



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**

## **ESTIMATIVA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA DO RIO SAPUCAÍ POR MEIO DE MODELAGEM HIDROLÓGICA DINÂMICA DISTRIBUÍDA**

João Bosco Coura dos Reis

Trabalho para avaliação parcial na disciplina de Introdução ao Geoprocessamento (SER-300) do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

INPE  
São José dos Campos  
2015

## RESUMO

No Brasil, a falta de planejamento para ocupações de bacias hidrográficas expõe a população aos perigos hidrometeorológicos, sobretudo durante o período chuvoso, quando ocorrem com maior frequência eventos pluviométricos intensos e prolongados. Atualmente, têm-se ampliado o uso de métodos e técnicas de geoprocessamento para confecção de mapas, geração de dados e informações que auxiliam e orientam medidas de prevenção e mitigação de desastres. Em razão da periodicidade de ocorrência de eventos de inundações no rio Sapucaí, o trabalho propõe a aplicação de um modelo hidrológico dinâmico distribuído com o propósito de estimar o escoamento superficial em um trecho de sua bacia hidrográfica, no Sul de Minas Gerais. Para este fim pretende-se utilizar o método do *Soil Conservation Service Curve Number* (SCS-CN), visto sua versatilidade e estabilidade para estimar o escoamento superficial, dependendo para isso de um único parâmetro, CN, que varia em função do tipo, uso, cobertura e da condição de umidade antecedente do solo. Será feito uso do *framework TerraME*, capaz de executar rotinas de modelagem dinâmica espacial em um espaço celular, onde é discretizada a área de estudo. Os valores dos parâmetros para a aplicação do método serão calibrados por um processo de otimização com dados de sete estações de coleta de dados, pertencentes ao Laboratório de Informações Hídricas locado na UNIFEI, que coletam automaticamente medidas de precipitação e nível fluviométrico ao longo do trecho de interesse. Na falta de dados de vazão, a validação do modelo será a partir da comparação do padrão de variação da vazão estimada com a variação do nível do rio. O intuito do desenvolvimento do trabalho é entender a resposta da bacia para determinadas quantidades de chuva, possibilitando a elaboração de mapas de riscos de inundações, essenciais para adoção de medidas de prevenção e mitigação na região.

## SUMÁRIO

	<b><u>Pág.</u></b>
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Objetivo .....	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	4
2.1. Modelos hidrológicos .....	4
2.2. Método SCS-CN.....	6
2.3. Plataforma <i>TerraME</i> .....	10
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	13
3.1. Área de estudo .....	13
3.2. Material.....	17
3.3. Metodologia.....	17
3.3.1. Elaboração da base de dados espaciais .....	19
3.3.2. Execução no TerraME .....	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	23
4.1. Parâmetros hidrometeorológicos e dados de entrada do modelo .....	23
4.2. Modelo dinâmico distribuído .....	25
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	29
REFERÊNCIAS .....	30
APÊNDICE A .....	34

## 1 INTRODUÇÃO

Eventos naturais possuem energia suficiente para causar grandes transformações na paisagem, atuando na modelagem e na dinâmica da superfície terrestre, além de configurar-se como fenômenos ou condições de perigo que podem causar perdas de vidas, impactos no sistema social e na economia.

No Brasil, o crescimento populacional e a falta de planejamento para ocupações de bacias hidrográficas expõem a população aos perigos hidrometeorológicos, que são caracterizados por processos ou fenômenos atmosféricos e hidrológicos, no qual as inundações e os movimentos de massa representam os dois processos mais frequentes e que mais causam desastres no País, sobretudo durante o período chuvoso, quando ocorrem com maior frequência eventos pluviométricos intensos e prolongados (Tominaga *et al.*, 2011; Rodriguez *et al.*, 2009).

Com um cenário de recorrência e danos causados por eventos extremos, tem-se buscado novas formas de prevenir e mitigar seus resultados, tanto através de medidas estruturais (construções físicas e técnicas de engenharia), quanto com medidas não estruturais (utilização de conhecimento, práticas ou acordos para reduzir os riscos e impactos, sensibilização do público, treinamento, educação, planos de uso do solo, pesquisas e fontes de informações) (UN-ISDR, 2004).

No âmbito da gestão dos recursos hídricos, modelos hidrológicos servem como ferramenta de estudo, planejamento e tomada de decisões. A simulação do escoamento superficial por modelos hidrológicos, por exemplo, se mostra fundamental para o gerenciamento e desenvolvimento de recursos hídricos, controle e previsão de inundações, projetos de irrigação e drenagem, projetos de estruturas hidráulicas e para geração de energia hidrelétrica (Geetha *et al.*, 2008).

Com a evolução da tecnologia, o sensoriamento remoto se tornou uma ferramenta poderosa para aquisição de dados em áreas extensas e antes dificilmente acessíveis, sendo amplamente utilizado para definição de uso e cobertura do solo em bacias hidrográficas, que são informações necessárias para o cálculo de infiltração, evapotranspiração e escoamento, por exemplo; enquanto o geoprocessamento possibilitou o armazenamento, manipulação, análise e recuperação de grandes quantidades de dados geográficos. Dessa maneira o sensoriamento remoto e o geoprocessamento tornaram-se essenciais para o desenvolvimento e aplicação de modelos hidrológicos distribuídos, especialmente pelo uso de dados hidrológicos que apresentam natureza dinâmica, altamente variável no tempo e no espaço (Singh, 1995).

Fazendo uso de técnicas e métodos de geoprocessamento, Pereira (2008) implementou um modelo hidrológico dinâmico distribuído na plataforma de modelagem *TerraME*, com o objetivo de estimar o escoamento superficial em uma microbacia hidrográfica localizada no município de Petrópolis, região serrana do estado do Rio de Janeiro. O trabalho contribui para o conhecimento da resposta hidrológica da microbacia para determinadas quantidades de chuva, possibilitando, desta forma, a geração de mapas de riscos de inundações.

Reis (2014) alerta para a necessidade de monitoramento de inundações no trecho do alto rio Sapucaí, região sul de Minas Gerais, devido a recorrência de eventos extremos que atingem a região, em especial o município de Itajubá (MG). O autor utiliza um modelo empírico para prever o crescimento do nível do rio Sapucaí, entretanto, visto a limitação do modelo, relacionado principalmente a sua sensibilidade às mudanças de uso e cobertura do solo, sendo, aparentemente incapaz de prever o impacto hidrológico resultante na bacia (Vertessy *et al.*, 1993), faz-se necessário a utilização de modelos mais robustos, capazes de auxiliar no entendimento da resposta da bacia hidrográfica do rio Sapucaí durante eventos de precipitação e que permitam simular alterações no uso e ocupação do solo para identificar seus impactos no comportamento hidrológico na região.

## **1.1. Objetivo**

O presente estudo tem o objetivo de implementar um modelo hidrológico dinâmico distribuído, baseado no método Curva Número (CN) do Serviço de Conservação do Solo (SCS), a fim de estimar o escoamento superficial e a vazão de máxima durante um período de precipitações intensas ocorridas em um trecho da bacia do rio Sapucaí, localizada no Sul de Minas Gerais. A partir deste trabalho pretende-se entender a resposta da bacia hidrográfica para determinadas quantidades de chuva, visando disponibilizar um instrumento capaz de orientar medidas de prevenção e mitigação de desastres para a região.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Modelos hidrológicos**

Conceituando, modelos são representações simplificadas do comportamento de um sistema complexo (Clarke, 1973), que auxiliam no entendimento dos processos que o envolvem. Assim o modelo hidrológico se apresenta como uma importante ferramenta que permite melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica, além de prever condições e cenários diferentes dos observados (Tucci, 1998).

Em geral os modelos servem para simular o movimento da água na natureza, sendo um conjunto de equações, técnicas e procedimentos que descrevem os eventos hidrológicos. Devido à natureza simuladora do ciclo hidrológico, em geral os modelos exigem dados bastante completos da bacia hidrográfica, além de amplos conhecimentos em Hidrologia (Olivo, 2004). Tendo como unidade de estudo a bacia hidrográfica, os modelos buscam estimar, sobretudo, o processo complexo, dinâmico e não linear de transformação da chuva em vazão (Geetha *et al.*, 2008).

Segundo Clarke (1973), os modelos hidrológicos estão divididos em duas grandes áreas, estocásticos e determinísticos, de acordo com a natureza das variáveis utilizadas na formulação dos modelos. Se as variáveis empregadas forem consideradas variáveis aleatórias, levando em conta o conceito de probabilidade, então o modelo é classificado como estocástico (também chamado de probabilístico), enfatizando a dependência temporal das variáveis hidrológicas do modelo. Por outro lado, caso os conceitos de probabilidade sejam ignorados durante a elaboração do modelo, estes serão chamados de determinísticos. Dooge (1973) coloca que quando para uma mesma entrada, o sistema produz sempre a mesma saída, o sistema é tido como determinístico; enquanto se o relacionamento entre a entrada e saída do sistema for estatístico, este é classificado como estocástico.

Os modelos também são classificados caso considere os processos físicos que atuam sobre as variáveis de entrada do sistema para produzir variáveis de saída. Neste caso, os modelos conceituais e os físicos são complexos e estão embasados na concepção física dos processos que envolvem um fenômeno hidrológico, conseqüentemente exigindo um grande conjunto de dados e informações devido a tentativa de descrever todos seus processos. Os modelos são ditos empíricos quando utilizam relações estatísticas baseadas em observações e experimentos, preocupando-se apenas com as entradas e saídas, independentemente de todos os complexos processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica. Entretanto a divisão entre modelos empírico e conceitual não é um processo simples, pois mesmo os modelos formulados sem referência aos processos físicos, podem apresentar parâmetros com alguma interpretação física, ao mesmo tempo em que modelos conceituais podem conter componentes empíricos, resultados de simplificações e atalhos que os caracterizariam como empíricos (Clarke, 1973).

Clarke (1973) lista três principais usos dos modelos conceituais, sendo importantes para previsão de vazão do rio, para completar séries temporais de vazão a partir de registros de chuva, e como ferramenta para previsão de possíveis efeitos das mudanças do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica, principalmente relacionada ao comportamento da vazão.

E a existência ou não de relações espaciais definem modelos do tipo pontual ou distribuído. Modelos pontuais ou concentrados não consideram a distribuição espacial da variável de entrada do modelo, tampouco a variação espacial dos parâmetros que caracterizam os seus processos físicos, admitindo que as variáveis de entrada e saída são representativas de toda a área estudada. Já os modelos distribuídos levam em conta a variabilidade espacial e temporal das variáveis de entrada ou parâmetros do modelo (Clarke, 1973).

De forma geral, a definição do modelo utilizado para cada bacia hidrográfica deve ser determinada com base em um conjunto de fatores, como a disponibilidade e variedade de dados para a área de interesse, os recursos

financeiros e computacionais disponíveis, o objetivo e a profundidade do estudo, a facilidade de aplicação e as limitações do modelo.

## **2.2. Método SCS-CN**

O método Curva Número (CN) do Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture* - USDA) foi originalmente desenvolvido em 1954 com o objetivo de estimar a transformação da precipitação em escoamento superficial (USDA SCS, 1985), sendo amplamente utilizado nos Estados Unidos e em outros países. Sua popularidade pode ser explicada pelo fato do método ser simples, estável e fácil de entender e aplicar (Geetha *et al.*, 2007).

Embora apresente uma base conceitual, o método CN compartilha a simplicidade de modelos empíricos com a aplicabilidade de modelos mais rigorosos, como os modelos físicos. E ainda que criado como um modelo concentrado, que ignora o impacto da variação temporal e espacial da chuva (Geetha *et al.*, 2008), este não é considerado necessariamente ruim, todavia se apresenta como um prático substituto aos complexos modelos distribuídos (Ponce e Hawkins, 1996).

Com o intuito de delinear as capacidades e limitações do método SCS-CN, Ponce e Hawkins (1996) elaboraram um exame minucioso, indicando uma série de vantagens e desvantagens do método em questão. Entre as vantagens estão a versatilidade e a estabilidade do modelo conceitual em estimar o escoamento superficial, dependendo para isso de um único parâmetro, CN, que varia em função do tipo, uso e cobertura do solo, da condição hidrológica e da condição de umidade antecedente do solo. Contudo os autores citam, entre as desvantagens, a falta de orientação sobre como variar a condição antecedente e os efeitos da escala espacial.

O cálculo do escoamento superficial é descrito em detalhes no Capítulo 10 – *Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall*, do *National Engineering*

*Handbook, Section 4 (NEH-4) (USDA SCS, 1985)*, sendo determinado, popularmente, pela seguinte equação:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad P > I_a \quad (2.1)$$
$$Q = 0 \quad P \leq I_a$$

Onde

Q é o escoamento superficial em mm;

P é a precipitação em mm;

S é o fator de retenção em mm;

I<sub>a</sub> é o parâmetro de absorção inicial.

O parâmetro de absorção inicial (I<sub>a</sub>) corresponde as perdas ocorridas antes do processo de formação do escoamento superficial, principalmente ligadas à interceptação pela vegetação, evaporação, infiltração e retenção da água em depressões do solo, portanto, altamente variável e relacionado ao tipo, uso e cobertura do solo. I<sub>a</sub> é definido pela equação:

$$I_a = \lambda S \quad (2.2)$$

Sendo λ a constante de absorção inicial ou razão I<sub>a</sub>/S.

Originalmente considera-se o valor de λ como 0,2 (USDA SCS, 1985). Traduzindo fisicamente, significa que dada uma precipitação, 20% do fator de retenção é a absorção inicial ocorrida antes do escoamento superficial começar. Isto é, quanto maior o valor de I<sub>a</sub>, mais intensa deve ser a precipitação (P) para desencadear o escoamento superficial.

Porém, diferente do proposto no método original, o valor de λ não pode ser fixo em 0,2 (Geetha *et al.*, 2008), assim sendo, o valor da constante tem sido

revisado e adaptado para cada aplicação nas diferentes bacias hidrográficas, visto sua dependência nas condições geológicas e climáticas regionais (Ponce e Hawkins, 1996). Jiang (2001) ressalta que diferentes valores de  $\lambda$  afetam a previsão do escoamento superficial, pois estes provocam diferentes resultados.

Com o intuito de testar a versatilidade do método SCS-CN, Mishra e Singh (2004) investigaram a variação de cada parâmetro para a bacia hidrográfica de Hemavati, na Índia. Como resultado foi visto que a medida que aumenta o valor de  $\lambda$ , diminui a eficiência do modelo, sendo a máxima eficiência encontrada com valor da constante de absorção inicial na ordem de 0,01.

Mishra *et al.* (2006) empregaram o método de Curva Número em 84 pequenas bacias hidrográficas dos Estados Unidos a fim de investigar a razão  $I_a/S$ , incorporando a umidade antecedente em função da precipitação ocorrida nos últimos cinco dias, no qual os melhores resultados foram obtidos com valores menores do que 0,1.

Determinando  $I_a/S$  por dois métodos distintos com diferentes conjuntos de dados, Hawkins e Khojeini (2000) e Woodward *et al.* (2003) concluíram que valores próximos de 0,05 da constante de absorção inicial se ajustam melhor do que o valor de 0,2 proposto no NEH-4, ressaltando que, de forma geral,  $\lambda$  não é definitiva, variando para cada bacia hidrográfica.

Nas equações 2.1 e 2.2 a variável  $S$  representa o potencial máximo de retenção após o início do escoamento. O valor de  $S$  pode variar no intervalo de  $0 \leq S \leq \infty$ , sendo calculado, na prática, pela variável adimensional Curva Número (CN). CN varia de 0 ( $S = \infty$ ), caracterizando, teoricamente, uma bacia hidrográfica de máxima abstração ( $Q = 0$ ), a 100 ( $S = 0$ ), indicando uma bacia totalmente impermeável ( $Q = P$ ) (Ponce e Hawkins, 1996). O fator de retenção em milímetros (mm) pode ser calculado pela seguinte equação:

$$S = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Onde CN representa um valor de Curva Número tabelado.

Os valores de CN tabelados (USDA SCS, 1985) refletem a complexa condição hidrológica em uma bacia hidrográfica, que é a combinação da condição média de umidade antecedente, do tipo, uso e cobertura do solo. Portanto as propriedades do solo influenciam no processo de geração de escoamento superficial a partir da precipitação, sendo divididos em quatro grupos (A, B, C e D), de acordo com a capacidade de infiltração e velocidade de transmissão da água no solo (Jiang, 2001):

A - Baixo potencial de escoamento. Solo com altas taxas de infiltração e transmissão;

B - Taxas moderadas de infiltração e transmissão, com solos de textura moderadamente fina para grossa;

C - Solos de textura moderadamente fina que podem apresentar camadas que impedem o movimento da água, com baixa taxa de infiltração e transmissão;

D - Solos argilosos ou com materiais impermeáveis, com baixa taxa de infiltração e transmissão e alto potencial de escoamento.

No método SCS-CN, CN ainda varia conforme a condição média de umidade antecedente do solo (*Antecedent Moisture Condition - AMC*) (USDA SCS, 1985). Como não existe uma orientação clara sobre como variar a condição de umidade do solo de acordo com a chuva ocorrida durante um determinado período antecedente (Ponce e Hawkins, 1996), usualmente adota-se a chuva ocorrida nos últimos 5 dias (Mishra *et al.*, 2006; Geetha *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2011). AMC, então, é dividido em três classes, de acordo com a quantidade de chuva ocorrida nos cinco dias anteriores ao dia de análise, sendo elas: AMC 1 - condição de solo seco; AMC 2 - condição média de umidade; e AMC 3 - condição de solo saturado.

Os valores de CN encontrados nas tabelas NEH-4 correspondem a condição média (AMC 2), sendo representado por CN<sub>2</sub> e assumindo que estes são apropriados para bacias hidrográficas com declividade média de 5%. Arnold e

Willians (1995) desenvolveram uma equação que ajusta o valor de  $CN_2$  para diferentes declividades, superando a particularidade original.

$$CN_{2s} = \frac{1}{3}(CN_3 - CN_2)[1 - 2\exp(-13,86Dec)] + CN_2 \quad (2.4)$$

Onde

$CN_{2s}$  representa o valor ajustado de  $CN_2$  para diferentes declividades;

$CN_3$  corresponde a AMC 3;

Dec é a declividade média da bacia hidrográfica.

As correções para as condições de umidade 1 ( $CN_1$ ) e 3 ( $CN_3$ ) são feitas em função do valor de  $CN_2$ , quando admite-se declividade média da bacia igual a 5%, ou para diferentes declividades substituindo o valor de  $CN_2$  por  $CN_{2s}$ .  $CN_1$  e  $CN_3$  são calculados por meio das seguintes equações (Arnold e Willians, 1995):

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \exp[2,533 - 0,0636(100 - CN_2)]} \quad (2.5)$$

$$CN_3 = CN_2 \exp[0,00673(100 - CN_2)] \quad (2.6)$$

### 2.3. Plataforma *TerraME*

A plataforma *TerraME* (*Terra Modeling Environment*) é um *software* que provê a infraestrutura necessária para modelagem e simulação das interações entre sociedade/natureza. Com a implementação do conceito de autômatos celulares aninhados e um conjunto de serviços, a plataforma permite a análise e manipulação de dados dinâmicos espaciais e temporais e o desenvolvimento, simulação e avaliação de modelos (Carneiro, 2006).

O ambiente computacional é dotado de cinco principais serviços, sendo eles: (i) descrição do modelo, feito pela linguagem de programação LUA (Ierusalimschy *et al.*, 1996), de alto nível, que permite o fácil entendimento do modelo com excelente performance; (ii) representação do modelo, com possibilidade de controle e organização dos dados; (iii) mecanismo de simulação que comporta os processos geográficos de forma independentes; (iv) avaliação do modelo, serviço que inclui as etapas de calibração e validação, capaz de comparar mapas em diferentes resoluções e apontar erros de localização e quantidade; e por fim (v) a gerência de dados dinâmicos espaciais e temporais, com integração em um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), baseado na biblioteca *TerraLib* (Câmara *et al.*, 2001).

O ambiente da plataforma *TerraME* foi desenvolvido usando a biblioteca *TerraLib*, projeto de *software* livre, de código fonte aberto e escrito em C++, com capacidade de construção de espaço celular e de integrar sistemas de gerenciamento de banco de dados objeto-relacionais (SGBD-OR) (por exemplo: *MySQL*, *PostgreSQL*, *Access* e *Oracle*) para armazenamento de dados geográficos. A visualização dos dados e dos resultados é feito pelo aplicativo geográfico *TerraView*, o qual foi construído utilizando a *TerraLib* (Figura 1).

O *TerraME* possibilita ao usuário definir os aspectos analíticos, espaciais e temporais do modelo a ser aplicado em várias escalas. A utilização de um modelo hidrológico, por exemplo, com a estrutura fornecida pela plataforma envolve três componentes: (i) um espaço celular, com determinada resolução espacial, caracterizado por um conjunto de atributos disposta na forma de colunas em uma tabela associada; (ii) um ou mais iteradores espaciais, a fim de definir a trajetória que indica a ordem em que o espaço celular deve ser percorrido para um determinado processo; e (iii) uma ou mais relações de vizinhança entre as células.

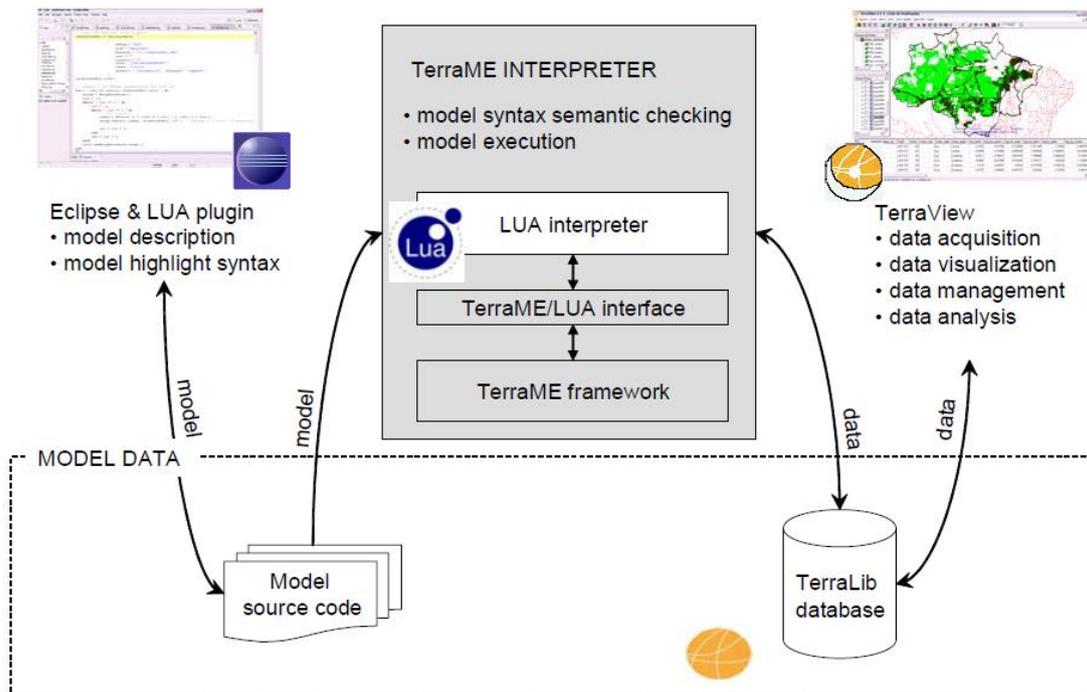


Figura 2.1 – Módulos e serviços do TerraME (Carneiro, 2006).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Área de estudo**

De acordo com o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí (2010), a bacia hidrográfica do rio Sapucaí integra a bacia do rio Grande, localizada na Região Sudeste, a qual é compartilhada por dois estados: São Paulo e Minas Gerais. O rio Sapucaí nasce na Serra da Mantiqueira, no município de Campos do Jordão, estado de São Paulo, a uma altitude de 1620 metros de altitude, percorrendo, aproximadamente, 343 km (34 km dentro do Estado de São Paulo e 309 km em Minas Gerais) até desaguar no Lago de Furnas, entre os municípios de Paraguaçu e Três Pontas, em Minas Gerais, com altitude de 780 metros.

A bacia é dividida em três trechos: alto, médio e baixo, sendo uma parte do trecho do alto Sapucaí a área de estudo do trabalho, de 859 km<sup>2</sup>. A figura 3.1 ilustra a área de estudo com a rede de drenagem e as localizações das estações de coleta de dados utilizadas. As figuras 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam o mapa altimétrico, de declividade e uso e ocupação do solo, respectivamente.

O rio Sapucaí apresenta uma declividade média de 3,508 m/km, enquanto o trecho do alto Sapucaí apresenta 9,556 m/km. Paralelamente, as declividades da bacia variam de 25%, próximos às nascentes, até atingir valores médios de 0,05% no trecho de 12 km, local de planície onde se situa o município de Itajubá, favorecendo a ocorrência de inundações no município.

A geomorfologia da região da bacia do rio Sapucaí é definida pelo domínio tectônico do Escudo Brasileiro, cuja morfologia inclui o domínio dos Planaltos do Sul de Minas, a partir da Serra da Mantiqueira.

O relevo predominante na região é em forma de topo arredondado, com vertentes côncavo-convexas, planícies aluvionares abertas, vales encaixados e drenagem dendrítica.

A vegetação original do trecho do alto Sapucaí corresponde às características do domínio da Mata Atlântica. Entretanto, as pressões - representadas pela expansão urbana e de infraestrutura e pelas atividades econômicas - sobre a vegetação no passado até os dias atuais, provocaram grandes alterações das características naturais da região. Foi observado um intenso desmatamento de seus ecossistemas naturais, com substituição da vegetação nativa por áreas de pastagens, culturas e também, silviculturas, além da expansão das áreas urbanas e da malha viária.

O clima do trecho do alto Sapucaí é do tipo tropical e temperado, sob influência da elevada altitude da região, com oscilações de temperaturas e predominância de ventos NE. Apresenta temperaturas médias anuais entre 18°C e 19°C. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.500 mm, podendo ocorrer 1 ou 2 meses sem chuva. Nos meses de setembro a março predominam as temperaturas mais elevadas, atingindo o máximo em dezembro e janeiro. Já nos meses de maio a agosto as temperaturas são consideravelmente baixas, atingindo o mínimo em junho e julho.

Pinheiro (2005), analisando a distribuição de chuvas na bacia com potencial de desencadear inundações no município de Itajubá, fez uma importante contribuição. Notadamente, a região está vulnerável à ocorrência de eventos hidrometeorológicos, porém, estes eventos ocorrem, principalmente, quando estão associados a chuvas frontais distribuídas de forma geral por toda a bacia. Os eventos de chuvas que desencadearam inundações, além da distribuição espacial, ainda apresentaram duração superior a 24 horas.

A ocorrência de chuvas bem distribuídas espacialmente pela bacia, atingindo ao mesmo tempo as áreas de contribuição da cabeceira do rio Sapucaí e também dos seus principais afluentes a montante de Itajubá, - rio das Bicas e Santo Antônio -, provocam o aumento do nível do rio Sapucaí quando combinados, produzindo uma onda de cheia em direção à área urbana itajubense e, ocasionalmente, nos eventos mais extremos, resultando no transbordamento do rio e na ocorrência de inundação.

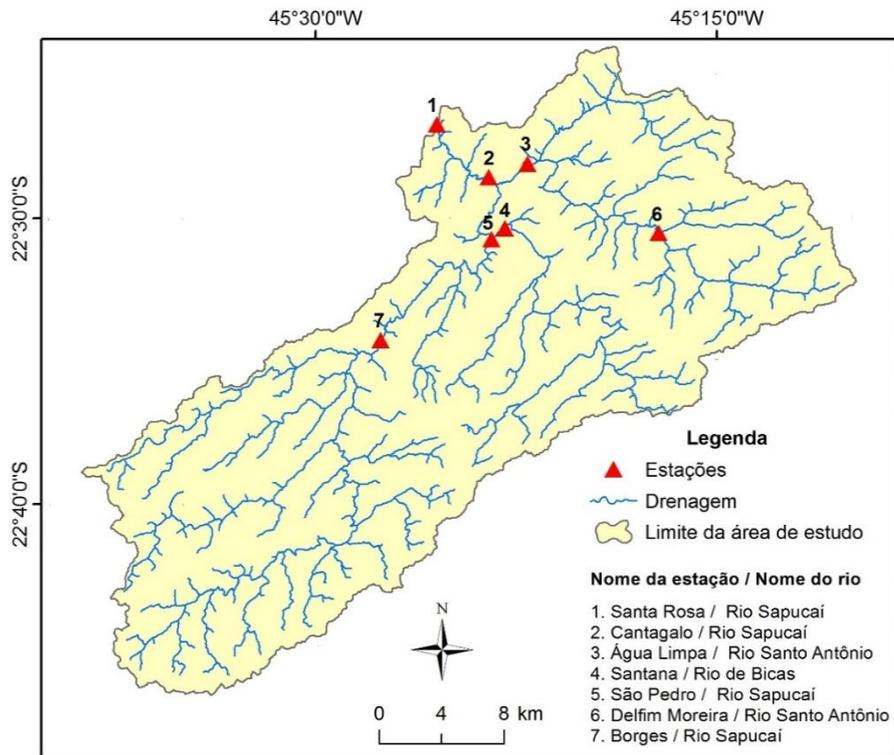


Figura 3.1 – Rede de drenagem e a localização das estações de coleta de dados.

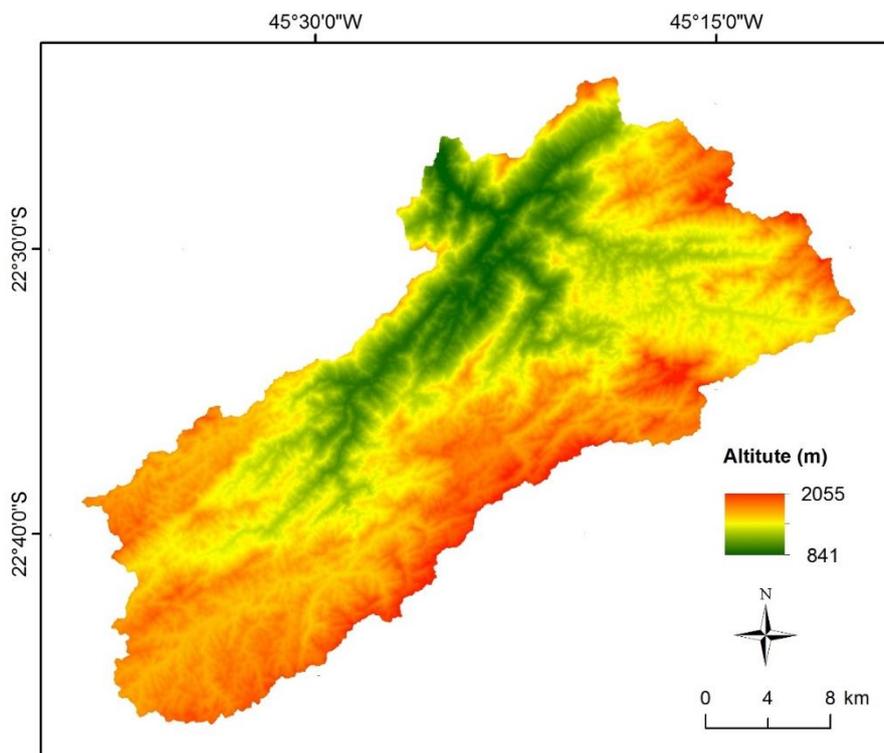


Figura 3.2 – Mapa altmétrico.

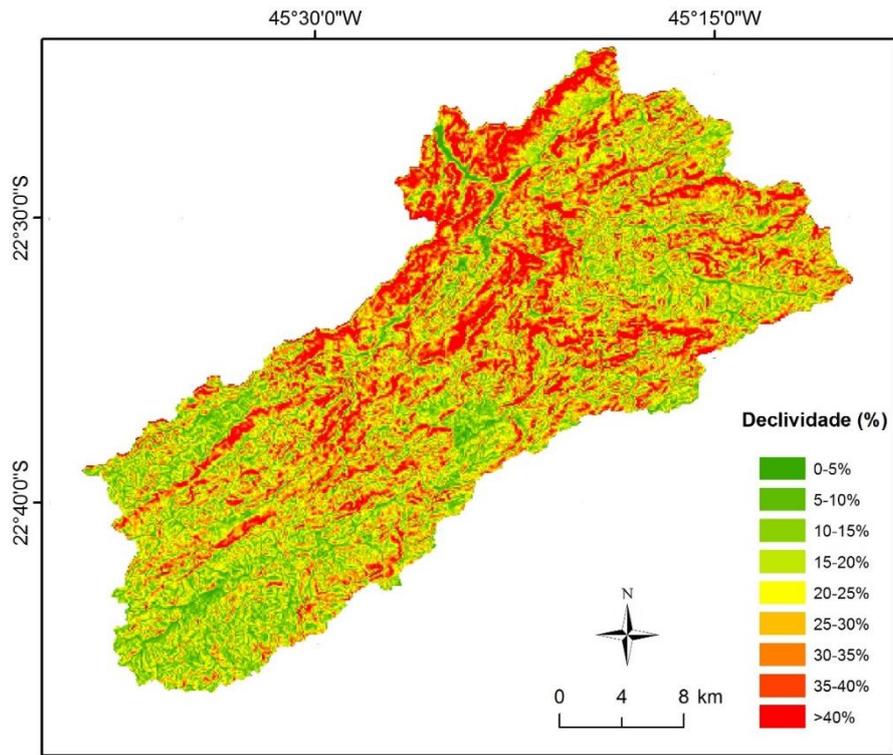


Figura 3.3 – Mapa de declividade.

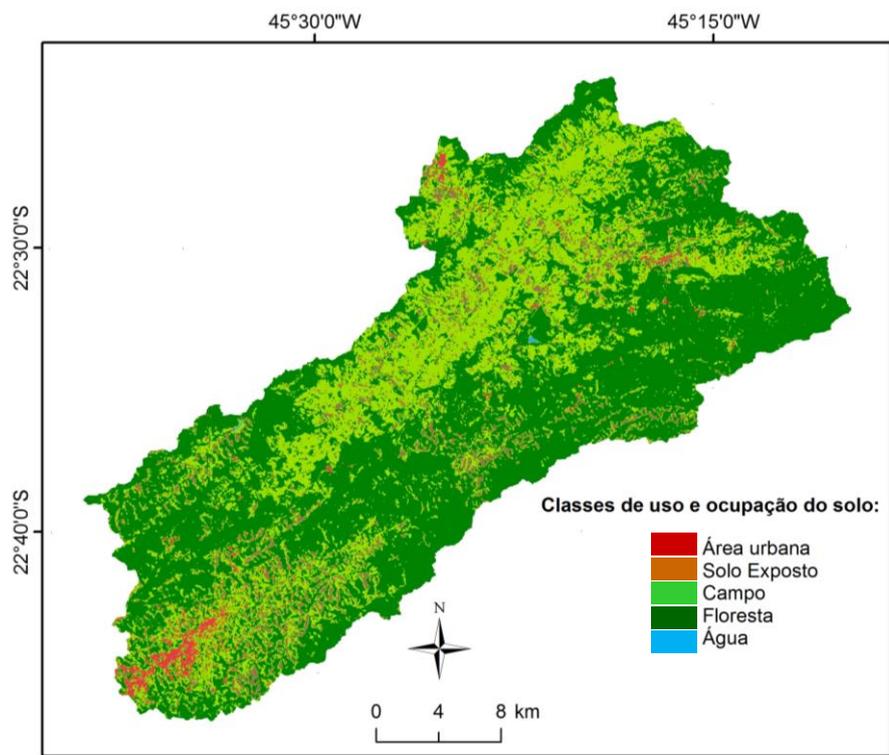


Figura 3.4 – Mapa de uso e ocupação do solo.

### 3.2. Material

Para execução deste trabalho, utilizou-se dos seguintes recursos:

- ✓ Imagens oriundas do sensor *Operational Land Imager* (OLI) a bordo do satélite Landsat 8. As imagens correspondem a órbita/ponto 218/76, adquiridas no dia 6 de abril de 2014, apresentando resolução espacial de 30 metros (exceto para a banda pancromática de 15 metros) e radiométrica de 12 bits (4096 níveis de cinza) (Irons *et al.*, 2012);
- ✓ Modelo digital do terreno (MDE) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução de 90 metros (cena SF-23-Y-B);
- ✓ Dados de precipitação e nível fluviométrico (LIH, 2013);
- ✓ SPRING versão 5.1.8 para *Windows*;
- ✓ TerraView versão 4.2.2;
- ✓ TerraHidro versão 0.4.1;
- ✓ TerraME versão 1.3.0;
- ✓ *Software* estatístico R, a partir da interface RStudio versão 0.98.1028;

A função de cada ferramenta para o desenvolvimento do trabalho é descrita no capítulo 3.3 Metodologia.

### 3.3. Metodologia

O trabalho foi realizado de acordo com as etapas presentes no fluxograma da Figura 3.5.

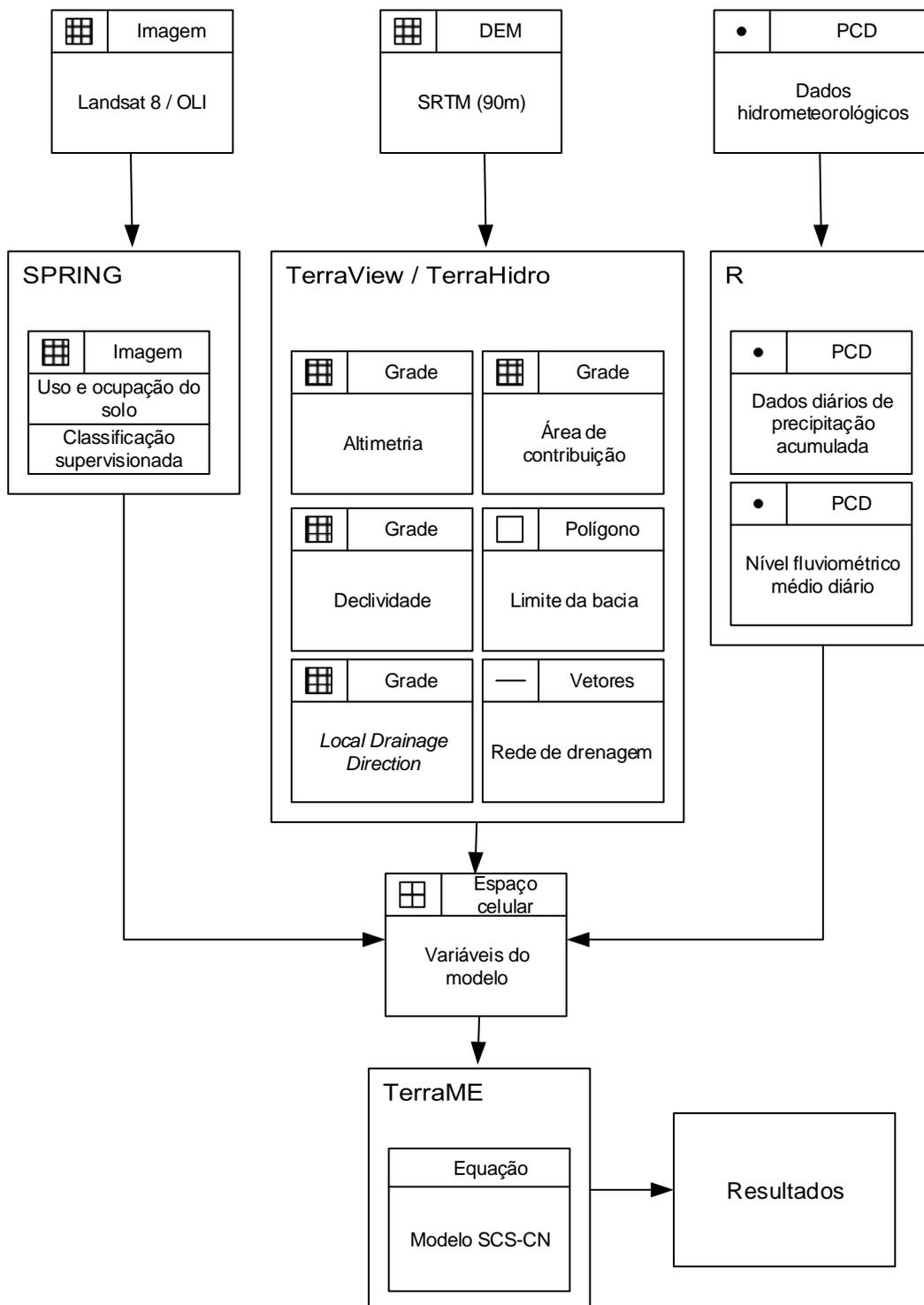


Figura 3.5 – Fluxograma com as etapas de desenvolvimento do trabalho.

Tendo em vista um melhor entendimento sobre os procedimentos utilizados, segue de forma sintética as etapas de desenvolvimento da pesquisa:

- Classificação supervisionada das imagens Landsat 8, oriundas do sensor OLI, pelo *software* Spring;
- Extração da base de dados espaciais hidrológicos a partir do MDE, fazendo uso do *plugin* TerraHidro, instalado no aplicativo TerraView;
- Organização dos dados hidrometeorológicos no *software* estatístico R;
- Criação e preenchimento do espaço celular no TerraView, utilizando o Sistema Gerenciador de Banco de Dados MySQL;
- Execução do modelo hidrológico SCS-CN no espaço celular por meio da plataforma TerraME.

### **3.3.1. Elaboração da base de dados espaciais**

Tendo em visto fornecer as classes de uso e ocupação do solo necessários para a utilização do modelo hidrológico SCS-CN, foi feita uma classificação supervisionada seguindo as orientações propostas por Xu (2007), que encontrou melhores resultados na classificação quando se utiliza os índices MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*), NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e NDBI (*Normalized Difference Built-up*), gerados a partir das imagens do sensor OLI a bordo do satélite Landsat 8, como imagens para classificação, ao invés das bandas originais. O processo de classificação supervisionada por *pixel* demandou duas fases: treinamento e classificação. Na fase de treinamento foi selecionado amostras puras e representativas do comportamento espectral dos principais elementos detectáveis na imagem (área urbana, solo exposto, campo, floresta e corpos d'água). Na Figura 3.4, pode observar o resultado da classificação.

Em seguida, foi feito uso do Sistema para Modelagem Hidrológica Distribuída, denominada TerraHidro, um *plugin* do aplicativo TerraView. O TerraHidro tem como objetivo atender a demanda por ferramentas que auxiliem trabalhos e estudos na área de hidrologia. O aplicativo permite a geração automática de

informações hidrológicas, reduzindo o tempo de processamento e trabalho, porém, sem o detrimento da qualidade dos resultados (Rosim *et al.*, 2013).

Para o trabalho foi definido como base o modelo digital de elevação (MDE) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de aproximadamente 90 metros de resolução espacial (Jarvis *et al.*, 2008). A partir dela, fazendo uso das potencialidades do TerraHidro, foi gerada a grade de declividade, área de contribuição, grade de direção de fluxo, conhecido como LDD (*Local Drainage Direction*), rede de drenagem e delimitação da bacia.

Os dados hidrometeorológicos foram organizados no *software* para análises estatísticas e gráficas R. O conjunto de dados de nível fluviométrico obtido para a realização do trabalho pertence ao Sistema de Monitoramento de Enchentes (SME) do Rio Sapucaí (LIH, 2013). Os dados de nível de rio e precipitação adquiridos são do período de janeiro de 2009 a maio de 2013, referentes às seguintes estações de coleta de dados: Água Limpa, Borges, Cantagalo, Delfim Moreira, Santa Rosa, Santana e São Pedro. A localização e o rio a qual pertence cada estação podem ser visualizados na Figura 3.1. Os intervalos entre as leituras variavam, apresentando períodos com leituras mais frequentes, com intervalos menores, de 10 minutos, até períodos com intervalos de 1 hora. A variação do intervalo se deve ao fato da necessidade de aumentar a coleta de dados durante os eventos de precipitação, quando o monitoramento frequente, auxilia na observação do fenômeno de formação da onda de cheia. Os intervalos entre as leituras variavam no tempo e também entre as estações.

Sendo assim, foi selecionado primeiro um período para estudo, que compreendeu as leituras entre os dias 24 de novembro de 2009 e 13 de dezembro de 2009, período em que ocorreram desde dias sem chuva até fortes eventos de precipitação na área de estudo. Os dados de precipitação foram acumulados para rodadas diárias e os de nível fluviométrico foram transformados em média diária.

Como resultado, foram geradas as seguintes variáveis apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Variáveis utilizadas no trabalho.

<b>Grades numéricas</b>	<b>Dados temáticos e cadastrais</b>
Grade altimétrica	Estações pluviométricas / fluviométricas
Declividade	Uso e ocupação do solo
Grade LDD	Limite da bacia
Grade Acumulada	Rede de drenagem

No TerraView os dados gerados foram associados ao espaço celular, construído com espaçamento de 90 metros, compreendendo toda a área de estudo, resultando em 108.659 células.

A partir do preenchimento das células com os valores referentes às variáveis geradas para o trabalho, o espaço celular apresentou uma tabela de dados com a seguinte estrutura, demonstrada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Atributos do espaço celular.

<b>Atributo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
codigo	String	Identificador da célula
col	Inteiro	Número da coluna da célula
lin	Inteiro	Número da linha da célula
ldd	Inteiro	Direção de fluxo entre 1 e 8
contributing	Inteiro	Valor da grade acumulada entre 1 e 108659
slope	Real	Declividade da célula em porcentagem
landuse	Inteiro	Valor da classe de uso e ocupação do solo

### **3.3.2. Execução no TerraME**

Originalmente o modelo hidrológico Curva Número do Serviço de Conservação do Solo é classificado como um modelo concentrado, o qual desconsidera as variações espaciais e temporais dos parâmetros do solo e da chuva. Com base no modelo CN, na noção de espaço celular e nas funcionalidades do TerraME, foi possível implementar um modelo dinâmico distribuído..

Para tanto, foi criado um banco de dados no TerraView, utilizando o SGBD MySQL, o qual conta com o espaço celular devidamente preenchido pelos parâmetros necessários para execução do modelo no *TerraME*. A execução do modelo concentrado CN no *TerraME* permite gerar um valor de escoamento superficial para cada célula do espaço celular, resultando em um caráter distribuído e dinâmico do modelo para toda a área de estudo, visto as iterações entre as células.

As funções disponibilizadas pelo TerraME permitem calcular o valor de CN e declividade média da área à montante de cada célula. A varredura do espaço celular e a trajetória de cálculo e execução do modelo seguem os valores presentes na grade de contribuição, que calcula o número de células que contribuem para cada célula, percorrendo os valores menores para os maiores. Foi criado ainda uma função de vizinhança, considerando que cada célula deva ter apenas um vizinho, indicado pelos valores da grade LDD. Maiores discussões sobre as funções de criação da ordem de varredura, trajetória e regras de vizinhança podem ser encontradas em Pereira (2008).

Todos os parâmetros de entrada do modelo são definidos no código fonte para execução do modelo no TerraME, sendo eles: descrição para acesso ao banco de dados; codificação das classes de uso e ocupação do solo e os respectivos valores de CN; vetor com valores de chuva em mm/dia, na forma de uma tabela em LUA; resolução do espaço celular; valor da constante de absorção inicial; limite das condições AMC e condição inicial de umidade antecedente do solo. O código fonte utilizado encontra-se no Apêndice A deste trabalho.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Parâmetros hidrometeorológicos e dados de entrada do modelo

O conjunto de parâmetros utilizados como entrada para execução do modelo no *TerraME* encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados de entrada do modelo.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
CN - Área Urbana	95	$\lambda$	0,05
CN - Solo exposto	86	Limite Inf. AMC	20
CN - Campo	74	Limite Sup. AMC	52
CN - Floresta	69	Variação de tempo	24 horas
CN - Água	0	Resolução	90 metros

O período de análise selecionado entre o conjunto de dados disponível foi entre 24 de novembro e 13 de dezembro de 2009. O período escolhido se deve ao fato de apresentar desde dias sem a presença de chuva, até dias com baixa à forte ocorrência de precipitações. Destaca-se, neste período, os dias 5, 6, 7 e 8 de dezembro, os quais registraram uma precipitação acumulada diária de 0,03, 13,4, 30,78 e 79,02 mm/dia, respectivamente.

A forte chuva ocorrida no dia 8 provocou a elevação do nível do nível do rio Sapucaí, onde na altura da estação de coleta de dados Santa Rosa, localizada na saída da bacia hidrográfica escolhida como área de estudo, registrou um pico de aproximadamente 3,4 metros em relação a vazante do rio. A Figura 4.1 possibilita a comparação entre a variação de chuva e nível do rio.

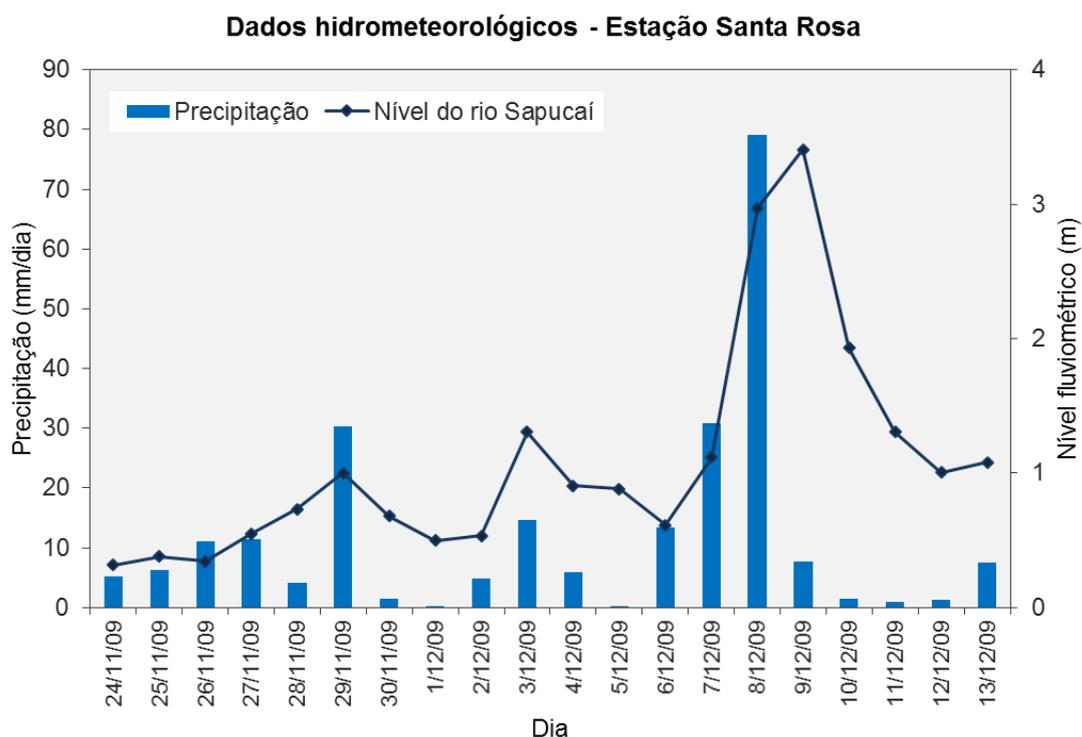


Figura 4.1 – Dados hidrometeorológicos.

A Figura 4.1 permite observar, ainda, o tempo de resposta entre o momento que se registra o valor de chuva (dia 8 de dez.) e o dia que apresenta o pico de elevação do nível do rio Sapucaí (9 de dez.). Este padrão permite considerar que a chuva, que apresenta caráter de alta variação temporal e espacial na bacia, ocorreu de forma mais intensa durante a noite do dia 8, próximo a virada do dia, sendo assim, tendo a resposta do nível ocorrendo horas depois, já no dia 9. Reis (2014) demonstra que o tempo de propagação da onda de cheia que passa pela estação Borges, à montante da estação Santa Rosa, leva aproximadamente 4 horas até alcançar a saída da bacia, provocando o aumento do nível em Santa Rosa, o que reforça o caráter da chuva e resposta analisada.

## 4.2. Modelo dinâmico distribuído

A aplicação do modelo dinâmico distribuído, baseado no método Curva Número do Serviço de Conservação do Solo, apresentou como resultado valores de volume escoado para cada célula. O valor dado é em  $m^3$  por dia, mas para efeito de avaliação, transformou-se em  $m^3/s$ .

A Figura 4.2 apresenta a seleção de três dias entre os dias escolhidos expostos para análise. A primeira imagem representa o escoamento do dia 26 de novembro, que registrou uma chuva acumulada de 11 milímetros, provocando baixo escoamento. No dia 7, a chuva moderada, de aproximadamente 30 mm, aumentou os valores de escoamento superficial, fato realçado pela condição de umidade antecedente do solo, que contribui para a maior transformação de chuva em vazão. O dia 8 de dezembro de 2009 apresentou os maiores valores de chuva e vazão do período selecionado. As chuvas intensas causaram o cálculo de um alto valor de vazão, aproximadamente  $450 m^3/s$ , comportamento que pressupõe situação de alerta para a área urbana do município de Itajubá, construída na planície de inundação do rio Sapucaí, na saída da bacia hidrográfica deste estudo.

Analisando os valores de vazão de dois pontos distintos da bacia, é possível observar os efeitos da área de contribuição no valor de vazão. A Figura 4.3 apresenta os valores encontrados para a estação Borges, situada em um ponto mais à montante da saída da bacia, e os valores para a estação Santa Rosa, situada na saída da bacia e que recebe como contribuição o escoamento superficial de toda a área. No dia 8 a estação Borges apresentou aproximadamente  $200 m^3/s$ , enquanto Santa Rosa valores na ordem de  $450 m^3/s$ .

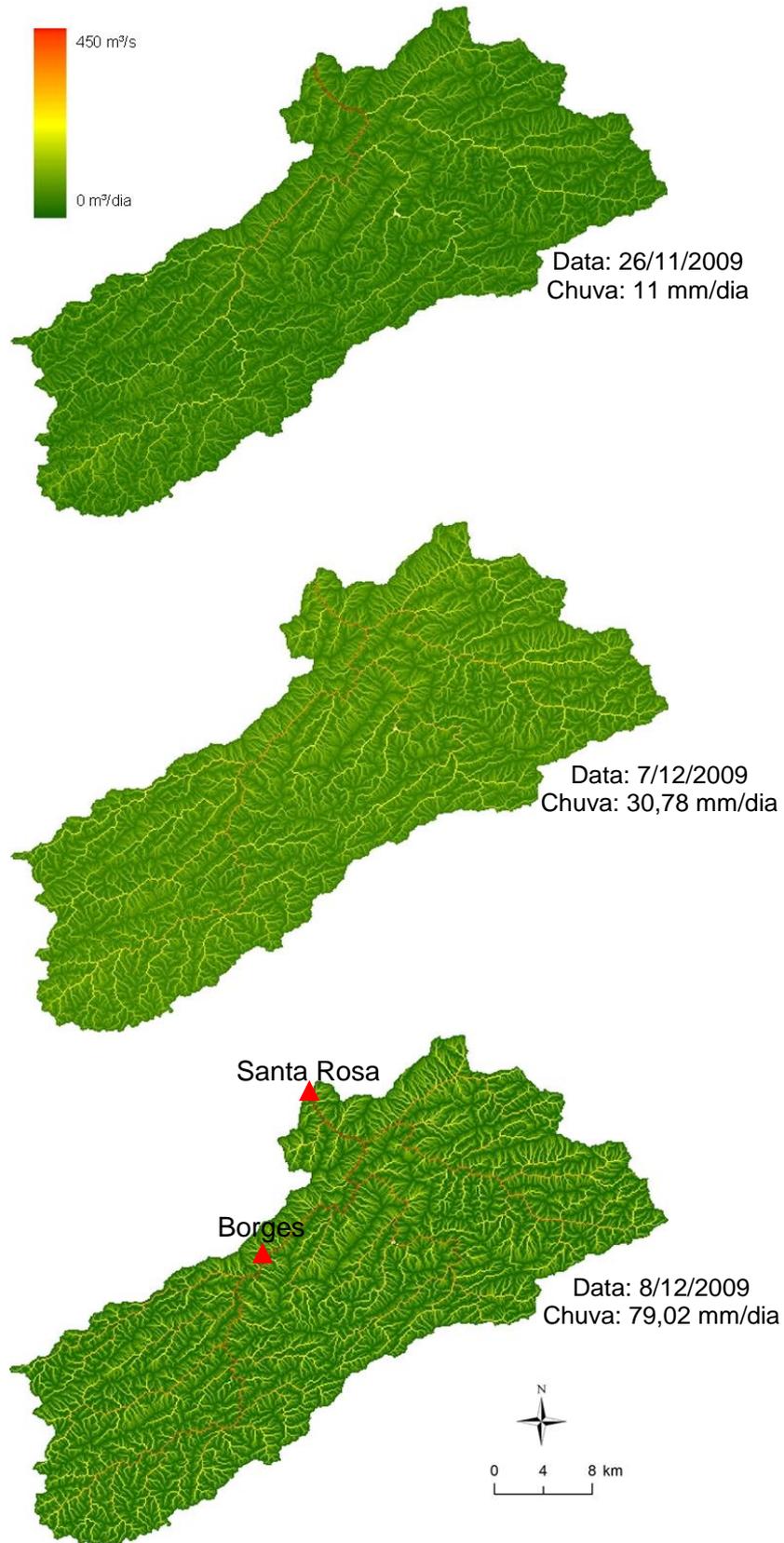


Figura 4.2 – Representação dos valores calculados de vazão.

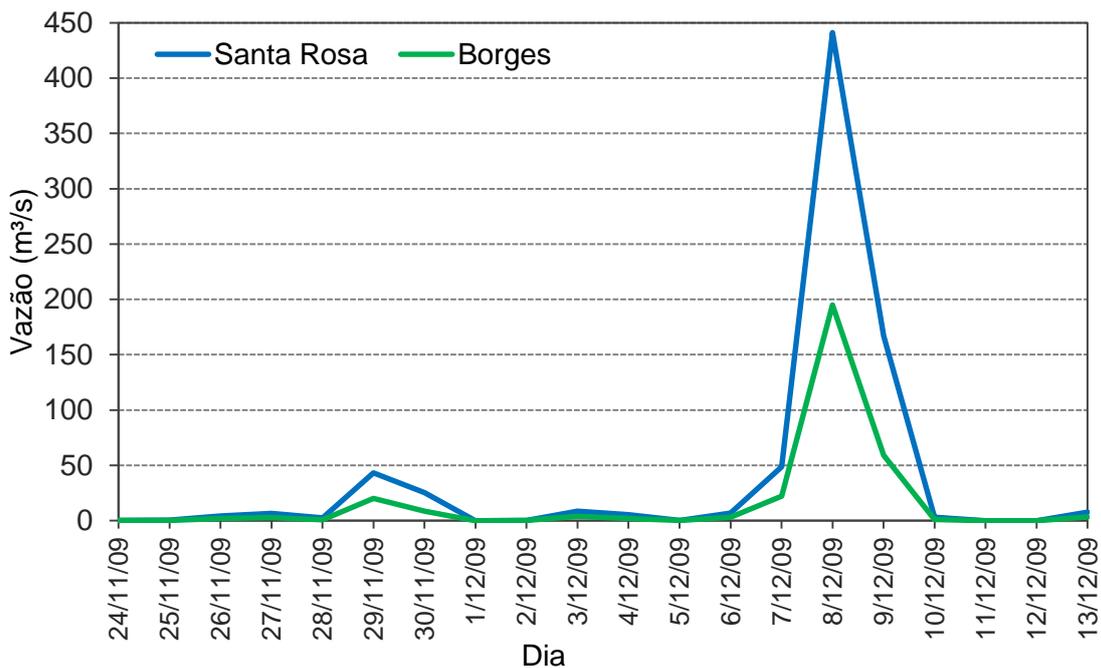


Figura 4.3 – Valores de vazão na estação Borges e Santa Rosa.

Embora vazão e nível fluviométrico sejam grandezas físicas diferentes e com unidades diferentes, mas diante da impossibilidade de transformar nível em vazão, a validação dos resultados consistiu na comparação entre os valores normalizados de nível e vazão. É possível observar na Figura 4.4 que os valores de vazão estimado pelo modelo dinâmico distribuído reproduziu o comportamento do nível fluviométrico registrado na estação Santa Rosa.

Importante destacar que os valores gerados pelo modelo baseado no método Curva Número calculam exclusivamente o escoamento superficial gerado diretamente pela intensidade de precipitação, fazendo com que em dias sem chuva, os valores de vazão estimado sejam 0.

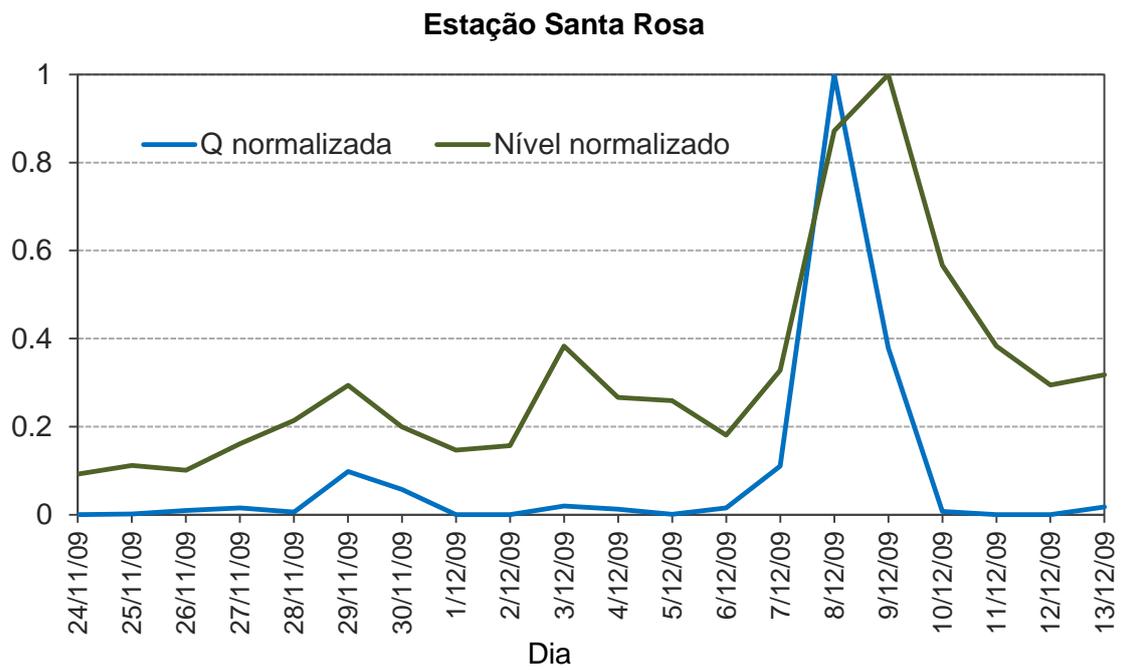


Figura 4.4 – Comparação entre valores de vazão e nível normalizado.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Modelos hidrológicos precisam se tornar ferramentas práticas, ampliando suas aplicações e funcionalidades, visto a necessidade de estudos e entendimento do comportamento do complexo sistema hidrológico, que se torna ainda mais desafiador quando inserido a variável humana e suas ações na bacia hidrográfica. Para isto os modelos precisam ser simples, fáceis de usar, com limitações e vantagens expostas de forma clara, tendo em vista poderem ser escolhidas para as funções adequadas às suas capacidades.

O método SCS-CN se mostrou versátil e fácil de entender e aplicar. O método é capaz de calcular a vazão com confiabilidade e simulação de cenários, fazendo uso de um conjunto de dados que pode ser alcançado através do sensoriamento remoto e do geoprocessamento. O seu extenso material de apoio permite o estudo e a compreensão para a aplicação.

Como limitações, foi visto que por trabalhar em passos diários, o método desconsidera a variação temporal e espacial da chuva, fato que deve ser estudado e melhor desenvolvido. Há ainda a necessidade de calibração dos parâmetros para diferentes bacias hidrográficas. O método pode ser acoplado a um modelo hidrodinâmico que calcule a vazão normal do rio, resultando em um modelo que estima o escoamento superficial e a vazão do rio em estudo.

Os *softwares* utilizados para a execução do trabalho foram todos gratuitos. O Spring, TerraView, TerraHidro, TerraME e R permitiram, em conjunto, trabalhar com um grande grupo de informações. A possibilidade de trabalhar com o espaço celular para modelagem dinâmica de superfície se mostrou interessante e com grande potencial de aperfeiçoamento.

Como perspectiva futura, deseja-se aprofundar os conhecimentos no método CN e somar ao modelo, os valores de vazão normal do rio, para que seja possível no futuro, entender o comportamento da bacia hidrográfica do rio Sapucaí e assim criar um sistema de monitoramento de inundações na região, com destaque para a área de Itajubá, no sul de Minas Gerais.

## REFERÊNCIAS

ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R. SWRRB -- A watershed scale model for soil and water resources management. In: SINGH, V. P. (Ed.) **Computer Models of Watershed Hydrology**. Highlands Ranch, CO: Water Resources, 1995. ISBN 0-918334-91-8.

CÂMARA, G.; L. VINHAS, *et al.* Design Patterns in GIS Development: The Terralib Experience. In: Workshop Brasileiro de Geoinformática - SBC, 3., 2001, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: SBC, 2001.

CARNEIRO, T. G. S. Nested-ca: a foundation for multiscale modelling of land use and land cover change. 2006. 107 p. **Tese** (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

CLARKE, R. T. A review of some mathematical models used in hydrology, with on their calibration and use. **Journal of Hydrology**, 19: 1-20, 1973.

DOOGE, J. C. I. **Linear Theory of Hydrologic Systems**. Technical Bulletin n. 1468, ARS, US Department of Agriculture. 1973.

GEETHA, K.; MISHRA, S. K.; ELDHO, T. I.; RASTOGI, A. K.; PANDEY, R. P. Modifications to SCS-CN Method for Long-Term Hydrologic Simulation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 133 (5) p. 475-486, 2007.

GEETHA, K.; MISHRA, S. K.; ELDHO, T. I.; RASTOGI, A. K.; PANDEY, R. P. SCS-CN-based Continuous Simulation Model for Hydrologic Forecasting. **Water Resources Management**. v. 22, n. 2, p. 165-190, 2008.

GUHA-SAPIR, D.; VOS F.; BELOW R.; PONSERRE S. **Annual Disaster Statistical Review 2011: The Numbers and Trends**. Brussels: CRED; 2012.

HAWKINS, R. H.; KHOJEINI, A. V. Initial Abstraction and Loss in the Curve Number Method. Arizona, **Hydrological Society Proceedings**, 2000.

IERUSALIMSCHY, R.; FIGUEIREDO, L. H.; FILHO, W.C. Lua-an extensible extension language. **Software: Practice & Experience**, v. 26, p. 635-652, 1996.

IRONS, J. R.; DWYER, J. L.; BARSÍ, J. A. The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. **Remote Sensing of Environment**, 122, 2012. p. 11–21.

JARVIS, A.; REUTER H.I.; NELSON, A. E. **Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database**. 2008. Disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org>> Acesso em: fev. 2014.

JIANG, R. Investigation of Runoff Curve Number Initial Abstraction Ratio. **MS thesis**, Watershed Management, University of Arizona, 120 p. 2001.

LIH – Laboratório de Informações Hídricas. **Sistema de Monitoramento de Enchentes**. UNIFEI, Itajubá, 2013.

- MISHRA, S.K.; SAHU, R.K.; ELDHO, T.I.; JAIN, M. K. An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. **Water Resources Management**, v.20, n.5, p.643-660, Oct. 2006.
- MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number. *Hydrol. Process.* v.18, n.7, p. 1291-1313, 2004.
- OLIVO, A. A. **Modelos matemáticos para a previsão de cheias fluviais**. 2004. 151 p. Tese de Doutorado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos. 2004.
- PEREIRA, L. M. Modelagem hidrológica dinâmica distribuída para estimativa do escoamento superficial em uma microbacia urbana. 2009, 93 p. **Dissertação** (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ. **Resumo Executivo**. Belo Horizonte – MG. 2010. Disponível em: <[http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/planos\\_diretores\\_BH/sapucaai.pdf](http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/planos_diretores_BH/sapucaai.pdf)> Acesso em: jun. 2015.
- PINHEIRO, V. M. 2005. **Avaliação Técnica e Histórica das Enchentes em Itajubá – MG**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia, UNIFEI. Concluída em 2005.
- PONCE, V.; HAWKINS, R. Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity?. **J. Hydrol. Eng.**, 1(1), 11–19. 1996.
- REIS, J. B. C. Monitoramento e alerta de inundação no município de Itajubá (MG) através de modelos matemáticos. 2014. 95 f. **Dissertação** (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá (MG). 2014.
- RODRIGUEZ, J., *et al.* **Annual Disaster Statistical Review 2008**: The numbers and trends. CRED – Centre for Research on the Epidemiology of Disaster. Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium, 2009.
- ROSIM, S.; OLVEIRA, J. R. F.; JARDIM, A. C.; NAMIKAWA, L. M.; RENNÓ, C. D. TerraHidro: A Distributed Hydrology Modelling System With High Quality Drainage Extraction. **GEOProcessing 2013**: The Fifth International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications and Services. 2013. p. 161 – 167. ISBN: 978-1-61208-251-6
- SINGH, V. P. Watershed modeling. In: SINGH, V. P. (Ed.) **Computer Models of watershed Hydrology**. Highlands Ranch, CO: Water Resources, 1995. ISBN 0-918334-91-8.
- TOMINAGA, L. K., SANTORO, J., AMARAL, R. **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. 1<sup>o</sup>.ed., 2<sup>o</sup>reimpressão. – São Paulo: Instituto Geológico, 2011.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1998.

UN-ISDR - United Nations International Strategy for Disaster Reduction. **Living with Risk: a global review of disaster reduction initiatives**. Inter-Agency Secretariat International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), Geneva, Suíça, 2004.

USDA - Soil Conservation Service (USDA SCS). **National Engineering Handbook**. Section 4. Hydrology. USDA-SCS, Washington, D.C. 1985.

VERTESSY, R. A.; HATTON, T. J.; O'SHAUGHNESSY, P. J.; JAYASURIYA, M. D. A. Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. **J. Hydrology**, v.150, 2-4, p. 665-700, 1993.

XIAO, B.; WANG, Q. H.; FAN, J.; HAN, F. P.; DAI, Q. H. **Application of the SCS-CN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity. Pedosphere**. 21(6): 738–749. 2011.

XU, H. Extraction of Urban Built-up Land Features from Landsat Imagery Using a Thematic oriented Index Combination Technique. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** Vol. 73, No. 12, December 2007, pp. 1381–1391. 2007.

WOODWARD, D.; HAWKINS, R.; JIANG, R.; HJELMFELT, JR. A.; VAN MULLEM, J.; QUAN, Q. **Runoff Curve Number Method**: Examination of the Initial Abstraction Ratio. World Water & Environmental Resources Congress 2003: pp. 1-10. 2003.

## **APÊNDICE**

## APÊNDICE A

### Código fonte utilizado no TerraME

```
-- IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO DE CURVA NÚMERO DO SCS DINÂMICO
DISTRIBUÍDO
csBacia = CellularSpace{
    dbType = "mysql",
    host = "localhost",
    database = "geop",
    user = "root",
    password = "mysql",
    layer = "cellularspace",
    theme = "cellularspace",
    select = { "codigo","col","lin","slope","ldd","contrib","landuse"},
}

-- DESCRIÇÃO DOS ATRIBUTOS DO ESPAÇO CELULAR
-- cell.col = Índice de Coluna (inicia-se com 0)
-- cell.lin = Índice de Linha (inicia-se com 0)
-- cell.slope = Declividade dada em porcentagem
-- cell.ldd = Codificação do sentido do fluxo de escoamento(LDD)
-- cell.contrib = Número de células que drenam/contribuem para a célula
-- cell.landuse = Classe de uso e cobertura do solo
-- cell.Qp = Vazão de pico em m³/s
-- cell.Qdia = Volume de água, em m³, escoado em um dia
-- cell.QR_past = Volume de água, em m³, restante do tempo anterior

-- CODIFICAÇÃO DAS CLASSES DE USO E COBERTURA DO SOLO
area_urbana = 1
solo_exposto = 2
campo = 3
floresta = 4
agua = 5

-- VALORES DE CURVA NÚMERO PARA CADA CLASSE
CN2_1 = 95
CN2_2 = 86
CN2_3 = 74
CN2_4 = 69
CN2_5 = 0

-- PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO
INI_TIME = 1 -- Posição inicial no vetor CHUVA para rodar o modelo
FINAL_TIME = 20 -- Posição final do vetor CHUVA
AMC_INI = 2 -- Condição AMC para os 5 primeiros valores de CHUVA (2.8 mm/dia)
CHUVA = { 5.17, -- 1 Vetor de chuvas
6.2, -- 2
11, -- 3
11.5, -- 4
4.21, -- 5
30.29, -- 6
1.47, -- 7
0.09, -- 8
4.79, -- 9
14.73, -- 10
```

```

5.89, -- 11
0.03, -- 12
13.4, -- 13
30.78, -- 14
79.02, -- 15
7.67, -- 16
1.46, -- 17
0.88, -- 18
1.37, -- 19
7.55, -- 20
0.91, -- 21
0.00 } -- 22
Dt = 24 -- Periodicidade dos valores de chuva em horas (1 dia = Dt = 24 horas)
Res = 90 -- Tamanho da célula do Espaço Celular em metros
Ia_S = 0.1 -- Valor da constante de absorção inicial
LIMITE_AMC_INF = 20 -- Valor abaixo do qual se considera o AMC-I
LIMITE_AMC_SUP = 52 -- Valor acima do qual se considera o AMC-III

-- ORDEM DE VARREDURA DA GRADE, DE ACORDO COM O VALOR DA COLUNA contrib
csBacia:load()
itGA = Trajectory{
    target = csBacia,
    select = function( c ) return true end,
    greater = function( c1, c2 ) return c1.contrib < c2.contrib end
}

-- CRIAÇÃO DA FUNÇÃO DE VIZINHANÇA (LDD)
function CreateLddNeighborhood( cs )
    COL = {0,1,1,0,-1,-1,-1,0,1}
    LIN = {0,0,-1,-1,-1,0,1,1,1}
    -- COL = {0,1,1,1,0,0,-1,-1,-1}
    -- LIN = {0,1,0,-1,1,-1,1,0,-1}
    for i, cell in ipairs( cs.cells ) do
        local neigh = Neighborhood()
        if(cell.ldd ~= 0) then
            local index = Coord{ x = (cell.x + COL[cell.ldd+1]), y = (cell.y +
LIN[cell.ldd+1]) }
            neigh:addCell( index, cs, 1/9 )
        end -- if
        cell:addNeighborhood( neigh, "myneigh" )
    end -- for
end

-- FUNÇÃO PARA A CHAMADA DA VIZINHANÇA (LDD)
function ForLddNeighbor( cell, ind, f )
    local neighborhood = cell:getNeighborhood(ind)
    if( neighborhood ~= nil) then
        neighborhood:first()
        neigh = neighborhood:getNeighbor()
        if(neigh ~= nil) then f( cell, neigh ) end
    end
    return true
end

-- ACÚMULO DE CN E DECLIVIDADE
function AcumCN_AcumDECL( Cell, Neigh)
    if(Cell.slope == 0.0) then Cell.slope = 0.02 end
    Neigh.CN[2] = Neigh.CN[2] + Cell.CN[2]
end

```

```

    Neigh.slope = Neigh.slope + Cell.slope
    return true
end

-- CÁLCULO DE CN MÉDIO E CORREÇÃO PELA DECLIVIDADE MÉDIA
function Correcao_CNs (Cell)
    Cell.CN[2] = Cell.CN[2] / Cell.contrib
    Cell.slope = Cell.slope / Cell.contrib
    Cell.CN[3] = Cell.CN[2]*math.exp( 0.00673 * (100 - Cell.CN[2]) )
    Cell.CN[2] = ((1/3)*(Cell.CN[3] - Cell.CN[2]) * (1 - 2 * math.exp(-13.86 * Cell.slope))) +
Cell.CN[2]
    Cell.CN[1] = Cell.CN[2] - (20 * (100 - Cell.CN[2])) / 100 - Cell.CN[2] + math.exp(2.533 -
0.0636 * (100 - Cell.CN[2]))
    Cell.CN[3] = Cell.CN[2] * math.exp(0.00673*(100 - Cell.CN[2]))
    return true
end

-- DETERMINAÇÃO DA CONDIÇÃO DE UMIDADE ANTECEDENTE (AMC)
function AMC (t)
    if(t <= 5) then
        return (AMC_INI)
    else
        soma_chuva5 = 0 -- Chuva acumulada nos últimos 5 dias
        for i = (t-5), (t-1), 1 do
            soma_chuva5 = soma_chuva5 + CHUVA[i]
        end
        if(soma_chuva5 < LIMITE_AMC_INF) then
            return (1)
        elseif(soma_chuva5 > LIMITE_AMC_SUP) then
            return (3)
        else return (2) end
    end
end --AMC

-- CÁLCULO DA CHUVA EFETIVA
function Calculo_Q (Cell, amc, tempo)
    Area = Cell.contrib*(Res^2) -- Área de contribuição da célula em m²
    S = 254*( (100/Cell.CN[amc]) - 1 ) -- Fator de retenção em mm
    if( CHUVA[tempo] > (Ia_S*S) ) then
        Qmm = ((CHUVA[tempo]-Ia_S*S)^2)/( CHUVA[tempo] + (1-Ia_S)*S )
        tL = ( 1.347*math.pow(Cell.Lf , 0.8)*math.pow((S/10) + 2.54 ,
0.7))/(1900*math.pow(Cell.slope*100, 0.5))
        tp = tL + Dt/2
        Tb = 2.67094*tp
        Cell.Qp = (0.208073241781107*Area*Qmm)/(tp*1000000)
        if(Tb > Dt)then
            QR_mcub = (Cell.Qp * ((Tb - Dt)*3600)^2 )/(2*(Tb - tp)*3600)
        else QR_mcub = 0 end
        Qmcub = ( Qmm*Area )/1000
        Cell.Qdia = Cell.QR_past + (Qmcub - QR_mcub)
        QR_mm = QR_mcub*1000/Area
        Qdia_mm = Cell.Qdia*1000/Area
        Cell.QR_past = QR_mcub
    else
        Cell.Qp = 0
        Cell.Qdia = Cell.QR_past
        Cell.QR_past = 0
    end -- if else CHUVA
end

```

```

if(Cell:getNeighborhood("myneigh") == nil) then
    print(" ")
    print("<<<<<TEMPO>>>> ["..tempo.."] --> AMC: "..amc.." <--")
    print("slope = "..Cell.slope)
    print("Lf = "..Cell.Lf)
    print("CN = "..Cell.CN[amc])
    print("S = "..S)
    print("Qmm = "..Qmm)
    print("Tb = "..Tb)
    print("Cell.Qp = "..Cell.Qp)
    print("Cell.Qdia = "..Cell.Qdia)
    print("Cell.QR_past = "..Cell.QR_past)
    print(" ")
end
return true
end -- Calculo_Q

-- VARREDURA DO ESPAÇO CELULAR PARA O CÁLCULO DE Lf E DOS VALORES DE CN E
DECLIV ACUMULADOS
function Percorrimento_1()
    forEachCell(itGA,
        function(cell)
            ForLddNeighbor(cell, "myneigh",
                function(cell, neigh)
                    -- CÁLCULO DO COMPRIMENTO DO MAIOR CAMINHO ATÉ A CÉLULA
                    if(neigh.Lf <= cell.Lf) then
                        if (cell.ldd==2) or (cell.ldd==4) or (cell.ldd==6) or (cell.ldd==8) then
                            --
                            if (cell.ldd==1) or (cell.ldd==3) or (cell.ldd==6) or (cell.ldd==8) then
                                neigh.Lf = cell.Lf + Res*math.sqrt(2)
                            else neigh.Lf = cell.Lf + Res end
                        end -- Lf
                        AcumCN_AcumDECL(cell, neigh)
                        return true
                    end ) --ForLddNeighbor
                return true
            end ) --ForEachCell
        return true
    end -- Percorrimento_1

-- VARREDURA DO ESPAÇO CELULAR PARA O CÁLCULO DA CORREÇÃO DOS
-- CNs E DA CHUVA EFETIVA COM VAZÕES DE PICO
function Percorrimento_2 (tempo)
    forEachCell(itGA,
        function(cell)
            if(tempo == INI_TIME) then Correcao_CNs(cell) end
            amc = AMC(tempo)
            Calculo_Q(cell, amc, tempo)
            return true
        end )--ForEachCell
    return true
end-- Percorrimento_2

-- ATRIBUIÇÃO DE VALORES INICIAIS AOS ATRIBUTOS
forEachCell(csBacia,
    function(cell)
        cell.Lf = 0
        cell.QR_past = 0
        cell.CN = {}
    end )

```

```

-- ATRIBUIÇÃO DOS VALORES DE CURVA NÚMERO
--   cell.landuse = 1 --extra@@@
--   if(cell.landuse == 1) then
--       cell.CN[2] = CN2_1
--   elseif(cell.landuse == 2) then
--       cell.CN[2] = CN2_2
--   elseif(cell.landuse == 3) then
--       cell.CN[2] = CN2_3
--   elseif(cell.landuse == 4) then
--       cell.CN[2] = CN2_4
--   elseif(cell.landuse == 5) then
--       cell.CN[2] = CN2_5
--   else cell.CN[2] = 71.9553 end
--   return true
end )--ForEachCell

CreateLddNeighborhood(csBacia)
Percorrimento_1()
for time = INI_TIME, FINAL_TIME, 1 do
    Percorrimento_2(time)
    csBacia:save(time,"Vazao_",{"Qdia","Qp","contrib"})
end -- for time

```