.2 – Esquema ilustrativo da Integração externa.

Com base nas implementações propostas por Yang *et al.* (1999) e Marsili-Libelli *et al.* (2001), os seus trabalhos se enquadram nessa metodologia. De acordo com Martin *et al.* (2005) esse tipo de ligação impede que os usuários possam utilizar todo o potencial do SIG.

### 3.1.2.2 Integração interna

É caracterizada pela modificação no código fonte, seja pela mudança significativa no código ou por meio de uma linguagem compatível entre as duas tecnologias, de forma que haja uma interface comum entre os subsistemas. Quando se trata de uma interface comum, são notórios os significativos avanços no desenvolvimento de interface gráfica de usuário (GUI). Uma GUI auxilia o usuário na manipulação dos dados envolvidos, transformando um processo complexo em uma interface gráfica de fácil manipulação. Uma grande melhoria quando se compara com os modelos numéricos desenvolvidos em interface de linhas de comando (CLI) no FORTRAN (MARTIN *et al.*, 2005).

As metodologias que envolvem o desenvolvimento de uma integração interna têm passado por várias modificações e avanços, incluindo a implementação de arquiteturas mais acessíveis, permitindo o acoplamento de novas funcionalidades e ferramentas, trazendo como consequência uma melhoria no comportamento da modelagem. A forma como ocorre a modificação no código fonte depende sobretudo da equipe de desenvolvimento, nesse sentido, é essencial um elevado nível de conhecimento em programação para que haja êxito no sistema.

O objetivo da aplicação é um pré-requisito do desenvolvimento, uma vez que existe grande variabilidade da forma de se realizar modificações no código fonte. Alguns sistemas de apoio à decisão espaciais principalmente os governamentais (CIRILO *et al.*, 1997; FEDRA, 2002; WANG *et al.*, 2007) têm optado por utilização de arquitetura orientada a serviços em especial o *Web Service* proporcionando um sistema online que favorece a comunicação entre os usuários e banco de dados, envolvidos no gerenciamento e planejamento da região aplicada. O desenvolvimento de um sistema distribuído é justificado pela necessidade de interoperabilidade entre as diversas organizações distintas que durante muito tempo armazenaram grandes quantidades de dados geográficos e necessitavam de um sistema em comum.

Além do objetivo, muitas vezes o modelo hidrológico ou o SIG se encontram em uma determinada linguagem incomum, necessitando-se uma compatibilização para que possa realizar a integração. A programação orientada objeto tem sido uma adotada para a união do modelo com o SIG por meio da compatibilização das ferramentas, utilizando uma linguagem em comum (ALMEIDA, 2006).

A complexidade envolvida nesse critério demanda uma subdivisão em duas classes: *SIG no modelo e modelo no SIG*.

### ***SIG no modelo***

A funções de modelagem espacial implementadas nos SIG possuem capacidades que podem ser estendidas para aplicação nos modelos hidrológicos (RAMIREZ & SOUZA, 2007). Além de funções matemáticas que são inseridas no modelo, representando um fenômeno hidrológico ou cálculo de um determinado parâmetro, a capacidade clássica do SIG relacionado com visualização dos resultados também é considerada como característica dessa classificação.

O esforço computacional no sentido da programação para elaboração de sistemas por meio dessa abordagem é reduzido, uma vez que a única necessidade de implementação seria a ligação do código do SIG no modelo. Essa ligação muitas vezes corresponde a uma cópia do código relacionado com a função do SIG que se deseja aplicar no modelo ou então por meio de ferramentas desenvolvidas em uma linguagem de alto nível no SIG que são representadas por uma interface amigável.

Devido ao baixo nível de complexidade de funções matemáticas que são implementadas, essa abordagem é utilizada principalmente por modeladores que vem o SIG unicamente como um sistema para mapeamento e conceitualmente irrelevante para aplicação na modelagem hidrológica. Entretanto, essa abordagem tem sido utilizada também como uma das etapas, de um processo mais complexo ou de modelagens que necessitam de funções básicas do SIG, como é o caso de Almeida *et al.* (2006) que através de funções pré existentes no SIG implementou em seu sistema o cálculo automático da precipitação média por meio do polígonos de Thiessen.

### ***Modelo no SIG***

Inserir funções que podem ser aplicadas para uma diversidade de necessidades na modelagem hidrológica dentro do SIG. Essa abordagem é caracterizada por seu elevado nível de acoplamento. A mesma assemelha-se com o “acoplamento firme” apresentado por Loague & Corwin (1998). Essa abordagem exige um maior tempo e custo de desenvolvimento, porém resulta em um sistema integrado caracterizado pela facilidade de manipulação pelo usuário final.

Apesar dos grandes avanços no desenvolvimento da Tecnologia da Informação quando se avalia a complexidade dos modelos hidrológicos, percebe-se que ainda existe uma grande distância para uma integração entre modelos hidrológicos dentro do SIG. De acordo Maidment (1993) existe uma dificuldade em compreender como equações diferenciais descrevendo a conservação de massa, Segunda lei de Newton, Primeira Lei da Termodinâmica e os processos de transporte e dispersão de massa podem ser explicados dentro do SIG. Dentro desse contexto Mendes e Cirilo (2001) apontam que as equações diferenciais que governam o fluxo e transporte da água e poluentes (via métodos numéricos como diferenças ou elementos finitos), ainda não são possíveis de serem obtidas dentro do ambiente de geoprocessamento.

Nesse sentido devido à variedade de modelos hidrológicos existentes faz com que a ligação entre modelos hidrológicos e SIG alcance níveis de acoplamentos diferentes, nesse caso quando se trata de inserir modelos no SIG será levado em consideração duas formas diferentes de união: “ligado” e “embutido”. De acordo com Martin *et al.* (2005) modelos complexos são mais aptos para serem “ligados” com SIG, enquanto versões simplificadas ou mais de simples de modelos hidrológicos possuem maior probabilidade de serem “embutidos” no SIG.

Para o desenvolvimento de um sistema por meio dessa abordagem é necessário que o desenvolvedor tenha acesso ao código do software, ou seja, necessita-se de um “SIG livre”. Entretanto a utilização de SIG comerciais corresponde a uma parcela significativa das aplicações que vem sendo desenvolvidas atualmente. Isso é possível devido à criação de extensões ou pacotes que são inseridos dentro do SIG, apesar da criação de extensões não permitir uma mudança no código fonte no SIG ao qual foi inserido. Essa integração será enquadrada como “integração interna” uma vez tais extensões são desenvolvidas em linguagens computacionais em alto nível permitindo a criação de uma interface única entre o modelo e o SIG, trazendo como consequência a facilitação no manuseio dos dados, o que não acontece na “integração externa”, apresentada anteriormente.

De acordo Whiteaker & Maidment (2004) as extensões definem características, atributos e relações por meio de uma interface de ligação entre o modelo e o SIG. A vantagem da utilização de pacotes inseridos no SIG está no fato de que o esforço relacionado com o desenvolvimento está ligado diretamente com o modelo, fazendo com que essas extensões tenham resultados bem expressivos. Atualmente existe uma grande quantidade de pacotes disponíveis gratuitamente na WEB, dentre as quais, algumas acompanham o desenvolvimento do SIG para quais foram implementadas.

Muitos autores mostram as vantagens da utilização de uma modificação no código fonte. De Roo (1998) apresenta uma integração para modelagem de vazão e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas utilizando o ambiente de desenvolvimento SIG PC Raster. Segundo o autor, as vantagens estão principalmente no melhoramento da capacidade no pré-processamento de dados e facilitando o manuseio dos sistemas.

O trabalho de Chang *et al.* (2005) mostra uma comparação entre duas formas de integração entre modelos hidrológicos e SIG, nesse caso, a primeira se enquadra em uma integração “sem modificação no código fonte” no qual os dados de entrada do modelo são



preparados externamente ao sistema e são armazenados em um banco de dados do Microsoft Access para posteriormente ser acessado pelo modelo, a outra forma de integração foi por meio do desenvolvimento de uma interface que funciona dentro do ArcGIS, no qual os dados são gerados de forma automática para entrada no modelo. A comparação dos resultados apontou que os erros da modelagem sem a presença de uma interface gráfica comum chegou até a 70% dos valores, mostrando a importância do desenvolvimento de interfaces gráficas na integração de modelos hidrológicos com SIG.

### **3.1.3 Quanto ao grau de complexidade**

Nas primeiras aplicações da integração entre SIG e modelos hidrológicos algumas deficiências foram levantadas por diversos autores, como ausência de abordagem teórica (Bian, 1997; Sui e Maggio, 1999), deficiência na aplicação em predição e explanação de problemas (Wellar *et al.* 1994), ausência de análise temporal, custo de implantação, ausência de metodologias que auxiliem na escolha da tecnologia, poucas aplicações (Devantier & Feldma, 1993). No entanto, o aumento das pesquisas no processo de integração possibilitou o avanço da tecnologia de forma que muitos dos problemas levantados nas primeiras aplicações foram resolvidos evoluindo para uma ferramenta eficiente e com grande capacidade auxílio na gestão dos recursos hídricos. Nesse contexto, apresenta-se a seguir uma classificação a partir do grau de complexidade: básico e avançado.

#### **3.1.3.1 Integração básica**

Integração com funcionalidade que está limitada ao processamento e à visualização de dados e resultados. Essa abordagem é aplicada desde as primeiras interações entre os sistemas, é uma idéia muito difundida pelos estudiosos que vem no SIG uma ferramenta de visualização de resultados.

Apesar do termo “Integração básica” sugerir a idéia de pouca eficiência, essa forma de acoplamento tem sido utilizada em paralelo com outros processos, principalmente com a modelagem hidrológica convencional (sem utilização de SIG), de modo que alcance resultados de boa qualidade. O trabalho de Santos *et al.* (2007) utiliza o SIG unicamente como um pré-processador de dados. A ferramenta utilizada foi o AGWA, a qual foi empregada para realizar a discretização automática da bacia hidrográfica em estudo.

Sob esse ponto de vista os trabalhos de Yang *et al.* (1999) e Marsili-Libelli *et al.* (2001) citados anteriormente se enquadram na “Integração Básica”, uma vez que utilizaram o SIG unicamente como ferramenta para visualizar os resultados da simulação e sem a presença de ferramentas interpretativas, o que reduziu a análise espacial e temporal dos resultados do modelo. O modelo MIKE SHE também foi integrado com o SIG ArcView, para que o mesmo pudesse dar suporte no pré e pós-processamentos dos dados, oferecendo ao usuário uma excelente oportunidade para supervisão e compreensão das características da bacia (BORAH & BERA, 2004).

### **3.1.3.2 Integração avançada**

O processo de evolução da integração entre modelos hidrológicos e SIG está relacionado com o avanço no desenvolvimento dos SIG, de forma que a ampliação de suas funcionalidades pôde dar suporte aos modelos hidrológicos de forma mais consistente. Nesse sentido essa a “integração avançada” é caracterizada pela incorporação de processos mais complexos de simulação e análise do fenômeno em estudo. Essa abordagem exige um nível de conhecimento superior no processo de implementação, uma vez que necessita de uma abordagem que avalie sob o ponto de vista conceitual o fenômeno estudado, ou seja, investigar não apenas a visualização de resultados, mas também a proximidade que os resultados representam a realidade do fenômeno.

Para Fedra (2006) um avanço na integração é possível quando se desenvolve um sistema de informação para uma finalidade específica para um determinado usuário ou grupo, incluído funcionalidades de SIG. De acordo com este autor, o SIG deve possuir uma estrutura aberta para receber ferramentas necessárias na análise dinâmica, necessitando de uma ampliação em suas funções por meio das seguintes características:

- ✓ Dinâmico em tempo real
- ✓ Simular o comportamento complexo dos fenômenos
- ✓ Dar apoio à tomada de decisão por meio de otimização.

Almeida (2006) e Fallahi *et al.* (2008), como mostrados anteriormente, enquadram-se nessa classe, uma vez que os mesmos utilizam-se de abordagens clássicas e inserem dentro dos sistemas integrados ferramentas de simulação e avanço nas linguagens, fazendo assim a

evolução da técnicas de integração e mostrando que muitos dos desafios levantados pelos primeiros pesquisadores já estão sendo cumpridos.

Kalken *et al.* (2005) implementaram um sistema de gerenciamento de recursos hídricos “MIKE FLOODWATCH”, voltado principalmente para previsão de inundações na Nova Zelândia, que apresentava como diferencial a presença de dados oriundos de estações telemétricas que estavam conectados ao banco de dados que alimenta os modelos. De acordo com os autores o sistema foi implementado com uma interface que permite a ligação com qualquer modelo hidrológico ou hidráulico para previsão de nível de água. De uma forma geral o “MIKE FLOODWATCH” funciona da seguinte forma: os dados são captados em tempo real das estações telemétricas que por meio de uma plataforma SIG e com os modelos hidrológicos acoplados é realizada a simulação com geração de cenários para a tomada de decisão.

O *WaterWare* corresponde a um sistema de gestão que possui em sua plataforma vários modelos hidrológicos acoplados, que são aplicados em várias áreas bem como modelagem superficial de água, modelagem de água subterrânea e qualidade, previsão de irrigação. O SIG foi implementado para dar suporte na modelagem e conseqüentemente na tomada de decisão, através de uma interface de fácil aceitação e voltada para internet com utilização de dados de entrada dos modelos em tempo real. A característica de avanço nesse sistema é que o mesmo integra ferramentas de otimização com gerenciamento de dados por meio de ferramentas analíticas, gerando relatórios e previsões para a gestão operacional (FEDRA, 2002).

## **3.2 Análise comparativa**

Conforme apresentado no capítulo 1 deste trabalho, um dos objetivos da pesquisa é comparar abordagens metodológicas de integração. Para tanto, a metodologia proposta é a aplicação de duas abordagens selecionadas em um mesmo estudo de caso, utilizando o mesmo modelo hidrológico, porém abordagens de integração diferenciadas.

### **3.2.1 Área de Estudo**

A área de estudo utilizada para aplicação desse trabalho foi a Bacia Escola de São João do Cariri (BESJC). A escolha da área de estudo é justificada por ser uma bacia na qual, vários modelos hidrológicos já foram testados e validados.

A BESJC possui uma área de aproximadamente 15 km<sup>2</sup> e encontra-se localizada na parte média da bacia do Rio Taperoá no Cariri paraibano (7°25' S, 36°30'O) na cidade de São João do Cariri a 206 km de João Pessoa e é parte do semi-árido nordestino. A altitude média é de 458m. O município é localizado na zona fisiográfica do Planalto da Borborema, fazendo parte da mesorregião da Borborema e à microrregião do Cariri Oriental ou antigo Cariris Velho (Figura 3.3), apresentando características de semi-aridez mais acentuada que o sertão por estar situada, na diagonal seca existente na superfície da Borborema, linha de fluxo e refluxo das massas de ar que atuam no Nordeste (CHAVES *et al.*, 2002).

A região onde se encontra a bacia apresenta-se com clima seco semi-árido, solos rasos, subsolo derivado do embasamento cristalino, vegetação de caatinga, relevo ondulado e altitude variando entre 450 m a 550 m. O curso d'água mais importante da bacia é o riacho Namorados, ao longo do qual estão localizados alguns açudes (Santos *et al.*, 2007).

A BESJC é dividida em quatro sub-bacias. A sub-bacia 1 foi escolhida para aplicação do modelo hidrológico KINEROS devido ao fato da disponibilidade de resultados já aplicados anteriormente da região. A sub-bacia 1 possui uma área de 0,18 há, declividade média em torno de 7,5% e possui uma cobertura vegetal preservada.



Figura 3.3 - Localização das mesoregiões e microrregiões do Estado da Paraíba (CHAVES *et al.*, 2002)

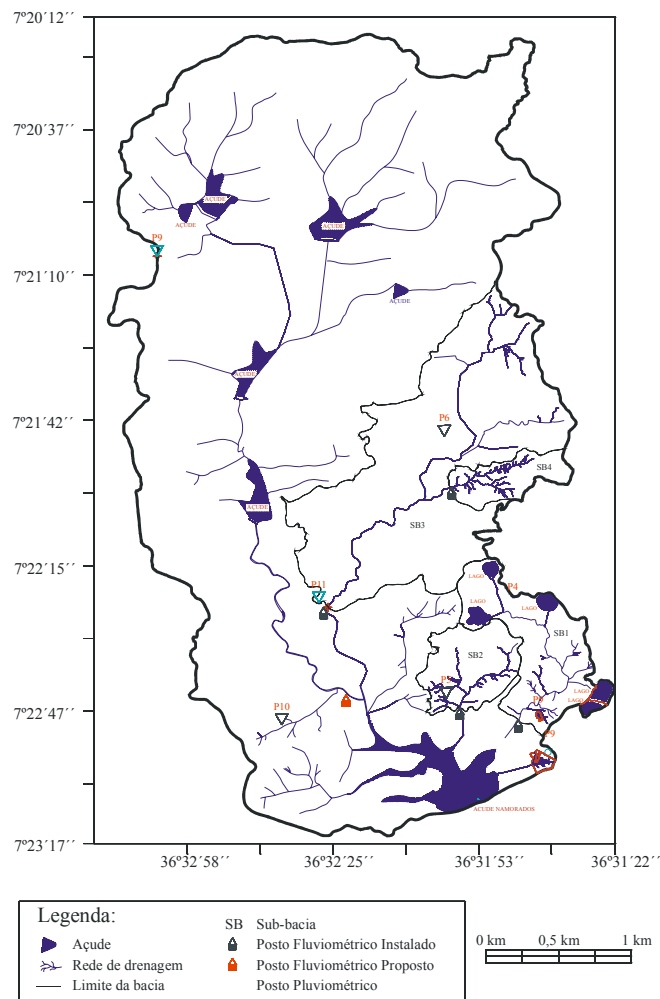


Figura 3.4 – Bacia Escola de São João do Cariri

### 3.2.2 Escolha das abordagens

A escolha das abordagens para efeito comparativo baseia-se na possibilidade de acesso aos softwares e modelo hidrológico envolvidos. As abordagens de integração analisadas são:

*Aplicação 1* – A primeira aplicação corresponde à integração do modelo hidrológico KINEROS2 com o SIG ArcGIS (ESRI) por meio do programa AGWA (*Automated Geospatial Watershed Assessment*) corresponde. Com relação aos critérios estabelecidos no capítulo 3, essa aplicação enquadra-se do seguinte modo:

**Critério Relacionamento de Dados:** *Com compartilhamento*, uma vez que o sistema funciona com um único banco de dados, onde após os dados de entrada ser inseridos,

todo o processamento funciona por meio GUI onde o usuário tem o controle, mas não precisa realizar manipulação na transferência modelo-SIG.

**Critério de Modificação no Código Fonte:** *Integração Interna – Modelo no SIG – Conectado.* A ferramenta AGWA que é a ferramenta responsável pela integração foi desenvolvida como um *plugin* que funciona dentro do ArcGIS com uma interface comum entre o SIG e o modelo, onde o modelo KINEROS é “ligado” ao SIG. O modelo continua em sua versão DOS, porém a manipulação do modelo é toda no ArcGIS.

**Critério Grau de Complexidade:** *Integração Básica –* A ferramenta proporciona uma automatização dos processos por meio de uma interface de fácil acesso e entrada de dados, além de permitir a visualização dos resultados do modelo por meio de mapas temáticos, além da comparação de resultados obtidos em diferentes simulações, permitindo a análise hidrológica dos impactos associados com a mudança no uso do solo. No entanto todas essas características estão ligadas com o pré e pós-processamento de dados, sendo classificado como integração básica.

Aplicação 2 - A outra aplicação corresponde à utilização do modelo KINEROS2 acoplado dessa forma no OpenJump através da plataforma para o SNIRH. Em relação aos critérios metodológicos aplicados são descritos a seguir:

**Critério Relacionamento de Dados:** *Sem Compartilhamento –* Apesar de haver uma interface comum no qual existe um acesso do modelo pelo SIG através do *plugin*, com relação ao banco de dados da aplicação existe uma separação entre os dados do modelo e do SIG. Nesse caso antes da execução do modelo, os arquivos de entrada são elaborados independentemente do SIG e armazenados em um determinado local a critério do usuário.

**Critério de Modificação no Código Fonte:** *Integração Interna – Modelo no SIG – Ligado.* De forma semelhante à aplicação anterior, porém nesse caso por se tratar de um SIG livre foi desenvolvida uma interface dentro do OpenJump, mas mantendo a mesma ligação por *plugin* devido à complexidade do modelo.

**Critério Grau de Complexidade:** *Integração Básica –* Para essa aplicação a interface criada foi elaborada unicamente para manipulação dos dados e visualização dos resultados por meio de gráficos. Na realidade para a utilização do KINEROS2 por meio da

plataforma para o SNIRH, o SIG é utilizado unicamente como base para implementação da interface, não sendo utilizada nenhuma propriedade geográfica para a modelagem.

### **3.3 Simulações**

#### **3.3.1 Aplicação 1 (ArcGIS–AGWA–KINEROS)**

Os procedimentos metodológicos necessários para se estudar uma bacia hidrográfica utilizando-se o AGWA podem ser divididas em cinco passos: 1) Identificação da localização e delimitação da bacia; 2) Subdivisão da bacia; 3) Parametrização dos tipos de solos e dos usos e coberturas da terra; 4) Entrada dos dados de precipitação; 5) Execução do modelo e visualização dos resultados (KEPNER *et al.*, 2004).

##### ***Delimitação e subdivisão da área de drenagem da bacia***

Para caracterização física da bacia no AGWA o principal dado de entrada corresponde ao MNT referente à bacia em estudo. Assim para a BESJC o MNT foi gerado com base em um levantamento obtido em campo por meio de uma estação total. Os dados foram preparados para o formato DBF, os quais foram inseridos no ArcGIS 9.2 (*Tool-Add XY Data*) onde com auxílio da extensão *3-D Analyst* os pontos foram interpolados para gerar um grid com células de 10 m de resolução. A interpolação adotada foi o método do inverso da distância. Outros trabalhos como o de Maeda (2008) utilizam os dados da missão de mapeamento do relevo terrestre (Shuttle Radar Topography Mission – SRTM), porém esse MNT não se aplicaria para a BESJC, devido ao pequeno tamanho da bacia comparando com a resolução do pixel do SRTM.

Através do AGWA e com base no MNT foi definido o exutório da bacia, ou seja, ponto no qual toda precipitação ocorrida na área de drenagem da bacia irá convergir. Em seguida é realizada o cálculo automático dos limites da bacia com base em mapas de direção de escoamento e de fluxo acumulado, além da opção da geração automática da rede de drenagem. O passo seguinte consiste na discretização da bacia, através da sub-divisão da mesma em sub-regiões. De acordo com Miller *et al.* (2007) essa divisão é realizada com base na porcentagem de área de contribuição de drenagem das sub-regiões que corresponde à *Contributing Source Area (CSA)*, que é definida pelo usuário e é uma característica do

próprio AGWA. Sendo assim, quanto menor o valor de CSA, mais complexa será a subdivisão.

### ***Parametrização dos tipos de solo e uso e cobertura do solo***

Essa etapa consiste em um dos maiores desafios na utilização do AGWA para região diferente da qual o mesmo foi desenvolvido, ou seja, para regiões diferentes dos EUA. Nesse sentido, para o sucesso da implementação seguiu-se a orientação do manual dos desenvolvedores do AGWA, através da implementação dos dados de entrada seguindo padrão e formato pré-definido.

Na parametrização do solo é levada em consideração a cobertura do solo, no qual para execução do modelo no AGWA é requerido um mapa no formato *grid* associado com uma tabela, a qual contém os parâmetros relacionados com o tipo de cobertura da bacia: Grupo hidrológico, Número da Curva (CN), porcentagem de cobertura, interceptação, coeficiente de Manning e porcentagem de impermeabilização. Para a identificação da cobertura do solo foi utilizada uma imagem de alta resolução do IKONOS (Figura 3.5), no qual por meio de classificação supervisionada no software ERDAS através da coleta de pixel e um conhecimento prévio da região foram gerados um mapa de cobertura do solo e uma tabela de atributos.

Para os componentes do solo a ferramenta oferece três opções de entrada: STATSGO (*State Soil Geographic*), SSURGO (*Soil Survey Geographic*) e FAO (*Food and Agriculture Organization*). O AGWA possui um vasto banco de dados de atributos relativos a mapas de solo obtidos em levantamentos da USGS e do Departamento de Agricultura Estadunidense (USDA). Para utilização em regiões fora do território estadunidense, a opção que o AGWA fornece corresponde ao mapa de solo da FAO

Maeda (2008) aponta que a escala de 1:5.000.000 dos mapas pedológicos da FAO diferem significativamente de levantamentos mais refinados que comumente são encontrados em bacias hidrográficas, sendo adotado pelo autor a opção de implementação dos dados específicos para a área de estudo. Porém para esse trabalho optou-se pela utilização dos dados de solo da FAO, que foi obtido diretamente do site do *United States Department of Agriculture* (USDA), compreendendo um mapa no formato shapefile juntamente com tabelas associadas ao mapa.



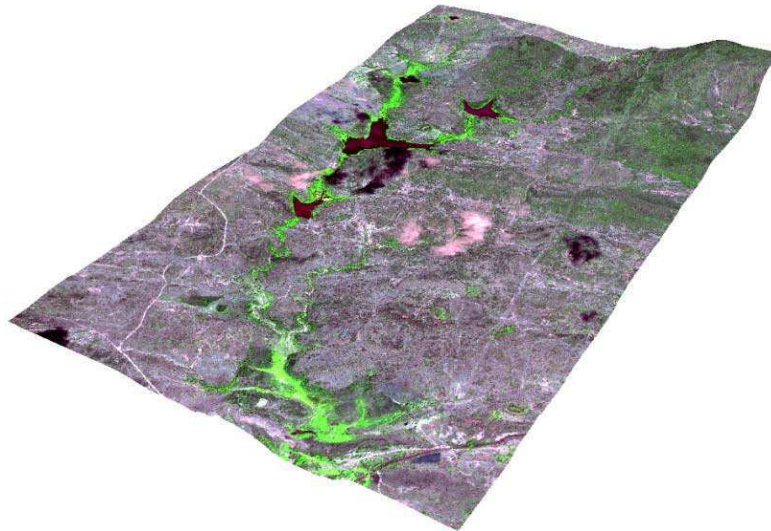


Figura 3.5 – Composição colorida das bandas 234 do IKONOS associada ao MNT da BESJC.

O sistema de classificação de solos da FAO, conhecido como *Soil Map of the World* (SMW), é composto por 5.000 unidades de mapas de unidades (mapeamento) e 200 unidades de terra. Este sistema é o resultado da compilação de dados sobre o solo de cada país no mundo e é organizado em 10 regiões do continente. Uma dessas regiões é América do Norte (Levick *et al.*, 2004).

Os mapas da FAO estão em formatos de unidades de mapas (*mapping units*) poligonais. Cada unidade de mapa está associada a um único número, número de identificação e unidade de solo (soil-units) contida na unidade de mapeamento. Cada polígono ou unidade pode ser caracterizado por vários componentes ou unidades de solo em diversas porcentagens. Desse modo as características associadas com o tipo de solo estão inseridas em tabelas, que são a base para o modelo extrair os parâmetros necessários para a simulação. Nesse sentido a parametrização com o tipo de solo consiste na extração de parâmetros hidrológicos das tabelas associadas com o mapa de solo (CUEVAS, 2006).

#### ***Entrada de dados meteorológicos***

O *Automated Geospatial Watershed Assessment* (AGWA) fornece três opções de entrada de precipitação: geração de evento usando um mapa de Precipitação – Frequência do NOAA; entrar com os dados do evento de forma manual ou entrar com uma tabela em um formato pré-definido com o evento. Para cada evento é definido a umidade antecedente na bacia.

Os dados de precipitação para a modelagem foram obtidos com base em estações pluviométricas registradas na BESJC que foram inseridas manualmente para criação do arquivo de entrada do modelo.

Devido à influência da umidade inicial na produção de escoamento e erosão. Foram adotadas diferentes condições de umidade de solo em eventos distintos já aplicados na região por Santos (2008) com o intuito de avaliar a coerência dos resultados obtidos pelo AGWA.

### ***Execução do modelo***

Após todas as etapas de delimitação, discretização, parametrização e entrada de dados de precipitação o KINEROS pode ser executado. O que acontece é que a ferramenta gera os parâmetros de entrada do modelo que é simulado em DOS e após a simulação os dados são importados para o SIG em um módulo separado para controle da visualização.

O AGWA apresenta duas formas de visualização de resultados, a primeira por meio dos resultados absolutos e a segunda por meio de resultados relativos, onde o usuário pode comparar os resultados de diferentes simulações, podendo ser aplicado para visualizar o aumento do escoamento para diferentes coberturas de solo.

### **3.3.2. Aplicação 2 (OpenJump–SNIRH–KINEROS)**

Com base na documentação técnica (UFPB, 2009) relacionada com a implementação da integração entre os modelos hidrológicos e o SIG, pode-se dividir de uma forma geral o processo de simulação nas seguintes etapas: descrição das principais características da bacia, entrada dos dados da parametrização, entrada da precipitação, entrada dos dados observados e execução do modelo.

Para a realização desse trabalho, como ainda não se dispõe de um acesso direto dos dados da ANA, após a instalação dos arquivos relacionados com o OpenJUMP, foi criado um banco de dados para os arquivos de entrada do modelo, sendo necessário para execução do modelo realizar os seguintes procedimentos: geração dos dados de entrada e execução do modelo.

### ***Geração dos dados de entrada***

Para utilização do modelo nesse ambiente é necessário o desenvolvimento dos arquivos de entrada nos seus respectivos padrões de formato, o que já corresponde a forma tradicional no modelo KINEROS2 no DOS. A bacia hidrográfica definida para aplicação dessa integração foi a sub-bacia 1 da Bacia Hidrográfica de São João do Cariri (

Figura 3.4), já descrita anteriormente.

Inicialmente é preenchido a aba relacionada com os dados básicos gerando o arquivo com a extensão \*.gd com informações básicas da bacia hidrográfica (nome, área, código, título da simulação), bem como o período escolhido para simulação (mês inicial e final, ano inicial e final). Em seguida é carregado o arquivo de parâmetro, que foi elaborado anteriormente por Santos (2008) que aplicou o modelo KINEROS2 na BESJC. Os próximos arquivos a serem carregados são os dados observados de precipitação, vazão e sedimentos observados, podendo estar um em arquivo pronto nos formatos definidos ou podem ser gerados por meio da interface no OpenJump para o SNIRH.

### ***Execução do modelo***

Após o carregamento dos arquivos correspondentes aos dados de entrada do modelo, o programa apresenta um resumo com os dados carregados relacionados com a simulação onde o usuário poderá selecionar as variáveis a serem simuladas. Nesse trabalho optou-se pela simulação apenas de vazão, para uma avaliação puramente metodológica.

### 3. Resultados e discussões

#### 3.1. Sistematização

Na Tabela 4.1 são mostrados vários esforços na integração entre modelos hidrológicos com Sistema de Informações Geográficas nas mais variadas áreas da hidrologia. Esses trabalhos foram enquadrados nos critérios estabelecidos no capítulo 3, que são:

- ✓ Critério 1- Relacionamento entre os dados: Sem compartilhamento (SC) ou Com compartilhamento (SC)
- ✓ Critério 2 – Modificação no código-fonte: Integração Externa (IE); Integração Interna SIG no modelo (IISM); Integração Interna modelo no SIG “ligado” (IIMSc) ou Integração Interna modelo no SIG “embutido” (IIMSe)
- ✓ Critério 3 – Quanto ao grau de complexidade: Integração Básica (IB) ou Integração Avançada (IA)

Tabela 3.1 - Exemplos de integrações entre modelos e SIG enquadrados nos critérios estabelecidos.

			CRITÉRIO			
Modelo	SIG	Foco	1	2	3	Referências
MODFLOW	ArcInfo	Água Subterrânea	SC	IE	IB	Hinaman (1993)
AGNPS	ArcInfo	Hidrologia	SC	IE	IB	SathyaKumar & Farell-Poe (1995)
AGNPS	GRASS - WATERSHED	Qualidade de água e transporte de contaminantes	SC	IE	IB	Osmond <i>et al.</i> (1997)
3DFEMWATER/ 3DLEWASTE	ArcCAD/ ArcView	Modelagem ambiental e transporte de contaminantes	SC	IE	IB	Anderson (1998)
HEC-1	ArcInfo	Modelagem do escoamento	SC	IE	IB	Chang <i>et al.</i> (2000)
SWAT	GRASS	Modelagem do escoamento	SC	IE	IB	Rosenthal <i>et al.</i> (1995)
ANSWERS	GRASS	Erosão/transporte de sedimentos	SC	IE	IB	Srinivasan & Engel (1991)
QUAL2E	ERDAS	Qualidade da água	SC	IE	IB	Yang <i>et al.</i> (1999)/ Marsili-Libelli <i>et al.</i> (2001)
MATLAB	ArcView	Qualidade da superfície da água	SC	IE	IB	Marsili-Libelli <i>et al.</i> (2001)

			CRITÉRIO			
Modelo	SIG	Foco	1	2	3	Referências
MIKE SHE	ArcView	Hidrologia da bacia/ Qualidade da água	SC	IIMSc	IB	Borah and Bera (2004)
SWMM	ArcView	Hidrologia e hidráulica pluvial	SC	IIMSc	IB	Huber & Dickinson (1988)
MIKE BASINS	ArcView	Hidrologia da bacia/ Qualidade da água	CC	IIMSe	IA	Jha & Das Gupta (2003)
HSPF, QUAL2E	ArcView	USEPA BASINS sistema de modelagem	CC	IIMSc	IB	Whittemore and Beebe (2000)
MODFLOW	ArcView	Água Subterrânea	CC	IIMSc	IB	Tsou & Whittemore (2001)
GLEAMS	Arc/CAD	Água subterrânea e poluição difusa	CC	IIMSc	IB	De Paz & Ramos (2002)
SCS runoff Model	MapInfo	Transporte de pesticida	SC	IE	IB	Li <i>et al.</i> (2002)
IDOR <sup>2D</sup>	ArcView	Qualidade de água	CC	IIMSc	IB	Tsanis e Boyle (2001)
HEC-HMS	ArcView 3.2 - HEC-GeoHMS	Escoamento Superficial	CC	IIMSc	IB	Al-Abed <i>et al.</i> (2005) Santos <i>et al.</i> (2006)
QUAL2E e MODFLOW	ArcGIS – GEO- MODSIM	Qualidade de água/ Água Subterrânea	CC	IIMSc	IB	Triana & Labadie (2007)
SWBM	ArcView 3.2	Balanço hídrico na Bacia	SC	IE	IB	Al-Abed <i>et al.</i> (2005)
SWAT	GRASS	Modelagem do escoamento	SC	IIMSc	IB	Ogden <i>et al.</i> (2001)
QUAL2E	ArcView – SIBAC	Qualidade de água	SC	IE	IB	Zeilhofer <i>et at.</i> (2003)
USLE	ArcView	Transporte de sedimentos	CC	IISM	IB	Santos (1999) Cavalcante & Teixeira (2004)
AÇUMOD/ MODFLOW	OpenJUMP - ARENA	Água subterrânea/ escoamento superficial	CC	IIMSe	IA	Almeida (2006)
Vários	ArcMap - MIKE FLOODWATC H	Gestão dos Recursos Hídricos	CC	IIMSc	IA	Kalken <i>et al.</i> (2005)
Vários modelos	WaterWare	Gestão e prevenção de enchentes em tempo real	CC	IIMSc	IA	Fedra (2002)
SWAT	ArcGIS	Modelagem do escoamento	CC	IIMSc	IA	Maeda (2008)

Ao avaliar a Tabela 3.1 percebe-se que a integração entre modelos hidrológicos com Sistemas de Informações Geográficas é uma realidade que vem sendo comprovada pela elevada quantidade de aplicações com os mais variados modelos e SIG. Auxiliando como ferramenta básica de pré e pós-processamento de dados e também no desenvolvimento de cenários futuros.

A integração sem compartilhamento corresponde a uma das abordagens que mais vem sendo aplicadas, principalmente quando se trata de modelos de qualidade de água. Esse fato ocorre devido a complexidade do modelo, onde poucos desenvolvimentos conseguiram implementar um banco de dados adequado que evite uma manipulação de dados externa ao SIG. O trabalho de Whittimore & Beebe (2000), porém, mostra um avanço na utilização de modelos de qualidade de água, os quais conseguiram integrar o QUAL2E no ArcGIS desenvolvendo um banco de dados no qual não havia necessidade de transferência arquivos. Essa integração ocorreu por meio da ferramenta BASINS, que por meio de uma interface gráfica “conectou” o modelo ao SIG.

Alguns modelos foram aplicados com metodologias diferentes como o SWAT que por Rosenthal *et al.* (1995) e Ogden *et al.* (2001) foi desenvolvido sem compartilhamento de banco de dados e sem nenhuma modificação no código fonte do SIG (GRASS). Porém, Maeda (2008), utilizando o mesmo modelo e com a ferramenta AGWA dentro do ArcGIS, aplicou uma integração com compartilhamento. Nessa aplicação, a troca de dados entre o SIG e o modelo ocorreu automaticamente e havendo uma interface gráfica no desenvolvimento de modo que havia uma “conexão” do SIG ao modelo.

A abordagem classificada como *Interna modelo no SIG “embutido”*, conforme se vê na Tabela 3.1, ainda possui poucas aplicações. Isso se deve ao fato de que muitos SIG ainda não possuem estruturas apropriadas para que esse tipo de integração aconteça. O fato de se ter atualmente SIG de código aberto corresponde a um avanço, porém esses ainda possuem algumas limitações em comparação com os comerciais (CIRILO *et al.*, 1997). Desse modo Martin *et al.* (2005) afirma que existe uma tendência de evolução do SIG por meio do desenvolvimento de módulos de SIG que sejam desenvolvidos especificamente para aplicação em modelos hidrológicos, que sejam capaz de produzir análise temporal dos resultados do modelo.

A avaliação temporal permitida pelos sistemas integrados ainda precisa de investigações mais precisas, porém algumas aplicações já mostram o grande avanço nesse

aspecto como a inclusão de telemetria no sistema permitido uma simulação com um tempo de resposta menor, principalmente em área susceptíveis a enchentes (RAFAELI NETO, 2000; FEDRA, 2006).

A tendência de evolução é perceptível por meio das várias extensões que têm sido desenvolvidas com as mais variadas funções dentro da modelagem hidrológica, principalmente da automatização dos processos (AL-ABED *et al.*, 2005; MAEDA, 2008). A opção de “conectar” o SIG ao modelo mostra-se eficiente para solucionar as limitações existentes.

Os avanços no processo de integração são perceptíveis, mas a idéia de utilização de SIG como ferramenta de gerenciamento e visualização de dados (Integração básica) ainda é bem marcante nas aplicações correntes. Essas características básicas do SIG permanecem atraentes para a modelagem hidrológica devido ao crescimento da disponibilidade de dados, principalmente quando se trata de instituições públicas de gerenciamento ambiental. Esses órgãos demandam cada vez mais tecnologias robustas com velocidade e eficiência, fazendo com que a integração entre modelos hidrológicos com SIG esteja cada vez mais crescente e presente nos processos em que a variabilidade espacial é importante (WHITTEMORE & BEEBE, 2000; FEDRA, 2002; ALMEIDA, 2006).

A elaboração de um padrão para a sistematização do processo estudado nesse trabalho corresponde a um avanço na utilização do mesmo. Os critérios estabelecidos apontam muitas vezes limitações da integração entre modelos hidrológicos e SIG, de modo que o conhecimento das falhas é primordial para possível melhoramento.

A estrutura do SIG é preponderante na escolha da metodologia, onde alguns se mostram mais susceptíveis para mudanças através da inserção de novas funcionalidades que venham a complementar essa estrutura, porém outros não possuem a mesma suscetibilidade. A possibilidade de modificação também está relacionada com a linguagem no qual o SIG foi desenvolvido e também pela liberdade de modificação pelo usuário.

## 3.2. Aplicação 1 (AGWA-ARCGIS-KINEROS)

### 3.2.1. Delimitação e Discretização da Bacia

O resultado da interpolação dos dados levantados em campo para geração do Modelo Numérico do Terreno (MNT) da bacia em estudo é mostrado na Figura 3.1.

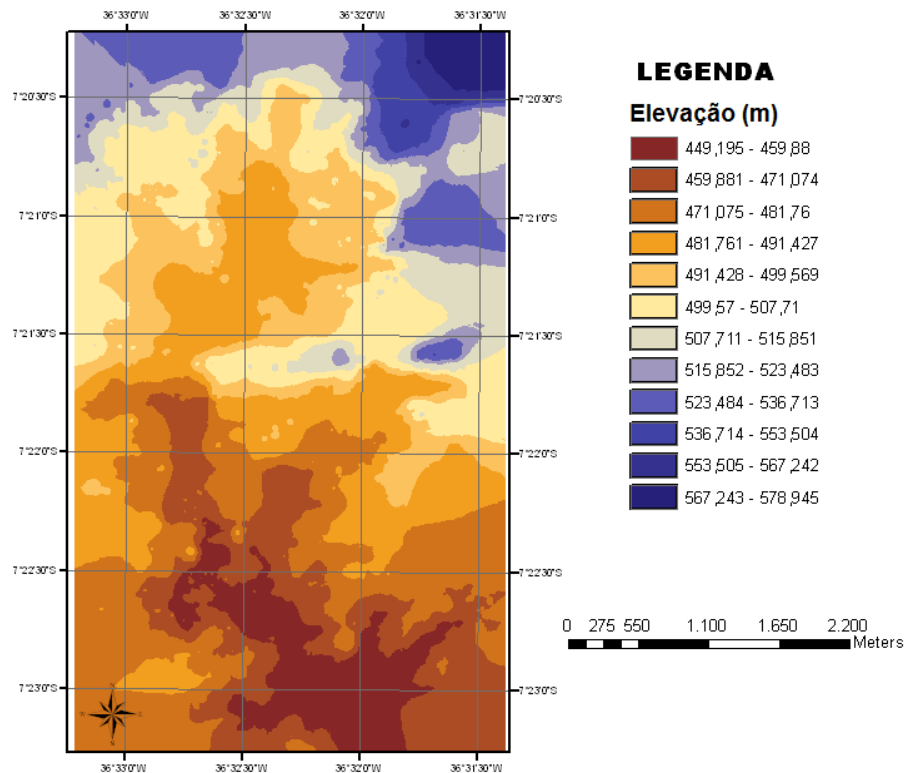


Figura 3.1 – Modelo Numérico do Terreno da Bacia Escola de São João do Cariri

Com base no MNT, foram geradas a direção do escoamento e a rede de drenagem da bacia através da ferramenta AGWA, que são mostrados a seguir, nas Figuras 4.2 e 4.3, respectivamente:



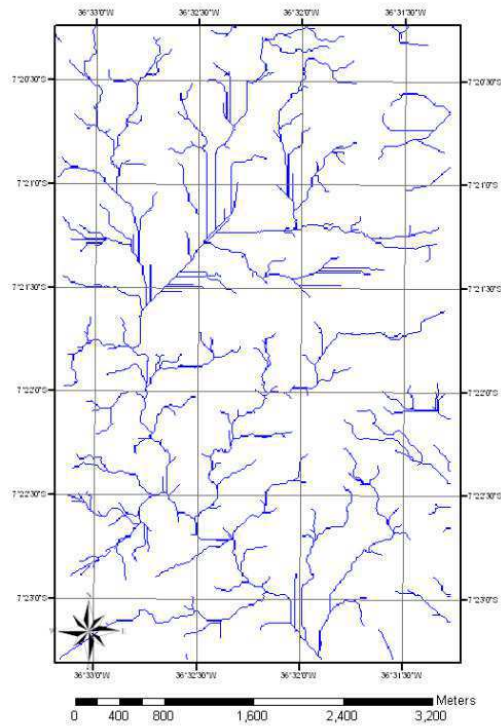


Figura 3.2 – Rede de drenagem

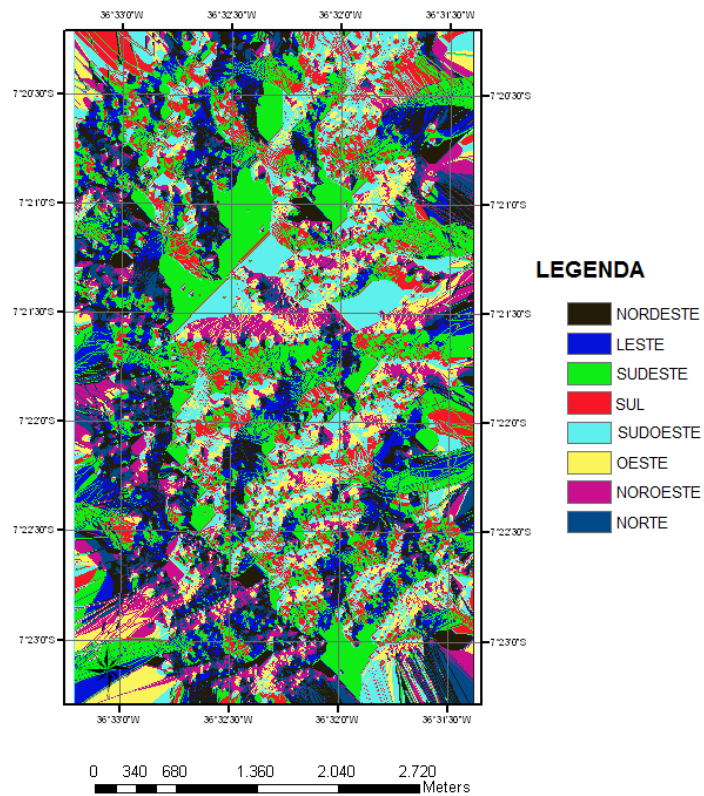


Figura 3.3 – Direção de escoamento

Através da rede de drenagem foi realizada a delimitação automática da bacia, ocorrendo inicialmente a definição da área total da bacia e em seguida foi delimitada uma sub-bacia, que representa a sub-bacia 01, na qual, foi realizada a simulação com o modelo hidrológico (Figura 3.4).

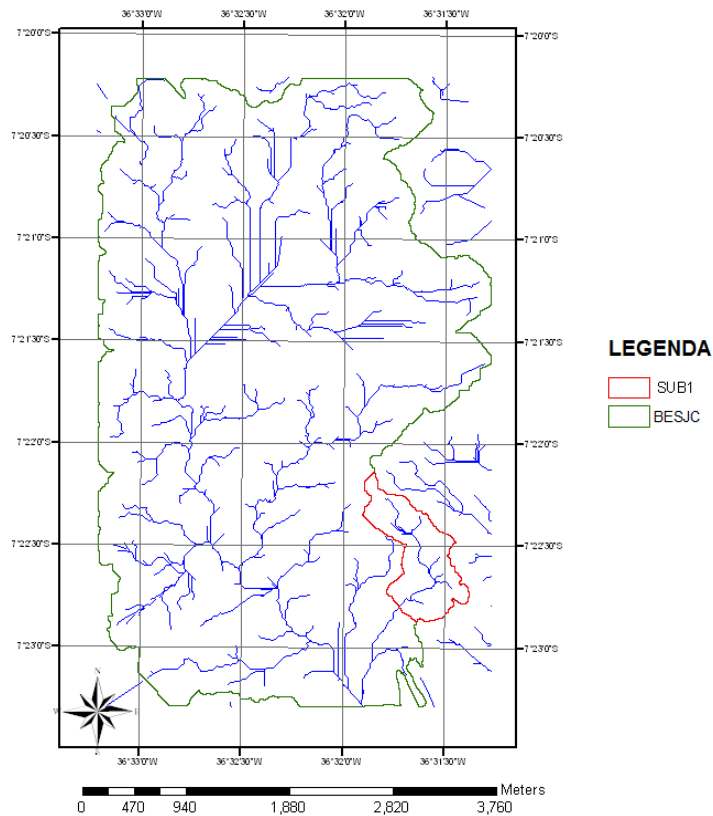


Figura 3.4 – Delimitação automática da bacia e sub-bacia

Devido à precisão e resolução do MNT disponível, não se conseguiu obter a forma da BESJC de uma maneira próxima à delimitação tradicionalmente utilizada na região, que foi obtida em levantamentos de campo. A sub-bacia 1 foi gerada com uma área de 0,594 km<sup>2</sup>, ocorrendo uma proximidade no valor da área, diferente apenas quanto à forma.

O processo seguinte corresponde à discretização automática da bacia, que consistiu na divisão da área de drenagem em sub-regiões com base no *Contributing Source Area* (CSA), que corresponde ao coeficiente utilizado para discretização no AGWA e que representa o nível da complexidade geométrica na discretização da bacia. Foram testados diversos valores para o CSA, porém o valor o menor valor aplicável para essa área foi 5%, sendo adotado para a aplicação. Valores maiores de CSA proporcionaram uma pequena quantidade de elementos e valores menores não foram suficientes para que a ferramenta fizesse a intercessão com os dados do solo. Desse modo a sub-bacia 1 foi subdividida em 36 planos e 14 canais, conforme mostra a Figura 4.5.

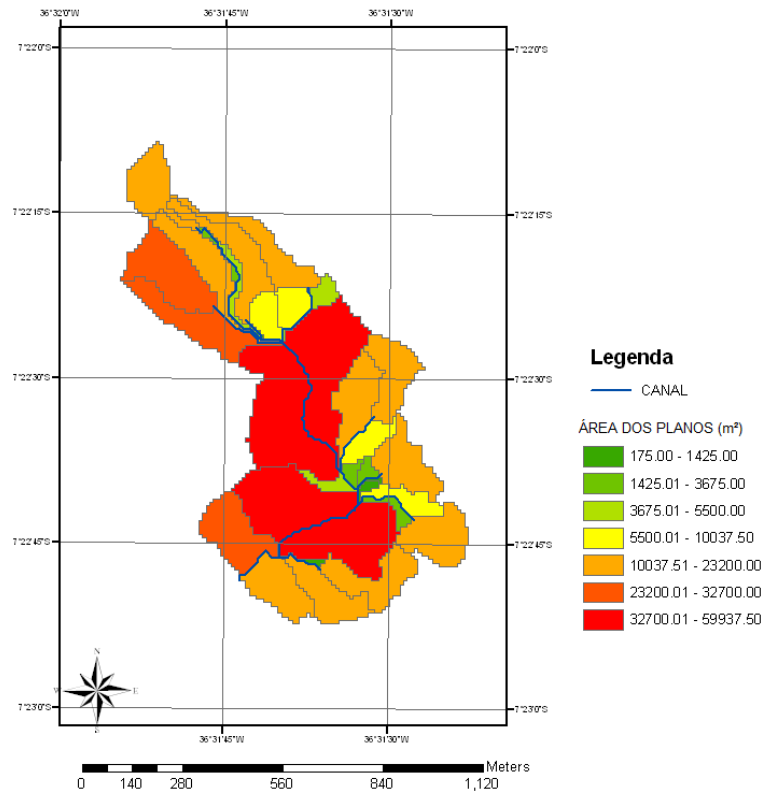


Figura 3.5 – Discretização automática em planos e canais com CSA igual a 5%

### 3.2.2. Parametrização do tipo e cobertura do solo

A Figura 3.6 apresenta a imagem do satélite IKONOS com data de passagem de 10 de Julho de 2009, a qual foi utilizada nesse trabalho para classificação da cobertura do solo. A escolha dessa imagem é justificada por ser a única disponível com essa resolução, o que permite uma análise mais acurada do terreno.

A partir do software de Processamento Digital de Imagens utilizado (ERDAS) foi realizada a classificação supervisionada como apresentado na Figura 4.7. Foram identificadas seis classes de cobertura de solo: (i) água, relacionado com a superfície de alguns açudes existentes na região; (ii) vegetação aberta, associada com a presença de árvores de pequeno porte com uma distribuição irregular; (iii) vegetação densa, ocorrendo na parte mais elevada da bacia com a concentração de árvores formando pequenos bosques; (iv) vegetação rasteira, é caracterizada pela pastagem natural e por plantio de palma forrageira; (v) mata ciliar, corresponde a vegetação desenvolvida nas margens dos açudes beneficiada pela unidade natural da região; e por fim, (vi) solo exposto, caracterizado pela área desmatada, região destinada a pecuária e estradas.

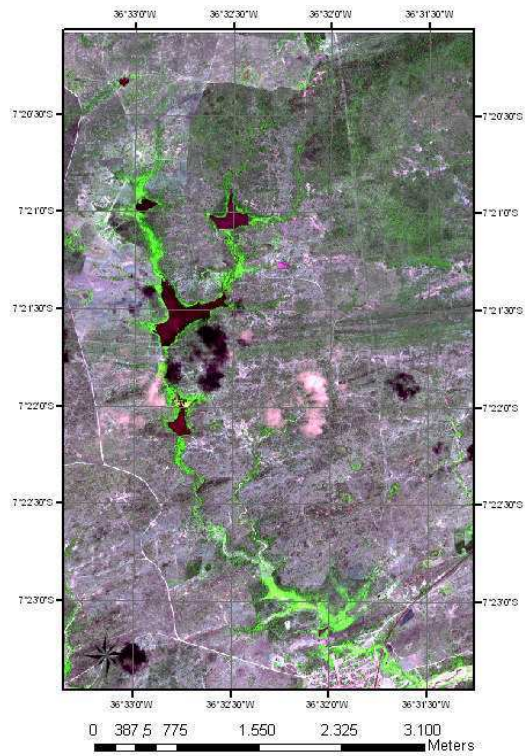


Figura 3.6 – Imagem do sensor IKONOS de Junho de 2009, combinação bandas 123(RGB)

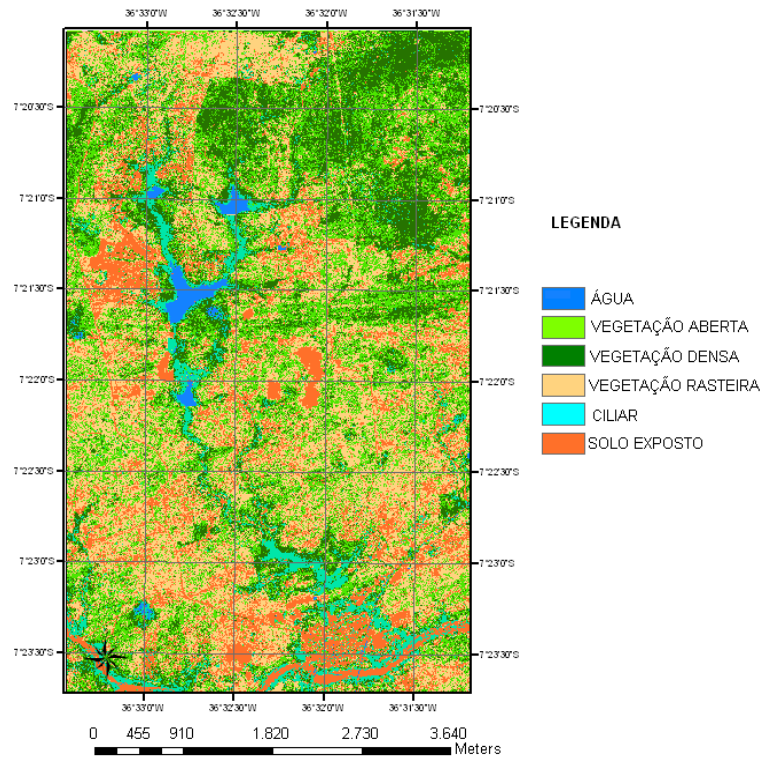


Figura 3.7 – Resultado da classificação supervisionada

Os valores associados com a cobertura do solo necessários como dados entrada do modelo hidrológico, foram estabelecidos com base em trabalhos anteriores aplicados à BESJC, resultando na Tabela 4.2.

Tabela 3.2 – Informações relacionadas com a cobertura do solo

IDENTIFICA	CLASS	NAME	A	B	C	D	COVER	INT	N	IMPERV
001	1	Água	100	100	100	100	0	0,0	0,00	0,0
002	2	Vegetação Aberta	45	66	77	83	10	0,0	0,02	0,0
003	3	Vegetação densa	25	55	70	77	10	0,4	0,02	0,0
004	4	Vegetação Rasteira	47	67	81	88	10	0,0	0,02	0,0
005	5	Ciliar	36	60	73	79	10	0,01	0,02	0,0
006	6	Solo Exposto	72	82	87	89	10	0,0	0,02	0,4

IDENTIFICA: Código de Identificação; CLASS: Classes da camada; NAME: Nome da classe; A, B, C e D: Valor da Curva Número (CN) associado com cada classe; COVER: Porcentagem de cobertura INT: Porcentagem de Interceptação; N: Coeficiente de Manning; IMPERV: Porcentagem de impermeabilização.

O parâmetro que mais influencia na modelagem do KINEROS associado com a cobertura vegetal é o coeficiente de manning, para o qual, foi adotado um valor único baseado em Santos (2008).

De acordo com o mapa da FAO, o tipo de solo correspondente à bacia em estudo é o Luvisolo Crômico. Devido à escala global do mapa da FAO o mesmo acaba considerando apenas um tipo de solo para toda a área da bacia, o que difere dos levantamentos realizados na BESJC (CHAVES, 2002). Porém o arquivo de parâmetros gerado com os dados descritos anteriormente mostrou-se próximo aos valores de parâmetros estabelecidos por Santos (2008) que aplicou KINEROS2 na BESJC.

### ***Execução do modelo e resultados***

Devido ao fato do modelo não ter sido calibrado para esta aplicação, os resultados mostrados são aplicados unicamente para avaliação qualitativa e sob o ponto de vista metodológico. No entanto foram investigados alguns dos fatores referentes ao processo de simulação que mais influenciam na estimativa dos resultados com o intuito de avaliar a coerência da ferramenta AGWA.

Conforme descrito no tópico 3.3.1 os parâmetros foram selecionados com base nos dados da FAO que foram inseridos no modelo. Os dados da FAO representam valores médios

obtidos em outras regiões com características semelhantes, o que não necessariamente quer dizer idêntico a região em estudo.

Alguns dos parâmetros do modelo exercem maior influência sobre os processos de escoamento e erosão, como os valores da condutividade hidráulica e da capilaridade. Nesse sentido, Santos (2008) realizou uma análise de sensibilidade para estimativas destes parâmetros, encontrando valores que mais se adequaram para a região de estudo.

No presente trabalho, os valores dos parâmetros foram estabelecidos por meio do AGWA através das tabelas da FAO relacionadas com o tipo de solo a determinação dos valores de parâmetros ficou a cargo do modelo AGWA, resultando nos dados listados na Tabela 3.3. Nesta tabela, também estão listados os valores determinados por Santos (2008).

Tabela 3.3 – Valores dos principais parâmetros obtidos por diferentes metodologias: planos

	<b>Splash</b>	<b>Rock</b>	<b>Ks</b>	<b>G</b>	<b>Por</b>	<b>Dist</b>	<b>Coh</b>
<b>AGWA</b>	114,78	0,16	4,76	272,73	0,44	0,31	0,007312
<b>Santos (2008)</b>	1000	0,15	4,00	330	0,398	0,32	0,00001445

Pave: ; Splash: Impactos das gotas de chuva; Rock: Fração volumétrica dos solos; Ks: Coeficiente de condutividade hidráulica; G: Valor efetivo do potencial de capilaridade; Por: Porosidade do solo; Coh: Coesão do solo.

Tabela 3.4 – Valores dos principais parâmetros obtidos por diferentes metodologias: canais

	<b>Rock</b>	<b>Ks</b>	<b>G</b>	<b>Por</b>	<b>Dist</b>	<b>Coh</b>
<b>AGWA</b>	0,00	210	101	0,44	0,545	0,005
<b>Santos (2008)</b>	0,15	3,8	263	0,398	0,69	0,00001445

Rock: Fração volumétrica dos solos; Ks: Coeficiente de condutividade hidráulica; G: Valor efetivo do potencial de capilaridade; Por: Porosidade do solo; Dist: Índice de distribuição dos poros; Coh: Coesão do solo.

Os parâmetros considerados principais do modelo como o G, Ks, e porosidade após a utilização do AGWA se mostraram semelhantes para os planos. Os modelos em geral são concebidos e calibrados em regiões com clima, vegetação, entre outras características semelhantes, porém no processo de calibração é necessário levar em consideração as características físicas da bacia como um todo.

As diferenças mais expressivas ocorreram da estimativa da coesão e do potencial de capilaridade, que vão influenciar na determinação do escoamento superficial e da erosão. Com base nos eventos selecionados para aplicação do modelo, a Tabela 4.5 mostra os

resultados da simulação por meio do AGWA em comparação com aplicação anterior na região de estudo.

Tabela 3.5 - Comparação dos resultados das simulações aplicadas na BESJC

Data	Chuva mm	Lo mm	Eo kg/ha	Si	Santos (2008)		AGWA	
					lc mm	Ec kg/ha	lc mm	Ec kg/ha
<b>25/01/2004</b>	64,8	12,51	21,82	0,695	12,43	40,248	17,41	3942,43
<b>30/01/2004</b>	14,8	0,749	6,62	0,64	0,733	2,710	0,16	23,43
<b>15/07/2004</b>	45,7	4,47	0,61	0,753	4,479	15,162	10,17	2417,87
<b>17/02/2005</b>	9,6	0,105	1,16	0,675	0,105	1,165	0,63	144
<b>28/04/2005</b>	60,7	6,551	16,97	0,6	6,528	16,725	40,33	14243,39
<b>24/04/2006</b>	9,3	3,98	5,59	0,648	0,385	5,089	0,38	428,73
<b>21/06/2006</b>	32,8	4,221	26,43	0,783	4,207	26,229	20,48	7736,09

Onde: Lo= Lâmina Observada; Eo= Erosão Observada; Si=Saturação do solo; lc= Lâmina calculada; Ec= Erosão calculada;

O número de eventos simulados para essa aplicação não é suficiente para uma análise mais criteriosa. Em uma comparação entre uma simulação já calibrada como é o caso de Santos (2008), com os resultados obtidos pelo AGWA também é esperado uma diferença significativa dos valores simulados. Porém os resultados mostrados na Tabela 4.5 mostram que, utilizando os dados de parâmetros da FAO existe uma tendência de o AGWA conseguir estimar melhor a lâmina de escoamento do que os sedimentos, que foram superestimados em comparação com os valores obtidos por Santos (2008).

As justificativas para os resultados superiores obtidos pelo AGWA em relação a Santos (2008) estão relacionadas com diversos fatores, como delimitação da área e principalmente os parâmetros obtidos para região. Conforme mostrado por Santos (2008) a discretização também influencia nos resultados da simulação. Nesse caso, para essa aplicação utilizar um valor elevado no CSA irá gerar um número menor de elementos e poderá esconder pequenas características da região como pequenos riachos e conseqüentemente afetar os resultados.

Desse modo foi selecionado o evento do dia 24/04/2006 que adotou Si=0,648 que se mostraram bem próximos dos resultados estimados por Santos (2008) para mostrar através das Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 a representação espacial dos resultados gerados pelo AGWA para a simulação da produção de sedimentos e escoamento na sub-bacia 1.



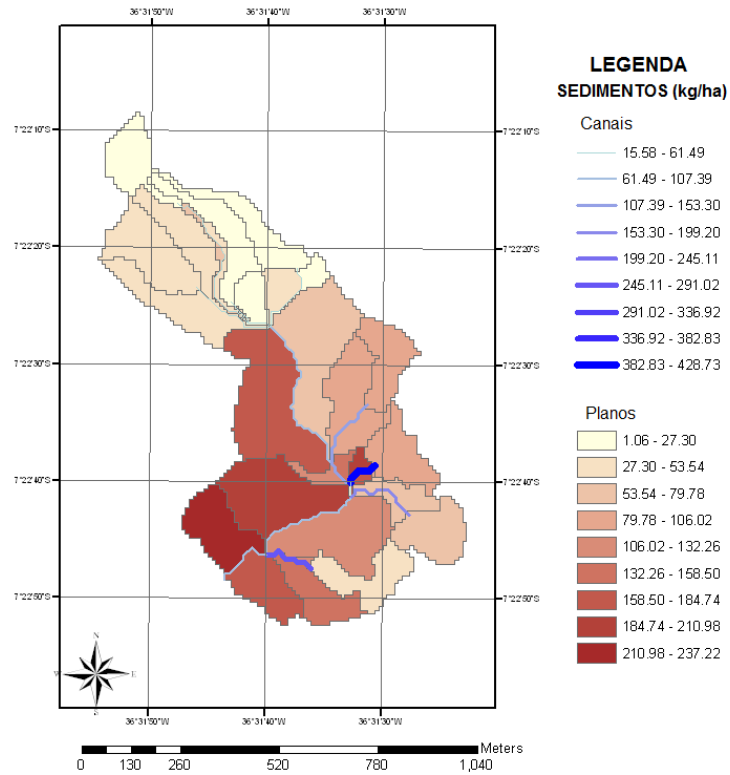


Figura 3.8 -Produção de sedimentos – evento 24/04/2006 (kg/ha)

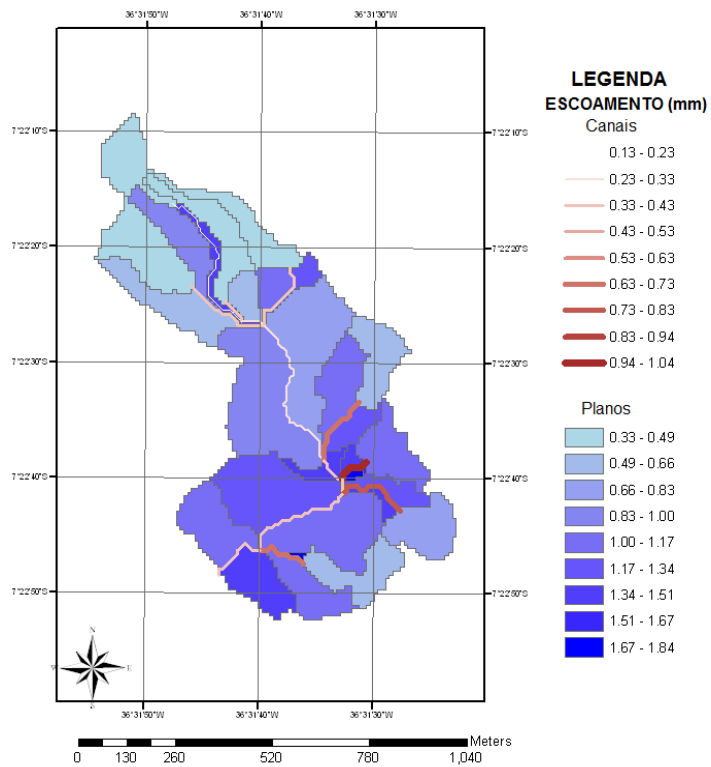


Figura 3.9 - Lâmina total escoada – evento 24/04/2006 (mm)



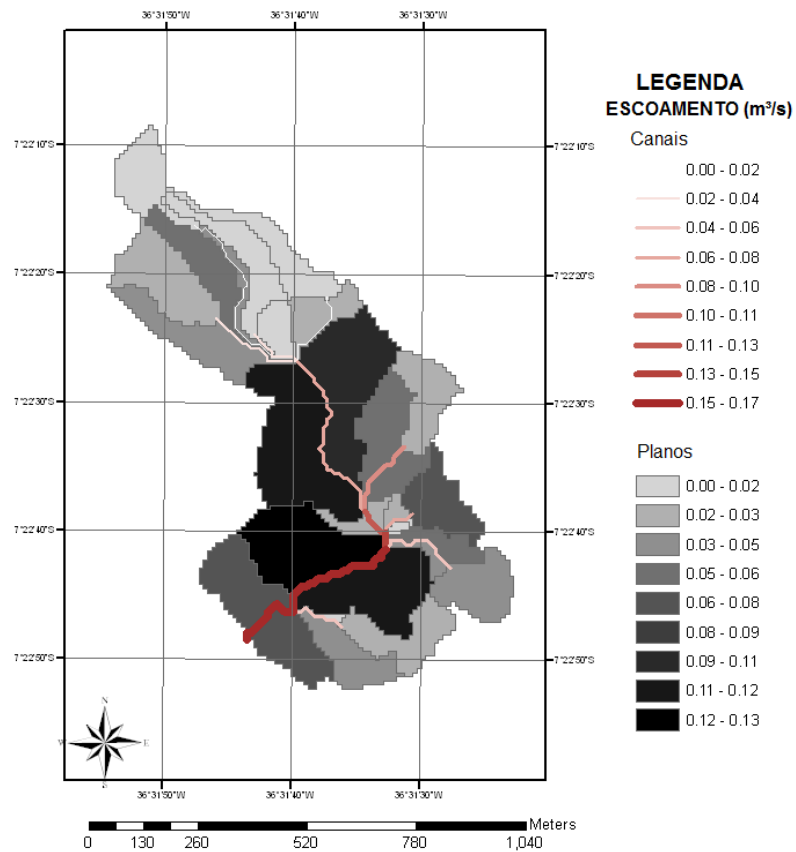


Figura 3.10 – Escoamento superficial – evento 24/04/2006 (m³/s).

Além dos resultados em mapas mostrados anteriormente, são gerados os arquivos de saída com os resultados da simulação. Caso seja necessário, os resultados podem ser exportados para tabelas onde serão gerados gráficos como hidrogramas para cada elemento, como o mostrado na Figura 4.11 que representa o hidrograma de vazão simulada no exultório da sub-bacia 1.

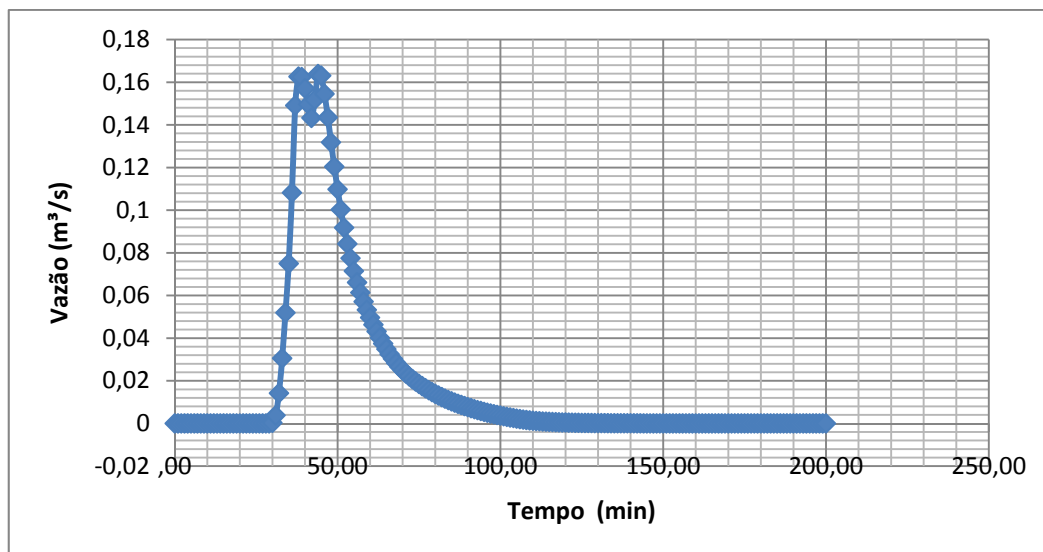


Figura 3.11 - Hidrograma de vazão simulada no exultório da sub-bacia 1 – evento 24/04/2006

A utilização da ferramenta AGWA para integração do modelo hidrológico KINEROS com o ArcGIS mostrou-se de grande auxílio através das vantagens trazidas para o modelador através da automatização dos processos de entrada de dados. Com relação aos resultados obtidos, apesar de não ter havido a calibração do modelo, para alguns eventos os resultados mostraram-se coerentes com os resultados obtidos anteriormente para bacia. Sendo necessária uma adaptação de alguns dados de entrada que represente a realidade da região além da calibração do modelo para que os resultados do AGWA possam ser utilizados para avaliação quantitativa da região.

### 3.3. Aplicação 2 (OpenJUMP-SNIRH-KINEROS)

#### 3.3.1. Arquivos de entrada

Conforme descrito na metodologia os arquivos foram gerados nos formatos específicos para entrada de cada variável e são mostrados nas figuras a seguir. A Figura 3.12 mostra por meio da primeira aba da interface os dados básicos da Sub-bacia 1 a qual foi aplicada o modelo.



Figura 3.12 – Interface gráfica desenvolvida para entrada dos dados do modelo: Dados Básicos

A Figura 4.13 mostra o arquivo de parâmetro que foi carregado para a modelagem. A versão MS-DOS do KINEROS possui uma flexibilidade no reconhecimento do arquivo de parâmetro, o que não ocorre na versão que foi utilizada para esse trabalho. Nesse sentido foi realizada uma adaptação na forma como os parâmetros se encontravam organizados no arquivo (\*.par) para que se pudesse realizar a simulação.

Baseado no trabalho de Santos (2008) a sub-bacia 1 foi discretizada em 35 planos e 14 canais.

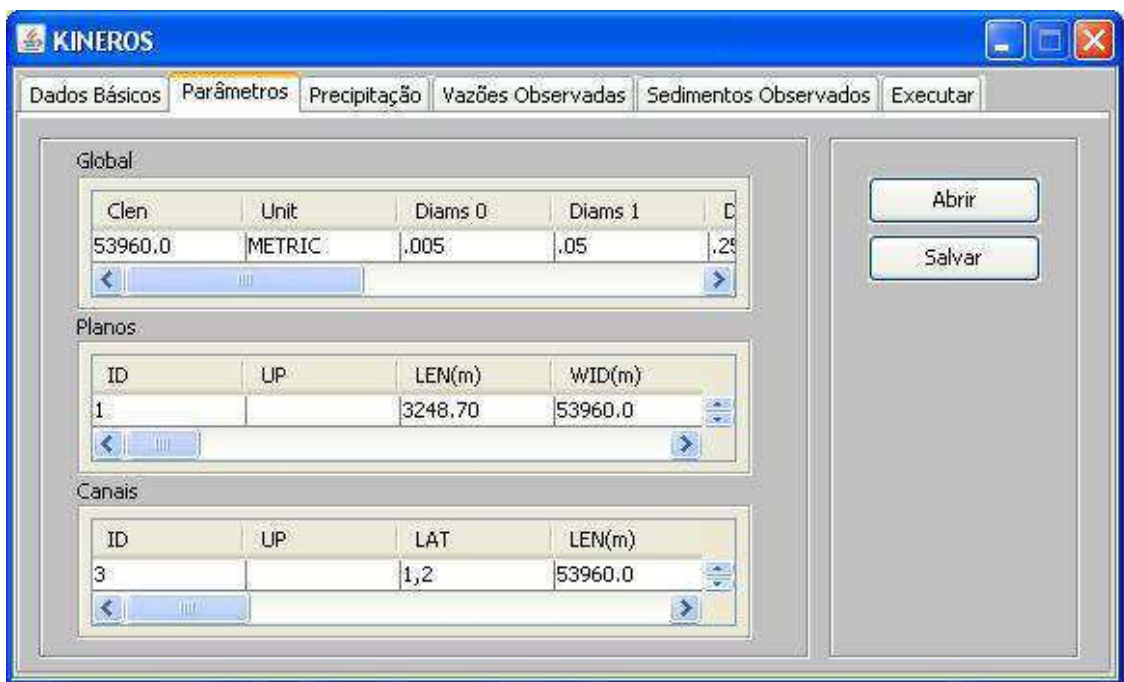


Figura 3.13 – Interface gráfica desenvolvida para entrada dos dados do modelo: Parâmetro

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram os valores de entrada para a precipitação e vazão observada respectivamente.

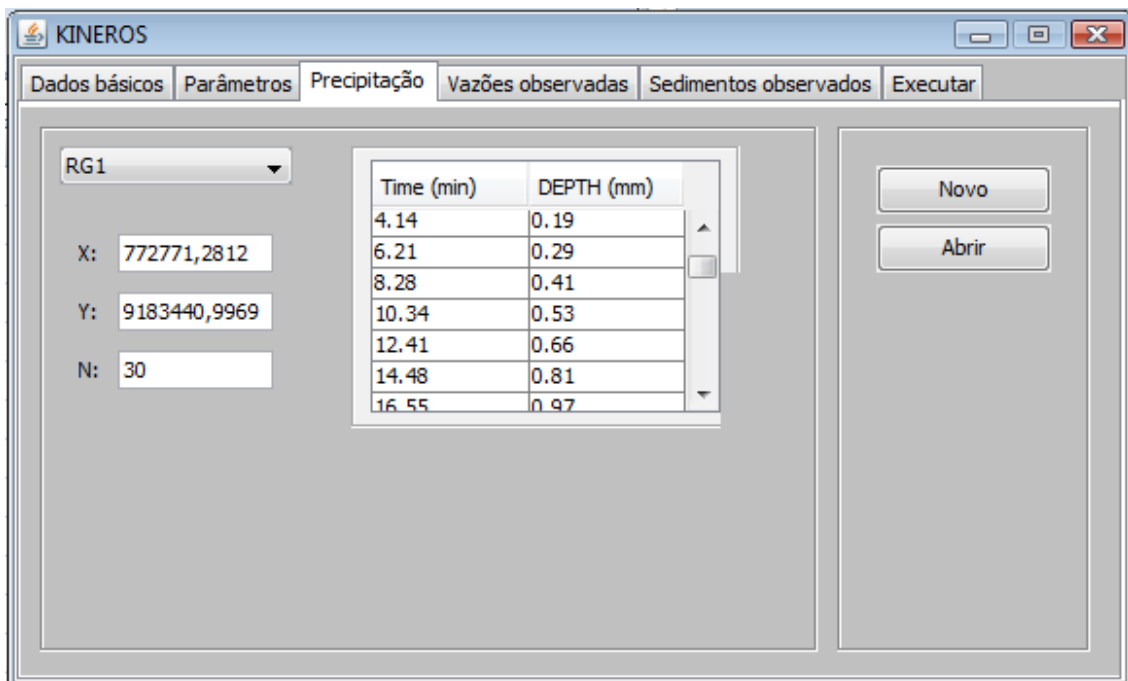


Figura 3.14 – Interface gráfica desenvolvida para entrada dos dados do modelo: Precipitação

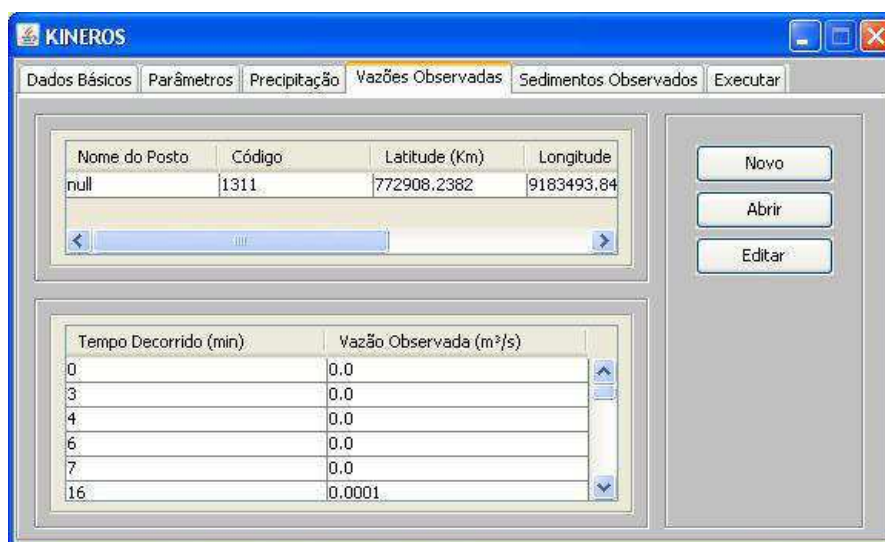


Figura 3.15 – Interface gráfica desenvolvida para entrada dos dados do modelo: Vazão observada

### 3.3.2. Execução e resultados

Após todos os procedimentos descritos anteriormente, a ferramenta disponibiliza uma aba por meio da qual foram verificados todos os arquivos de entrada necessários para a simulação e escolhida a variável vazão para ser simulada. Após a execução do modelo, os resultados foram importados novamente para o SIG no qual ocorreu a visualização dos mesmos.

Essa plataforma desenvolvida mostra os resultados por meio de tabelas e gráficos, que também são acessados por meio de abas. Os resultados e análise realizada pelo sistema são mostrados nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18.

A grande vantagem da utilização da integração OpenJUMP-SNIRH-KINEROS corresponde a manipulação dos dados que após a implementação da plataforma na WEB, o usuário poderá ter acesso diretamente aos dados da Agência Nacional de Águas (ANA). Outro fator importante corresponde à realização das simulações por meio de uma interface de fácil compreensão e visualizar os resultados por meio de gráficos interativos, não necessitando de edição de arquivos de saída para geração de gráficos.

Nesse caso foi elaborada uma interface para o modelo KINEROS, que em sua versão original foi desenvolvida em DOS e a manipulação dos dados ocorria em linhas de comando, desse modo o desenvolvimento da interface auxilia significativamente na comunicação usuário – modelo, que por sua vez implica na melhoria da eficiência dos modelos hidrológicos.

ID	Tipo do elemento	Área do elemento m <sup>2</sup>	Área acumulada m <sup>2</sup>
1	Plane	22130.41	22130.41
2	Plane	26142.48	48272.89
3	Plane	8926.68	8926.68
4	Plane	15450.50	15450.50
6	Plane	7410.87	7410.87
7	Plane	13427.61	13427.61
9	Plane	3510.00	3510.00
10	Plane	3272.40	3272.40
12	Plane	9091.44	9091.44
13	Plane	16594.34	16594.34
15	Plane	5331.20	5331.20
17	Plane	12146.40	12146.40
18	Plane	15277.44	15277.44
19	Plane	16268.25	16268.25

Figura 3.16- Tabela de resumo da simulação

Tempo Decorrido (min)	Vazão Calculada (m <sup>3</sup> /s)
0.	.0000000
10.	.1335027
20.	.2298682
30.	.1003293
40.	.0261570
50.	.0058265
60.	.0016096
70.	.0006864
80.	.0004408
90.	.0003312
100.	.0002430
110.	.0001685
120.	.0001488

Figura 3.17 - Tabela com valores de vazão simulados

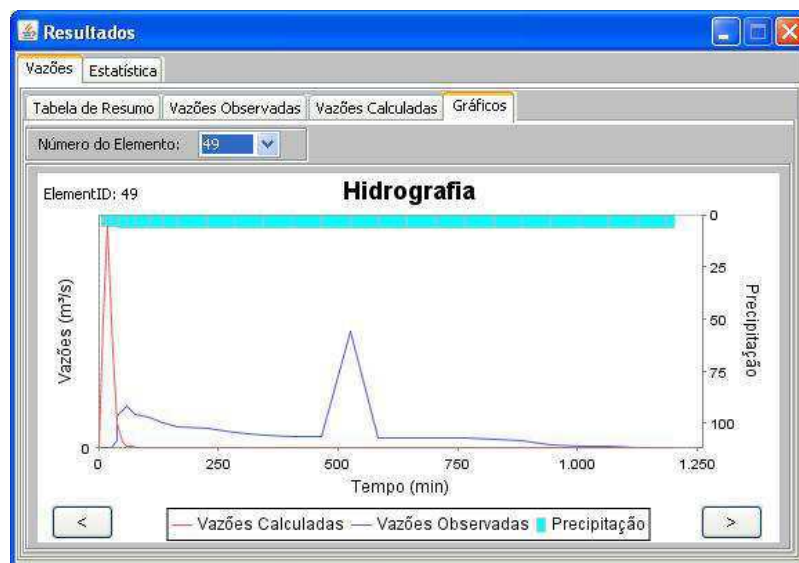


Figura 3.18 - Hidrograma da simulação para cada elemento

Parâmetros	Vaz. Obs. (m³/s)	Vaz. Calc. (m³/s)
Média	0.01	0
Deviation	0.02	0.03
Variância	0	0
Coef. de Variância	1.62	6.23
Mínimo	0	0
Máximo	0.12	0.23
Assimetria	0.62	0.16
Autocorrelação	0.37	0.08
RBIAS	-1.39	
MSRE	127.23	
Coef. Nash	-5.5	
Cor. Pearson - R	-0.2	
Coef. Determ. - R²	0.04	
Função Objetivo		

Figura 3.19 - Resumo estatístico da simulação

Conforme dito anteriormente existem vários fatores que irão influenciar a simulação como número de elementos calibrados e parâmetros arbitrados. A ferramenta utilizada nessa aplicação permite que várias simulações sejam realizadas, sendo as mesmas armazenadas em arquivos distintos.

Os resultados são mostrados a critério do usuário que poderá escolher o elemento e em seguida visualizar os resultados da simulação para o mesmo, por meio de gráficos e tabelas.

A utilização do OpenJump integrado com o KINEROS2 para o SNIRH proporcionou novas funcionalidades na utilização do modelo hidrológico, como manipulação dos dados de entrada e a forma de visualização dos resultados. Os resultados obtidos representaram melhor a BESJC, devido ao fato de serem dados que já foram aplicados e validados anteriormente por Santos (2008).

### 3.4. Comparação entre as duas metodologias

A Tabela 3.6 mostra o resumo com a classificação das aplicações realizadas, com base nos critérios estabelecidos.

Tabela 3.6 – Classificação quanto aos critérios desenvolvidos

	<b>Critérios Elaborados</b>		
<b>Aplicação</b>	<b>Relacionamento de dados</b>	<b>Modificação no Código Fonte</b>	<b>Grau de Complexidade</b>
ARCGIS AGWA KINEROS	Com compartilhamento	Integração Interna – Modelo no SIG – Ligado	Integração Básica
OpenJump SNIRH KINEROS	Sem compartilhamento	Integração Interna – Modelo no SIG – Ligado	Integração Básica

As aplicações mostradas anteriormente apresentaram duas formas distintas de integrar um modelo hidrológico distribuído a um SIG. Cada aplicação demonstrou a importância de um sistema integrado, trazendo benefícios para o usuário por meio de processos automatizados e interfaces desenvolvidas para auxílio à gestão dos dados.

Com base na metodologia aplicada nesse trabalho e levando em conta os critérios estabelecidos para classificar as formas de integração entre SIG e modelo hidrológico, são analisadas as aplicações de forma que se identifiquem as vantagens e dificuldades em cada metodologia adotada.

Com relação ao primeiro critério estabelecido (Tabela 3.7), “o relacionamento entre os dados”, a primeira aplicação utilizando o AGWA foi desenvolvida com compartilhamento de banco de dados, onde é perceptível uma proximidade lógica entre as duas ferramentas. Os arquivos necessários para a simulação são extraídos diretamente a partir do banco de dados que estão no formato pré-estabelecido, e em seguida todo o processo de parametrização do modelo ocorre dentro do ambiente SIG para posteriormente ser exportado para o modelo. Sem necessidade de conversão entre arquivos para que ocorra a simulação. A segunda aplicação, utilizada para o SNIRH, foi desenvolvida sem compartilhamento de dados. Observa-se então a necessidade do desenvolvimento do arquivo de parâmetro externo ao SIG para que posteriormente esse arquivo possa ser inserido no SIG.



Tabela 3.7 – Avaliação das aplicações quanto ao critério de relacionamento entre os dados

<b>Relacionamento entre os dados</b>			
		<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
ArcGIS AGWA KINEROS	Com compartilhamento de dados	Proximidade mais lógica;  Melhora o desempenho do usuário (Processo automatizado).	Necessidade de dados consistentes na resolução e formato adequado (Solo, Topografia, etc.).
OpenJump SNIRH KINEROS	Sem compartilhamento de dados	Não necessita de dados digitais em formato pré-estabelecido.	Demanda maior tempo na utilização do modelo.

Em relação ao usuário a integração com compartilhamento se mostrou eficiente no auxílio na modelagem através do processo automatizado de coleta de parâmetros e transferência dos mesmos para a simulação, sem necessidade de edição ou pré-processamento. Fato que não ocorreu com a aplicação sem compartilhamento, onde em bacias na qual sejam aplicadas discretizações em um número elevado de elementos o processo de parametrização será tedioso e demorado.

No entanto, o processo automatizado possui a desvantagem de que, para muitas regiões, os bancos de dados existentes de entrada para ferramentas de integração de SIG com modelos não apresentam uma resolução espacial adequada. Essa limitação ocorreu com o AGWA, onde os dados de solo disponíveis para região apresentaram uma baixa resolução para a BESJC, afetando significativamente nos resultados simulados. Além dos dados de solo também é necessário levar em consideração o MNT, pois consiste na principal entrada nos processos automatizados de avaliação de bacias hidrográficas, onde os mesmos devem possuir uma resolução adequada, visto que, com base nele são obtidas todas as características físicas da bacia para entrada no modelo, evitando-se também o efeito zig-zag que ocorre quando o modelo possui uma célula grande em relação à área em estudo.

O modelo hidrológico KINEROS2 foi desenvolvido em DOS, sendo manipulado comumente por meio de linhas de comando no qual o usuário insere os dados de entrada para a simulação. As duas aplicações apresentaram desenvolvimentos com o intuito de auxiliar o usuário nesse processo. Por se tratar de um modelo de base física, as equações que definem o KINEROS2 são complexas para serem inseridas dentro de um ambiente SIG. Nesse sentido,

sob o ponto de vista da modificação no código fonte (Tabela 3.8), para as duas aplicações foi adotada a integração interna modelo no SIG, por meio da conexão. A primeira aplicação utilizando o ArcGIS desenvolveu uma extensão que funciona dentro do SIG e por meio de um *plugin*. Devido ao fato de ser um SIG proprietário foi adotada a arquitetura orientada a serviços, onde duas linguagens diferentes foram unidas para o desenvolvimento de uma GUI onde o usuário manipulava todo o processo envolvido na modelagem. A segunda aplicação, por sua vez utilizou um SIG livre o OpenJUMP, no qual foi também desenvolvido um *plugin*, sendo que por se tratar de um SIG livre, foi implementado na linguagem de programação interna do SIG através da programação orientada a objetos para também ser apresentado ao usuário interfaces gráficas.

Tabela 3.8 - Avaliação das aplicações quanto à Modificação no Código Fonte

Modificação no Código Fonte				
		Implementação	Vantagens	Desvantagens
ArcGIS AGWA KINEROS	<b>Integração Interna modelo no SIG Ligado (plugin)</b>	Arquitetura Orientada a Serviços	Substituição das Linhas de Comando por GUI; Melhoria da comunicação Usuário – Modelo; Melhoria na manipulação dos dados; Aumento da eficiência nos resultados por meio da redução de erros nos dados de entrada; Menor tempo para modelagem;	Necessidade de desenvolvedores na equipe; Maior tempo de implementação.
OpenJump SNIRH KINEROS		Programação Orientada a Objetos		

A substituição das linhas de comando do DOS pelas interfaces gráficas dentro do SIG corresponde a uma das principais vantagens na integração de SIG com modelos hidrológicos. A modificação no código fonte tem levado a grandes desenvolvimentos como a presença de interfaces gráficas amigáveis e inserção de algoritmos utilizadores que vem simplificando a manipulação dos dados de entrada para execução do modelo e ampliando a possibilidade de visualização dos resultados. As duas aplicações apresentam opções para que o usuário insira dados de precipitação por meio da GUI. No caso do SNIRH ainda podem ser inseridos dados de vazão e transporte de sedimentos observados, propriedade essa que não é permitida pelo AGWA. Com relação à implementação das ferramentas a diferença entre o

tipo de programação adotado está ligada com os softwares que estão disponíveis para desenvolver o sistema.

Com relação ao pós-processamento dos resultados (Tabela 3.9) existe uma diferença significativa entre as duas aplicações. Enquanto o resultado do modelo no AGWA ocorre por meio de mapas, os resultados produzidos para o SNIRH ocorrem por meio de gráficos e tabelas. Os resultados espacializados correspondem a uma ferramenta de suma importância para a gestão dos recursos hídricos, pois através deles é possível a identificação de um determinado fenômeno na região como, por exemplo, uma maior produção de escoamento e associá-la uma determinada cobertura de solo. Porém, os resultados gráficos ainda são mais eficientes para avaliação quantitativa do modelo hidrológico, além do comportamento temporal do fenômeno que ainda não é possível por meio do SIG.

Tabela 3.9 - Forma de visualização dos resultados

<b>Pós-processamento</b>		
	<b>Visualização</b>	<b>Características</b>
<b>ArcGIS AGWA KINEROS</b>	Mapas	Mais adequado para avaliação qualitativa e identificação espacial do problema
<b>OpenJump SNIRH KINEROS</b>	Gráficos	Mais adequado para avaliação quantitativa e calibração dos resultados;

Em relação ao critério do grau de complexidade (Tabela 3.10) adotado pelas aplicações, todas as duas aplicações se enquadram como integração básica. Apesar dessas ferramentas apresentarem diversas funcionalidades no apoio à modelagem, todas estão ligadas com o pré e pós processamento dos dados. No entanto a utilização do AGWA se diferencia, uma vez que além do pré e pós processamento dos dados, a ferramenta proporciona uma automatização dos processos envolvidos na modelagem, bem como comparação entre simulações distintas por meio de mapas.

Tabela 3.10 - Avaliação das aplicações quanto ao Grau de Complexidade

<b>Grau de Complexidade</b>			
		<b>Características</b>	<b>Diferença</b>
<b>ArcGIS- AGWA- KINEROS</b>	Integração Básica	“Utilizados apenas como pré e pós-processamento de dados”	AGWA – Automatização do processo, comparação entre simulações distintas, geração de mapas
<b>OpenJump – SNIRH - KINEROS</b>			

A segunda aplicação foi desenvolvida com o intuito de manipulação dos dados do modelo permitindo que o usuário possa visualizar os resultados da modelagem por meio de gráficos e tabelas, como ditos anteriormente.

## 4. Conclusões e Recomendações

A investigação mostrada nesse trabalho identificou que os Sistemas de Informações Geográficas já correspondem a uma ferramenta de primordial importância na área de recursos hídricos não apenas no gerenciamento de dados, mas também na geração de cenários que auxiliam na tomada de decisão.

As diversas aplicações que vêm ocorrendo desde os primeiros trabalhos na integração entre modelos hidrológicos e SIG mostrou a grande variedade de modelos e regiões aplicadas. Os modelos hidrológicos aplicados variam significativamente, que vai de modelos mais simples como a equação universal de perda do solo (USLE) até modelos mais complexos como o SWAT.

A comparação entre os primeiros trabalhos utilizando SIG e modelos hidrológicos e as aplicações mais recentes mostra um crescimento dessas ferramentas integradas. Esse crescimento é justificado pelo crescente investimento na área de tecnologia que vem ampliando as funcionalidades dos SIG convencionais, surgindo a idéia de “SIG estendido”, no qual são inseridas novas propriedades capazes de atender determinadas demandas dos modelos hidrológicos.

Esse crescimento tem se mostrado hábil não apenas nos meios acadêmicos, mas também no setor empresarial que tem procurado investir cada vez mais no desenvolvimento dessa tecnologia. No Brasil é perceptível o crescimento de algumas iniciativas e investimentos de pesquisas nesta área, porém com aplicações voltadas mais para o gerenciamento e a visualização de dados.

Apesar dos avanços observa-se que ainda existem algumas incompatibilidades principalmente relacionadas com a estrutura de alguns modelos hidrológicos que não permitem que estes sejam integrados diretamente com um SIG, como os modelos SWAT e KINEROS2 cujas aplicações mostraram-se apenas por meio da ligação com o SIG. Sendo necessário encarar o processo com parcimônia, para que se possam explorar coerentemente os resultados obtidos. Além disso, a variável temporal dos modelos hidrológicos ainda é de difícil implementação e representação no SIG visto que um mapa sempre será uma representação visual de certa data (instante) e a representação de séries temporais ou de cenários para diferentes instantes ainda acarreta grande esforço computacional e de armazenamento.

Com relação à metodologia elaborada nesse trabalho para criação de critérios que visam à sistematização da integração entre modelos hidrológicos e SIG pode-se afirmar que se mostrou eficiente e representativa, uma vez que foi enquadrada uma quantidade significativa de aplicações realizadas em períodos de tempo diferentes e utilizando uma diversidade de SIG e modelos hidrológicos.

Ainda sobre as abordagens metodológicas de integração, foi verificada a influência da tecnologia da informação sobre o desenvolvimento de sistemas integrados de SIG e modelos, sendo esse fator marcante nos critérios estabelecidos para a sistematização. Trazendo como consequência a importância da metodologia desenvolvida para os primeiros passos no desenvolvimento de integrações entre modelos hidrológicos distribuídos e SIG. Sendo significativa não apenas para o usuário, mas também para o desenvolvedor no qual a partir das características do sistema que precisará desenvolver se baseará nos critérios estabelecidos para alcançar o seu objetivo.

O fator Tecnologia da Informação também é responsável pelo avanço no processo de integração entre modelos e SIG, uma vez que novos desenvolvimentos proporcionaram que modelos hidrológicos mais complexos pudessem ser acoplados aos SIG, trazendo um significativo avanço para a aplicabilidade destas ferramentas computacionais.

As duas ferramentas aplicadas se mostraram eficientes no que diz respeito à manipulação de dados de entrada para o modelo hidrológico, sendo cada aplicação desenvolvida para um objetivo específico, apresentando diferenças, sobretudo no aspecto de entrada de dados para o modelo e forma de visualização dos resultados.

De acordo com os critérios desenvolvidos, as aplicações mostraram-se diferentes unicamente quanto ao relacionamento dos dados. Desse modo foi verificado que uma integração com compartilhamento de dados é mais vantajosa para o usuário, uma vez que o processo de transferência, manipulação manual de dados referente a caracterização de bacias hidrográficas está mais propensa a erros.

A modificação no código fonte que ocorreu nos sistemas por meio da implementação de ferramentas também contribuiu para uma melhoria no processo de modelagem hidrológica, pois modelos hidrológicos desenvolvidos com interfaces gráficas voltadas ao usuário permitem um melhor controle de dados sem necessidade de manipular os arquivos.

A utilização do modelo KINEROS2 integrado com um SIG mostrou que apesar das limitações, é possível a integração de modelos hidrológicos complexos com SIG desde que sejam identificadas as limitações do processo, elaborando dados com precisão significativa para serem aplicados na região. Devido à aplicação de algoritmos de interpolação, recomenda-se que a coleta dos dados extrapole os limites da bacia hidrográfica em estudo, para que se possam obter dados mais representativos.

A integração realizada utilizando o OpenJump por meio da ferramenta desenvolvida para o SNIRH mostrou-se competente no auxílio na manipulação dos arquivos de entrada e na visualização dos resultados por meio de tabelas e gráficos. Sendo necessário futuras implementações para que seja gerado resultados espacializados para proporcionar informações a mais na tomada de decisão.

Em relação aos resultados obtidos pelas aplicações recomenda-se que para aplicação mais coerente da ferramenta AGWA para uma bacia hidrográfica é necessário um MNT com uma melhor resolução para que a extração dos parâmetros físicos da bacia como a delimitação, declividade e discretização possam ser representativos da bacia de estudo. Além disso, o mapa de solo para região deve ser elaborado levando em consideração os solos existentes da região, mas essa ainda corresponde a uma limitação da utilização do AGWA no Brasil. Sendo necessários alguns avanços para que se possa explorar toda capacidade da utilização dessa ferramenta. Deve ser investigada também a simulação com diferentes discretizações para que se possa identificar a influência na simulação. Na segunda aplicação, que corresponde ao KINEROS2 integrado ao OpenJump, o que modifica em relação ao processo de modelagem é apenas a interface de entrada de dados e visualização de resultados.

## 5. Referências Bibliográficas

- Al-Abed N, Abdullah F, Abu Khyarah A, GIS-hydrological models for managing water resources in the Zarqa River basin. *Environ Geol* 47:405–411. 2005.
- Almeida, C. N. Modelagem Integrada de Recursos Hídricos com Apoio de um Sistema de Informações Geográficas. Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento, 2006, 114f. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.
- Anderson, A. H. The development of a 4-dimensional gis/cadd-based decision support system for managing environmental remediation projetos. *Watermodeling Resources*. [[http://www.watermodeling.org/html/4d\\_gis\\_cadd.html](http://www.watermodeling.org/html/4d_gis_cadd.html)], 1998.
- Araújo, M. e Rocha, J. G. Web Services na Informação Geográfica. In XATA 2004 – XML, aplicações e tecnologias associadas. Editado por José Ramalho e Alberto Simões (Braga: Universidade do Minho), pp. 88-101, 2004.
- Arnold, J. G., Williams, J. R., Sirinivasan, R., King, K, K. W. and Griggs, R. H. SWAT – Soil Water Assessment Tool. USDA, Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, Texas.1994. (<http://www.brc.tamus.edu/swat/>)
- Aronoff, S. *Geographical Information Systems: A Management Perspective*. Ottawa, WDI Publications, 1989.
- Bathurst, J. C.; Wicks, J. M.; O’Connel, P. E. 1995 The SHE / SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system. In: Singh, V. P. (editor) *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications. Highlands Ranch, 1130pp.
- Bernard, L. e Kruger, T. Integration of GIS and Spatiotemporal Simulation Models: Interoperable Components for Different Simulation Strategies. *Transaction in GIS*. June, 2000. Disponível em: <[http://ifgiweb.uni-muenster.de/~bernard/publications/bernard\\_kruger\\_tgisdraf.pdf](http://ifgiweb.uni-muenster.de/~bernard/publications/bernard_kruger_tgisdraf.pdf)>. Acesso em 21 de outubro de 2009.
- Beven, K. Infiltration, Soil Moisture, and Unsaturated Flow. In: Bowles, D.S. and O’Connell, P.E. Ed. *Recent advances in the modeling of hydrologic systems*. Dordrecht: Klumer Academic Publishers, 1991. Cap. 7, p. 137-151. (Series C: Mathematical and Physical Sciences, 345).



- Beven, K. J.; Lamb, R.; Quinn, P.; Romanowicz, R.; Freer, J. TOPMODEL. In: Singh, V. P. (editor) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications. Highlands Ranch, 1130pp. 1995
- Beven, K. J. Distributed Hydrological Modelling: Applications of the TOPMODEL Concept. John Wiley and Sons, Chichester. 1997.
- Bian, L. Integrating Environmental Models and GIS in the Framework of GIS Interoperability, 1997. Disponível em: <<http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/interop97/program/papers/bian.html>>. Acesso em 21 de outubro de 2009.
- Borah, D.K. and Bera, M. Watershed-Scale Hydrologic and Nonpoint-Source Pollution Models: Review of Applications. Transactions of the ASAE 47(3):789-803. 2004.
- Burrough, P. A. Dynamic Modelling and Geocomputation. In Geocomputation: A Primer, edited by Longley, P. A., Brooks, S. M., McDonnell, R. and Macmillan, B. (Chichester: John Wiley & Sons), pp. 165–191, 1998.
- Burrough, P. A.; McDonnell, R. A.; Principles of Geographical Information Systems. Oxford, Clarendon Press, 2a edição, 311p, 1998.
- Calijuri, M. L., Meira, A.D. e Prusk, F. F. Geoprocessamento Aplicado aos Recursos Hídricos. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 27. Poços de Caldas, 1998. Cartografia, Sensoriamento e Geoprocessamento. Lavras: UFLA, SBEA, 1998, p. 200-225.
- Câmara Neto, G. Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos. 1995. 282 p. (INPE-TDI). Tese de Doutorado em Computação Aplicada - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 1995. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.29.07.25>>. Acesso em: 23 de outubro de 2009.
- Carvalho, P. R. S. Análise Comparativa de Métodos para Delimitação Automática das Bacias e Sub-Bacias do Alto Curso do Rio Preto. Dissertação de Mestrado em Geografia. Universidade de Brasília, 58f, 2007.
- Cavalcante, S. P. P., Teixeira, A. S. Avaliação Espacial da Erosão através do uso de SIG – Sistemas de Informações Geográficas: In: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2004, São Luís. VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2004.

- Chang, T. J., H. Ming-Hsi, W. Teng, and C. J. Huang. A GIS Assisted Distributed Watershed Model for Simulating Flooding and Inundation. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 36(5):975-988. 2000.
- Chang, C., Lo S., Yu S, Role of Geographic Information System (GIS) in watershed Simulation By WinVAST Model. *Environmental Monitoring and Assessment*. 289-301. 2005.
- Chaves, I. B. et al. Salinidade das águas superficiais e suas relações com a natureza dos solos na bacia escola do açude namorados e diagnóstico do uso e degradação das terras. Relatório técnico. Convênio Banco do Nordeste do Brasil/UFPB/FINEP. Campina Grande, 2002. 114 f.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. e Mays, L. W. *Hidrologia Aplicada*. Editora McGraw-Hill, Santafé de Bogotá, Colômbia, 1994.
- Christofoletti, A. *Modelagem de Sistemas Ambientais*. São Paulo: UNESP. Edgard Blucher, 1ª edição, 1999. 236 p.
- Chung, J. Y. *Web-Services Computing: Advancing Software Interoperability*. IEEE Computer, October, 2003.
- Cirilo, J. A., Sampaio Jr, R. A., Agra, M. C. M., Cunha, F. A. G. C. e Torres Filho, C. O. Sistema de Informações de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco: Subsistema de Informações ao Usuário. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2(1), p. 29-43, 1997.
- Coelho, G. B. *Análise e Simulação do Processo de Transformação de Chuva em Vazão com Suporte de Sistema de Informações Geográficas (SIG)*; 2006; 81f. Dissertação de Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco Centro de Tecnologia e Geociências. Recife, 2006.
- Collares, E. G. *Avaliação de alterações em redes de drenagem de microbacias como subsídio ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas: aplicação na Bacia Hidrográfica do Rio Capivari –SP*. 2000. 194f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Collins, S. H. and Moon, G. C. Algorithms for dense digital terrains models, *Photogram. Eng. and Remote Sensing*, 47:71-76. 1981.

- Collischonn, W.; Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.
- Coppock, J. T. e Rhind, D. W. The History of GIS. In Maguire, D.W., Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (editors) *Geographical Information Systems: Principles and Applications*. London: Longman Scientific and Technical, Vol. 1, pp. 21–43, 1991.
- Couclelis, H. Space, Time, Geography. In *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*, edited by Logley, P. A., Goodchild. M. F., Maguire, D. J. and Rhind, D.W. New York: John Wiley & Sons, 1999. Vol. 1, pp. 29-38.
- Cuevas, N. G. A. Modelacion hidrológica de las cuencas El Chuveje y Arroyo Real como herramienta en la implementacion de pago por servicios ecologicos en la Reserva de La Biosfera Sierra Gorda, Queretaro, Mexico. Tesis de Maestra em Ciencias Especialid em Sistemas Ambientales. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey. 2006.
- De Roo, A. P., Modelling runoff and sediment transport in catchments using GIS. *Hydrological Processes* 12, 905–922. 1998.
- De Paz, J. M. and Ramos, C.. Linkage of a Geographical Information System With the GLEAMS Models to Assess Nitrate Leaching in Agricultural Areas. *Environmental Pollution* 118:249-258. 2002.
- Devantier, B. A.; Feldman, A. D. Review of GIS applications in hydrologic modeling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.119, p.246-60, 1993.
- Dooge, J. C. I. *Linear Theory of Hydrologic Systems: Technical Bulletin nº. 1948*. ARS, US Department of Agriculture, 1973.
- Eierman, M. A., Niederman, F. e Adams, C. DSS Theory: A Model of Constructs and Relationships. *Decision Support Systems*, 14, 1-26. 1995.
- Fallahi, G. R., Frank, A. U., Mesgari, M. S. e Rajabifard, A. An Ontological Structure for Semantic Interoperability of GIS and Environmental Modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, pp. 342–357, 2008.
- Fedra, K. Gis and environmental modeling. In: Goodchild, M. F.; Parks, B. O.; Steyaert, L. T., ed. *Environmental modeling with GIS*. New York, Oxford, 1993. p.35-50.

- Fedra, K. Distributed Models and Embedded GIS: Integration Strategies and Case Studies. In: Goodchild, M. F. et al. (Eds.), GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues. GIS World Book, Fort Collins, p. 414–417, 1996.
- Fedra, K. Beyond GIS: Integrating dynamic simulation models and GIS for natural resources and environmental management. GIS Development. 2006. Disponível em: <[http://www.gisdevelopment.net/proceedings/mapmiddleeast/2006/natural%20resource%20management/mm06nat\\_96.htm](http://www.gisdevelopment.net/proceedings/mapmiddleeast/2006/natural%20resource%20management/mm06nat_96.htm)> Acessado em 14 de Junho de 2009.
- Fedra, K. GIS and Simulation Models for Water Resources Management: A Case Study of the Kelantan River, Malaysia. GIS Development. 6/8: 39-43, 2002. Disponível em: <<http://www.ess.co.at/docs/papers/WW.html>>. Acesso em 21 de outubro de 2009.
- Feng, C-C. e Sorokine, A. Incorporating Hydrologic Semantic Information for Interoperable GIS with Hydrologic Model. ACMGIS 2001: 59-63, 2001.
- Fotheringham, A. S. e Rogerson, P. Spatial Analysis and GIS. London: Taylor and Francis, 1994.
- Gomes, L. N. e Cardoso, L. G. Modelagem Numérica da Superfície na Geração da Planialtimetria Segundo Dados de Quatro Equipamentos Topográficos. Irriga, Botucatu. V.3, n.1, p. 81-91, 2008. Disponível em: <<http://200.145.141.142/revistas/irriga/include/getdoc.php?id=772&article=284&mode=pdf>>. Acesso em 20 de Outubro de 2009.
- Goodchild, M. F., Haining, R. e Wise, S. Integrating GIS and Spatial Data Analysis: Problems and Possibilities. International Journal of Geographical Information Systems, 6, p. 407-423. 1992.
- Goodchild, M. F. The State of GIS for Environmental Problem-Solving. In Environmental Modeling with GIS, edited by Goodchild, M. F., Parks, B. O. and Steyaert, T. (New York: Oxford University Press), pp. 8-15, 1993.
- Goodchild, M., Egenhofer, M., Fegeas, R. Interoperating GISs: Report of a Specialist Meeting Held under the Auspices of the Varenus Project Panel on Computational Implementations of Geographic Concepts [online]. National Center for Geographical Information and Analysis, Santa Barbara. 1997. Disponível em: <<http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/interop97/report.html>>. Acesso em 21 de Outubro de 2009.
- GRASS - Geographic Resources Analysis Support System, 1999. Disponível em: <<http://www.baylor.edu/~grass/>>. Acesso em 22 de outubro de 2009.

- Grossi, C. H. Sistema de Informação Geográfica - BASINS 3.0 na Modelagem Hidrológica da Bacia Experimental do Rio Pardo, SP, 2003; 101f. Dissertação de Mestrado em Agronomia. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônomicas Campus de Botucatu. 2003.
- Haggett, P. e Chorley, R. J. Modelos, Paradigmas, e a Nova Geografia. Modelos físicos e informações na Geografia. (Chorley, R.J. e Haggett, P., Eds.). Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1-19, 1975.
- Hinaman, K. C. Use of Geographic Information Systems to Assemble Input-Data Sets for a Finite Difference Model of Ground Water Flow. *Water Resources Bulletin* 29:401-405, 1993.
- Huber, W.C. and R.E. Dickinson, Storm Water Management Model (SWMM), Version 4, User's Manual. EPA/600/3-88/001a, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia. 1988.
- Hunter, G. J. e Goodchild, M. F. Modeling the uncertainty of slope and aspect estimates from spatial database. *Geographical Analysis*, 29, 35-49. 1997.
- Jha, M.K. and A. Das Gupta, 2003. Application of Mike Basin for Water Management Strategies in a Watershed. *Water International* 28(1):27-35.
- Kalken, T. V., Skotner, C., Mulholland, M. Application of an Open, GIS Based Flood Forecast System to the Waikato River, New Zealand. In: International conference on innovation advances and implementation of flood forecasting technology. Troms, Norway. 2005.
- Keen, M., Acharya, A., Bishop, S., Hopkins, A., Milinski, S., Nott, C., Robinson, R., Adams, J. e Verschueren, P. Patterns: Implementing an SOA Using an Enterprise Service Bus. IBM Redbook, 22 July 2004.
- Kepner, W. G.; Semmens, D. J.; Bassett, S. D.; Mouat, D. A.; Goodrich, D. C. Scenario analysis for the San Pedro river, analyzing hydrological consequences of a future environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, n.94, p.115-127, 2004.
- Kopp, S.M. Linking GIS and Hydrological Models: Where We Have Been, Where We Are Going? In: Application of Geographical Information Systems in Hydrology and Water Resources, edited by Kovar, K. and Nachtnebel, H.P. (Proc. Int. Conf. HydroGIS96, Vienna, April 1996), 133-139. IAHS publ. no. 235.

- Levick, L.R., D. Semmens, D.P. Guertin, I.S. Burns, S.N. Scott, C.L. Unkrich and D.C. Goodrich. 2004. Adding global soils data to the Automated Geospatial Watershed Assessment Tool (AGWA). In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Transboundary Waters Management, Tucson, AZ, Nov. 16-19, 2004.
- Y. R., G. H. Huang, Y.F. Li, J. Struger, and Fischer J. D. A Pesticide Runoff Model for Simulating Runoff Losses of Pesticides From Agricultural Lands. *Water Science and Technology* 47(1):33-40. 2002.
- Loague, K., Corwin, D.L. Regional-Scale Assessment of Non-point Source Groundwater Contamination. *Hydrological Processes*. vol. 12, pp. 957-965. 1998.
- Yang, M. D., C. J. Merry, R. M. Sykes. Integration of Water Quality Modeling, Remote Sensing, and GIS. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 35(2):253-263. 1999.
- Machado R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Tese de doutorado de agronomia. Área de concentração: irrigação e drenagem. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, São Paulo, 2002.
- Maeda, E. E. Influência das mudanças do uso e cobertura da terra no escoamento superficial e produção de sedimentos na região da Bacia do Alto Rio Xingu. Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto. INPE. São José dos Campos. 2008.
- Maidment, D.R. GIS and hydrologic modeling. In Goodchild, M.F., Parks, B.O. and Steyaert, L.T. (ed.), *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, Oxford, 147-167. 1993.
- Maidment, D. R. *Arc Hydro: GIS for Water Resources*. ESRI, Redlands, CA. 2002.
- Marsili-Libelli, S., E. Caporali, S. Arrighi, C. Becattelli, A Georeferenced River Quality Model. *Water Science and Technology* 43(7):223-230. 2001.
- Martin, P. H., E. J. LeBoeuf, J. P. Dobbins, E. B. Daniel, and M. D. Abkowitz. Interfacing GIS with water resource models: A state-of-the-art review. *J. American Water Resources Assoc.* 41(6): 1471-1487. 2005.
- McDonald MG, Harbaugh AW. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. *US Geological survey techniques of water-resources investigations*, book 6, Chap. A1, US Geological Survey, Open-File report 83-875. 1988.

- McKinney, D. C.; X. Cai. Linking GIS and water resources management models: an object-oriented method. *Environmental Modelling & Software* 17: p. 413–425, 2002.
- Mendes, C. A. B. Planejamento Nacional de Recursos Hídricos Baseado no Uso de Técnicas de Geoprocessamento, 9p. 1998.  
<http://www.iica.org.Br/AguaTrab/Carlos%20andre%20publões/P1TB08.htm>.
- Mendes, C. A. B. e Cirilo, J. A. Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação. ABRH: Porto Alegre, 2001. 536p.
- Miller, S. N., Goodrich, D. C., Hernandez, M., Semmens, D. J., Miller, R. C., Kepner, W. G. e Guertin, D. P. The Automated Geospatial Watershed Assessment Tool. *Environmental Modelling & Software*, v.22, n.3, p. 365-377. 2007.
- Miranda, J. I. Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas. Brasília, DF, Embrapa Informação Tecnológica. Editora Perfil. 425p. 1ª Edição. 2005.
- Moore, I. D. Hydrologic modelling and GIS models In: Prelim. Proc. Second Int. Conf./Workshop on Integrating Geographic Information Systems and Environmental Modeling (Breckenridge, Colorado, USA). 1993.
- Moore, I.D.; Grayson, R.B. Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. *Water Resources Research*, 27:1177-1191, 1991.
- Mullins, J.A., Carsel, R.F., Scarbrough, J.E., Ivery, A.M. PRZM-2: a Model for Predicting Pesticide Fate in the Crop Root and Unsaturated Soil Zones: Users Manual for Release 2.0. USEPA, Athens, G. A. 1993.
- O'Callaghan, J. F.; Mark, D. M. The Extraction Of Drainage Networks From Digital Elevation Data. *Comput. Vision Graphics Image Process*, 28, 328-344, 1984.
- Ogden, F. L., Garbrecht, J., DeBarry, P. A. and Johnson, L. E. GIS and Distributed Watershed Models. II: Modules, Interfaces and Models. *Journal of Hydrologic Engineering* 6(6):515-523. 2001.
- Oliveira, P. A., Davis Jr., C. A. e Oliveira, P. A. F. Proposição de Infra-Estrutura de Dados Espaciais (SDI) Local, Baseada em Arquitetura Orientada por Serviços (SOA). 2008. Disponível em: <<http://www.geoinfo.info/geoinfo2008/papers/p61.pdf>>. Acesso em: 17 de outubro de 2009.

- Osmond, D. L., R. W. Gannon, J. A. Gale, D. E. Line, C. B. Knott, K. A. Phillips, M. H. Turner, M. A. Foster, D. E. Lehning, S. W. Coffey, and J. Spooner, 1997. WATERSHEDSS: A Decision Support System for Watershed-Scale Nonpoint Source Water Quality Problems. *J. American Water Resource Association* 33(2): 327-341.
- Paz, A. R.; Collischonn W. e Tucci C. E. M. (2005). Geração de direções de fluxo para modelagem hidrológica de grande escala. SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVI, 2005, João Pessoa. Anais... João Pessoa: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2004. [CD-ROM].
- Pressman, R. S. Engenharia de Software. 3. ed., São Paulo: Makron Books, 1995.
- Pullar, D. E Springer, D. Towards integrating GIS and catchment models. *Environmental Modelling & Software*. (15): 451-459, 2000.
- Rafaeli Neto, S. L. Um Modelo Conceitual de Sistema de Apoio à Decisão Espacial para Gestão de Desastres por Inundações; 2000. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- Ramirez, M. R. e Souza, J. M. Sistema Gerenciador de Banco de Dados em Sistemas de Informações Geográficas. *Geomática: modelos e aplicações ambientais*. Editado por Meirelles, M. S. P., Camara, G. e Almeida, C. M. Brasília, DF: Embrapa Informação e tecnologia. P. 55-104. 2007.
- Rao, M., Fan, G., Thomas, J., Cherian, G., Chudiwale, V., Awawdeh, M. A web-based GIS Decision Support System for managing and planning USDA's Conservation Reserve Program (CRP). *Environmental Modelling & Software*. 1270-1280. 2007.
- Rennó, C. D. e Soares, J. V. Discretização Espacial de Bacias Hidrográficas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, Foz do Iguaçu, abril de 2001. Anais. São José dos Campos: INPE, 2001. Sessão Técnica Oral. p. 485-492.
- Rennó, C. D. e Soares, J. V. Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica. *Geomática: modelos e aplicações ambientais*. Editado por Meirelles, M. S. P., Camara, G. e Almeida, C. M. Brasília, DF: Embrapa Informação e tecnologia. 2007.
- Rocha, J. V. e Lamparelli, R. A. C. Geoprocessamento. In: Silva, F. M., Mecanização e agricultura de precisão. Poços de Caldas: UFV, 1998. Cap.1, p.1-30.



- Rodrigues, A. e Raper, J. Defining Spatial Agents. In Spatial multimedia and virtual reality, edited by Camara, A. S. and Raper, J. (Taylor & Francis, London), online at <http://helios.cnig.pt/~armanda/html/Livro.html>. 1998.
- Rosenthal, W. D., Srinivasan, R., and Arnold, J. G. Alternative River Management Using a Linked GIS-Hydrology Model. *Trans. ASAE*, 38(3): 783-790. 1995.
- Rovey, E. W., Woolhiser, D. A. e Smith, R. E. A Distributed Kinematic Model of Upland Watersheds. Fort Collins, Colorado State University, 52p. Hydrologic Papers 93, 1977.
- Santos, I.; Krüger, C. M. ; Levis, M. ; Garcia, K. S. Avaliação de Perdas de Solo por Erosão Hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Ivaí. In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1999, Belo Horizonte, Minas Gerais. Anais em CD, 1999. v. 1. p. 1-20
- Santos, C. A. G. ; Silva, Richarde Marques da ; Aguiar, L.M.C. . Estimativa da produção de sedimentos na bacia experimental Jatobá a partir de técnicas de modelagem e geoprocessamento. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e do 8º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 2007, São Paulo.
- Santos, C.A.G.; Silva, R.M.; Paiva, F.M.L. (2005). “Modelagem hidrossedimentológica de uma microbacia da bacia experimental de São João do Cariri” in Anais do XVI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, João Pessoa. Novembro. 1.
- Santos, I. M. e Zeilhofer, P. Modelagem Hidrológica Integrada em Sistemas de Informação Geográfica. *Geodésia Online*, v. 4, p. 1-16, 2005.
- Santos, S., Monteiro, A., Mourato, S. e Fernandez, P. Os Sistemas de Informação Geográfica na Modelagem Hidrológica. In: XII Congresso Nacional de Tecnologias de la Información Geográfica. Granada. El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas. p. 465-479, 2006.
- Santos, L. L. ; Srinivasan, V. S ; Aragão, R. ; RIBEIRO, P J. M. Avaliação da resposta do modelo KINEROS2 Para diferentes representações da bacia hidrográfica. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007
- Santos, L. L., Modelagem hidrossedimentológica e avaliação comparativa de três modelos em pequenas sub-bacias na região Semi-Árida paraibana. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. UFCG. Campina Grande. 2008.

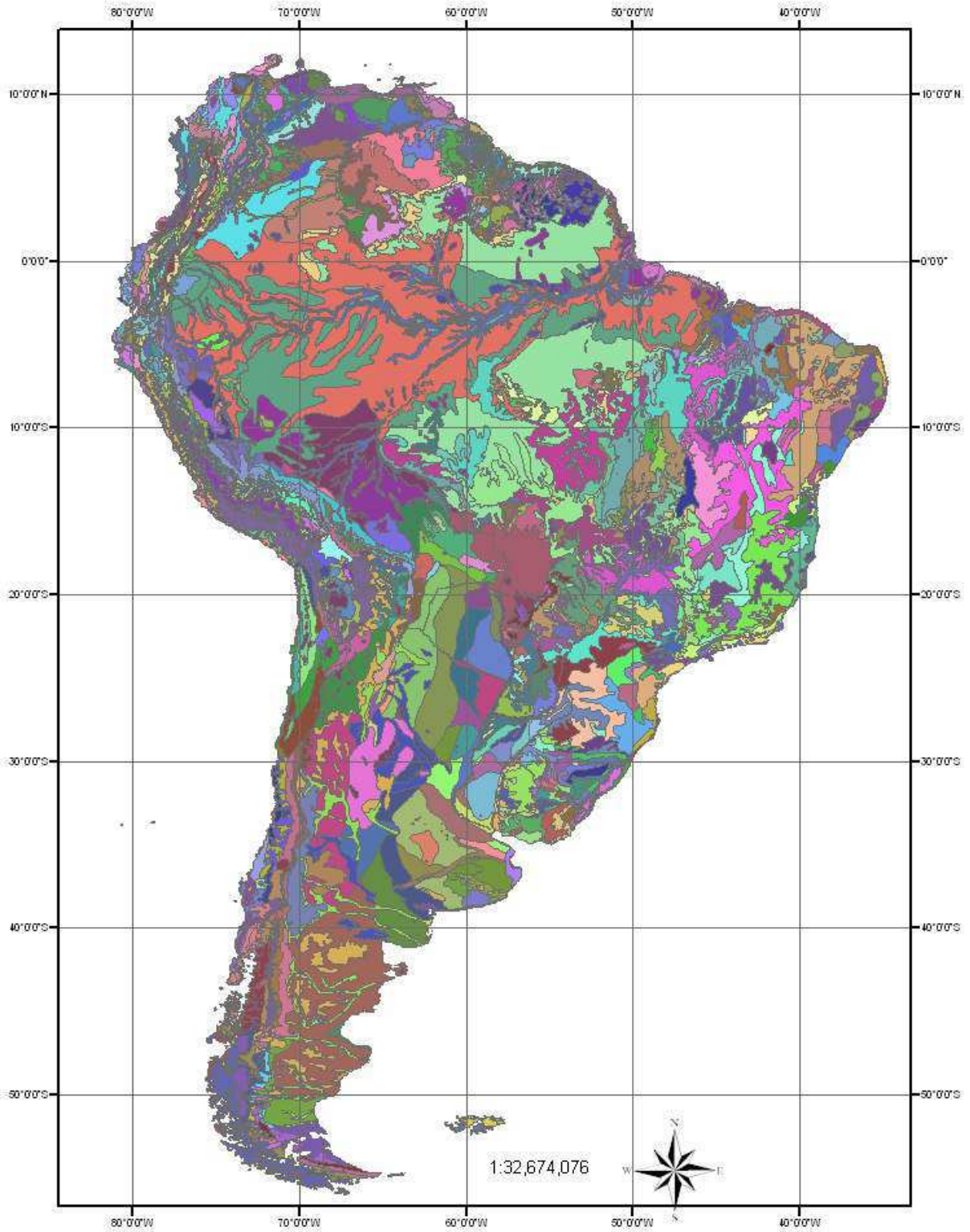
- SathyaKumar, R. and K.L. Farell-Poe. Predicting Rural Municipal Nonpoint Source Pollution Using GIS and AGNPS. Paper 95-3241, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan. 1995.
- Singh, V.P. Computer Models of Watershed Hydrology. Highlands Ranch, Colo.: Water Resources Publications. Ed. 1995.
- Smith, R.E., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A. and Unkrich, C.L.: 'Chapter 20: KINEROS – a kinematic runoff and erosion model', in: Computer Models of Watershed Hydrology, Singh, V.P. (ed.), Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, pp. 697–732. 1995.
- Soares Júnior, A., Moreno, B. N., Barbosa, F. A. R., Almeida, C. N., Guimarães, C. A., Souza, T. F. Concepção de uma base unificada de dados para os modelos hidrológicos do SNIRH. In: Anais do IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Salvador. 2008.
- SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, SP, 1998 Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring>>. Acesso em: 18 de outubro de 2009.
- Srinivasan, R. and Engel, B. A. GIS: A Tool for Visualization and Analysis. Paper 92-3610, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan. 1991.
- Stuart, N. e Stocks, C. Hydrological Modelling Within GIS: An Integrated Approach. In: Kovar, K. and Nachtnebel, B. (Eds) Applications of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, IAHS Publication No. 211. IAHS Press, Wallingford, UK. 1993.
- Sui, D. Z. e Maggio, R.C. Integrating GIS with Hydrological Modeling: Practices, Problems, and Prospects. Computers, Environment and Urban Systems, 23, 35-51, 1999.
- Taylor, K., Walker, G. e Abel, D. A Framework for Model Integration in Spatial Decision Support Systems. International Journal of Geographical Information Sciences, v.13, p. 533-55, 1999.
- Takahashi, Tadao. Introdução à Programação Orientada a Objetos. III EBAI (Escola Brasileiro-Argentina de Informática). Curitiba, Janeiro 1998.
- Teixeira, A. L. de A., Moreti, E. e Christofolletti, A. Introdução aos Sistemas de Informação Geográfica. Rio Claro: ed. do Autor, p. 80, 1992.

- Triana, E., J. and Labadie J. W. GEO-MODSIM: Spatial Decision Support System for River Basin Management. ESRI International User Conference. San Diego, California. 2007.
- Tsanis, I. K. and S. Boyle, A 2D Hydrodynamic/Pollutant Transport GIS Model. *Advances in Engineering Software* 32:353-361. 2001.
- Tsou, M. S. e Whittemorez, 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. Modelos Hidrológicos. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 669 p. 2ª Edição. Porto Alegre, 2005.
- Uchoa, H. N. e Ferreira, P. R. Geoprocessamento com Software Livre. Disponível em: <<http://www.geolivre.org.br>>. 2004. Acesso em: 18 de outubro de 2009.
- UFPB. Integração de Modelos Chuva-Vazão ao SNIRH para disponibilização pública. Documentação do Aplicativo e Manuais dos Modelos. João Pessoa, 2009.
- USACERL. GRASS 4.1 User's Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratories, Champaign, Illinois. 1993.
- USEPA. QUAL2E Windows Interface User's Guide. United States Environmental Protection Agency, Office of Water, Athens, EPA/823/B/95/003, Athens GA. 1995.
- Valério Filho, M. e Araújo Júnior, G. J. L. Técnicas de Geoprocessamento e Modelagem Aplicadas ao Monitoramento de Áreas Submetidas aos Processos de Erosão do Solo. In: 5º Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Anais. Bauru-SP, 1995. p.279-82.
- Xu, C-Y. Hydrologic Models. Uppsala University Department of Earth Sciences Hydrology. 165p, 2002. <http://folk.uio.no/chongyux/papers/fulltext.pdf>.
- Wang, S., Shao, J., Song, X., Zhang, Y., Huo, Z. e Zhou, X. Application of MODFLOW and Geographic Information System to Groundwater Flow Simulation in North China Plain, China. *Environmental Geology*, p. 1449–1462. 2007.
- Watkins, D. W., Mckinney, D. C., Maidment, D. R. e Lin, M. D. Use of Geographic Information Systems in Groundwater Flow Modeling. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, v.122, p.88-96, 1996.
- Wellar, B.; Cameron, N.; Sawada, M. Progress in building linkages between GIS and methods and techniques of scientific inquiry. *Computers, Environment and Urban Systems*, v.18, p.67-80, 1994.

- Westervelt, J., Shapiro, M. Combining scientific models into management models. In: Fourth International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4) CD-ROM, Banff, Canada. 2000.
- Whittemore, R.C. and Beebe, J. EPA's BASINS Model: Good Science or Serendipitous Modeling? *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 36(3):493-499. 2000.
- Whiteaker, T. L. e Maidment, D. R. Geographically Integrated Hydrologic Modeling Systems. Dissertation. The University of Texas at Austin, 2004. CRWR Online Report 04-04. Disponível em: <<http://www.crwr.utexas.edu/reports/2004/rpt04-4.shtml>>. Acesso em: 20 de outubro de 2009.
- Whitehead, P. G. e Robinson, M. Experimental Basin Studies: An International and Historic Perspective of Forest Impacts. *Journal of Hydrology*, 145:217-230, 1993.
- Woolhiser, D. A., Smith, R. E. e Goodrich, D. C. KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, pp 130, 1990.
- Zakia, M. J. B. Identificação e Caracterização da Zona Ripária em uma Microbacia Experimental: Implicações no Manejo de Bacias Hidrográficas e na Recomposição de Matas Nativas. Tese de Doutorado. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 93p. 1998.
- Zeilhofer, P., ; Lima, E. B. N. R. ; Santos, F. M. ; Rigo, L. O . Um ambiente SIG para a Modelagem Integrada da Qualidade da água utilizando QUAL2E. *Caminhos da Geografia (UFU. Online)*, v. 8, p. 107-125, 2003.
- Zheng, C. (1992). A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in ground-water systems, S. S. Papadopoulos & Associates, Rockville, Md.

# ANEXOS

## Anexo 1 - Mapa de solo da FAO



Anexo 2 – Planos da discretização automática da sub-bacia 1

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Coordenadas Geográficas UTM		Largura (m)	Comprimento (m)	Declividade
		x Centróide	y Centróide			
1	20800,00	772563,00	9184576,00	242,95	85,61	0,0235
2	21200,00	772876,81	9184397,00	235,16	90,15	0,0187
3	32700,00	772609,94	9184335,00	225,98	144,70	0,0371
4	23200,00	772791,69	9184380,00	267,39	86,76	0,0250
5	22000,00	773225,88	9184051,00	188,51	116,71	0,0454
6	22600,00	773264,44	9183800,00	104,23	216,83	0,0533
7	23100,00	773353,88	9183598,00	118,07	195,64	0,0289
8	23000,00	773176,25	9183484,00	221,42	103,88	0,0247
9	3150,00	772748,69	9184379,00	7,03	448,20	0,0328
10	4350,00	772788,75	9184300,00	9,71	448,20	0,0262
11	187,50	772788,75	9184300,00	9,71	448,20	0,0003
12	212,50	772850,00	9184174,00	2,89	73,64	0,0150
13	22337,50	772697,38	9184375,00	91,42	244,35	0,0366
14	26962,50	772687,63	9184196,00	110,34	244,35	0,0198
15	300,00	772885,00	9184149,00	4,68	64,14	0,0042
16	9300,00	772876,19	9184218,00	144,99	64,14	0,0189
17	5500,00	773036,63	9184277,00	26,96	203,99	0,0069
18	9100,00	772951,81	9184241,00	44,61	203,99	0,0175
19	50862,50	773047,00	9184089,00	108,52	468,70	0,0338
20	59937,50	772928,56	9183941,00	127,88	468,70	0,0546
21	10037,50	773165,00	9183866,00	50,14	200,21	0,0770
22	22462,50	773128,31	9183979,00	112,20	200,21	0,0586
23	2787,50	773117,00	9183780,00	36,41	76,57	0,1126
24	4312,50	773056,06	9183749,00	56,32	76,57	0,0781
25	487,50	773183,00	9183757,00	5,45	89,50	0,0976
26	2912,50	773155,69	9183780,00	32,54	89,50	0,1368
27	175,00	773155,69	9183780,00	32,54	89,50	0,0014
28	1425,00	773156,88	9183733,00	35,63	40,00	0,0993
29	3675,00	773230,13	9183672,00	17,48	210,21	0,0582
30	9925,00	773271,31	9183698,00	47,22	210,21	0,0456
31	40800,00	773109,81	9183590,00	128,59	317,28	0,0815
32	45100,00	772939,69	9183694,00	142,15	317,28	0,1095
33	1112,50	773016,69	9183527,00	8,07	137,78	0,1011
34	19687,50	773047,25	9183437,00	142,89	137,78	0,0458
35	21300,00	772913,06	9183454,00	126,68	168,14	0,0875
36	26400,00	772790,81	9183605,00	157,01	168,14	0,1221

Anexo 3 – Canais da discretização automática da sub-bacia 1

Elemento	Coordenadas Geográficas UTM		Comprimento (m)	Declividade
	x Centróide	y Centróide		
1	772799,822	9184313,822	448,20	0,022
2	772846,036	9184177,964	73,64	0,013
3	772821,109	9184169,000	244,35	0,006
4	772897,071	9184149,000	64,14	0,000
5	772974,697	9184208,697	203,99	0,007
6	772985,000	9183946,071	468,70	0,024
7	773113,358	9183867,358	200,21	0,025
8	773105,000	9183749,000	76,57	0,064
9	773161,464	9183759,000	89,50	0,075
10	773135,000	9183709,000	40,00	0,003
11	773217,678	9183709,000	210,21	0,048
12	773012,929	9183629,000	317,28	0,016
13	772971,464	9183529,000	137,78	0,071
14	772855,000	9183531,500	168,14	0,016