

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CAMPUS LONDRINA

CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

VITOR MANOEL NOGUEIRA ALVARES

**AVALIAÇÃO INICIAL DA APLICABILIDADE DO MODELO DE SIMULAÇÃO
CAESAR**

Estudo aplicado à Bacia do Ribeirão Cambé, Londrina-PR.

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2013

VITOR MANOEL NOGUEIRA ALVARES

**AVALIAÇÃO INICIAL DA APLICABILIDADE DO MODELO DE SIMULAÇÃO
CAESAR**

Estudo aplicado à Bacia do Ribeirão Cambé, Londrina-PR.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Ligia Flávia Antunes Batista

Co-Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi

LONDRINA

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

VITOR MANOEL NOGUEIRA ALVARES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Ambiental, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Londrina.

Prof^a. Dr^a. Ligia Flávia Antunes Batista

Orientador

Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi

Co-Orientador

Prof. Dr. Alexandre Sordi

Coordenador do Curso Superior de Engenharia Ambiental

Londrina, 01 de abril de 2013

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, pois foram meus exemplos e meus motivos por ter me esforçado para alcançar todos os meus objetivos. Por terem sido pacientes em meus momentos de preocupação, e por terem me dado apoio em momentos que precisei.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina pelo conhecimento fornecido e pela oportunidade de poder aplicar, na prática, todo o conhecimento adquirido durante o curso.

Agradeço à minha orientadora, Profa. Dra. Lígia Flávia Antunes Batista, sem a qual este trabalho não teria se desenvolvido de forma alguma. Pela sua paciência com o modelo que relutava para facilitar nosso trabalho e por me atender e responder às minhas dúvidas, seja pessoalmente ou virtualmente. Agradeço pelas broncas e cobranças, assim como pelos momentos de risadas como as geradas pelo “departamento de escambo”. Por todo esse período, deixo aqui meu sincero agradecimento.

Agradeço ao meu co-orientador, Dr. Ricardo Nagamine Costanzi, pelo auxílio com as dúvidas que constantemente surgiram durante o trabalho, o qual foi de fundamental importância para a conclusão do estudo.

Agradeço aos meus colegas de turma, em especial à Marcela Arfelli Silva, pelo apoio e auxílio em momentos decisivos durante todo o desenvolvimento desse trabalho e também do curso. Também à Mônica Hirata Bertachi por ter me auxiliado na elaboração, e também por tolerar insistentes e repetitivos pedidos de ajuda.

Por fim, agradeço à todos aqueles que, em algum momento, estiveram envolvidos nesse projeto em algum momento, e peço desculpas àqueles que não foram citados diretamente.

RESUMO

ALVARES, Vitor Manoel Nogueira. Avaliação da Aplicabilidade do Modelo de Simulação CAESAR: Estudo aplicado à Bacia do Ribeirão Cambé, Londrina-Pr. 2013. 60p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2013.

O solo é um recurso que está em constante processo de degradação, seja por consequências naturais ou antropológicas. A imprevisibilidade das consequências naturais somada aos impactos causados pela ação humana fazem necessárias medidas de controle e prevenção de impactos ainda maiores. Considerando-se que as bacias hidrográficas são definidas como unidades de estudo e gestão, a utilização de ferramentas para auxiliar no estudo dessas áreas torna-se um importante parâmetro para compreensão do comportamento de suas dinâmicas. O modelo CAESAR foi selecionado devido à simplicidade de sua modelagem de complexidade reduzida. Esse estudo tem como objetivo de avaliar os processos hidrológicos relacionados à vazão, erosão e deposição do solo da bacia do Ribeirão Cambé por meio do modelo CAESAR. Para tal, elaboraram-se três diferentes cenários de simulação (10dSusp, 10dNsusp e 30d), onde se avaliaram as curvas de vazão e os períodos de precipitação e para o cenário 30d avaliou-se também a distribuição espacial de dados de velocidade de fluxo de vazão, variação da elevação da bacia (erosão e deposição de solo) e acúmulo de água. O modelo mostrou algumas limitações relacionadas à interpretação da cobertura do solo. Ainda assim, notou-se que o modelo apresentou nos valores de vazão máxima da bacia, mostrando coerência e dando maior confiabilidade para os outros resultados apresentados. O modelo produziu resultados suficientes para ser utilizado como instrumento de pesquisas iniciais para compreender melhor os comportamentos da bacia Ribeirão do Cambé e, a partir desses resultados, aprofundar pesquisas em áreas de interesse em estudos posteriores em locais de maior dinâmica de alterações.

Palavras chave: Bacia hidrográfica, Ribeirão Cambé, modelo CAESAR.

ABSTRACT

ALVARES, Vitor Manuel Nogueira. Evaluation of Applicability of Simulation Model CAESAR: Study applied to the Ribeirão Cambé Watershed, Londrina-Pr. 2013. 60p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2013.

Soil is a resource that is in a constant process of degradation, either by natural or anthropological consequences. The unpredictability of the natural consequences added to the impacts caused by human action make necessary measures to control and prevent even greater impacts. Considering that watersheds are defined as units of study and management, the use of tools to assist in the study of these areas becomes an important parameter for understanding the behavior of its dynamics. The CAESAR model was selected due to its simplicity of reduced complexity modeling. This study aims to assess the hydrological processes related to water flow, soil erosion and deposition on the Ribeirão Cambé watershed through CAESAR model. To this end, it was developed three different simulation scenarios (10dSusp, 10dNsusp and 30d), evaluating the flow slopes and precipitation periods and for the 30d scenario it was also evaluated the spatial distribution data of water flow velocity, variation in the watershed elevation (erosion and soil deposition) and water accumulation. The model has shown some limitations related to the interpretation of soil cover. Still, it was noted that the model presented values of maximum water flow, showing consistency and giving greater reliability for the other presented results. The model produced sufficient results to be used as a tool for initial research to better understand the behavior of the Ribeirão Cambé watershed and, from these results, further research in areas of interest for further studies in regions of greatest dynamic changes.

Keywords: Watershed, Ribeirão Cambé, CAESAR model.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Diagrama esquemático para os processos de operação chave em um modelo de autômato celular | 18 |
| Figura 2 - Figura 2 - Esquema do algoritmo de varredura..... | 22 |
| Figura 3 - Rede de drenagem e principais bacias da área urbana de Londrina - Paraná..... | 26 |
| Figura 4 - Perfil da Bacia Ribeirão do Cambé | 27 |
| Figura 5 - Distribuição das estações pluviométricas no município de Londrina - PR | 31 |
| Figura 6 - Traçado hipotético das isoietas em uma bacia hidrográfica..... | 32 |
| Figura 7 - Polígonos de Thiessen para a bacia Ribeirão do Cambé com as estações Espírito Santo, Londrina - SE Copel e Três Bocas | 33 |
| Gráfico 1 - Vazão e precipitação em função do tempo - sedimentos em suspensão..... | 37 |
| Gráfico 2 - Vazão e precipitação em função do tempo - desconsiderados os sedimentos em suspensão..... | 38 |
| Gráfico 3 - Vazão e precipitação em função do tempo - 30 dias | 38 |
| Gráfico 4 - Pico de vazão no intervalo de tempo de 7000 a 7500 minutos - 10dSusp | 41 |
| Gráfico 5 - Pico de vazão no intervalo de tempo de 7000 a 7500 minutos - 10Nsusp | 42 |
| Gráfico 6 - Picos de vazão do trecho inicial - 30d | 43 |
| Gráfico 7 - Comparativo de somatória de precipitação e picos - 10dSusp..... | 44 |
| Gráfico 8 - Comparativo de somatória de precipitação e picos - 10dNsusp..... | 44 |
| Gráfico 9 - Comparativo de somatória de precipitação e picos - 30d | 45 |
| Gráfico 10 - Picos de vazão do Trecho final - 10dSusp e 10dNsusp | 46 |
| Gráfico 11 - Picos de vazão no trecho final - 30d..... | 47 |
| Figura 8—Imagem de acúmulo de água na Bacia Ribeirão do Cambé - 30d | 49 |
| Figura 9 - Dinâmicas de solo da Bacia Ribeirão do Cambé - 30d..... | 51 |
| Figura 10 - Dados de velocidade de fluxo na Bacia Ribeirão do Cambé - 30d | 52 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Distribuição granulométrica do solo da bacia Ribeirão do Cambé - Londrina - PR | 29 |
| Quadro 2 - Coordenadas das estações de medição pluviométrica no município de Londrina – PR | 30 |
| Quadro 2 - Períodos de dados contínuos entre as estações selecionadas..... | 34 |
| Quadro 4 - Valores de precipitação para o intervalo de 10 dias..... | 39 |
| Quadro 5 - Valores de precipitação para o intervalo de 30 dias..... | 40 |
| Quadro 6 - Distribuição de imagens por intervalo de dias..... | 48 |
| Quadro 7 - Esquema de cores para avaliação de dinâmicas de solo..... | 50 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 2. | OBJETIVOS..... | 13 |
| 2.1. | Objetivo Geral..... | 13 |
| 2.2. | Objetivos Específicos..... | 13 |
| 3. | REFERENCIAL TEÓRICO..... | 14 |
| 3.1. | Modelos de simulação computacional..... | 15 |
| 3.2. | Modelo CAESAR..... | 17 |
| 3.2.1. | Modelo Matemático..... | 19 |
| 3.2.1.1. | Modelo hidrológico..... | 19 |
| 3.2.1.2. | Equações de fluxo..... | 20 |
| 3.3. | Trabalhos Relacionados..... | 22 |
| 3.3.1. | WEPP..... | 22 |
| 3.3.2. | BASINS..... | 23 |
| 3.3.3. | DRAINMOD..... | 23 |
| 3.3.4. | AGNPS (Modelo agrícola de poluição por fonte não pontual)..... | 24 |
| 4. | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 25 |
| 4.1. | Área de estudo..... | 25 |
| 4.2. | Modelagem..... | 27 |
| 4.2.1. | Altimetria..... | 28 |
| 4.2.2. | Granulometria..... | 28 |
| 4.2.3. | Precipitação pluviométrica..... | 29 |
| 5. | RESULTADOS..... | 37 |
| 5.1. | Análise de vazão..... | 37 |
| 5.2. | Análise de dados espaciais..... | 47 |
| 6. | CONCLUSÃO..... | 55 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 57 |

1. INTRODUÇÃO

Segundo Sperandio (2012, p. 1412) um dos processos de degradação do solo mais atuantes é a erosão ocasionada pela ação do fluxo da água na bacia. De acordo com esse autor, em despeito da importância do recurso solo, não se observa a adoção de um manejo conservacionista, visando preservá-lo, que sofre constantemente processos de degradação ambiental devido à sua utilização predatória.

A imprevisibilidade da natureza em suas formas e consequências torna necessárias medidas de controle e prevenção de possíveis eventos mais graves como enchentes e erosão. Lelis e Calijuri (2010, p. 159) afirmam que, numa visão holística de preservação dos recursos naturais, a identificação dos problemas ambientais de uma área deve subsidiar a implementação de um planejamento do uso e ocupação dos solos. Deve-se então compreender o ambiente ocupado fim de preservá-lo para o futuro.

Segundo Teodoro et al (2007), a caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica é um dos primeiros e mais comuns procedimentos executados em análises hidrológicas ou ambientais, e tem como objetivo elucidar as várias questões relacionadas com o entendimento da dinâmica ambiental local e regional.

Neste contexto a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, adota a definição de bacias hidrográficas como unidade de estudo e gestão, dando a essa unidade grande valor para o gerenciamento das bacias pelas unidades de gestão e importância aos estudos dessa áreas.

Assim, a utilização de ferramentas que ajudem a compreender as dinâmicas da bacia hidrográfica é fundamental para a compreensão inicial e posterior estudo desses locais. Nesse cenário, modelos matemáticos de estimativa de perdas de solo pela vazão de água vêm sendo aplicados com eficiência, tanto no planejamento conservacionista (preventivo) quanto na avaliação e controle do processo erosivo de bacias hidrográficas (Machado, 2002; Christofolletti, 1999 apud LELIS e CALIJURI, 2010, p. 159).

Segundo Silveira e Quadros (2006, p. 1) modelos de simulação são ferramentas que podem ser usadas para reduzir o tempo e o custo da

experimentação de campo. No entanto, deve-se ter claro que um modelo é uma abstração da realidade e que, portanto assim deve ser tratado. A utilização desse tipo de ferramenta pode fornecer dados similares aos que seriam obtidos em campo, porém a complexa integração entre as múltiplas variáveis encontradas na realidade é quase irreproduzível em modelos matemáticos. Essa subjetividade ligada ao mundo real limita a utilização dessa ferramenta a apenas uma aproximação dos resultados reais.

A aplicação de modelos de simulação cabe às mais variadas áreas da pesquisa. No específico caso desse estudo, será aplicada a avaliação dos processos de erosão e deposição gerados pela vazão em uma bacia hidrográfica.

No contexto desse trabalho, destaca-se que a avaliação unilateral, ou seja, de apenas uma perspectiva hidrológica, geomorfológica ou geográfica, da bacia hidrográfica pode não resultar em dados suficientes para a avaliação no âmbito ambiental, já que esse tipo de análise é fundamentalmente interdisciplinar. Assim, faz-se importante utilizar modelos hidrológicos, de erosão e de deposição de sedimentos em bacias hidrográficas. Todas essas variáveis integradas geram dados capazes de fornecerem base para a melhor compreensão das consequências de eventos naturais e antrópicos dentro da área de estudo.

Esse trabalho se justifica pela necessidade da melhor compreensão do comportamento de uma bacia hidrográfica em relação aos processos hidrológicos e o comportamento do solo (erosão e deposição).

A erosão e conseqüente deposição do solo geram impactos diretos na bacia hidrográfica e sua geomorfologia. Essa complexidade torna necessária a realização de estudos que integrem essas variáveis para a obtenção de resultados mais próximos do real.

A utilização de uma ferramenta de simulação capaz de fornecer dados coerentes com a realidade é de grande valia para as pesquisas na área e pode servir como parâmetro para tomada de decisões de planos de ação de impacto ambiental (processos erosivos, deposição de solo, assoreamento de rios) e criação de projetos de gestão do meio ambiente.

Chwif (1999, p. 1) cita Pidd (1998) enumerando algumas vantagens da simulação computacional, quando comparada com a experimentação direta

de um sistema real. A primeira é em relação aos custos envolvidos: é muito menos oneroso efetuar experiências com o modelo de simulação do que com o sistema real, especialmente quando equipamentos de alto custo estão envolvidos. Também a experimentação de um sistema real envolve riscos, tanto materiais quanto humanos, o que não ocorre com um sistema simulado.

A utilização do modelo CAESAR é interessante pela simplicidade de sua modelagem. Esse modelo é caracterizado por Coulthard (2008, p. 2) como um modelo de complexidade reduzida, corroborado pela afirmação de Chwif (1999, p. 12) que afirma que dentro da comunidade científica, por consenso, modelos simples são sempre preferíveis a um modelo complexo. Ainda justifica que é muito mais difícil admitir uma falha em um modelo extremamente custoso do que em um modelo simples e barato.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar os processos hidrológicos relacionados à vazão, erosão e deposição do solo da bacia do ribeirão Cambé por meio do modelo CAESAR.

2.2. Objetivos Específicos

- Ajuste dos parâmetros que caracterizam a bacia e as variáveis da simulação.
- Simular, por meio da variação de parâmetros de precipitação, coletados pela Agência Nacional de Águas (ANA), e intervalo de tempo, três diferentes cenários, sendo caracterizados por:
 - Avaliar os resultados de erosão e deposição obtidos nos diferentes cenários criados e a aplicabilidade do modelo CAESAR.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Oliveira et al. (2008, p, 56) afirmam que as bacias hidrográficas têm se tornado um importante instrumento para o gerenciamento das atividades de uso e conservação dos recursos naturais. A bacia hidrográfica é a célula básica da análise ambiental e permite conhecer e avaliar seus diversos componentes, processos e interações que nela ocorrem, fundamentada em uma visão sistêmica e integrada do ambiente (BOTELHO e SILVA, 2004, p 155).

O planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos devem considerar as características físicas, bióticas, abióticas, bem como sociais, econômicas e culturais dos indivíduos que interagem neste espaço geográfico. Para tal, deve-se proceder uma análise dos principais componentes da paisagem, integrando aspectos naturais e antrópicos, visando à utilização racional da água, desenvolvendo estudos e propostas de medidas preventivas e corretivas (BORGES et al., 2009, p. 1).

Segundo Botelho e Silva (2004, p 154), cresceu enormemente o valor da bacia hidrográfica como uma unidade de análise e planejamento ambiental e estudos como erosão, manejo e conservação do solo, água e planejamento ambiental, são aqueles que mais têm utilizado a bacia hidrográfica como unidade de análise.

De acordo com Borges et al. (2009, p. 2), a tomada de consciência, por parte da sociedade, no que diz respeito à utilização dos recursos hídricos, impulsionou o desenvolvimento de estudos e criações de leis para a regulamentação de seu uso. A ocupação de bacias hidrográficas tem despertado maior interesse, pois a partir destas é possível avaliar de forma integrada as ações antrópicas sobre o meio ambiente e suas consequências sobre o equilíbrio ecológico, considerando que a qualidade da água de um manancial está intimamente ligada ao seu uso.

Segundo Chaves (1991), citado por Machado (2003, p. 736), essa crescente preocupação com problemas de assoreamento e poluição de cursos d'água e de reservatórios contribuiu para o desenvolvimento de modelos matemáticos que preveem o aporte de sedimentos em pontos específicos da bacia hidrográfica. Estes são utilizados para a avaliação de práticas de manejo da terra e avaliação e planejamento ambiental.

"Bacias são um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, formadas nas regiões mais altas do relevo por divisores de água, onde as águas das chuvas, ou escoam superficialmente formando os riachos e rios, ou infiltram no solo para formação de nascentes e do lençol freático". (Teodoro et al., 2007, apud Barrella, 2001)

Ainda de acordo com Teodoro et al. (2007, p. 138), essas águas superficiais escoam para as partes mais baixas do terreno, formando riachos e rios, sendo que as cabeceiras são formadas por riachos que brotam em terrenos íngremes das serras e montanhas e à medida que as águas dos riachos descem, juntam-se a outros riachos, aumentando o volume e formando os primeiros rios, esses pequenos rios continuam seus trajetos recebendo água de outros tributários, formando rios maiores até desembocarem no oceano.

A simulação do comportamento de uma bacia hidrográfica pode fornecer indicações a respeito de mudanças desejáveis ou indesejáveis que estejam ocorrendo com os recursos hídricos como consequência de práticas de manejo. Podem-se identificar várias práticas que prejudicam a sustentabilidade, podendo estas práticas ocorrer em diferentes escalas (Rennó, 2004, p. 26).

Dessa forma, utilizam-se esses modelos para a análise, controle e predição de hipóteses. Segundo Tucci (1995, p. 26), modelos hidrológicos procuram descrever o processo de transformação de precipitação em vazão, dentro de uma análise da visão hidrológica, morfológica e geográfica da situação, tendo também parâmetros como a taxa de áreas impermeáveis e a eficiência do escoamento superficial. As componentes básicas desses modelos são: algoritmo de perdas por depressão e impermeabilização, perda por infiltração, escoamento superficial de toda a bacia e escoamento na superfície livre em canais.

3.1. Modelos de simulação computacional

A simulação visual consiste na utilização de recursos de computação gráfica, que com a geração de resultados visuais, que permitem ao analista avaliar a distribuição espacial do fenômeno de estudo para melhor analisar e compreender os dados, as informações e os resultados da simulação. (Sabbadini e Oliveira, 2006, p. 2).

Rennó (2004, p. 32) discute a categorização dos modelos matemáticos, separando-os nas seguintes categorias:

- 1) Quanto ao uso de probabilidade:
 - a) Modelos estocásticos: Modelo em que ao menos uma das variáveis apresenta comportamento aleatório.
 - b) Modelos determinísticos: Caracterizado caso os conceitos de probabilidade não sejam considerados durante a elaboração do modelo. Mesmo que uma variável seja aleatória, o modelo pode ser determinístico se seus valores de entrada gerar apenas um único valor de saída.
- 2) Quanto à representação dos fenômenos:
 - a) Modelos empíricos: São baseados em observações. Pouco robustos, já que são específicos para a região e condições para as quais as relações foram estimadas. Não são capazes de gerar simulações de mudanças nas condições sobre as quais o modelo foi construído.
 - b) Modelos baseados em processos: Normalmente mais complexo que os modelos empíricos, pois buscam descrever todos os processos que influenciam o modelo estudado em geral por meio de equações diferenciais do sistema físico e empírico.
- 3) Quanto ao tipo de variáveis:
 - a) Modelos discretos: No caso desses modelos, as variáveis envolvidas no processo permanecem inalteradas durante determinado espaço de tempo, mudando seus valores em instantes bem definidos.
 - b) Modelos contínuos: Em contraposição aos modelos discretos, as variáveis dos modelos contínuos variam durante todo o processo, alterando seus valores continuamente.
- 4) Quanto à representação da dimensão espacial:
 - a) Modelos pontuais: Nesses modelos, considera-se que as variáveis de entrada e saída são representativas para toda a extensão da área de estudo.
 - b) Modelos distribuídos: Considera-se que os valores das variáveis poderão ser diferentes para cada ponto dos modelos.
- 5) Quanto à representação do tempo:

- a) Modelos estáticos: Um conjunto de dados de entrada gera apenas um resultado a partir das equações inerentes ao modelo utilizado em um único passo de tempo.
- b) Modelos dinâmicos: Utilizam o resultado obtido por meio de uma iteração das equações do sistema como variável de entrada para uma próxima iteração, apresentando as mudanças ocorridas ao longo do tempo.

Assim como variam os meios de aplicação e as diferentes classificações dos modelos em relação aos seus dados de entrada e saída, também variam as diferentes escalas utilizadas. As simulações descrevem modelos como processos com diferentes níveis de detalhamento espacial e diferentes escalas de tempo. Rennó (2004, p. 35) afirma que um modelo pode ser detalhado, apropriado a pequenos intervalos de tempo e espaço, ou ser mais simples e genérico, podendo simular o comportamento de regiões inteiras e/ou períodos de tempo mais longos (décadas, séculos).

3.2. Modelo CAESAR

Neste trabalho foi utilizado o modelo CAESAR, distribuído por meio de uma ferramenta livre. O modelo promove a modelagem bidimensional de fluxo e transporte de sedimentos. É capaz de simular mudanças morfológicas na captação de rios ou afluentes, baseando-se em regimes de enchente, em períodos de até milhares de anos. Foi inicialmente projetado para simular a resposta geomórfica de captação de rios e variações climáticas e/ou de cobertura vegetal. (Coulthard, 2008, p. 1)

De acordo com Coulthard (2008, p. 2) CAESAR é um dos modelos fluviais de um novo gênero denominado modelos de complexidade reduzida. Foi projetado, em parte, para suprir a falta de abordagens complexas entre dinâmicas fluviais bidimensionais e tridimensionais, tais abordagens são comumente muito complexas para serem prontamente aplicadas em grandes áreas em escalas temporais maiores que um único evento de enchente, e

modelos de evolução do solo de baixa resolução que simulam o desenvolvimento de paisagens durante milhares de anos.

De acordo com a classificação de Rennó podemos afirmar que o modelo é: determinístico, pois não se baseia em probabilidades; empírico, pois utiliza dados obtidos da realidade; discreto, pois as mudanças das variáveis são pré-definidas pelo usuário; e dinâmico, pois seus resultados são dados em função do tempo.

Coulthard (1999, p. 55) explica que a área de estudo é representada em um arranjo uniforme de células de grade. A cada célula dá-se um valor inicial para elevação, descarga de água, profundidade da água, área de drenagem e frações granulométricas. Para cada espaço de tempo ou ciclo, esses valores são atualizados em relação às células adjacentes de acordo com as leis aplicadas para todas as células. Essas leis recaem sobre quatro grupos abrangendo a modelagem hidrológica, hidráulica, de erosão e curva de processo (Figura 1).

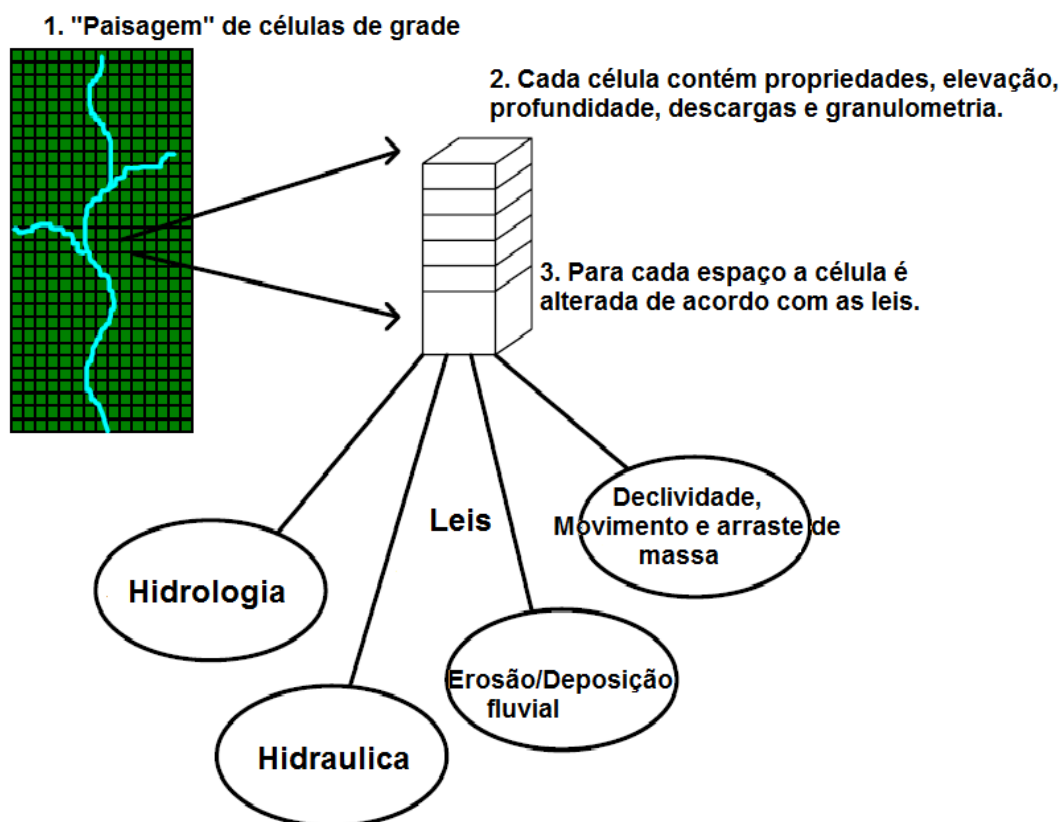


Figura 1 - Diagrama esquemático para os processos de operação chave em um modelo de autômato celular

Fonte: Coulthard, (1999, p. 55)

Em termos gerais, uma célula possui doze camadas, das quais dez são dedicadas à representação da granulometria do solo. Cada célula contém também informação de saturação, usada para direcionar e distribuir o fluxo excedente para células adjacentes.

Além disso, as camadas permitem controlar se haverá deposição ou erosão, a partir de movimento de material de cima para baixo (deposição) ou de baixo para cima (erosão).

3.2.1. Modelo Matemático

Segundo Coulthard (2008, p. 56), as equações que regem o modelo simulação CEASAR são divindades para o modelo hidrológico e para as equações de fluxo.

3.2.1.1. Modelo hidrológico

Para cada instante da execução do modelo, a saturação do solo (J_t) para uma célula é calculada. A saturação para o tempo do passo seguinte (T) é então calculada (J_{t+1}), mas para isso um parâmetro adicional é carregado, j_t o qual, antes de todos os ciclos, é estabelecido como o último j_{t+1} . Então, se a taxa de pluviosidade (r) for zero, J_{t+1} é calculado de acordo com a equação (1).

$$J_{r+1} = r / ((r - J_i) / J_i \exp(((0 - r)T/m) + 1)) \quad (1)$$

Caso a taxa de pluviosidade seja diferente de zero, calcula-se através da equação (2).

$$J_{t+1} = m/T \log(((r - J_t) + J_t \exp(rT/m))/r) \quad (2)$$

Nessas equações, m é a variável que controla o aumento e a diminuição do deficit de umidade do solo.

3.2.1.2. Equações de fluxo

Para cada célula, um limiar de escoamento é calculado pela equação (3), o qual é baseado na quantidade de água que infiltrará através do solo, em um balanço da condutividade hidráulica (K), da declividade (S) e do espaçamento horizontal (Dx).

$$\text{Limiar} = KS(Dx)^2 \quad (3)$$

Esse limiar de escoamento é então subtraído da saturação do solo equacionada pelas equações (1) e (2), e a proporção acima é tratada como escoamento, que segue como fluxo subsuperficial. Esse fluxo subsuperficial é calculado utilizando um algoritmo de fluxo múltiplo dado pela equação (4) como descreve Coulthard (2008, p 57) por meio do enunciado de Desmet e Govers (1996).

$$Q_i = (Q_0 S_i^x) / (\sum S_i^x) \quad (4)$$

Na equação (4) Q_i é a fração de descarga acrescentada às células adjacentes (i) do fluxo total de descarga (Q_0) em m^3/s , de acordo com a declividade (S) entre uma célula e suas células adjacentes). Com o fluxo superficial, a espessura é calculada utilizando a equação de Manning descrita pela equação (5).

$$Q = A(R^{0,67} * S^{0,5}) / n \quad (5)$$

Onde (A) é a área da seção da célula dada pela equação (6), (R) é o raio hidráulico, (S) é a declividade e (n) é o coeficiente de Manning. Caso a célula tenha dimensões de 1mx1m, essa equação pode ser rearranjada para a seguinte equação (7), com largura (w) sendo 1, restando apenas a espessura (d).

$$A = wd \quad (6)$$

$$Q = d(R^{0,67} * S^{0,5})/n \quad (7)$$

O comportamento da água é então calculado de acordo com a equação (8) onde tanto a profundidade (d) quanto a elevação da célula (e) é considerada.

$$Q_i = (Q_0 ([e + d] - e_i)^x) / (\Sigma [(e + d) - e_i]^x) \quad (8)$$

Nessa equação (8), (Qi) é a descarga da célula processada (i), (Q0) a descarga total da célula, (e) é a elevação da célula e (d) a profundidade da água (em metros) para cada célula adjacente (i). As diferenças de declividade entre as células diagonalmente adjacentes são calculadas por meio da divisão por $(2(Dx^2))^{1/2}$. O cálculo de espessura é uma importante aproximação que permite que o modelo processe as descargas sobre ou ao redor de obstáculos.

Segundo Coulthard e De Wiel (2006, p. 6), os dados do modelo hidrológico são então calculados utilizando um método de algoritmos de fluxos múltiplos. Esse sistema processa a bacia em quatro direções: De norte a sul (Figura 2[1]), leste a oeste (Figura 2[2]), oeste a leste (Figura 2[3]) e sul a norte (Figura 2[4]), como pode ser visualizado na figura 2.

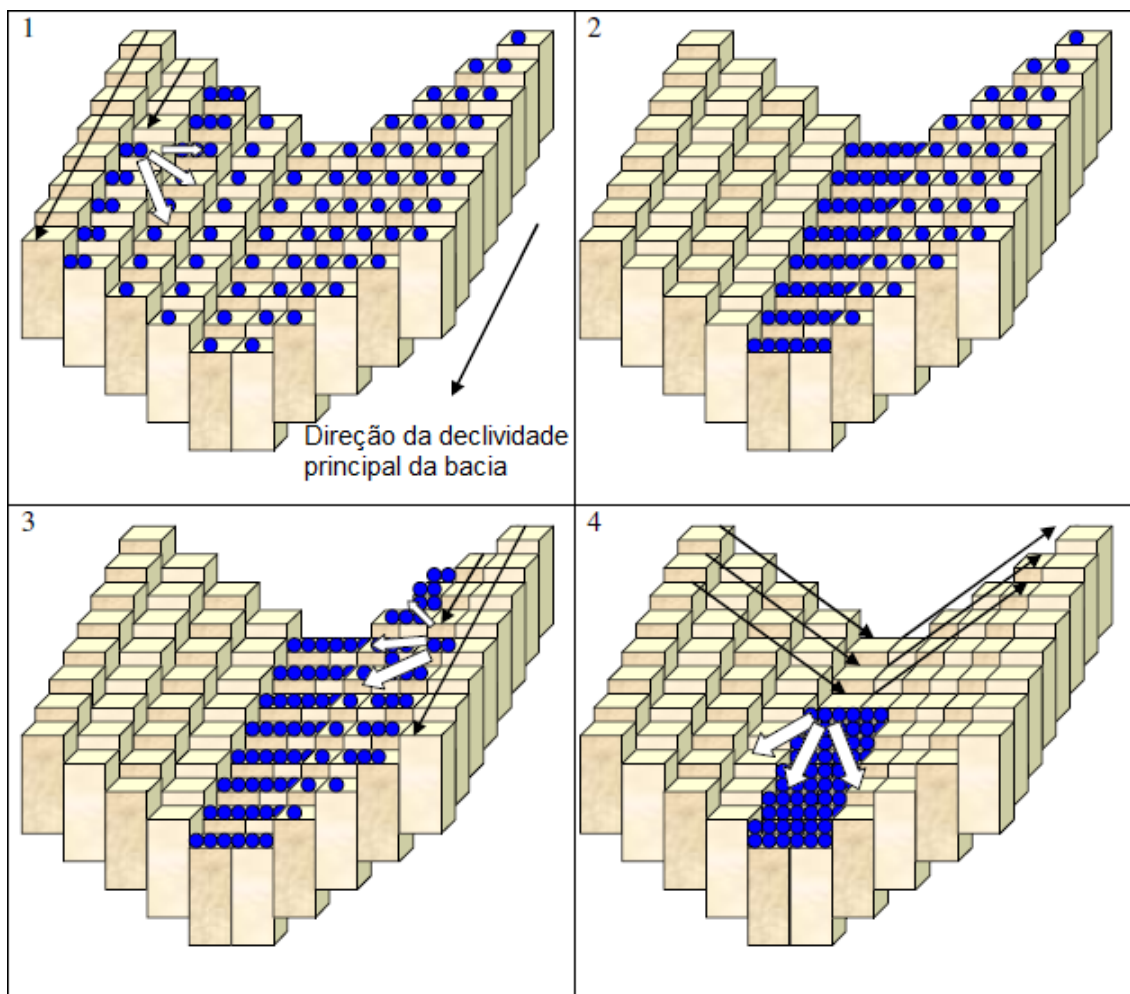


Figura 2 - Figura 2 - Esquema do algoritmo de varredura
 Fonte: Coulthard, T., De Wiel, M.V., (2006, pág. 6).

3.3. Trabalhos Relacionados

3.3.1. WEPP

Segundo Meyer et al. (1975) citados por Cassol & Lima (2003, p. 118), nos últimos 20 anos, foram desenvolvidos modelos de simulação da erosão hídrica baseados em processos físicos fundamentais, que têm fornecido estimativas consistentes da erosão. Esse modelo não somente prediz taxas de erosão do solo, mas também a liberação de sedimentos. O *Forest Service* dos Estados Unidos tem validado com sucesso o modelo WEPP para um grande número de condições de estradas florestais (Elliot et al., 1997 apud Machado et al., 2003, p. 296).

De acordo com Chaves (1996) citado por Machado et al. (2003, p. 296), o modelo WEPP representa a última geração de modelos com base em processos e foi o resultado de um esforço multidisciplinar, envolvendo pesquisadores de várias agências e universidades americanas. Baseia-se nos fundamentos das teorias de infiltração, física do solo, fitotecnia, hidráulica e mecânica da erosão. Proporciona várias vantagens sobre outras tecnologias de previsão de erosão, como a capacidade de estimar as distribuições espacial e temporal da perda de solo e deposição e da perda de solo líquida na vertente ou em cada ponto dela, tanto em nível diário, quanto mensal ou anual. Além da opção de simulação contínua, o modelo pode também ser usado na opção evento a evento.

Segundo seus desenvolvedores, Flanagan et al. (1995), esse modelo não considera eventos do tipo voçoroca e sua aplicação é limitada a áreas onde as taxas de chuva excedem a capacidade de infiltração e o fluxo subsuperficial é insignificante.

3.3.2. BASINS

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (2012), esse sistema foi originalmente introduzido em 1996. *BASINS* é um sistema de análise ambiental multiuso projetado para utilização por órgãos estaduais, regionais e locais na realização de estudos de bacias e qualidade da água. Este sistema torna possível avaliar rapidamente grandes quantidades de dados de fonte pontual (lançamentos de efluentes e descargas de águas pluviais em corpos hídricos) e não pontual (precipitação). *BASINS* permite avaliar a qualidade da água em locais de fluxo selecionados ou em uma bacia inteira. Esta ferramenta integra dados ambientais, ferramentas analíticas e programas de modelagem para apoiar o desenvolvimento de abordagens para a gestão de bacias hidrográficas e proteção ambiental, incluindo programas de carga máxima diária total (TMDL).

3.3.3. DRAINMOD

Segundo Gabele (1997), inicialmente, o modelo DRAINMOD foi utilizado como uma ferramenta de pesquisa para investigar o desempenho dos sistemas de drenagem em larga escala e de subirrigação e seus efeitos no uso da água, no desenvolvimento das colheitas, tratamento de efluente, e movimentos de poluentes provenientes de campos agrícolas.

O modelo simula a hidrologia de solos mal drenados, lençol freático próximo à superfície em uma base horária e diária por longos períodos de dados. Prediz os efeitos da drenagem associada às práticas de gerenciamento da profundidade do lençol freático, o regime de água no solo e os campos de colheita. O modelo tem sido testado com êxito e aplicado em uma grande variedade de condições geográficas e do solo.

Segundo o Serviço de Conservação do Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), responsável pelo desenvolvimento do DRAINMOD, o modelo simula processos subsuperficiais relacionados à precipitação irrigação do solo.

3.3.4. AGNPS (Modelo agrícola de poluição por fonte não pontual)

O modelo AGNPS foi desenvolvido para examinar a qualidade da água dado os efeitos da erosão do solo gerada pela agricultura e áreas urbanas (YOUNG et al. 1987 apud GABELE, 1997). É projetado para ser executado em escalas de bacias.

A função hidrológica fornece a predição das taxas de volume de escoamento e pico de vazão. A função de erosão do solo inclui a erosão e a sedimentação. A função de nutrientes analisa as concentrações de nitrogênio, fósforo e demanda química de oxigênio (DQO) no escoamento e no sedimento. O modelo exige um total de 22 parâmetros para a execução. Entre os parâmetros estão o modelo de elevação digital (DEM) e informações de morfologia, solo, uso da terra e fontes pontuais. De acordo com o Serviço de Conservação dos Recursos Naturais do USDA, o modelo é uma ferramenta de análise da poluição dos corpos hídricos devido às dinâmicas hidrológicas da bacia.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

A área escolhida para o estudo está compreendida no perímetro rural e urbano do município de Londrina, localizado no norte do Paraná, entre as latitudes 23° 13' 58" S e 23° 25' 09" S e longitudes 51° 04' 52" W e 51° 14' 58" W. Para a realização do seguinte projeto, escolheu-se a bacia do ribeirão Cambé, devido à localização, tamanho e importância hídrica para a região. Segundo Rocha (1995, p. 536) a bacia do ribeirão Cambé engloba a área urbana e uma interface urbano-rural do município. Corta a faixa central do município no sentido noroeste-sudeste (Figura 3). Possui, segundo a classificação de Köppen, o clima do tipo Cfa, ou seja, clima subtropical úmido, com chuvas em todas as estações, podendo ocorrer secas nos meses de inverno. A temperatura média de 16,4° C no mês mais frio e de 25,5° C no mês mais quente, sendo a temperatura média anual registrada em 2007 de 21,8°.

De acordo com Rocha (1995, p. 540) a área está situada no Planalto de Guarapuava ou Terceiro Planalto, onde se evidencia, ao lado de pequenos espigões que constituem divisores de águas secundários, apenas suaves colinas e platôs.

Segundo Trabaquiniet al. (2009, p. 43) a bacia mostra uma rede de drenagem bem distribuída, de maneira geral os rios são de caráter perene, e escoam sobre o relevo que possui orientação para a margem esquerda do rio Tibagi.

Como característica natural, esta cidade conta com a presença de muitas nascentes que dão origem a inúmeros córregos e ribeirões, somente na área urbana encontram-se 84 cursos d'água.

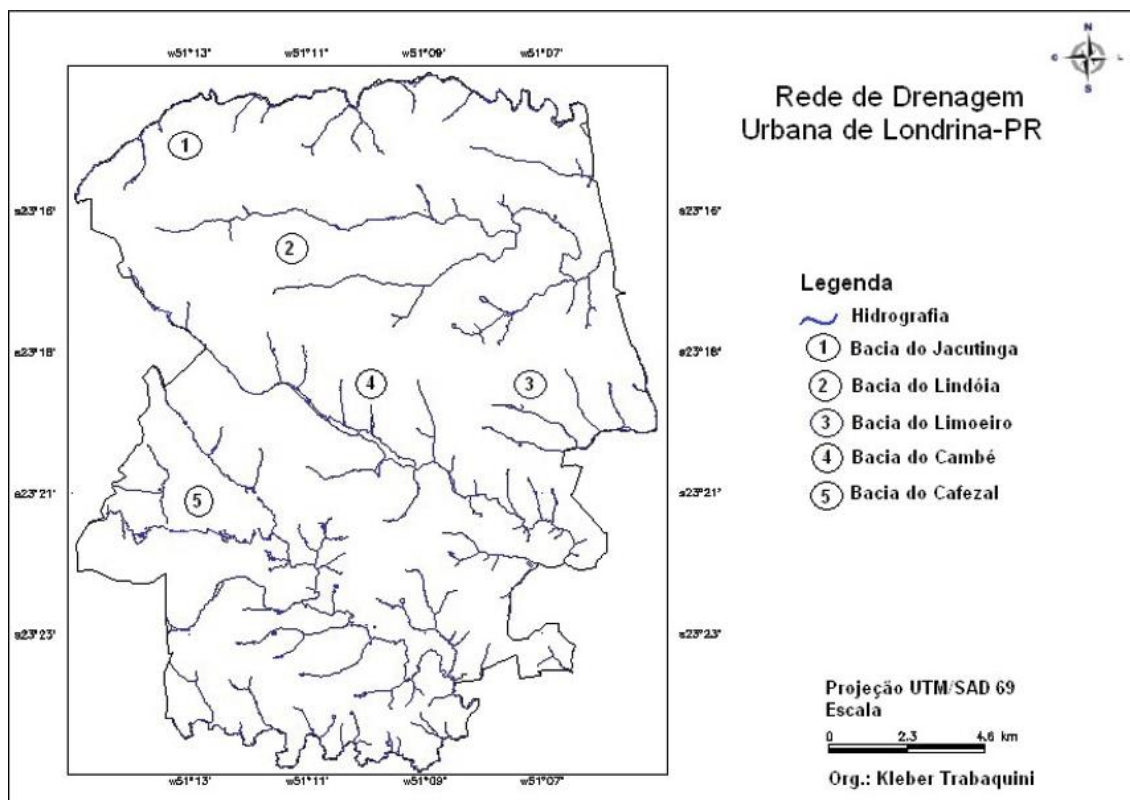
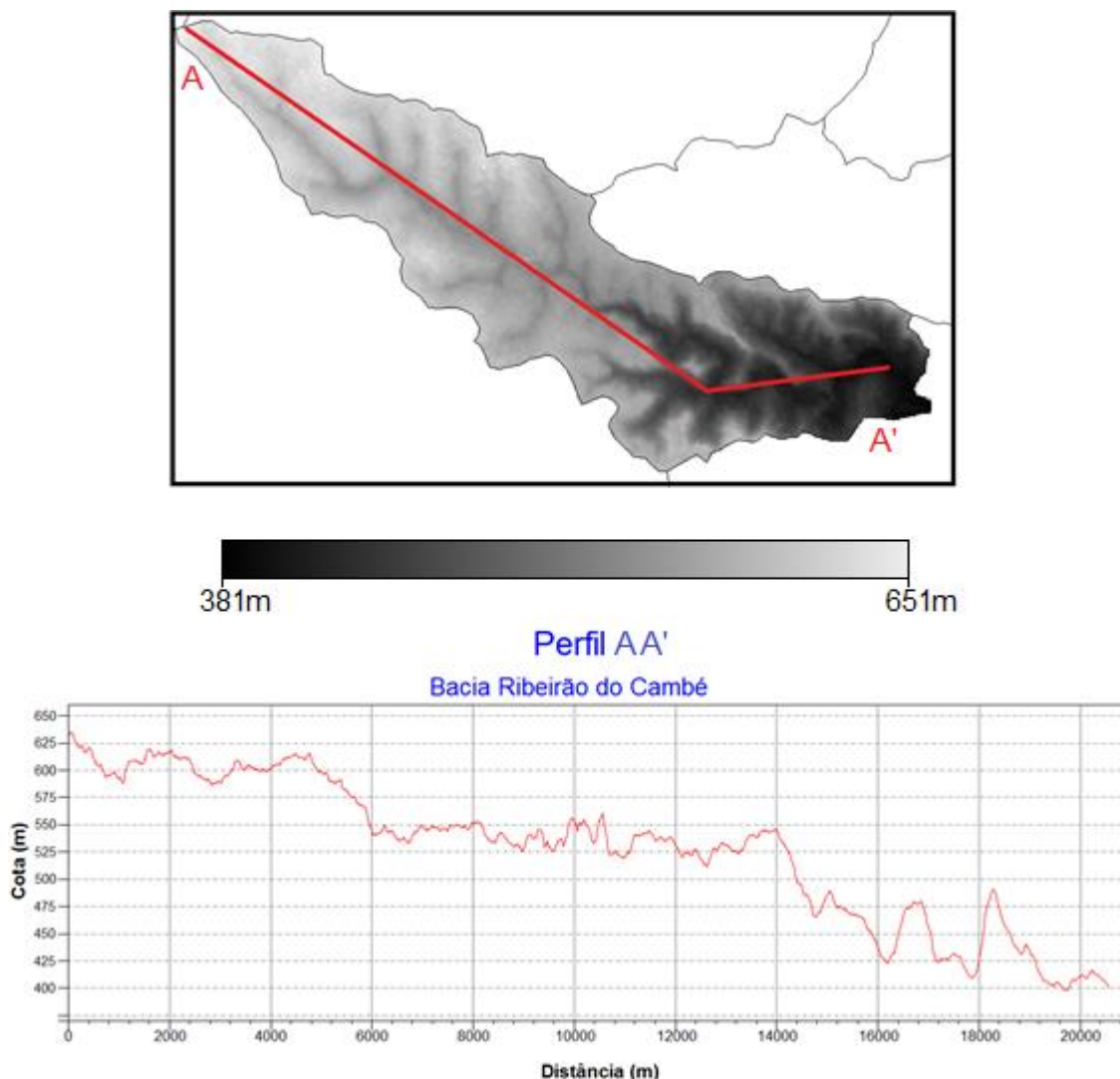


Figura 3 - Rede de drenagem e principais bacias da área urbana de Londrina - Paraná.
Fonte: Trabaquini, K. et al, (2009. Pág. 45).

Os dados de solo a serem utilizados neste trabalho são provenientes do CEEG - Campo Experimental de Engenharia Geotécnica, localizado na Universidade Estadual de Londrina (UEL), cujas amostras foram extraídas à 2m de profundidade. A partir de ensaios de caracterização no laboratório de Geotecnia dessa mesma universidade, esse solo foi classificado como Argila Siltosa (TEIXEIRA *et al.* 2006, 2008). De acordo com a normatização do Conselho de Pesquisas de Transporte (TRB), este solo é classificado como um solo do tipo A7, ou seja, considerado argiloso.

A Bacia Ribeirão do Cambé tem uma variação de mais de 250 metros de altura desde sua ponta a noroeste até sua ponta sudeste, apresentando seu ponto mais baixo a uma cota de 381 m e seu ponto mais alto a uma cota de 651 m. O perfil da linha que segue o curso da água está apresentado na Figura 4.



y

Figura 4 - Perfil da Bacia Ribeirão do Cambé
Fonte: Autoria Própria

4.2. Modelagem

De acordo com Trivelato (2003, p. 6) a modelagem é um processo complexo e, em vários campos, envolve a capacidade de dedução e inferência. A modelagem de um sistema será mais fácil se conhecidas as leis pertinentes ao sistema, se for fácil obter uma representação gráfica ou simbólica do sistema, e se as incertezas entre as entradas, parâmetros e saídas puderem ser quantificadas. Assim Trivelato (2003, p. 6) define modelo como: “Uma representação física, matemática, lógica ou computacional qualquer de um sistema, processo, fenômeno ou entidade.” Segundo a sua natureza os

modelos são classificados em: físicos, matemáticos, lógicos e, recentemente, computacionais.

O crescente potencial de processamento oferecido pelos recursos computacionais fornece dados cada vez mais confiáveis e torna esse tipo de análise uma ferramenta de significativa importância para a tomada de decisões. Dessa forma busca-se minimizar os custos em testar hipóteses, diminuindo o grau de comprometimento destes testes e visando diminuir as incertezas consequentes dessas decisões.

Para o processamento da simulação, foram necessários dados de altimetria da bacia, de precipitação pluviométrica e granulometria.

4.2.1. Altimetria

O modelo de terreno utilizado foi obtido através da rede ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) GDEM (*Global Digital Elevation Model*) de imagens de alta resolução (30m x 30m). As imagens são distribuídas gratuitamente ao público desde 29 de junho de 2009 e facilitam os estudos de desastres, saúde, energia, clima, tempo, ecossistema, agricultura e biodiversidade.

Devido à grande dimensão da imagem ASTER GDEM original, necessitou-se reduzir a imagem do satélite, focando-se na área da bacia em estudo. Dessa forma o modelo processaria apenas a área de interesse, reduzindo o tempo de simulação, o qual é diretamente proporcional à dimensão dos dados inseridos. Para tal, obtiveram-se arquivos de limites da bacia através de mídia digital de educação ambiental fornecida pela Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEMA). Com o auxílio desses dados as imagens ASTER GDEM foram recortadas no limite da bacia Ribeirão do Cambé, por meio do Sistema de Processamento de Informação Geográfica SPRING desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE).

4.2.2. Granulometria

Para a simulação, o modelo CAESAR permite informar até 9 níveis de diâmetros de grãos, estabelecidos pelo usuário, para elaborar uma curva granulométrica no sistema. Esses diâmetros indicam as respectivas proporções granulométricas.

Quadro 1 - Distribuição granulométrica do solo da bacia Ribeirão do Cambé - Londrina - PR

| | Tamanho do sedimento (m) | Proporção |
|---|--------------------------|-----------|
| 1 | 0,000005 | 0,61 |
| 2 | 0,00001 | 0,06 |
| 3 | 0,00002 | 0,05 |
| 4 | 0,00004 | 0,04 |
| 5 | 0,00008 | 0,12 |
| 6 | 0,00016 | 0,12 |
| 7 | 0,00032 | 0 |
| 8 | 0,00064 | 0 |
| 9 | 0,00128 | 0 |
| | Soma | 1 |

O modelo exige que a somatória final das porcentagens de granulometrias seja igual a 1. Dessa forma evita erros de processamento durante a simulação.

A curva granulométrica do solo de Londrina, que corresponde às proporções do Quadro 1, foi obtida através de um estudo realizado na Universidade Estadual de Londrina (UEL) pelo Laboratório de Geotecnia por Coelho (2012, p. 47).

4.2.3. Precipitação pluviométrica

Para a simulação, adquiriram-se dados de pluviosidade com o volume diário de chuvas na região. Os dados utilizados foram obtidos através da Biblioteca Virtual da Agência Nacional de Águas disponível em sua página virtual. Esses dados foram obtidos com coordenadas de suas localizações.

Para melhor visualização desses dados, utilizou-se no SPRING os dados de limites municipais para localizar qual sua distribuição dentro do município de Londrina e quão próximas da bacia em estudo estariam essas estações. Para tal, os limites municipais foram obtidos por meio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através de sua página virtual.

Foram obtidos dados de 8 estações de medição pluviométrica em todo o município de Londrina como seguem os dados no Quadro 1, distribuídas de acordo com a Figura 5:

Quadro 2 - Coordenadas das estações de medição pluviométrica no município de Londrina – PR

| Nome | Identificação | Latitude | Longitude |
|---------------------|----------------------|-----------------|------------------|
| Londrina - SE Copel | A | -23,2667 | -51,23 |
| Londrina | B | -23,3167 | -51,15 |
| Espirito santo | C | -23,3667 | -51,20 |
| Três bocas | D | -23,355 | -51,02 |
| São Luiz | E | -23,5167 | -51,23 |
| Paiquerê | F | -23,5167 | -51,07 |
| Sítio igrejinha | G | -23,5831 | -51,08 |
| Lerrovile | H | -23,6831 | -51,08 |

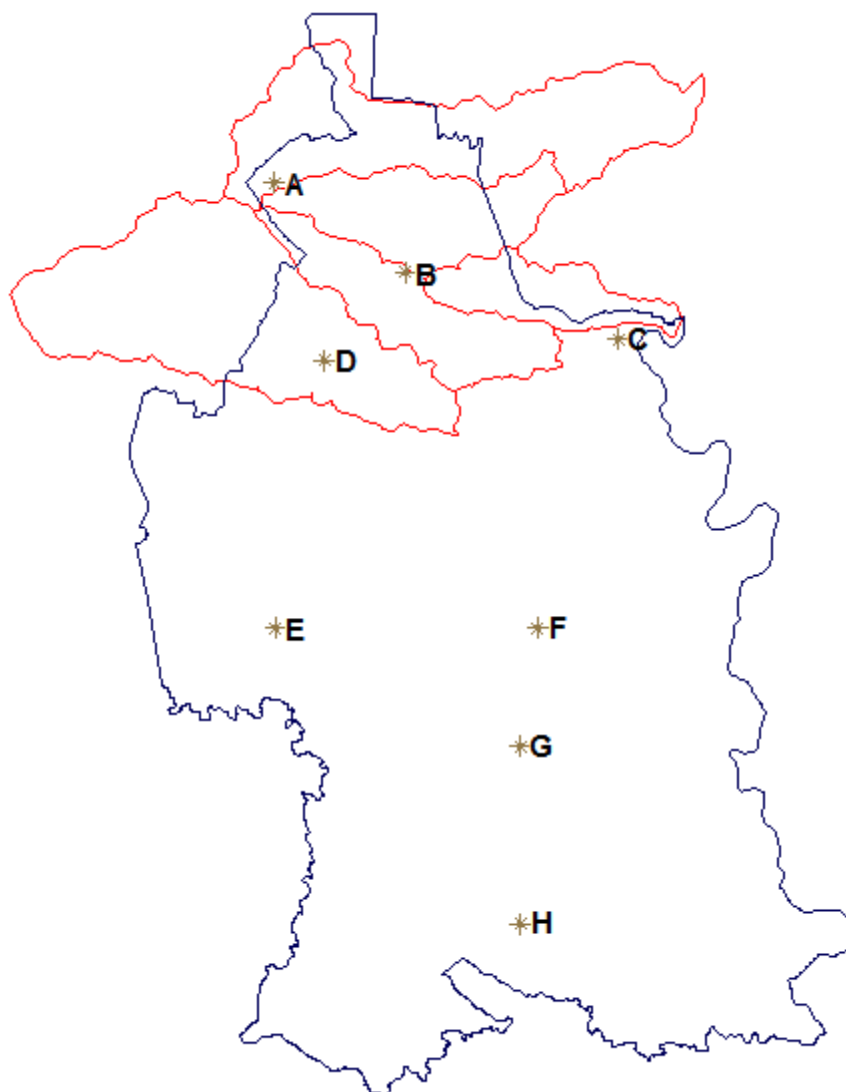


Figura 5 - Distribuição das estações pluviométricas no município de Londrina - PR
Fonte: Autoria própria

Durante a análise de dados de pluviosidade, notou-se que apenas 4 estações, localizadas na parte norte do município, geram dados de pluviosidade da região da bacia em estudo. Dessa forma, restringiu-se o uso dos dados a apenas as estações Espírito Santo, Londrina, Londrina – SE Copel e Três Bocas.

No entanto, durante o tratamento dos dados, notou-se que a estação Londrina continha várias sequências de dados ausentes, contabilizando mais de 15% de perda de dados. Dessa forma, para permitir a utilização de um período contínuo de chuvas, descartaram-se os dados da referida estação.

O modelo CAESAR permite a informação somente de um índice pluviométrico para toda a bacia, por hora. Assim fez-se a média ponderada desses dados no período selecionado. Para se realizar o cálculo da média de precipitação na bacia, segundo Carvalho e Silva (2006), existem 3 métodos: o método aritmético, o método das isoietas e o método de Thiessen. O método aritmético é o mais simples e resume-se em calcular a média aritmética dos valores obtidos na região de estudo. Esse método tem melhor funcionalidade quando as estações estão distribuídas uniformemente na bacia e os dados não variam significativamente da média de precipitação da bacia.

Ainda de acordo com Carvalho e Silva (2006), no método das isoietas são traçadas curvas que unem os pontos de mesmo valor de precipitação na bacia como mostrado na figura 6, e então se calcula as áreas parciais entre duas isoietas e as médias de precipitação contidas nessas áreas. A média por esse método é dada pela equação 9.

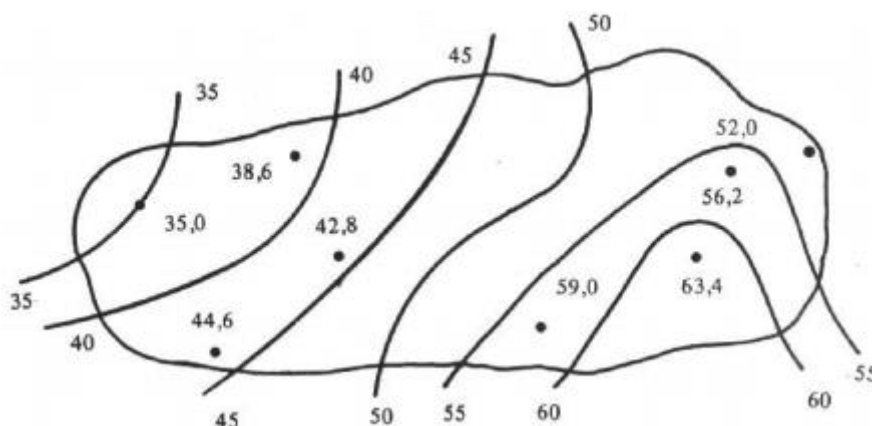


Figura 6 - Traçado hipotético das isoietas em uma bacia hidrográfica
Fonte: Carvalho e Silva (2006)

$$\text{Precipitação média} = (A_1 P_1 + A_2 P_2 + A_3 P_3 + \dots + A_n P_n) / A \quad (9)$$

Considerando-se que os as estações na bacia em estudo somam-se em apenas 3 e não são uniformemente distribuídas optou-se pelo método de Thiessen, o qual determina as áreas de abrangência de um determinado posto pluviométrico. Considera-se que no interior dessas áreas a altura pluviométrica é a mesma do respectivo posto. A determinação dos polígonos é feita, segundo Teixeira (2010, p. 47), primeiramente ligando-se duas estações por um segmento de reta. Em seguida traça-se a mediatriz deste segmento de reta. Esta mediatriz divide para um lado e para outro, as regiões de abrangência. Este procedimento é realizado, inicialmente, para um posto

qualquer, ligando-o aos adjacentes. Define-se, desta forma, o polígono daquele posto. Esse procedimento é repetido para todas as outras estações e os polígonos formados fora da bacia são desconsiderados. A precipitação média da bacia é obtida através da equação (9). Onde A_i é a área do polígono dentro da bacia, P_i é a precipitação do respectivo posto de medição e A é a área total da bacia.

$$\text{Precipitação média} = (\sum_{i=1}^n A_i P_i) / A \quad (9)$$

O resultado dos polígonos de Thiessen para a bacia em estudo, que foram processados com a ferramenta Quantum GIS, com as estações selecionadas está exposta na Figura 7.

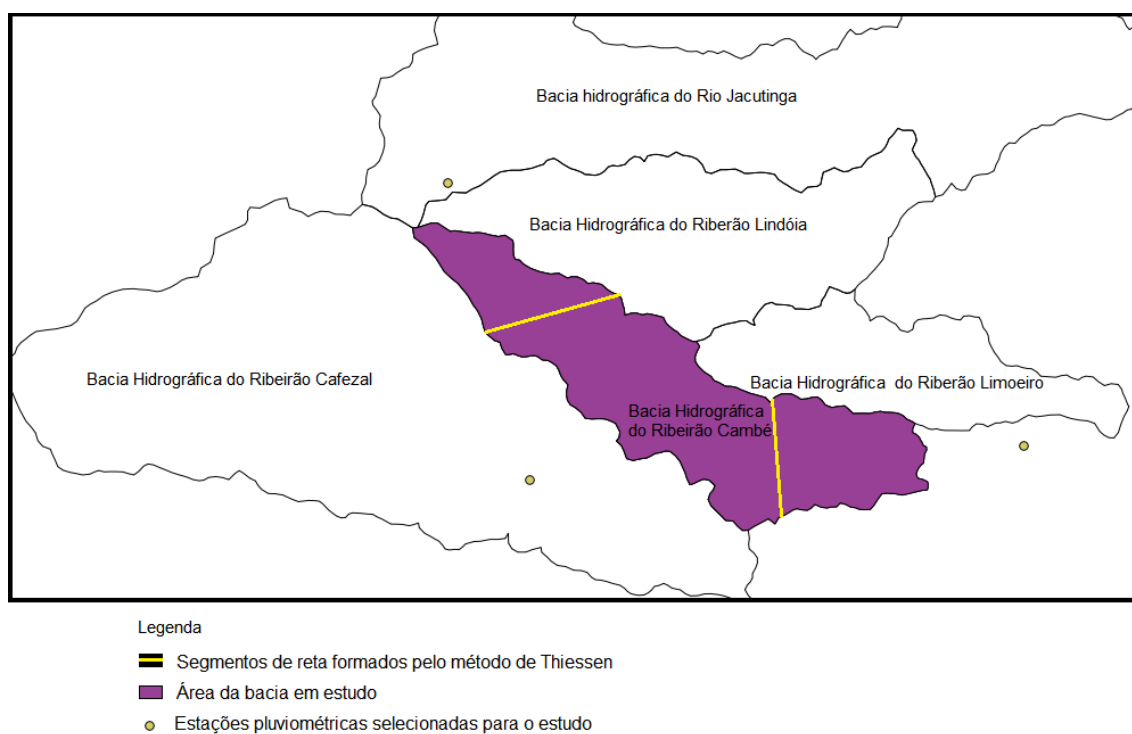


Figura 7 - Polígonos de Thiessen para a bacia Ribeirão do Cambé com as estações Espírito Santo, Londrina - SE Copel e Três Bocas.
Fonte: Autoria própria.

Com esse resultado foi possível calcular a média de chuvas no período escolhido a ser utilizado no modelo CAESAR para caracterizar a precipitação na bacia.

Essas estações iniciam suas séries de dados em períodos distintos (Quadro 2).

Quadro 2 - Períodos de dados contínuos entre as estações selecionadas

| Estação | Início | Final |
|---------------------|-----------------|-------------------|
| Espírito Santo | Agosto de 1975 | Fevereiro de 1999 |
| Londrina - SE Copel | Outubro de 1988 | Março de 2010 |
| Três Bocas | Outubro de 1977 | Fevereiro de 1999 |

Dessa forma, para se obter um período contínuo de dados com alto índice de precipitação para simular os cenários, buscou-se a interseção entre esses períodos de chuva, resultando no período compreendido entre primeiro de outubro de 1988 e 28 de fevereiro de 1999. Isso significa que, durante esse período, as três estações possuem dados diários ininterruptos de pluviometria.

E análise de todo o período, selecionaram-se dois intervalos de precipitação relativamente alta. O primeiro período está compreendido entre os dias 14 a 23 de fevereiro de 1993 pelo alto valor de precipitação no quinto dia. O segundo período (30 dias) está contido entre os dias 11 de março a 9 de abril de 1998 pela grande distribuição de chuvas.

O funcionamento do CAESAR é baseado em dados horários de precipitação. Isso faz com que seja necessário o tratamento desses dados obtidos da ANA (diários) antes da aplicação no modelo. Como a intensidade das chuvas nos dias de precipitação é desconhecida, adotou-se oito horas para a distribuição das chuvas diárias, resultando em outras 16 horas de nenhuma precipitação.

Com os dados pré-processados, foi necessária a determinação de outros parâmetros do modelo, os quais representam desde a resolução da imagem altimétrica, período, intervalo e intensidade de chuvas, até valores que controlariam as equações intrínsecas ao sistema.

Um desses valores é denominado “m’ value”, e é a principal variável com função de controlar o (CAESAR, 2008, p. 56). Esse dado foi utilizado para controlar os resultados obtidos no modelo buscando adequá-lo à realidade da bacia em estudo.

A fim de se comparar os valores dos dados de saída de vazão e validar o modelo, calcularam-se as vazões máximas da bacia nos diferentes cenários a mérito de comparação pela equação (10).

$$Q = C * i * A \quad (10)$$

Onde:

Q = Vazão (m³/s);

C = Coeficiente de escoamento superficial, variando de 0 a 1, onde 0 significa nenhum escoamento superficial e infiltração de todo o volume de água e 1 significa que há apenas escoamento superficial e nenhuma infiltração de água;

i = Intensidade de chuva (m/s);

A = Área da bacia (m²).

De posse desses dados, foram definidos os seguintes cenários de simulação:

- Período de chuvas de 10 dias, com um pico de precipitação extrema (104mm de chuva em um dia) distribuído em 8 horas, considerando a suspensão de sedimentos no fluxo de vazão, correspondente aos dados de 14 a 23 de fevereiro de 1993.

- Período de chuvas de 10 dias, com um pico de precipitação extrema (104mm de chuva em um dia) distribuído em 8 horas, desconsiderando a suspensão de sedimentos no fluxo de vazão, correspondente aos dados de 14 a 23 de fevereiro de 1993.

- Período de chuva de 30 dias, com precipitação máxima de 42,18 mm de chuva. As chuvas foram distribuídas em intervalos de 8 horas e desconsiderou-se a suspensão de sedimentos no fluxo de vazão, correspondente aos dados de 11 de março a 9 de abril de 1998.

Para todos os cenários, foram analisados os dados de vazão em função do tempo comparando o comportamento das curvas resultantes dessa função entre os diferentes cenários com a precipitação distribuída e precipitação acumulada. Foram avaliados também os picos de vazão e os comportamentos das curvas em relação aos maiores eventos de precipitação.

Para o cenário de 30 dias foram avaliados também, além dos dados citados anteriormente, os dados da distribuição espacial de acúmulo de água na bacia, dinâmicas do solo (erosão e deposição), velocidade do fluxo de água e variação da altimetria causada pela precipitação.

5. RESULTADOS

Nesse trabalho foram discutidos os resultados obtidos de vazão em função do tempo, comparando-os com os níveis de precipitação. Analisaram-se os picos de vazão máxima e sua adequação ao tamanho da bacia.

5.1. Análise de vazão

Após as simulações do modelo, obtiveram-se os seguintes resultados para os intervalos de 10 dias de precipitação com sedimentos em suspensão (10dSusp) (Gráfico 1), 10 dias de precipitação sem considerar os sedimentos em suspensão (10dNsusp) (Gráfico 2) e 30 dias de precipitação (30d) (Gráfico 3).

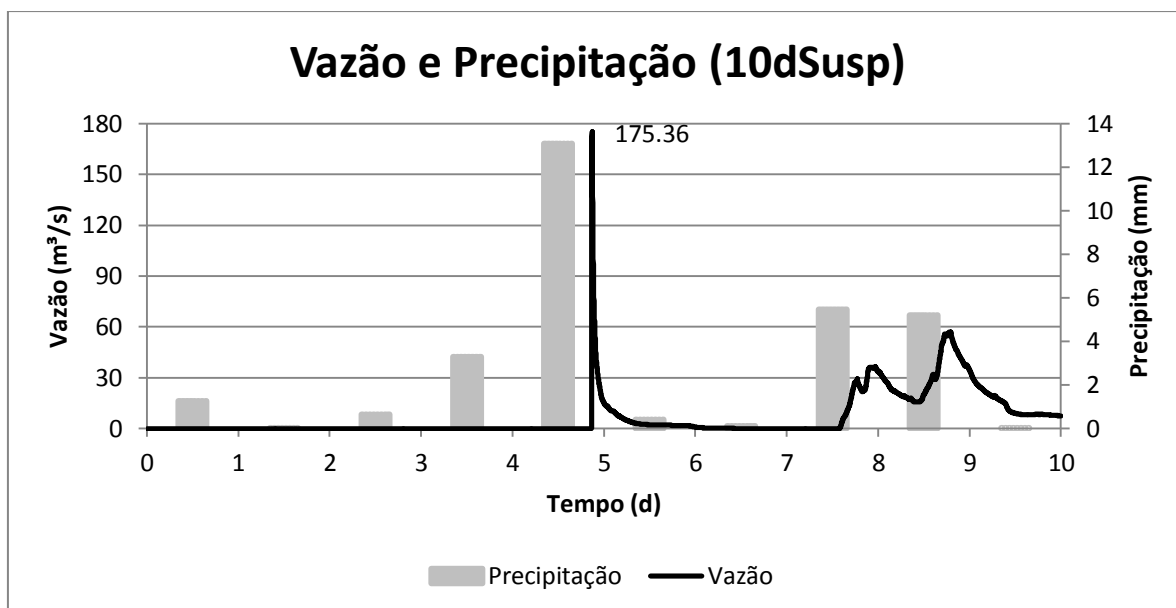


Gráfico 1 - Vazão e precipitação em função do tempo - sedimentos em suspensão

Fonte: Autoria própria

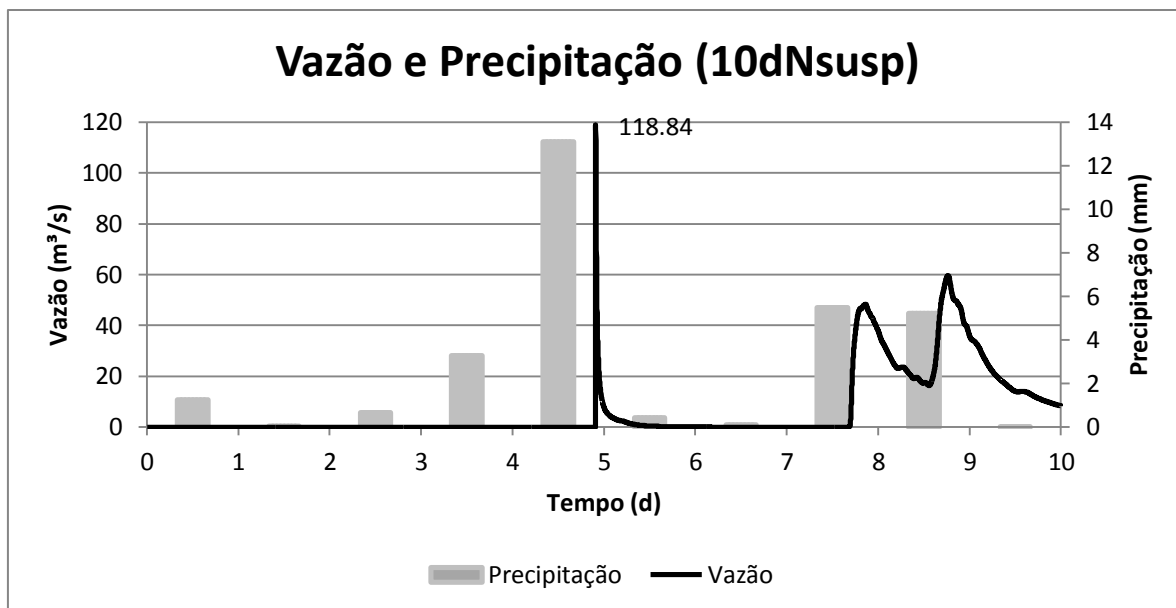


Gráfico 2 - Vazão e precipitação em função do tempo - desconsiderados os sedimentos em suspensão

Fonte: Autoria própria

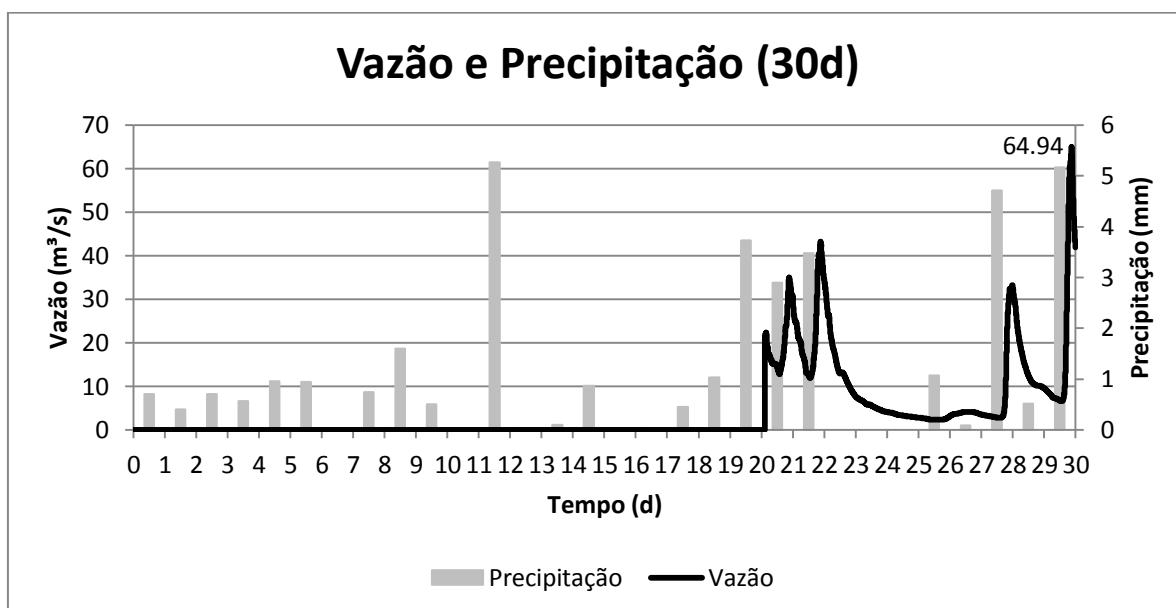


Gráfico 3 - Vazão e precipitação em função do tempo - 30 dias

Fonte: Autoria própria

A partir dos gráficos 1, 2 e 3 nota-se que, em todos os casos, os picos de vazão são gerados imediatamente após um evento chuvoso grande. Para os cenários de 10 dias (figuras 1 e 2) é mais facilmente notável. Nos cenários de 10 dias de chuva, pode-se notar que a vazão se iniciou logo após o maior evento chuvoso. Isso pode ser atribuído ao valor da intensidade de chuva mostrado no Quadro 4.

Quadro 4 - Valores de precipitação para o intervalo de 10 dias
Fonte: Autoria própria

| Dia | Precipitação (mm) |
|-----|-------------------|
| 1 | 10.07344 |
| 2 | 0.372195 |
| 3 | 5.2384 |
| 4 | 26.26663 |
| 5 | 104.6776 |
| 6 | 3.366622 |
| 7 | 0.921327 |
| 8 | 43.84471 |
| 9 | 41.68957 |
| 10 | 0.088967 |

Nota-se que no quinto dia de chuva, o evento de precipitação alcança 104,68 mm. Esse valor é imediatamente anterior aos picos de vazão mais altos de todo o intervalo. Para o 10dSusp esse valor é de 175,36 m³/s e para o 10dNsusp o valor 118,84 m³/s.

Sabendo-se que o maior evento de precipitação foi de 104,86 mm/dia e que a chuva foi dividida em 8 horas de precipitação, esse valor equivale à $3,64 \cdot 10^{-6}$ m/s. Tem-se que a área da bacia é de 73644600 m². Para efeito de análise, utilizou-se um coeficiente de escoamento superficial como 1, que significaria infiltração nula. Interpreta-se, dessa forma, que toda a água foi escoada da bacia.

Assim, tem-se que a vazão máxima para esta bacia, com este valor de precipitação seria:

$$Q_{m\acute{a}x} = 1 * 3,64 * 10^{-6} m/s * 73644600 m^2$$

$$Q_{m\acute{a}x} = 268,14 m^3/s$$

Dessa forma pode-se perceber que o modelo apresentou resultados coerentes em relação aos valores máximos, apesar de os mesmos terem sido extrapolados quando se elevou o coeficiente de escoamento superficial a 1.

Da mesma forma calculou-se os valores máximos para o 30d. Para esse intervalo, tem-se os seguintes intervalos de chuva (Quadro 1):

Quadro 5 - Valores de precipitação para o intervalo de 30 dias
Fonte: Autoria própria

| Dia | Precipitação (mm) | Dia | Precipitação (mm) |
|-----|-------------------|-----|-------------------|
| 1 | 5.670573658 | 16 | 0 |
| 2 | 3.26291431 | 17 | 0 |
| 3 | 5.642576369 | 18 | 3.688545704 |
| 4 | 4.532253519 | 19 | 8.291067519 |
| 5 | 7.675689192 | 20 | 29.88868144 |
| 6 | 7.613203327 | 21 | 23.24089969 |
| 7 | 0 | 22 | 27.84905656 |
| 8 | 6.009730474 | 23 | 0 |
| 9 | 12.85889336 | 24 | 0 |
| 10 | 4.068322258 | 25 | 0 |
| 11 | 0 | 26 | 8.577565331 |
| 12 | 42.17529134 | 27 | 0.728063128 |
| 13 | 0 | 28 | 37.66207457 |
| 14 | 0.842356092 | 29 | 4.159068168 |
| 15 | 6.997030915 | 30 | 41.34574094 |

Nota-se que o maior valor da tabela é 41,34 mm de precipitação. Da mesma forma que nos intervalos 10dSusp e 10dNsusp, as chuvas do 30d também foram distribuídas em 8 horas por dia. Assim, esse valor máximo de precipitação equivale à uma intensidade de $1,44 \cdot 10^{-6}$ m/s. De forma análoga ao intervalo anterior, calcula-se a vazão máxima a partir de (10).

$$Q_{m\acute{a}x} = 1 * 1,44 * 10^{-6} * 73644600m^2$$

$$Q_{m\acute{a}x} = 105,73 m^3/s$$

Assim, nota-se que, novamente, os valores dos resultados de vazão máxima produzidos pelo modelo não ultrapassam os limites da bacia. Para conferência dos outros picos desse mesmo intervalo, o cálculo foi também realizado em todos os picos anteriores ao máximo. O resultado foi acima do esperado em 3 dos 5 picos desse período.

Para os gráficos dos 3 cenários, foi possível notar comportamentos mais expressivos nos trechos temporais inicial e final. Tratando-se do trecho inicial do cenário 10dSusp e do cenário 10dNsusp, compreendido entre o quarto e o quinto dia, mais especificamente no intervalo entre 7000 e 7500 minutos contados desde o início da simulação, houve um comportamento semelhante em relação ao comportamento da curva no início da resposta de vazão. Os gráficos apresentaram o maior pico durante um intervalo de cerca de 2 horas. Para melhor visualizar a variação da vazão em escala de tempo detalhada, elaboraram-se os gráficos para 10dSusp (Gráfico 4) e 10dNsusp (Gráfico 5):

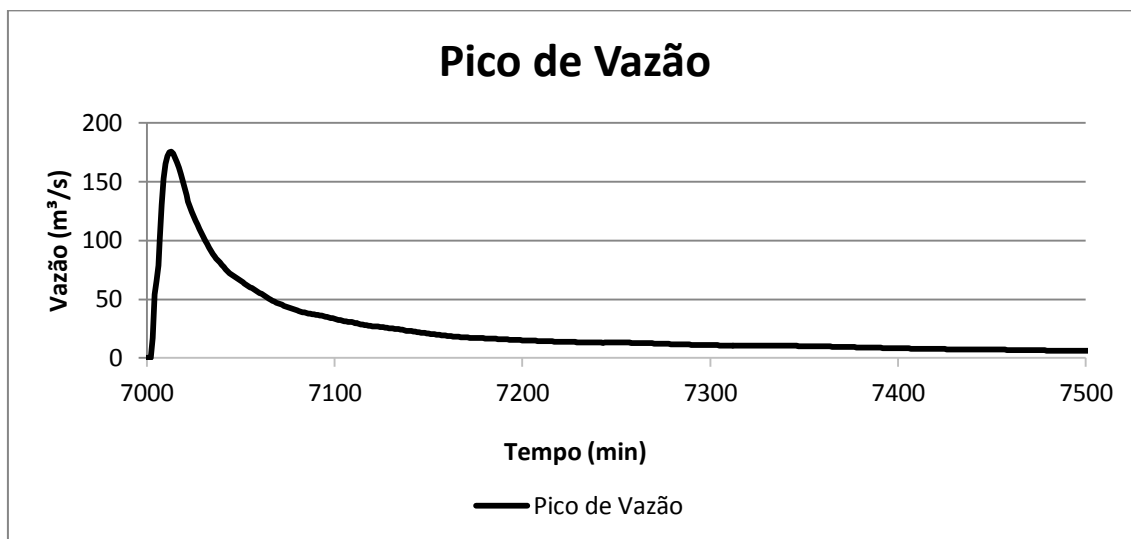


Gráfico 4 - Pico de vazão no intervalo de tempo de 7000 a 7500 minutos - 10dSusp

Fonte: Autoria própria

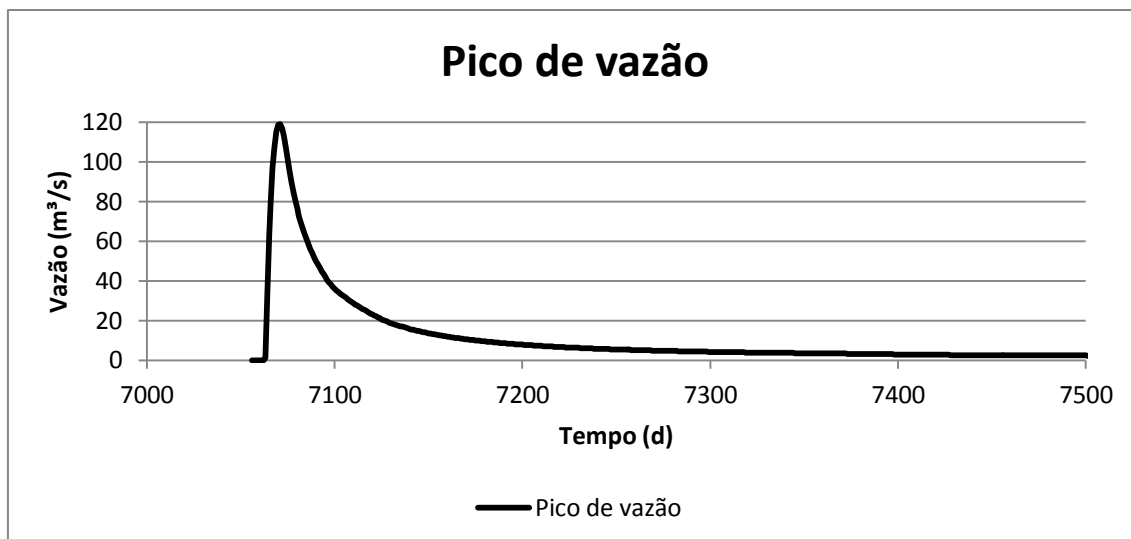


Gráfico 5 - Pico de vazão no intervalo de tempo de 7000 a 7500 minutos - 10Nsusp

Fonte: Autoria própria

Primeiramente, percebe-se que nos gráficos 4 e 5 os picos estão localizados em momentos muito próximos da escala temporal e também que em ambos os casos os picos caem em um intervalo de tempo bastante semelhante, apresentando variações de acordo com a presença ou não de sedimentos. Um possível justificativa para esse resultado pode estar relacionado à contribuição do volume de sedimentos na vazão da água da bacia, o qual contabiliza essa diferença numérica entre os valores de vazão dos dois cenários.

Pelos gráficos 1 e 2 e os segmentos extraídos para os dois cenários (gráficos 4 e 5), nota-se que essa queda de valores de vazão logo após o pico máximo de valor máximo de vazão pode ser justificada pelos eventos de precipitação com valores muito baixos que seguem os picos.

Analisando-se o trecho inicial do cenário 30d, referente ao intervalo compreendido entre os dias 20 e 23 da simulação, ou mais especificamente entre os minutos 28750 e 33000, nota-se uma curva um pouco menos abrupta quando se inicia a resposta de vazão do modelo (Gráfico 6).

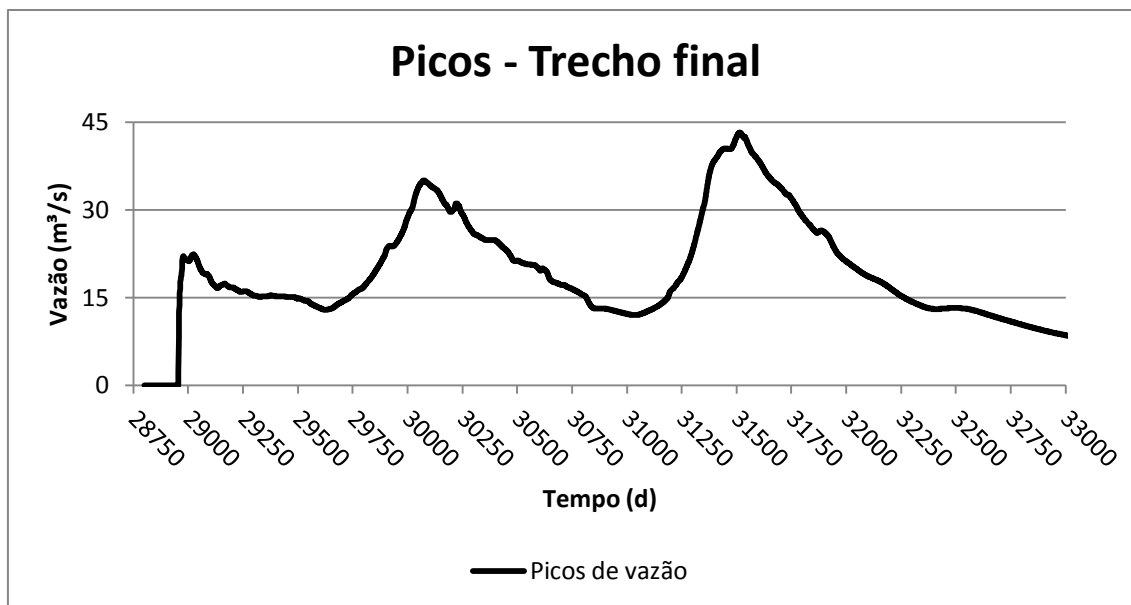


Gráfico 6 - Picos de vazão do trecho inicial - 30d

Fonte: Autoria própria

Esse comportamento pode ser justificado pela distribuição de precipitação mais amena durante o intervalo de tempo. Diferente do pico extremo de precipitação dos modelos de 10 dias (175,36 m³/s para 10dSusp e 118,84 m³/s para 10dNsusp), esse cenário apresenta o primeiro pico de precipitação menor e uma frequência de precipitação mais constante. Dessa forma pode-se inferir que quando o modelo recebe um evento de chuva mais intenso de forma concentrada, a resposta é um pico de vazão súbito, e quando a precipitação é mais distribuída, os picos são mais suaves. Nota-se também que a vazão segue os eventos chuvosos seguintes, aumentando e diminuindo seus valores de acordo com o intervalo de precipitação.

Para analisar melhor os picos iniciais, relacionaram-se os dados de vazão com uma curva da somatória da precipitação que indica a quantidade de água acumulada até determinado instante de tempo. Essa relação resultou nos gráficos dos cenários de 10dSusp (Gráfico 7) e de 10dNsusp (Gráfico 8):

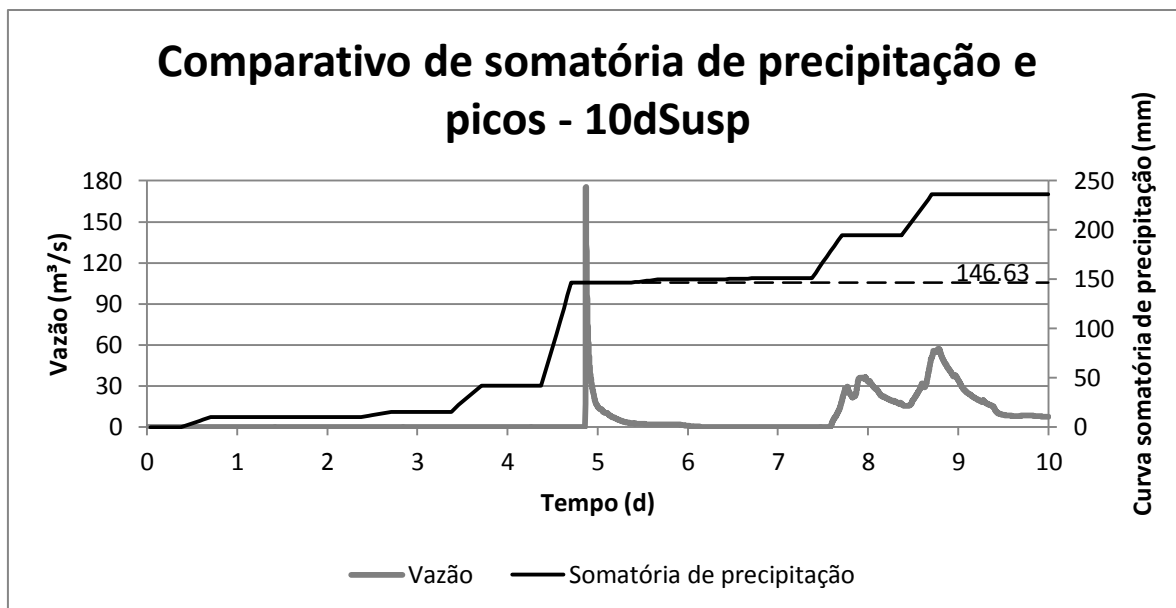


Gráfico 7 - Comparativo de somatória de precipitação e picos - 10dSusp

Fonte: Autoria própria

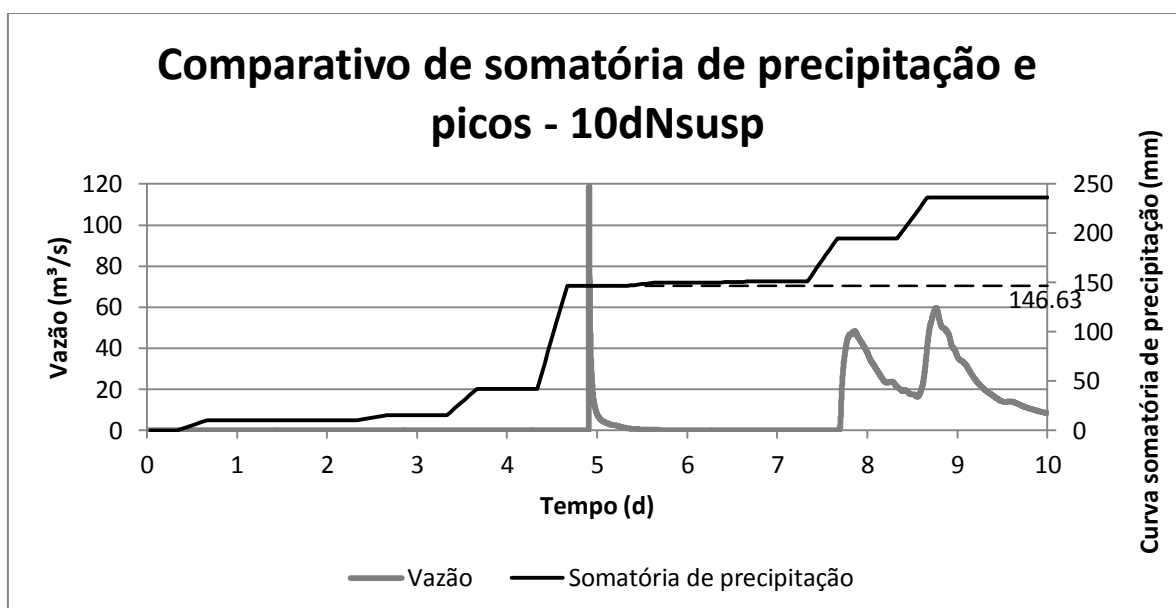


Gráfico 8 - Comparativo de somatória de precipitação e picos - 10dNsusp

Fonte: Autoria própria

Deve-se considerar que a curva somatória de precipitação apresenta as inclinações nos períodos em que há precipitação na bacia, gerando “degraus” de inclinação de 8 horas de duração e se estabilizando pelas próximas 16 horas pela inexistência de precipitação.

Avaliando os gráficos 7 e 8, pode-se notar que o modelo acumula uma grande quantidade de água na bacia antes de gerar a resposta da vazão. Isso pode ser uma das justificativas para o alto pico de vazão dos intervalos de 10 dias do modelo evidenciados nos gráficos 4 e 5, pois mostra que além do pico extremo de precipitação imediatamente anterior a esses picos de vazão, existe já um acúmulo de água na bacia.

Da mesma forma, elaborou-se um gráfico semelhante aos gráficos 7 e 8 para o cenário 30d (Gráfico 9), o qual apresenta uma curva de acúmulo de precipitação diferente da dos intervalos 10dSusp e 10dNsusp devido aos diferentes intervalos de chuvas.

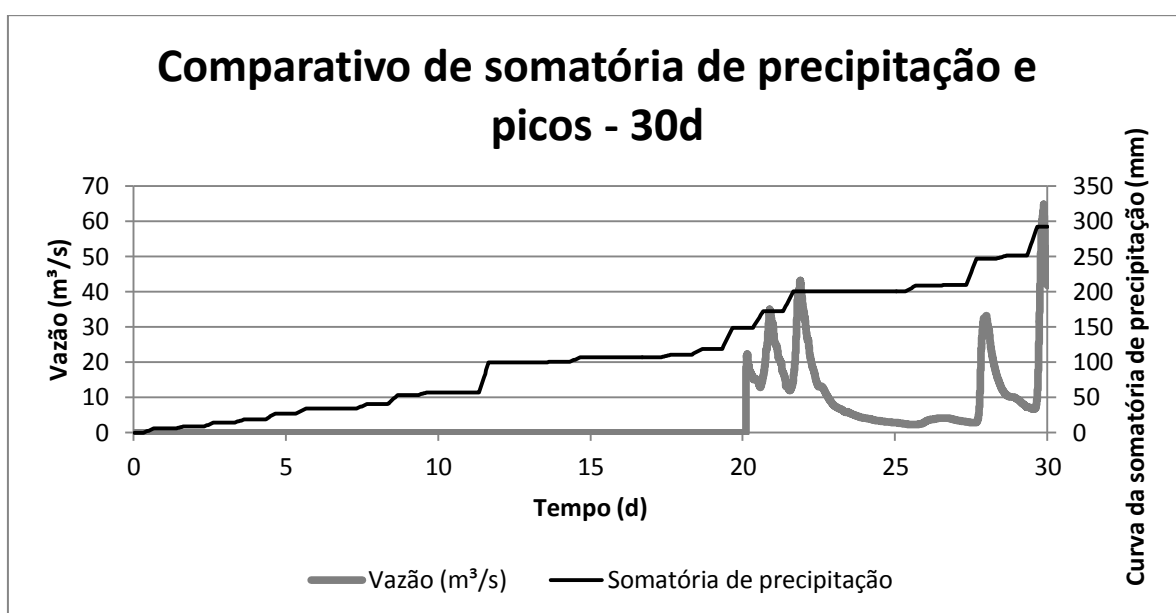


Gráfico 9 - Comparativo de somatória de precipitação e picos - 30d

Fonte: Autoria própria

Ao analisar o gráfico 9, pode-se notar também um grande acúmulo de precipitação, porém crescendo mais lentamente do que os cenários anteriores. Isso se justifica pela distribuição de chuvas com menor intensidade em um período maior. Percebe-se que, diferente dos outros cenários, o 30d não tem um pico súbito de precipitação podendo ser essa uma justificativa para o seu início menos intenso, evidenciado no gráfico 6.

O mais importante na análise dos gráficos 7, 8 e 9, é notar que a resposta da vazão se inicia após a curva somatória de precipitação se aproximar de 150 mm/h. Apesar de os intervalos temporais serem diferentes, esse comportamento foi semelhante nos 3 cenários. Essa foi uma constatação

observada nos diferentes cenários que pode ter relação com a morfometria geral da bacia e sua capacidade máxima de armazenamento de água.

Quando se analisa o trecho final dos cenários, compreendido entre os dias 7 e 10 para os cenários 10dSusp e 10dNsusp, e entre os dias 27 e 30 do cenário 30d, pode-se notar um comportamento semelhante ao demonstrado durante todo o intervalo de precipitação, onde os picos de vazão seguem os valores de precipitação em instantes posteriores.

O gráfico 10 mostra um comparativo entre os trechos finais dos cenários 10dSusp e 10dNsusp. Nota-se que os picos de ambos os cenários estão novamente sincronizados na escala temporal. Pode-se notar também que, pelos gráficos 1 e 2, os picos acompanham os últimos grandes eventos de precipitação do intervalo. Nota-se também que as curvas não se apresentam mais com variações súbitas, mostrando um comportamento mais suave no intervalo de tempo. Essa análise corrobora a avaliação do trecho inicial do cenário 30d (Gráfico 6), quando se inferiu que após um período de chuvas mais distribuído, os picos de precipitação se mostram mais suaves.

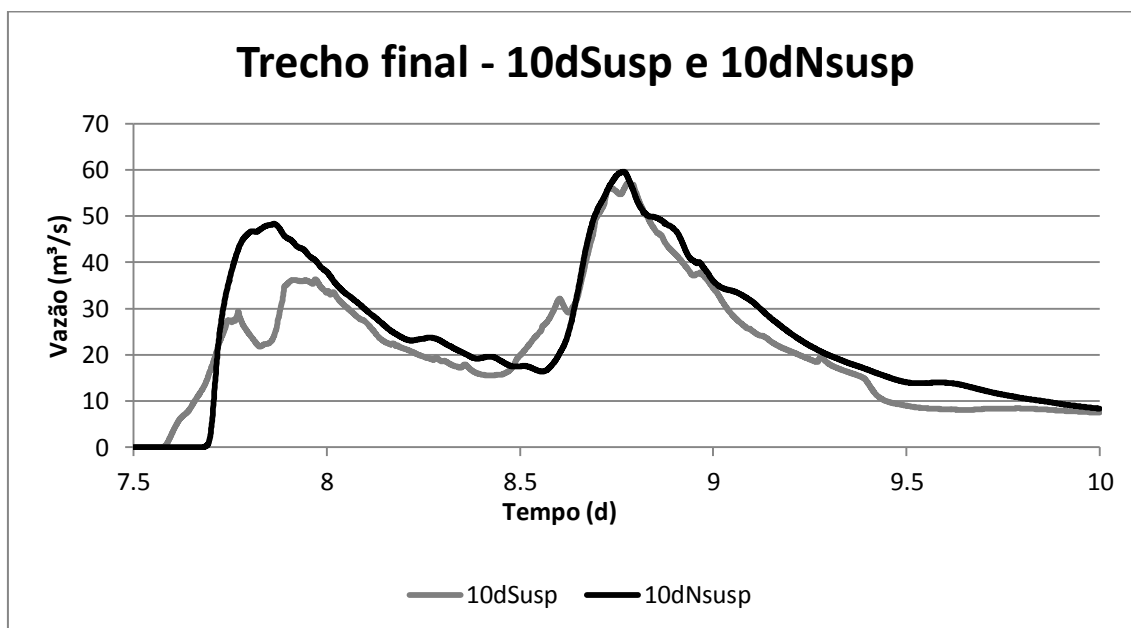


Gráfico 10 - Picos de vazão do Trecho final - 10dSusp e 10dNsusp

Fonte: Autoria própria

De forma geral, todos os gráficos referentes aos cenários de 10 dias (Gráficos 1, 2, 4, 5, 7, 8 e 10) apresentaram um perfil bastante semelhante de vazão, mostrando que, apesar de valores diferentes, o modelo interpretou a

precipitação de forma semelhante e coerente em relação ao comportamento da curva de vazão, visto que a única diferença entre os dois cenários é a presença ou não de material em suspensão no fluxo de vazão.

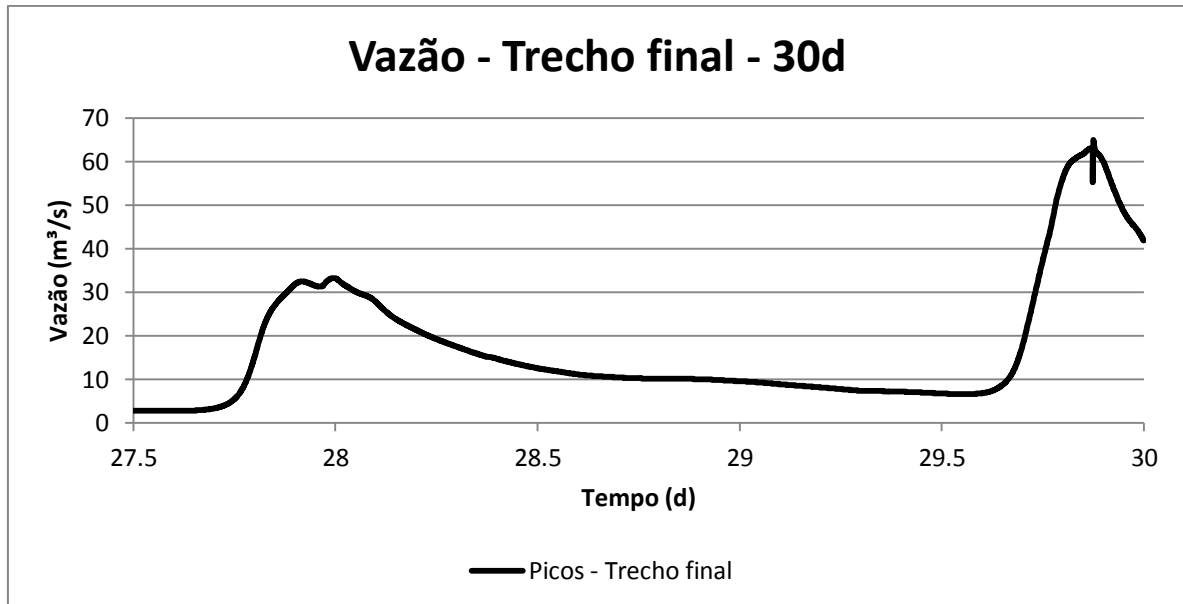


Gráfico 11 - Picos de vazão no trecho final - 30d

Fonte: Autoria própria

O trecho final do intervalo de 30 dias (Gráfico 11) não se mostra diferente do restante do intervalo, apresentando uma curva bem distribuída no tempo. Os picos de vazão desse intervalo também seguem os valores de precipitação, sendo o último pico, de 69,94 m³/s, a resposta da precipitação máxima desse intervalo. Em análise comparativa com o trecho inicial dos intervalos de 10 dias (Gráficos 4 e 5), em que se localiza a precipitação máxima desse intervalo, pode-se notar que, ainda que o pico seja alto, sua distribuição está visualmente próxima de uma curva normal, mostrando um crescimento e um decréscimo mais gradual no decorrer tempo.

5.2. Análise de dados espaciais

O modelo CAESAR mostra os efeitos das chuvas também em 4 outras formas de resposta. Essa resposta refere-se a sequência de imagens que mostra a distribuição espacial de algumas variáveis, como acúmulo de água, que permite avaliar a dinâmica do fluxo, deposição e erosão de

sedimentos e velocidade do fluxo em cada célula da bacia. A primeira análise a ser realizada é a do comportamento da água em relação à bacia. O modelo grava a simulação, armazenando, de acordo com o intervalo estabelecido, as imagens dos efeitos dos eventos na área em estudo. Essa análise foi realizada apenas para o cenário 30d, pois refletia maiores interferências na bacia e, portanto, seus resultados forneceram melhor visualização.

Devido ao período inicial dos testes ter resultados com valores nulos para vazão, iniciou-se a análise a partir do décimo dia, dividindo o intervalo de 20 dias em 6 imagens. Dessa forma a distribuição seguiu a ordem do Quadro 6.

Quadro 6 - Distribuição de imagens por intervalo de dias
Fonte: Autoria própria

| Imagem | Dia |
|--------|-----------------|
| a | 10 ^o |
| b | 14 ^o |
| c | 18 ^o |
| d | 22 ^o |
| e | 26 ^o |
| f | 30 ^o |

A primeira imagem da Figura 8 mostra o comportamento da água em função do tempo. Nota-se que, como esperado, na figura 8(a), a bacia está visualmente inalterada, porém pelos dados já analisados, sabe-se que a área já havia recebido um período de precipitação constante. Já a figura 8(b) mostra um comportamento que se justifica pelo fato de no 12^o dia ter havido um pico de precipitação, gerando um acúmulo de água a jusante da bacia. A figura 8(c) se mostra muito semelhante à figura 8(b), variando apenas a localização das concentrações, ainda antes do início de resposta de vazão. Já na figura 8(d), percebe-se pela primeira vez o escoamento de água para fora da bacia. No intervalo entre a figura 8(c) e 8(d) se tem o início da resposta da vazão, ilustrada pela imagem.

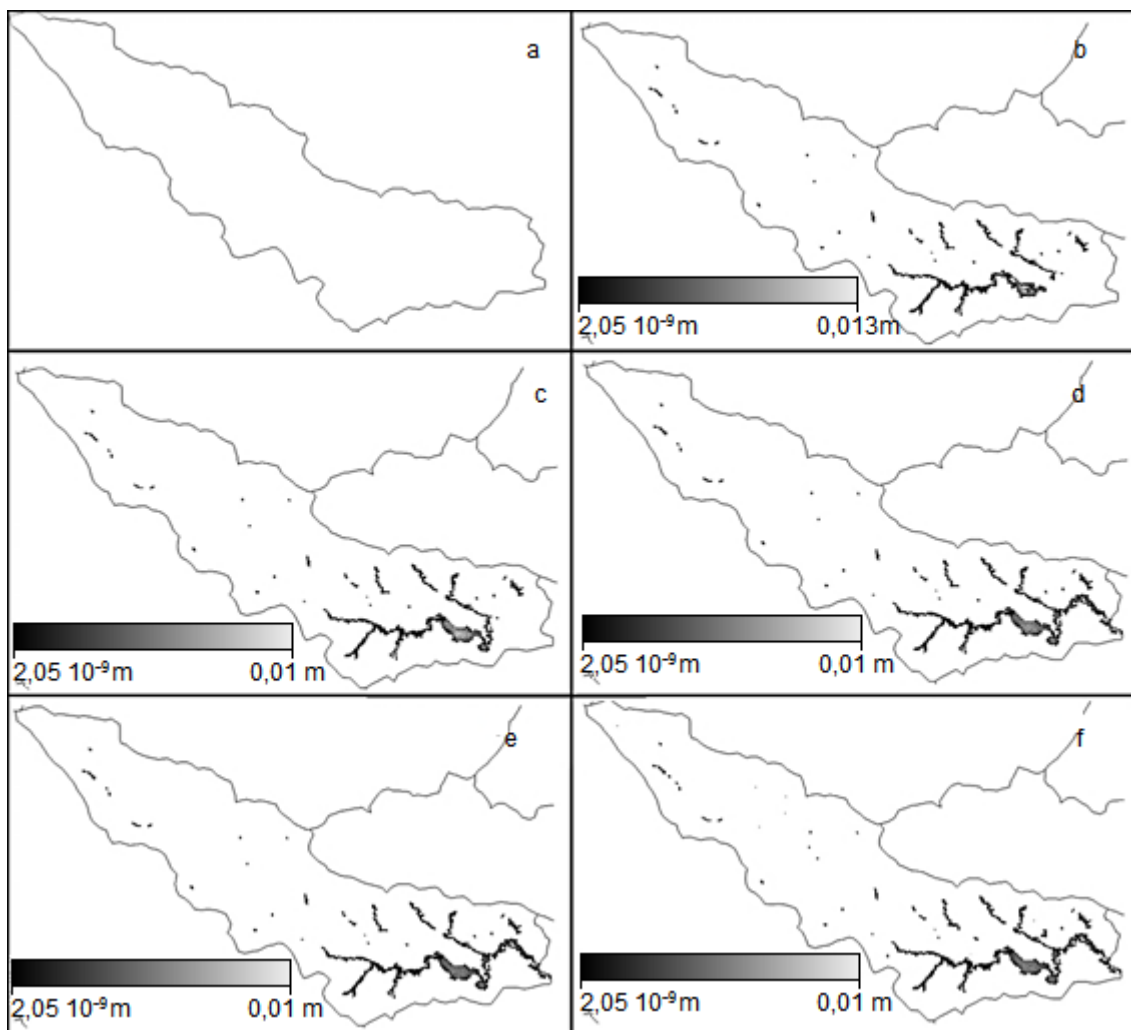


Figura 8—Imagem de acúmulo de água na Bacia Ribeirão do Cambé - 30d
Fonte: Autoria própria

Ainda analisando a figura 8, pode-se verificar que os quadros (d) e (f) tem maior quantidade de água concentrada na bacia, enquanto que a figura 8(e) mostra uma concentração visivelmente menor. Isso pode ser atribuído ao intervalo de chuvas menores próximos ao 26º dia do intervalo, e aos picos de vazão resultantes dos máximos de precipitação próximos ao 22º e ao 30º dia.

Deve-se ressaltar que a resolução do modelo altimétrico é um quadrado de 30 m de lado, resultando em pixels que representam 900 m² de área. Dessa forma, quando se visualiza a concentração de água a jusante da bacia, deve-se notar que a unidade de representação desses acúmulos abrange esta resolução. Considerando-se que o modelo interpreta a bacia como terreno permeável em toda a sua extensão, deve-se entender que essa área apresenta, naturalmente, uma saturação e acúmulo de águas em regiões de

fundo de vale, causando enchentes e alagamentos. Ao se extrapolar esses resultados, em busca de compará-los com a real situação de urbanização da bacia, pode-se inferir que a grande área impermeabilizada por pavimentações e construções aumenta a velocidade com que a água chega ao fundo de vale, causando impactos que podem ser ainda maiores do que os mostrados pela simulação.

Dessa forma, pode-se utilizar esse resultado como fundamentação para políticas de preservação de áreas permeáveis ou estratégias de drenagem capazes de preservar e buscar aumentar a área de infiltração da bacia e reduzir o risco de grandes enchentes e inundações.

Analisando outro dado desse estudo, pode-se relacionar esses acúmulos de água com a erosão e sedimentação. O modelo CAESAR fornece os dados de variação no arquivo de elevação relacionados aos eventos carreamento de solo e sua deposição (Figura 9).

A imagem foi aproximada para a base da bacia devido a toda dinâmica de solos mostrada pelos dados estar concentrada nessa área. Para facilitar a visualização dos dados, escolheu-se o esquema de cores do Quadro 7.

Quadro 7 - Esquema de cores para avaliação de dinâmicas de solo
Fonte: Autoria própria

| Alterações | Cor |
|-------------------|----------|
| Erosão | Azul |
| Nenhuma alteração | Verde |
| Deposição | Vermelho |

Assim, de acordo com a imagem, pode-se notar que de fato, no primeiro instante, ainda não há escoamento superficial, e portanto, não há processos de movimentação de solos. Já a partir do segundo quadro, notam-se pequenas manchas de erosão e sedimentação. Percebe-se que não há grandes variações no comportamento da dinâmica de solos nos intervalos, justificada pelo tamanho reduzido do intervalo de tempo escolhido, que impede que hajam maiores mudanças. Nota-se que há um trecho maior de erosão, enquanto nota-se uma deposição mais concentrada para todos os quadros.

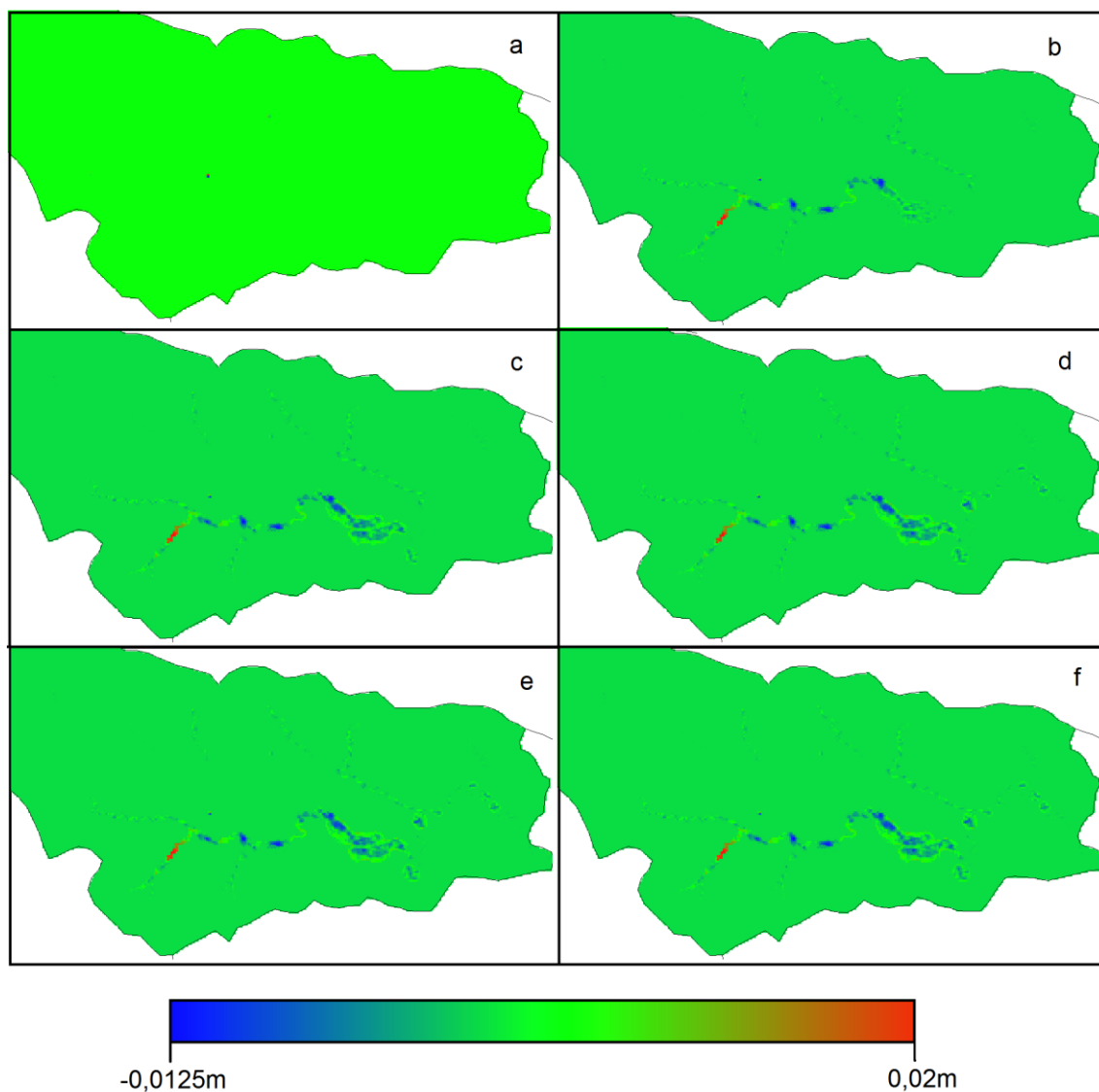


Figura 9 - Dinâmicas de solo da Bacia Ribeirão do Cambé - 30d; 5(a) – situação da bacia ao 10º dia; 5(b) - situação da bacia ao 14º dia; 5(c) - situação da bacia ao 18º dia; 5(d) - situação da bacia ao 22º dia; 5(e) - situação da bacia ao 26º dia; 5(f) - situação da bacia ao 30º dia.

Fonte: Aatoria própria

Os dados de erosão e deposição do solo mostram que houve uma deposição máxima de 17.45 m de solo por pixel, resultando em 0,019 m de deposição média por m^2 , e uma erosão máxima de 11.20 m de solo por pixel, resultando em 0,012 m de erosão média por m^2 de solo. A produção desses resultados é interessante para a análise de áreas onde pode haver carreamento de solo, bem como a deposição ou possível assoreamento de corpos d'água. É importante notar que, em uma comparação entre as figuras 8 e 9, os trechos de erosão e deposição acompanham os trechos de acúmulo de água. Esse comportamento é relacionado ao fato de o maior acúmulo de água

corresponder ao ponto de encontro das vazões de água, gerando um maior arraste de solo e por fim sua deposição.

Outra variável é a de velocidade de fluxo (Figura 10). Essa variável mostra onde se concentraram os maiores valores de velocidade e pode ser relacionada aos eventos de dinâmica do solo. Nota-se, novamente, que a maior quantidade de dados expressivos se encontra na base da bacia. Quando contraposta à imagem anterior, pode-se notar que os dados de velocidade acompanham a linha de erosão. O valor de velocidade máxima encontrado nesse intervalo foi de 5,22 m/s.

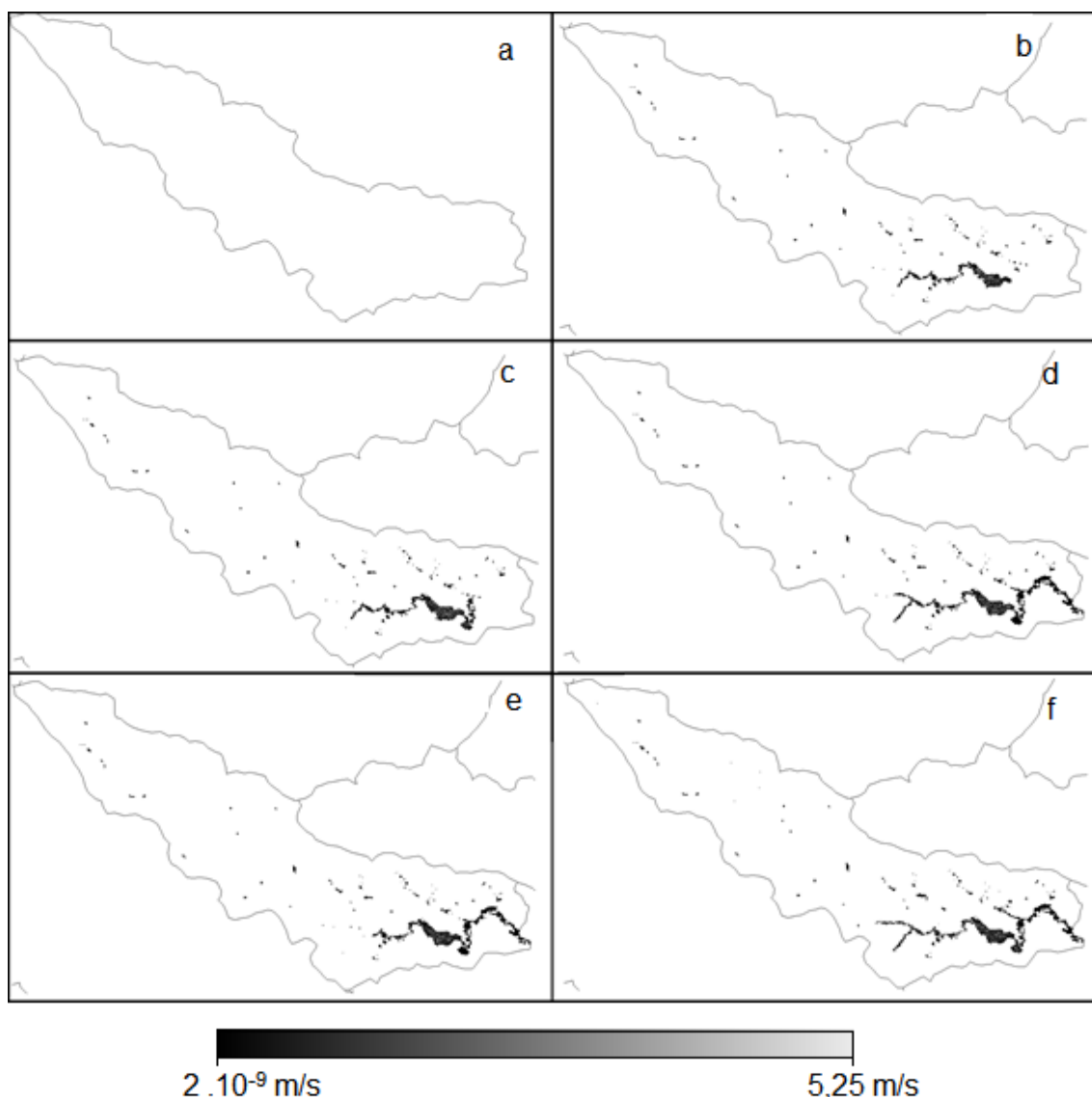


Figura 10 - Dados de velocidade de fluxo na Bacia Ribeirão do Cambé - 30d; 5(a) – situação da bacia ao 10^o dia; 5(b) - situação da bacia ao 14^o dia; 5(c) - situação da bacia ao 18^o dia; 5(d) - situação da bacia ao 22^o dia; 5(e) - situação da bacia ao 26^o dia; 5(f) - situação da bacia ao 30^o dia.

Fonte: Autoria própria

Os resultados mostram potencialidade e limitações do modelo e por isso devem ser tratados com devida cautela. Deve-se notar que o intervalo de tempo dessa análise é bastante curto para a análise de dinâmica de solos.

O modelo CAESAR, como já citado, é um modelo simples e, portanto, traz inerente aos seus benefícios, algumas limitações. Dentre elas a falta de representação espacial da cobertura do solo traz problemas pois não retrata sua heterogeneidade, bem como suas especificidades no que se refere à impermeabilização, visto que se trata de área urbana. Colocado esse ponto de vista percebe-se que a simulação é comprometida para uma bacia com significativa urbanização como a estudada, em que grande parte está impermeabilizada pelas edificações e pavimentação, interferindo em parâmetros como o escoamento superficial e infiltração da água no solo.

Outra dificuldade encontrada no modelo foi a calibração da curva de vazão. Ainda que fossem aplicados ao modelo diferentes intervalos de tempo, intensidade ou período de chuvas, o comportamento inicial da curva apresentou problemas semelhantes em todos os casos. Como mostrado nos gráficos de 10dSusp, 10dNsusp e 30d de vazão pelo tempo, nota-se que a curva tem valores nulos durante um longo período de tempo. Isso pode ser explicado pela própria estrutura de 10 camadas do modelo. O intervalo entre o processamento de todas as células e a saturação dessas causa uma inércia no modelo até que o escoamento superficial, acúmulo de água e por fim a vazão seja gerada.

A influência paralela no comportamento do modelo pelos seus parâmetros faz com que seja bastante trabalhosa a adequação do modelo à uma bacia em particular (calibração). Devido ao fato de ser um modelo ainda em fase de aperfeiçoamento, notou-se que para várias das variáveis exigidas para o CAESAR não há informação clara de seu funcionamento ou em alguns casos a própria documentação do modelo não apresenta a forma de se calcular o melhor valor para a bacia em estudo. Isso gera grande desprendimento de tempo e esforço e não garante resultados satisfatórios.

Também como desvantagem do programa, no entanto, sem influência direta sobre a qualidade de seus dados, é a grande variação do modelo sobre o número de iterações geradas por tempo, segundo Coulthard (2008, p. 64), devido à concentração de esforços do modelo em períodos de

maior atividade. Dessa forma, em situações de pouca pluviosidade, o modelo gerava poucas iterações para realizar todos os cálculos necessários. Em outros períodos com maior intensidade de chuva, era necessário um montante muito maior de iterações para que se calculasse o mesmo intervalo de tempo. Isso causava grande incerteza sobre o tempo estimado de simulação. Em paralelo à esse problema, estava também o longo período para a realização das simulações. Os menores intervalos de tempo (10 dias) demoravam de 4 a 5 horas para serem calculados, enquanto que os maiores (30 dias) eram processados, em alguns casos, em até 30 horas.

Apesar de a fonte de dados altimétricos ser a melhor resolução gratuita que se disponibiliza atualmente, a dimensão das células no modelo (30m x 30m) dificulta a determinação exata dos cursos de água, margens, erosão e sedimentação pontuais, dentre outros fatores dependentes dessa resolução. Essas dimensões geram grande variação de acúmulo de água em curtos períodos de tempo. Um dos locais de maior acúmulo de água é na represa, localizada em um parque nas cotas mais baixas da bacia, o qual apresenta aproximadamente 15 metros de extensão (Figura 11). Ainda que o córrego final tenha área uma seção significativamente menor do que a compreendida pela célula, o modelo não é capaz de interpretar essa distância.

No entanto o modelo mostrou-se interessante para o mérito de estudo inicial de uma bacia hidrográfica. À partir desse modelo é possível compreender a morfometria da área, bem como o comportamento dos processos hidrológicos básico de uma bacia. E, de forma paralela a seu uso na pesquisa, pode também servir ao propósito didático, uma vez que a simulação não gera apenas valores, mas também visualizações dos processos na bacia.



Figura 11 - Represa localizada nas cotas mais baixas da bacia
Fonte: Autoria Própria

6. CONCLUSÃO

Após analisar todos os dados obtidos com o modelo CAESAR, foi possível notar várias limitações do modelo em estudo, como os valores nulos no início das simulações, bem como muitas potencialidades. Durante o estudo da bacia, calculou-se em paralelo os valores de vazão máxima por cálculos manuais para se estabelecer um parâmetro de comparação entre o modelo e a teoria já aplicada para esse tipo de estudo. As vazões se encaixaram abaixo da vazão máxima obtida através desses cálculos, mostrando que esses resultados apresentaram valores plausíveis com a teoria. Também foi coerente nos resultados do comportamento da água na bacia, localizando esses acúmulos nos vales de cotas mais baixas da bacia, seguindo as linhas hidrológicas. A erosão ocorre nos pontos de maior velocidade de fluxo, e a deposição se encontra no final desses trechos. A maior atividade da bacia ocorre à jusante, devido à cota mais baixa, que indica o caminho lógico para as águas.

Foi coerente também no hidrograma, tendo uma sequência entre os picos de precipitação e os picos de vazão, mostrando que chuvas de maior intensidade influenciam imediatamente em picos de vazão. Associados às figuras expostas, podemos verificar que as maiores cheias também se encontram na base da bacia.

A manipulação das variáveis pode gerar dados mais fiéis à realidade, porém a quantidade e a complexidade de seu entendimento, torna esse um processo bastante demorado. No entanto, a limitação relacionada à cobertura do solo compromete significativamente a aplicabilidade do modelo na bacia em estudo, pois não interpreta a impermeabilização causada pelas edificações e pavimentos da área urbana.

Ainda assim, o modelo produziu resultados suficientes para ser utilizado como instrumento de pesquisas iniciais para compreender melhor os comportamentos da bacia Ribeirão do Cambé e, a partir desses resultados, aprofundar pesquisas em áreas de interesse em estudos posteriores em locais de maior dinâmica de alterações no modelo.

Este estudo serve de base para posteriores aprofundamentos àqueles que tiverem interesse em dar continuidade ao estudo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cambé. O estudo de maiores intervalos de tempo

talvez pudesse gerar resultados mais próximos aos reais, a análise da descarga de sedimentos poderia indicar quais os tipos de solo com maior potencialidade para erosão ou a correlação entre as distribuições espaciais de velocidade de fluxo e de erosão e deposição talvez pudesse confirmar as áreas de alto risco de impacto por esses eventos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTER. **Global Digital ElevationModel (GDEM)**. Disponível em: <<http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/3.html>>, Acesso em 13 de abril de 2012.

BORGES, F. F. et al. Bacia Hidrográfica: Uma unidade básica para análise e planejamento ambiental. **XI ENPOS – I Mostra Científica**. Pelotas, RS, 2009, disponível em: <www.ufpel.edu.br/cic/2009/regulamento.php>, Acesso em 23 de setembro de 2012.

BOTELHO, R. G. M., SILVA, A. S. da. Bacia Hidrográfica e qualidade ambiental. Cap. 6. p. 153. In: Reflexões sobre a geografia física no Brasil. 5ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. 282p.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. Biblioteca Virtual da ANA. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/>>, Acesso em 15 de junho de 2012.

CAESAR, 2008. Coulthard, T. De Wiel, M.V..The Cellular Automaton Evolutionary Slope And River model (CAESAR). Disponível em: <http://www.coulthard.org.uk/downloads/CAESAR_instructions2.pdf >, Acesso em 13 de abril de 2012.

CASSOL, E. A., LIMA, V. S. **Erosão em entressulcos sob diferentes tipo de preparo e manejo do solo**. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v. 38, n. 1, p. 117-124, janeiro, 2003.

CHWIF, L. **Redução de Modelos de Simulação de Eventos Discretos na sua Concepção: Uma Abordagem Causal**. 1999. 151 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo, São Paulo.

Coulthard, T. J. (1999). **Modeling Upland Catchment Response to Holocene Environmental Change**. Tese de Doutorado não publicada. Escola de Geografia, Universidade de Leeds, Reino Unido. 181 p.

EDC DAAC, 2001. **ASTER GDEM data product**. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table> Acesso em 24 de abril de 2012.

GABELE, T. **DRAINMOD – General ModelInformation**. 1997. Disponível em: <ecobas.org/server/rem/mdb/drainmod.html>, Acesso em 25 de março de 2012

INPE. Sistema **de Processamento de Informações Georreferenciadas**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html>>, Acesso em 24 de abril de 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual Técnico de Pedologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2007. p. 316.

LELIS, A. et al. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudoeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Ambiente e Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**.vol. 5, núm.2, 2010.Pp. 158-174. Universidade de Taubaté. Taubaté, Brasil.

MACHADO. C. C., GARCIA, A. R., SILVA, E., FONTES, A. M.. **Comprovação de Taxas de Erosão em Estradas Florestais Estimadas pelo Modelo WEPP (WaterErosionPrediction Project) Modificado em Relação a Medições Experimentais**. Revista *Árvore*, Universidade de Viçosa, Viçosa-MG, v.27, n.3, p.295-300, 2003

MACHADO, R.E. & VETTORAZZI, C.A. **Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, SP**. R. Bras. Ci. Solo, 27:735-741, 2003.

MONTEZUMA, R. C. M.. **Produção e reabilitação funcional do piso florestal em clareira de deslizamento: Parque Nacional da Tijuca, Rio de Janeiro**. *Anu. Inst. Geocienc.*, 2005, vol.28, no.2, p.155-156. ISSN 0101-9759.

NEVES, F. F.. **Análise Prospectiva das Áreas de Risco à Erosão na Microbacia Hidrográfica do Rio Bonito (Descalvado – SP), Potencialmente Poluidoras por Dejeito de Granjas**. 2005. 200 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.

PARANÁ, Londrina. **Prefeitura de Londrina – Dados Geográficos**. Disponível em:

<http://www1.londrina.pr.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=40&Itemid=58> Acesso em 15 de abril de 2012.

RENNÓ, C. D., **Construção de um Sistema de Análise e Simulação Hidrológica: Aplicação a Bacias Hidrográficas**. 2004. 148 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Curso de Pós-Graduação e Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos – SP.

ROCHA, G.C. **Carta de solos da bacia do ribeirão Cambé na área urbano-rural de Londrina, PR**. Seminário de Ciências Exatas/Tecnológicas, v. 16, n. 4, p. 536-549, 1995.

SABBADINI, F. OLIVEIRA, M. J. de. **Simulação Interativa Visual: Uma Ferramenta para Tomada de Decisão**. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 3., 12 p. 2006. Resende – RJ.

SILVEIRA, V. C. P., QUADROS, F. L. F. de. **Modelos de Simulação, uma ferramenta pouco explorada**. XXI Reunião do Grupo Técnico em Forrageiras do Cone Sul – Grupo Campos Desafios e Oportunidades do Bioma Campos Frente a Expansão e Intensificação Agrícola. 3 p. 2006, Pelotas – RS.

SPERANDIO, H. V. et al. Avaliação da erosão hídrica pela alteração na superfície do solo em diferentes coberturas vegetais de uma sub-bacia hidrográfica no Município de Alegre, ES. **Semina: Ciências Agrárias**. v. 33, n. 4, p. 1411-1418. Londrina, 2012.

SRTM. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>, Acesso em 24 de abril de 2012.

TEODORO, V. L. I., TEIXEIRA, D., COSTA, D. J. L., FULLER, B. B.. **O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local**. Revista Uniará. N. 20, 2007. P. 136 – 157.

TRABAQUINI, K., TAKEDA, M. M. G., ROMAGNOLLI, R., BARROS, M. V. F.. **Uso e ocupação das APPS em áreas de fundo de vale no perímetro urbano de Londrina – PR, utilizando imagem de alta resolução**. Revista Ra'e Ga – O Espaço Geográfico em Análise, n. 18, p. 41-49, 2009. UFPR, Curitiba – PR.

TRIVELATO, G. C.. Técnicas de modelagem e simulação de sistemas dinâmicos. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, 20 p. 2003. São José dos Campos –SP

TUCCI, C. E. M., PORTO, R. L. L., BARROS, M. T. de. **Drenagem urbana**. Editora da Universidade UFRGS:ABRH. Cap. 1. Inundações Urbanas, p. 15-36. 1995. Porto Alegre – RS.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **BASINS – Basic Information**. 2012. Disponível em: <water.epa.gov/scitech/datait/models/basins/basinsv3.cfm>, Acesso em 25 de março de 2012.

_____. California Institute of Technology. **ASTER, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer**. Disponível em: ><http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>>, Acesso em 25 de maio de 2012.

_____. NCSU BAE Department, Soil and Water Management Group. **DRAINMOD**. Disponível em: <http://www.bae.ncsu.edu/soil_water/drainmod/manuals.html>, acesso em 23 de março de 2013.

_____. **Quantum GIS**. Disponível em: <<http://www.qgis.org>>, Acesso em 22 de fevereiro de 2013.

_____. USDA, Natural Resources Conservation Service. **AGNPS, Continuous Simulation Model Processes**. Disponível em: <<http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/quality/?cid=stelprdb1043529>>, Acesso em 23 de março de 2013.

CARVALHO, Daniel Fonseca de; SILVA, Leonardo Batista da. **Hidrologia**. Cap. 4. São Paulo, 2006.

TEODORO, Valter Luiz Iost; TEEIXEIRA, Denilson; COSTA, Daniel Jadyr Leite; FULLER, Beatriz Buda. **O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica local**. Revista Uniara. Araraquara – SP, n 20. P. 137 – 157. 2007.

CÂMARA, Gilberto; SOUZA, Ricardo Cartaxo Modesto; FREITAS, Ubirajara Moura; GARRIDO, Juan; II, Fernando Mitsuo. **SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS by Object-Oriented Data Modelling**. Image Processing Division. National Institute for Spacial Research. Brasil. s/d.

COELHO, Rodrigo Vaz. **Estudo do traço solo-lodo (ETA)-cimento para emprego em pavimentação**. 2012. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.