



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS**



## **ESTÁGIO-SUPERVISIONADO**

*AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DE  
SEDIMENTOS NA REGIÃO SEMI-ÁRIDA PARAIBANA ATRAVÉS DE UM  
MODELO DISTRIBUÍDO*

**Fábio Faizi Rahnemay Rabbani**

**Campina Grande – Outubro de 2001**




Biblioteca Setorial do CDSA. Maio de 2021.

Sumé - PB

# Relatório de Estágio Curricular Supervisionado

Orientador:

  
Prof. Dr. Vajapeyam Srinigachar Srinivasan

Estagiário:

  
Fábio Faizi Rahnemay Rabbani  
Matricula 29711135

## **Apresentação**

Este relatório apresenta uma síntese das atividades realizadas pelo estudante de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba – Campus II, Fábio Faizi Rahnemay Rabbani, matrícula 29711135, que tiveram como objetivo cumprir o estágio curricular supervisionado, tendo como tema principal *a Avaliação da Produção de Escoamento Superficial e de Sedimentos na Região Semi-Árida Paraibana Através de um Modelo Distribuído*. Sendo este realizado sob uma carga horária de 20 horas semanais, totalizando 10 créditos.

## Agradecimentos

*A meu professor orientador, Dr. Vajapeyam Srinigachar Srinivasan, pela atenção dada nos últimos 2 anos, sendo de essencial importância para meu crescimento como futuro profissional.*

*A meu pai, Soheil, e minha mãe, Simin, por serem a maior prova do amor incondicional de Deus.*

*A meus irmãos, Emília e Roberto, pelo apoio.*

*A Kalina, pelos últimos 18 meses.*

*A minha família, pelo carinho.*

*A meus amigos, amigas e colegas.*

## Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>A BACIA EXPERIMENTAL DE SUMÉ</b> .....	<b>8</b>
3.1	LOCALIZAÇÃO .....	8
3.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-CLIMÁTICAS.....	9
3.3	INSTALAÇÕES .....	9
<b>4</b>	<b>MODELAGEM HIDROLÓGICA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DA EROSÃO</b> .....	<b>11</b>
4.1	ESCOAMENTO SUPERFICIAL E SEUS MECANISMOS DE GERAÇÃO .....	12
4.2	EROSÃO E SEUS MECANISMOS DE GERAÇÃO .....	13
4.2.1	<i>Erosão nos planos</i> .....	13
4.2.2	<i>Erosão nos canais</i> .....	14
4.3	MODELOS HIDROLÓGICOS DE ESCOAMENTO E EROSÃO.....	14
4.3.1	<i>Classificação dos Modelos</i> .....	14
4.3.2	<i>Modelos Chuva-Vazão</i> .....	15
4.3.3	<i>Modelos Empíricos</i> .....	15
4.3.4	<i>Modelos Conceituais Concentrados</i> .....	15
4.3.5	<i>Modelos Fundamentais</i> .....	16
4.4	MODELOS DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS.....	16
4.4.1	<i>Modelos Empíricos</i> .....	16
<b>5</b>	<b>CHDM: CATCHMENT HYDROLOGY DISTRIBUTED MODEL</b> .....	<b>17</b>
5.1	APRESENTAÇÃO.....	17
5.2	COMPONENTES MODELO.....	17
5.2.1	<i>Interceptação</i> .....	18
5.2.2	<i>Infiltração</i> .....	18

	5
5.2.3 <i>Escoamento nos Planos</i> .....	21
5.2.4 <i>Escoamento nos Canais</i> .....	22
5.2.5 <i>Condutos Circulares</i> .....	23
5.2.6 <i>Erosão e Transporte de Sedimento</i> .....	24
5.2.7 <i>Erosão nos planos</i> .....	24
5.2.8 <i>Equações de Transporte de Sedimento</i> .....	27
5.3 O CHDM 2001 .....	28
5.3.1 <i>Parâmetros de Infiltração</i> .....	29
5.3.2 <i>Parâmetros de transporte de sedimentos</i> .....	29
5.3.3 <i>Calibração dos Parâmetros para as parcelas 1 e 4</i> .....	31
<b>6 RESULTADOS</b> .....	<b>32</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>33</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>35</b>
<b>9 ANEXOS</b> .....	<b>37</b>

## 1 Introdução

Sendo bastante rasa, a camada produtiva do solo do Nordeste semi-árido, vindo seguida, logo abaixo por uma camada rochosa. O que se tem observado há muitos anos do semi-árido nordestino é uma prova de que a capacidade do homem em forçar adaptação do ambiente a sua necessidade, muitas vezes é fruto de uma dependência extrema aos recursos naturais.

Com o exorbitante caos instituído nas cidades, o conhecido êxodo rural deixou de ser um fato corriqueiro para se tornar uma prática inviável: famílias inteiras que antes fugiam das condições de miséria dos interiores nordestinos, voltam às suas pequenas propriedades com a única ambição de sobreviver. Por outro lado, tem-se grandes latifundiários que, por terem grandes extensões de terra e por visarem lucros imediatos, buscam atividades de baixos custos e de retorno promissor, porém sem a preocupação da conservação dos recursos utilizados.

A retirada da vegetação nativa para a plantação de insumos a serem usados na pecuária ou para a plantação de cultura de subsistência é um dos fatores contribuintes para a aceleração do processo erosivo na região Nordeste. Estudos têm mostrado a influência positiva, no combate a erosão, da vegetação nativa

Com essas intensas atividades não há tempo suficiente para que a terra reponha os seus nutrientes pelos processos naturais. O uso de equipamentos modernos, que permitem uma alta produtividade, também podem implicar numa perda alta de nutrientes. Sem um tratamento adequado estas perdas poderão levar os processos de desertificação e finalmente a infertilidade do solo.

No Nordeste Semi-árido a vegetação, em boa parte da região, é rasteira e do tipo caatinga. As culturas empregadas nem sempre são adequadas para o tipo de solo e para a quantidade de água disponível. As chuvas são escassas, mas medianamente intensas (Leprun, 1981). Nestas condições, a eliminação da vegetação, associada com o tipo de cultura empregada e a erosividade da chuva são fatores que contribuem, de forma expressiva, para a erosão do solo.

Afim de determinar estudos relacionados à influência das diversas atividades executadas na região e entender melhor os processos hidrológicos a Superintendência para



o Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) em conjunto com o ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération) criou o programa de bacias representativas e experimentais em vários estados da região. No semi-árido paraibano foram instaladas as Bacias Representativa e Experimental de Sumé, operadas em conjunto com a Universidade Federal da Paraíba, Campus de Campina Grande.

Desde 1982 mais de 270 eventos de precipitação foram registrados. As bacias forneceram valiosas informações que serviram de base para vários estudos que tinham como finalidade, dentre outras, a de modelar o processo de erosão e escoamento superficial. No entanto, os processos naturais exigem que análises mais detalhadas sejam realizadas para que se possa chegar à resultados conclusivos.

O programa CHDM - Catchment Hydrology Distributed Model - é um modelo fundamental e foi concebido com a finalidade de ser aplicado à bacias localizadas em regiões com características físico-climáticas semelhantes a Bacia Experimental de Sumé. No entanto, ele possui seis equações de transporte de sedimentos que possibilitam a identificação da equação que melhor caracteriza esse transporte e portanto a produção de sedimentos da bacia. A relação entre os parâmetros do modelo precisa ser determinada objetivando a estimativa futura destes parâmetros.

Recentemente foi lançado o CHDM 2001 que engloba funções e características dos modelos WESP e CHDM de maneira a permitir uma maior variedade de parâmetros para a simulação de chuva-vazão-erosão. Essas características permitem ao pesquisador fornecer ao programa dados como o potencial mátrico e o coeficiente de empoçamento que podem ser calibrados de acordo com a região estudada.

Neste estágio supervisionado fará-se uma avaliação do modelo CHDM 2001, para que futuramente, possa-se utilizar os parâmetros colhidos nesse programa para prever as situações de formação de lâminas e erosão em localidades com condições ambientais semelhantes.

## 2 Objetivos

Este estágio visa modelar os processos de escoamento e erosão em regiões desmatadas aplicando o modelo hidrossedimentológico CHDM.

Os objetivos do estágio apresentam-se abaixo:

- Verificação da consistência e seleção dos dados de parcelas e de microbacias da Bacia Experimental de Sumé que melhor convierem para análise;
- Calibração e determinação dos parâmetros de lâmina calculada do modelo CHDM para os eventos escolhidos;
- Análise da influência da granulometria e a escolha de um diâmetro representativo para a mistura de sedimento em cada parcela e microbacia estudada;
- Calibrar os parâmetros de potencial mátrico, porosidade, saturação máxima, coeficiente de erodibilidade e coeficiente de empoçamento da versão 2001 do CHDM.
- Criação de um banco de dados com os arquivos de chuva e de geometria de elementos para o CHDM 2001.
- Análise dos resultados obtidos e determinação de valores para os parâmetros considerados constantes para cada parcela e microbacia;

## 3 A Bacia Experimental de Sumé

Os resultados obtidos neste projeto são provenientes de dados coletados na Bacia Experimental de Sumé, onde a Universidade Federal da Paraíba desenvolveu diversas pesquisas tendo como colaboradores a SUDENE e o ORSTOM.

### 3.1 Localização

Localizada na propriedade Fazenda Nova, no município de Sumé, a Bacia

Experimental situa-se na altura do km 118 da BR-412, entre as cidades de Sumé e Monteiro. Esta região conhecida como Cariris Velhos faz parte da área superior da bacia do Rio Paraíba, com 7° 40' de latitude sul e 37°00' de longitude oeste.

### **3.2 Características Físico-Climáticas**

Por ter características físico-climáticas semelhantes a outras áreas do semi-árido nordestino, a Bacia Experimental de Sumé tem grande importância, uma vez que os resultados e conclusões obtidos nos estudos nela realizados podem ser abrangidos a uma das regiões mais secas do Brasil.

A região tem uma precipitação média anual entre 550 e 600 mm, distribuída entre o período chuvoso de fevereiro a abril, temperatura média anual de 24° C com médias máximas e mínimas diárias em 33°C e 15°C.

Observa-se a presença de um subsolo formado por rochas do complexo cristalino pré-cambriano, na maioria granitos. O solo característico do sertão nordestino é o bruno não cálcico vértico, constituindo cerca de 15% da superfície do polígono das secas, uma baixa permeabilidade com média de 26,4 mm/h.

O relevo é pouco ondulado a ondulado, com declividade variando entre 4% e 9%. O recobrimento vegetal é de dois tipos: a caatinga nativa densa hiperxerófila arbustiva e arbórea, e um pousio de seis anos.

### **3.3 Instalações**

Com a intenção medir o escoamento superficial e erosão correspondentes a cada chuva, estão instaladas na bacia experimental quatro microbacias e nove parcelas de erosão com diversas coberturas e declividades.

As quatro microbacias estão equipadas com tanques coletores das águas e dos sedimentos escoados correspondentes a cada chuva e de linígrafos para acompanhar a variação do volume d'água escoado através do tanques. O tanque possui forma retangular

de 2300 l de capacidade, com um vertedor triangular de 90°. Um dispositivo de amostragem automática das águas que sangram pelo vertedor completa o mecanismo de coleta das amostras. Na tabela 1 apresentam-se as características de cada microbacia.

O equipamento das parcelas é constituído por 2 tanques de 1000 l de capacidade cada, incluindo um partidor das descargas, em que oito partes em nove transbordam. Assim 11,1% dos volumes que transbordam do primeiro tanque são colhidos num segundo tanque de 1000 l. A área de cada parcela é de 100m<sup>2</sup> (22,1 x 4,5 m). As parcelas têm as características apresentadas na tabela 2

Além dos equipamentos já citados a bacia experimental de Sumé possui ainda uma estação meteorológica e pluviômetros e pluviógrafos localizados em vários pontos para permitir um melhor acompanhamento das variações temporais e espaciais das chuvas.

Abaixo apresenta-se um croqui das instalações existentes:

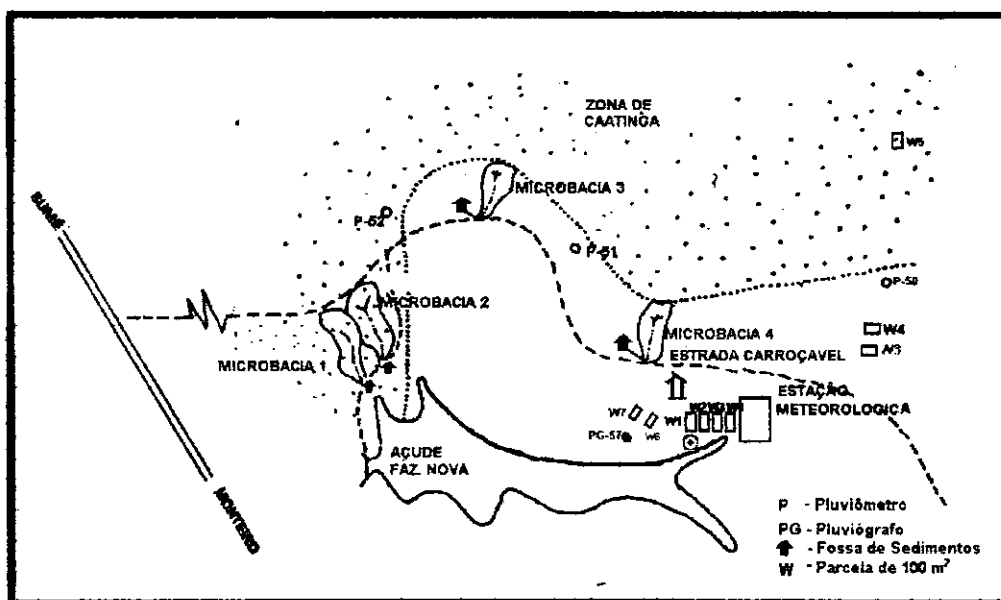


Figura 1 - Instalações da Bacia Experimental de Sumé (Cadier et al. 1983)

**Tabela 1.** Características das microbacias estudadas (Cadier et al., 1983).

Microbacia	Área ( ha )	Perímetro ( m )	Declividade Média (%)	Cobertura Vegetal
01	0.62	398	7.0	Caatinga Nativa
02	1.07	466	6.1	Caatinga Nativa
03	0.52	302	7.1	Desmatada
04	0.48	270	6.8	Desmatada

**Tabela 2.** Características das parcelas de 100 m<sup>2</sup>.

Parcela	Declividade Média ( % )	Cobertura Vegetal	Ano de Instalação
01	3.8	Desmatada	1982
02	3.9	Cobertura morta	1982
03	7.2	Cobertura morta	1982
04	7.0	Desmatada	1982
05	9.5	Caatinga nativa	1982
06	4.0	Palma morro abaixo	1983
		Milho	1989
07	4.0	Palma em contorno	1983
08	4.0	Desmatada	1983
09	4.0	Caatinga nativa	1983

#### 4 Modelagem Hidrológica do Escoamento Superficial e da Erosão

Os processos hidrológicos, assim como todos os processos naturais são de essência bastante complexa, por isso para seu estudo faz-se necessária a sua representação através de modelos. Modelo é a representação de algum objeto ou sistema numa forma ou linguagem de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entrada. (Cadier et al., 1987)

A modelagem hidrológica consiste da descrição, através de métodos matemáticos dos processos de chuva, interceptação, evaporação, transpiração, infiltração e escoamento superficial. Os modelos de erosão consistem na descrição, através de modelos matemáticos dos processos de desagregação, transporte e deposição dos sedimentos (Figueiredo, 1998).

#### **4.1 Escoamento Superficial e seus Mecanismos de Geração**

Ao atingir o solo, a água da chuva passa a percorrer caminhos diversos que levem a rios, canais e reservatórios. Esse movimento sobre a superfície do solo é conhecido como escoamento superficial. Dentre os elementos do ciclo hidrológico o escoamento superficial é o que exerce um dos papéis mais importantes. O escoamento é regido por leis físicas e é representado quantitativamente por variáveis como vazão, profundidade e velocidade. Ele é influenciado pelas características, da precipitação (intensidade e duração), pelas características do solo (textura, capacidade de infiltração e umidade) e pela cobertura vegetal. Quanto maior for a capacidade que o solo possui para infiltrar menor será a quantidade da precipitação que irá escoar.

De acordo com Rubin [Tucci (1987)] a infiltração pode ser dividida em três categorias: infiltração controlada pela condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ )- caso a intensidade da chuva seja menor que  $K_s$  toda a água precipitada infiltrará; infiltração controlada pela intensidade da chuva (intensidade menor que a capacidade de infiltração e maior que  $K_s$ ) – a taxa de infiltração será numericamente igual a intensidade da chuva; infiltração controlada pela capacidade de infiltração – a intensidade da chuva é maior que a capacidade de infiltração o que implica em saturação do perfil do solo e acúmulo de água, fato este conhecido como excesso de infiltração ou ponto de empocamento.

O comportamento do escoamento superficial é descrito por equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento. As suposições básicas, adotadas no desenvolvimento das equações de movimento são as seguintes: a) o fluxo é gradualmente variado; b) a declividade do canal é pequena e o leito é fixo; c) o fluido é incompressível e possui viscosidade constante; d) a distribuição da pressão é hidrostática; e) a quantidade de movimento, devido ao escoamento lateral é desprezível; f) a resistência

ao fluxo pode ser aproximada através de fórmulas de extrapolação e coeficientes de resistência utilizados para um fluxo permanente e uniforme.

## **4.2 Erosão e seus Mecanismos de Geração**

Pode-se definir erosão como o processo de desagregação e transporte do material existente no solo por agentes erosivos. É o Fenômeno do desgaste das rochas e solos em desagregação, deslocamento ou arrastamento das partículas sólida por ação da água ou outros agentes, como o vento. A essas partículas sólidas dar-se o nome de sedimentos.

Grandes dificuldades tem sido encontradas na avaliação quantitativa da erosão e da produção de sedimento nas bacias hidrográficas devido a complexidade do próprio processo erosivo que envolve grande número de variáveis independentes caracterizando um fenômeno de alta complexidade e bastante difícil de ser tratado analiticamente (Lopes e Srinivasan, 1990).

### **4.2.1 Erosão nos planos**

Os planos experimentam os processos de desagregação, transporte e deposição. Dependendo das condições da cobertura superficial o impacto das gotas da chuva provocará ou não a desagregação das partículas que poderão ser transportadas pelas gotas que são arremessadas após o impacto a uma curta distância.

Existe uma correlação entre a erosão e a energia cinética da chuva. Ao mesmo tempo a energia cinética depende da massa das gotas de chuva e de sua velocidade de chegada ao solo.

Além desses fatores, a desagregação depende da erodibilidade do solo. Pode-se citar três estágios básicos para a erosão hídrica nos planos: erosão laminar ou em camadas, erosão em sulcos e a erosão em ravinas. Na erosão em lâminas a remoção dos sedimentos acontece através da retirada de uma fina camada do solo que poderá abranger uma grande área. Com a erosão em sulcos e pequenos cursos d'água dar-se o aparecimento de pequenas rugas ou sulcos nos quais se concentra o fluxo. A formação desordenada desses sulcos é devida a variação natural da resistência do solo e devido a pequenas variações na declividade. O fluxo proveniente de vários sulcos une-se para formar os cursos de drenagem superficial que são canais de maiores dimensões. A erosão em ravinas acontece

no estágio final da erosão nos planos quando a concentração do fluxo resulta em grande erosão e provoca mudanças permanentes na topografia. Foster (1982)

A diferença entre este caso e o anterior (erosão em sulcos) é que no primeiro caso as dimensões dos cursos d'água são tais que eles poderão ser encobertos desfeitos completamente por práticas normais de cultivo, enquanto com as ravinas as dimensões dos cursos são muito grandes para uma correção fácil.

#### **4.2.2 Erosão nos canais**

Graças à força de cisalhamento que o fluxo superficial exerce nas laterais e no leito do canal ocorre a erosão. O fluxo superficial que acontece nos pequenos riachos é impulsionado para as partes mais baixas da bacia formando cursos d'água de maiores dimensões e pelo menos parte do material que foi erodido nos planos é transportado juntamente com o fluxo para os canais.

### **4.3 Modelos Hidrológicos de Escoamento e Erosão**

#### **4.3.1 Classificação dos Modelos**

De acordo com Woolhiser (1982) os modelos classificam-se em: contínuos e discretos; concentrados e distribuídos; estocásticos e determinísticos; conceitual e empírico. Para Chow (apud, Galvão 1990) os modelos matemáticos de simulação hidrológica podem ser classificados como determinísticos e estocásticos. Estas definições levam a crer que existe um consenso entre os autores nessas últimas classificações, ou seja, sendo o modelo estocástico ou determinístico ele poderá ser também contínuo ou distribuído, conceitual ou empírico.

Um sistema é dito contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo e discreto quando as mudanças de estado se dão em intervalos discretos. Um modelo é concentrado quando não leva em conta a variabilidade espacial, e distribuído quando as variáveis e os parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo. Segundo Dooge (1973) apud Tucci (1987) um modelo é determinístico quando, para uma mesma entrada, o sistema



produz sempre a mesma saída (devendo as condições iniciais serem exatamente as mesmas para certos sistemas), enquanto que o modelo é estocástico quando o relacionamento entre a entrada e a saída é estatístico. Os modelos são ditos conceitual quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos.

#### **4.3.2 Modelos Chuva-Vazão**

Estes tipos de modelo procuram simular a vazão em uma dada seção, a partir da precipitação conhecida na bacia hidrográfica. Procuram visar os seguintes objetivos: melhor entendimento do fenômeno hidrológico na bacia; análise de consistência e preenchimento de falhas; dimensionamento; previsão de cheias; análise das mudanças na resposta da bacia devido as modificações do uso da terra, entre outros.

#### **4.3.3 Modelos Empíricos**

Os modelos empíricos são baseados em dados observados e fornecem sempre a mesma resposta para a mesma entrada. São obtidos a partir de métodos estatísticos de regressão, análise de correlação e métodos baseados em funções estatísticas. Eles possuem limitações no que diz respeito as mudanças efetuadas na bacia justamente pela falta de significado físico dos seus parâmetros. (Bathurst e O'Connel, 1992)

#### **4.3.4 Modelos Conceituais Concentrados**

Muitos modelos hidrológicos são baseados na representação conceitual dos processos físicos que governam o fluxo de água através do meio poroso do solo e sobre ele. Tais modelos possuem dois tipos de parâmetros: parâmetros físicos (representam propriedades mensuráveis de uma bacia) e parâmetros de processo (representam propriedades que não são diretamente mensuráveis). (Sorooshian & Gupta, 1995)

Abbott et al. citado por Beven (1989) apontam como desvantagem ou limitação dos modelos conceituais concentrados, os seguintes pontos: eles necessitam de observações meteorológicas e hidrológicas relativamente longas para a sua calibração; a sua calibração envolve ajustamento de curvas o que torna a interpretação física dos parâmetros ajustados bastante difícil; a previsão dos efeitos das mudanças de uso do solo através da mudança no valor dos parâmetros não poderá ser efetuada com confiança; os modelos não utilizam informações relacionadas a topografia, tipo de solo e variações no tipo da vegetação.

### **4.3.5 Modelos Fundamentais**

Os modelos conceituais retratam as condições médias da bacia, sendo as variáveis envolvidas analisadas segundo uma ótica global. Como consequência os fenômenos são retratados segundo formulações baseadas em parâmetros empíricos (Tucci, 1987).

Uma vez que os modelos de base física requerem maiores informações a respeito da bacia, o requisito básico para aplicação dos mesmos seria colher todas os dados necessários para uma boa representação dos processos envolvidos. Esta prática demandaria tempo e recursos, pois seria necessária a coleta de informação em vários locais da bacia. Os dados imprescindíveis são coletados e outros estimados da forma que os parâmetros do modelo que poderão ser calibrados com os dados observados. Isto se constitui num dos grandes problemas na aplicação de modelos, pois nem sempre os parâmetros podem ser estimados com confiança.

Algumas das características dos modelos de base física foram citadas por Figueiredo (1998): a técnica de modelagem é baseada na física dos processos; os parâmetros possuem significado físico; a bacia é considerada um sistema espacialmente variável com entradas variáveis e parâmetros a serem calibrados; eles são projetados de tal maneira que é necessário a discretização da bacia em termos horizontais e verticais.

As restrições para o uso de modelos de base física e as limitações na sua aplicação estão relacionadas à calibração, validação e incertezas nos valores dos parâmetros e ao fato dos mesmos necessitarem de um grande número de informações para a sua aplicação. Deve-se considerar também que as equações utilizadas são boas para descrever os processos físicos que ocorrem em condições homogêneas e estacionárias, fato este que somente poderá ser encontrado em condições de laboratório.

## **4.4 Modelos de Produção de Sedimentos**

### **4.4.1 Modelos Empíricos**

Modelos empíricos são baseados em observações empíricas. Nestes modelos a produção de sedimento é relacionada com algum fator que o influencia de forma

significante utilizando para tanto o ajustamento de curvas. Os parâmetros nesses modelos possuem pouco ou nenhum significado físico.

## **5 CHDM: Catchment Hydrology Distributed Model**

### **5.1 Apresentação**

O Catchment Hydrology Distributed Model é uma ferramenta que é orientada ao evento por não ter componentes que descrevam a evapotranspiração e o movimento do solo entre as chuvas e, portanto, não pode manter o balanço hidrológico entre esses eventos. Tendo-se as condições de umidade inicial do solo pode-se obter a lâmina d'água e a erosão produzidas pelo evento. Graças a seu embasamento físico o CHDM pode ser utilizado em prever os efeitos causados por diferentes usos do solo.

Cada plano é descrito por seus parâmetros característicos, condições iniciais, arquivos de entrada (inputs), da mesma forma ocorre com os canais. Cada chuva pode ter variações espaciais e temporais. Informações (data) sobre a intensidade da chuva versus o tempo pode ser computada de 1 a 20 pontos localizados dentro ou nas proximidades da bacia. O CHDM então calcula a diferença entre a intensidade da chuva e a taxa de infiltração de 5 a 15 pontos em cada plano. O fluxo superficial e a infiltração são iterativos de modo que a infiltração continua mesmo que a chuva tenha cessado desde que haja água acumulada na superfície. O fluxo é direcionado passando pelos planos e sendo conduzidos pelos canais até a exutória da bacia. Os canais também podem perder volume d'água pela infiltração.

### **5.2 Componentes Modelo**

O modelo envolve os processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial (Planos), escoamento em canais, erosão nos planos, erosão nos canais e transporte de

sedimentos.

### 5.2.1 Interceptação

Em uma chuva parte da água fica retida nas folhagens das plantas existentes na área, de modo que o CHDM subtrai um fator conhecido como "Interception depth"(I) antes da infiltração ser calculada. O modelo reduz a 'taxa de chuva' até que I seja satisfeito, isto é, se o volume d'água produzido pela chuva no período do primeiro incremento de tempo ( $\Delta t$ ) for maior que I, a intensidade de chuva será reduzida de  $I/Dt$ . Caso I for maior que a intensidade da chuva, considera-se que essa intensidade é nula naquele incremento de tempo e o valor de I é reduzido do volume d'água produzido em incrementos de tempo subsequentes.

Os fatores que influenciam o valor de I envolvem condições como tipos de cobertura vegetal, estágio de crescimento de vegetação, estação de ano, e velocidade do vento. Esses valores podem ser observados em tabelas elaboradas por diversos estudiosos. Embora o componente interceptação possa ser altamente significativo no equilíbrio hidrológico, ele é relativamente sem importância para chuvas capazes de produzir inundações.

### 5.2.2 Infiltração

Durante os eventos a intensidade das chuvas muda continuamente, começando e terminando com o valor de zero. Devido a limitações técnicas, esta mudança de taxa é aproximada por um número finito de 'pulsos' relativamente pequenos, de tal forma que cada 'pulso' tenha uma taxa constante. A taxa de infiltração não é constante; seu padrão responde à variação da intensidade da chuva à quantia de infiltração acumulada.

### 5.2.2.1 Infiltração de chuva

No início de uma chuva haverá sempre um período dentro do qual a taxa de infiltração ( $f$ ) é igual à taxa de precipitação da chuva ( $i$ ) e o excesso de chuva ( $r$ ) é zero. Durante este período, a terra pode absorver água mais rapidamente. A taxa máxima de infiltração de água no solo é conhecida como capacidade de infiltração ( $f_c$ ), que pode ser descrita como uma função ( $f$ ) da quantidade de água inicial ( $\theta_i$ ) e da quantidade de água previamente absorvida pelo solo ( $F$ ):

$$f_c = f(F, \theta_i) \quad [1]$$

A água inicial contida no solo ( $\theta_i$ ) é assumida constante ao longo da profundidade porém variável entre eventos. Dois parâmetros são básicos ao modelo de infiltração: a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) [m/s] e o valor efetivo do potencial de capilaridade ( $G$ ):

$$G = \frac{1}{K_s} \int_{-\infty}^0 K(\psi) d\psi \quad [2]$$

onde  $\Psi$  é o potencial mátrico do solo [m] e  $K(\Psi)$  é a condutividade hidráulica (m/s). O parâmetro  $G$  é uma característica do solo e não incorpora o efeito do conteúdo inicial de água o qual é tratado independentemente.

O modelo CHDM calcula o excesso de infiltração fazendo uso da equação de Green-Ampt (1911):

$$f_c = K_s \left[ 1 + \frac{G\phi(S_{max} - S_i)}{F} \right] \quad [3]$$

onde  $\phi$  = porosidade do solo,  $S_{max} = \theta_s / \phi$  = saturação máxima relativa,  $\theta_s$  = conteúdo de água na saturação [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>],  $S_i = \theta_i / \phi$  = saturação inicial relativa,  $\theta_i$  = conteúdo inicial de

água [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ].  $G$  = valor efetivo do potencial de capilaridade, (m),  $K_s$  = Condutividade hidráulica saturada, (m/s),  $F$  é a profundidade da frente de molhamento, (m).

### 5.2.2.2 Infiltração durante intervalo de eventos

Quando a chuva cessa ou se cai a uma taxa menor da capacidade de infiltração ( $f_c$ ), a infiltração ainda continua uma vez que ainda há a presença de água na superfície do solo em forma de poços. O tratamento “cinemático” do fluxo de água na superfície é necessário uma vez que o suprimento de água não é ilimitado.

O CHDM simplifica a microtopografia da superfície do solo (pequeníssimas valas de passagem de água) com o parâmetro ‘RECS’. Este parâmetro representa a profundidade máxima local de escoamento superficial em que toda a superfície é coberta por água. Um valor de RECS baixo indica um solo regular e vice-versa.

### 5.2.2.3 Infiltração durante o intervalo de um mesmo evento

A teoria representada nas equações [2] e [3] aplica-se em geral quando  $i > K_s$ . Frequentemente em padrões de chuvas reais há um ou mais intervalos durante os quais  $0 < i < K_s$ . Contanto que a água remanescente na superfície satisfaça  $f_c$ , estes intervalos ainda são justificados por esta teoria.

Quando um intervalo mais longo acontece no qual parte ou toda a superfície está livre de água, ocorre a redistribuição da água no solo e em uma chuva subsequente um novo e maior valor de  $S_i$  é considerado. O CHDM, as mudanças na saturação relativa durante tal intervalo estão baseadas em uma estimativa analítica da quantidade de água que o solo obterá um evento com determinado  $i < K_s$  se aquela chuva continuasse indefinidamente.

### 5.2.3 Escoamento nos Planos

Durante uma chuva observa-se que o escoamento superficial ocorre quando a intensidade da chuva excede a capacidade de infiltração do solo, observando-se a partir deste momento o empoçamento da água nas pequenas depressões existentes ou formadas pela chuva. Naturalmente o escoamento é um fato tridimensional, porém o modelo funciona com a simplificação da unidirecionalidade do fluxo. São utilizadas as equações da continuidade e quantidade de movimento para o fluxo superficial:

- Equação da Continuidade

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot h)}{\partial x} = r \quad [4]$$

- Equação de Quantidade de Movimento:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) - r \frac{u}{h} \quad [5]$$

onde  $h(x,t)$  é a profundidade do fluxo (m);  $u$  é a velocidade média do fluxo, (m/s);  $r(x,t)$  é a taxa de entrada de fluxo lateral por unidade de área, (m/s);  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );  $S_0$  é a declividade do plano;  $S_f$  é a declividade da linha de energia;  $x$  é a distância na direção do fluxo, (m);  $t$  é o tempo, (s).

Além disso, o modelo considera que numa escala macro o fluxo é proporcional a potência do armazenamento por unidade de área, ou seja:

$$q = \alpha h^m \quad [6]$$

onde:  $q$  é a vazão por unidade de largura ( $m^3/s/m$ );  $h$  é o armazenamento de água por unidade de área (ou profundidade se a superfície for um plano) (m);  $\alpha$  e  $m$  são parâmetros

relacionados a declividade, rugosidade superficial e as condições de fluxo (laminar ou turbulento)

A aproximação da onda cinemática é empregada como uma simplificação da equação de momento, não preservando todas as propriedades da equação mais complexa. Segundo Lopes, este esquema é incondicionalmente estável para uma análise de estabilidade linear, mas a precisão depende do valor do incremento de tempo e da distância,  $\Delta t$  e  $\Delta x$  respectivamente

O modelo oferece duas opções para obtenção de  $\alpha$  e  $m$  na equação [6]:

- A fórmula de Manning:  $\alpha = S^{1/2} / n$  e  $m = 5/3$ , onde  $S$  é a declividade e  $n$  é o número de Manning.
- A fórmula de Chezy:  $\alpha = C S^{1/2}$  e  $m = 3/2$ , onde  $C$  é o parâmetro de rugosidade de Chezy.

Diversos autores fornecem os valores desses parâmetros. Para maiores informações consultar Lane et al. (1975), Lane e Woolhiser (1977), Wu et al. (1978), e Goodrich et al. (1988).

#### 5.2.4 Escoamento nos Canais

O CHDM utiliza-se de uma representação de elementos com uma seqüência de planos e canais onde os planos servem como servidores de fluxo lateral para os canais e servidor do principal do canal de primeira ordem. O fluxo nos canais também pode ser originário de um ou mais canais à montante. O modelo representa o fluxo não permanente e à superfície livre através da aproximação da onda cinemática para um fluxo não-permanente e gradualmente variado.

A equação da continuidade aplicada aos canais com fluxo lateral distribuído possui a seguinte forma:

- Equação da Continuidade:



$$\frac{\delta A}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = q_A \quad [7]$$

- Equação de Quantidade de Movimento:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) - q_A \frac{u}{A} \quad [8]$$

onde  $A(x,t)$  é a área da seção transversal do fluxo ( $m^2$ );  $q_A$  é a taxa de entrada de fluxo lateral por unidade de comprimento, ( $m/s$ ); e as outras variáveis já foram descritas.

A suposição da onda cinemática do fluxo pode ser pela vazão do canal com a área transversal do canal:

$$Q = \alpha R^{m-1} A \quad [9]$$

### 5.2.5 Condutos Circulares

Em uma área urbana, os sistemas de drenagem e esgotos são representados por condutos circulares. Esse dispositivo foi uma inovação em relação ao seu precursor, o modelo WESP. Para que o modelo possa apresentar resultados coerentes assume-se que o conduto é não forçado, isto é possui a superfície da água livre. Não se considera a entrada de água lateralmente de modo que a equação de continuidade permanece a mesma com  $q = 0$  (representando fluxo lateral nulo). A relação mais conhecida para dutos é a fórmula de Darcy-Weisbach:

$$S_f = \frac{f_d u^2}{4R 2g} \quad [10]$$

onde  $S_f$  é o ângulo de atrito,  $f_d$  é o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach, e  $u$  é a velocidade.

A vazão é calculada utilizando a seguinte equação:

$$Q = \frac{\alpha A^m}{p^{m-1}} \quad [11]$$

onde  $p$  é o perímetro molhado,  $\alpha = [8gS/f_d]^{1/2}$ ,  $A$  é a área molhada;  $m = 3/2$ .

### 5.2.6 Erosão e Transporte de Sedimento

O CHDM pode simular o movimento das gotas de chuva e das partículas de solo que são movimentadas devido à erosão. No escoamento superficial em planos e canais o modelo trabalha com os fatores de desagregação, transporte e deposição dos sedimentos separadamente.

Tanto nos planos como nos canais a equação usada para descrever a dinâmica dos sedimentos é a equação do balanço de massa citada por Bennett (1974) e Foster (1982):

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_s A) + \frac{\partial}{\partial x}(C_s Q) = e(x,t) + q_s(x,t) \quad [12]$$

onde  $C_s$  é a concentração dos sedimentos ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $A$  é a área da seção transversal do fluxo ( $\text{m}^2$ ),  $e(x,t)$  é o fluxo de sedimento no escoamento ( $\text{kg}/\text{m}/\text{s}$ ), e  $q_s$  é a taxa de entrada de sedimento pelo fluxo lateral (canais) ( $\text{kg}/\text{m}/\text{s}$ ).

### 5.2.7 Erosão nos planos

Assume-se que  $e(x,t)$  é composto de duas fontes principais: a desagregação da partícula de solo por impacto da chuva na terra ( $d_i$ ), e o desprendimento devido ao fluxo superficial( $d_f$ ):

$$e = d_i + d_f \quad [13]$$

Baseando-se em uma evidência experimental limitada, Meyer e Wischmeier (1969), apresentaram a relação em que a desagregação devido ao impacto da chuva pode ser aproximado como uma função do quadrado da taxa de queda das gotas. Porém Lopes (1987) avaliou que esta relação poderia conduzir a concentrações fisicamente irreais e apresentou o que acredita ser uma relação mais plausível:

$$d_i = c_f e^{-c_h h} i r \quad q > 0 \quad [14]$$

onde  $c_f$  e  $c_h$  são constantes. Estes parâmetros são importantes no controle da taxa de produção e transporte das partículas desagregadas devido a energia da chuva.

O parâmetro  $c_h$  controla o efeito da profundidade da água na superfície sobre a desagregação devido ao impacto das gotas de chuva. A desagregação de sedimentos devido ao fluxo superficial é estimada como sendo uma função linearmente dependente da diferença entre a concentração de equilíbrio e a concentração no instante considerado:

$$d_f = c_g (C_{mx} - C_s) A \quad [15]$$

onde  $C_{mx}$  é a concentração de sedimentos no estado de equilíbrio da capacidade de transporte,  $C_s = C(x,t)$  é a concentração real de sedimento no local, e  $c_g$  é o coeficiente da taxa de transferência (1/s).

Na verdade o parâmetro ( $c_g$ ) tem duas interpretações: ele representa a erodibilidade quando  $C_{mx}$  é maior que  $C_s$ . Alternativamente,  $c_g$  é uma função da velocidade de queda relativa das partículas de tamanho médio quando está ocorrendo a deposição ( $C_s > C_{mx}$ ).

$$v_s^2 = \frac{4 g(S_s - 1)d}{3 C_D} \quad [16]$$

onde  $S_s$  = gravidade específica da partícula,  $C_D$  é o coeficiente de arrasto e  $d$  é o diâmetro da partícula, que pode ser comparada a uma esfera [L]. O coeficiente de arrasto é uma função do número de Reynolds:

$$C_D = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_n}} + 0.34 \quad [17]$$

onde  $R_n$  é o número de Reynolds da partícula:

$$R_n = v_s d / \nu \quad [18]$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática da água [L<sup>2</sup>/T]. Para encontrar-se a velocidade da partícula deve-se resolver as equações [16], [17], e [18].

O parâmetro  $c_g$  (na deposição) na equação [15] é:

$$c_g(\text{deposição}) = \frac{v_s}{h_D} \left[ 1 - \frac{C_{mx}}{C_s} \right] \quad [19]$$

onde  $h_D$  = é a profundidade hidráulica [L]. Em termos físicos essa equação afirma que as partículas em excesso acima do valor de  $C_{mx}$  serão removidas à taxa da velocidade de deposição..

#### 5.2.7.1 - Erosão nos Canais

No fluxo de canal, a desagregação devido ao impacto da chuva (di) é abandonado, e o termo  $q_s(x,t)$  fica representando pela entrada lateral de sedimento. O restante da abordagem é bastante similar a da erosão em planos.

### 5.2.8 Equações de Transporte de Sedimento

Foram propostas muitas equações de transporte de sedimento capacidade equações na literatura, mas a maioria foi desenvolvida e testada para condições de relativa baixa natureza real. Na ausência de uma relação que defina com clareza a capacidade de transporte de sedimento o CHDM provê ao usuário uma escolha entre seis relações de transporte de sedimento: Meyer e Wischmeier (1969), o poder de fluxo de unidade de Yang (Yang, 1973), a relação de Bagnold (Kilinc e Richardson, 1973), Ackers e White (1973), a relação de transporte de Yalin (Yalin, 1963), Engelund e Hansen (1967)

A maioria destas relações foram desenvolvidas e validadas, baseadas em dados para fluxo de partículas não coesivas em pequenos canais de laboratórios ou canais naturais. Não obstante, algumas destas relações foram aplicáveis a erosão de planos (Foster 1982; Lopes 1987).

Na tabela 3 apresentam-se as variáveis utilizadas pelo CHDM, em que se especifica suas unidades e com que fator ela se relaciona:

**Tabela 3-** Relação dos parâmetros utilizados no modelo CHDM

Característica da Bacia	Comprimento do Plano ou Canal (LENGHT)	Ft ou m
	Largura do Plano (WIDTH)	Ft ou m
	Rugosidade Superficial (R1)	Ft ou m
	Declividade (SLOPE)	(%)
	Largura do Fundo do Canal (BW)	ft ou m
	Comprimento Característico (CLEN)	ft ou m
	Declividade das Laterais do Canal (ZR e ZL)	
	Diâmetro do Elemento Conduto (DIAM)	ft ou m
Solo	Condutividade Hidráulica Saturada (Ks)	Mm/h
	Tensão Capilar Efetiva (G)	Mm
	Porosidade (POR)	

	Saturação Inicial Relativa (SI) Saturação máxima relativa (SMAX) Conteúdo volumétrico de Rocha no Solo (ROCK) Fator de Recessão da Infiltração (RECS)	
Cobertura Vegetal	Profundidade de Intercepção (DINTR)	Mm
Sedimentos	Diâmetro Efetivo das Partículas (D50) Densidade dos Sedimentos (RHOS)	Ft ou $\mu\text{m}$
Erosão	Parâmetro de Erosão por Impacto das gotas (Cf) Parâmetro de Erosão pelo Cisalhamento (Cg) Parâmetro de amortização do impacto devido a Lâmina superficial (CH) Parâmetro da Equação de Bagnold (CO) Parâmetro da Equação da Força Trativa (CS) Proporção da Área da Superfície Pavimentada (PAVE) Desvio Padrão das partículas (SIGMAS)	
Chuva	Número de Elementos na Bacia (NELE) Unidade de Tempo (NTIME) Unidade de Total Precipitado (NUNITS) Número de Pluviômetros (NGAGES) Número máximo de Pares Tempo-Precipitação Acumulada (MAXND)	Min ou s Ft ou m
Sistema	Unidade para os dados de entrada e saída (NUNITS) Lei de Resistência (Manning ou Chezy) Opção de Impressão das Informações de Erosão (NEROS) Duração da Simulação (TFIN) Incremento de Tempo a ser Utilizado no Cálculo (DELT) Temperatura da Água (TEMP) Unidade de Tempo para os dados de Saída (NTIME) Número de Elementos - Canal ou Plano	Min Min Min ou s

### 5.3 O CHDM 2001

Com a atualização do modelo CHDM, lançada em janeiro de 2001, problemas relacionados à simulação da erosão na versão mais recente do WESP, tem perspectivas de serem solucionados.

### 5.3.1 Parâmetros de Infiltração

O componente do modelo de infiltração do CHDM necessita do conhecimento da saturação relativa inicial ( $S_i$ ) e dois parâmetros: potencial mátrico ( $G$ ) e a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ). Além disso, a saturação relativa máxima ( $S_{máx}$ ) pode ser estimada através da textura do solo. O CHDM usa os valores de saturação relativa, que são indicam a quantidade de água relativa à porosidade, em vez de valores absolutos. Por exemplo, um valor inicial de quantidade de água ( $\theta_i$ ) de 0.2 para um solo com uma porosidade de 0.4 daria uma saturação inicial  $S_i=0.2/0.4 = 0.5$ . Esse valor depende das chuvas anteriores ao evento estudado e às condições de evaporação do ambiente.

Os Parâmetros de infiltração podem ser estimados de diversas maneiras: dados obtidos por infiltrômetros podem ser analisados para obterem-se valores coerentes; ou eventos podem ser estudados para identificar valores aceitáveis desse parâmetros utilizando-se modelos como o CHDM. Esse processo é bastante difícil, pois as medições podem estar deficitárias e os parâmetros  $G$  e  $K_s$  apresentam interações em termos da lâmina total de um evento.

Os parâmetros podem também ser obtidos pelas características hidráulicas do solo insaturado, porém esses dados normalmente não estão disponíveis. Se a textura do solo é conhecida os parâmetros podem ser estimados por tabelas.

### 5.3.2 Parâmetros de transporte de sedimentos

#### 5.3.2.1 Parâmetros caracterizados pelo impacto de chuva

Parâmetros como coeficientes de erodibilidade por impacto de gotas de chuva ( $c_f$ ) e de empoçamento ( $c_h$ ) são importantes no controle da taxa em que a chuva causa o transporte de sedimentos soltos na superfície. Normalmente, a taxa de produção de sedimentos é limitada por esses parâmetros mais do que pela própria capacidade de

transporte da lâmina d'água. Porém, com uma lâmina corrente e uma taxa de erosão maior que uma taxa de deposição, os sedimentos serão transportados para fora da área em estudo.

O valor de  $c_f$  é, claramente, maior para solos não-coesivos. Em unidades inglesas (pés e segundos) seu valor é obtido pela seguinte equação:

$$c_f = 422 K_{usle} (\phi_r) \quad [20]$$

Os valores para a o fator erodibilidade do solo ( $K_{usle}$ ) estão na ordem de 0.1 e 0.5, sendo que as unidades métricas e inglesas para ele são iguais. O fator  $\phi_r$  representa as reduções devido à vegetação, à superfície do solo e outros fatores que diminuem a influência devido ao impacto das gotas. O seu valor pode ser encontrado na literatura especializada como em Foster (1983), porém fica a julgamento do usuário correspondê-lo às condições da região.

O parâmetro  $c_h$  controla o efeito da profundidade da água empoçada no erosão pelas gotas de chuva. Depois que a água empoça a erosão devido a esse fator diminui consideravelmente.

### 5.3.2.2 Parâmetro de erosão devido à lâmina d'água

Esse parâmetro ( $c_g$ ) representa a taxa relativa de erosão devido à lâmina d'água quando as condições hidráulicas da área indicam uma capacidade de transposição viável. Esse parâmetro é maior para solos não-coesivos. Foster e Smith (1984) estimaram o  $c_g$  sendo relacionado à  $K_{usle}$  e à fração de argila ( $f_d$ ) da seguinte maneira:

$$c_g = 5.6 K_{usle} \phi_r / a_T \quad [21]$$

$$\text{com } a_T = 188 - 468 f_{cl} + 907 f_{cl}^2; \quad f_{cl} < 0.22; \quad [22]$$

$$\text{ou } a_T = 130; \quad f_{cl} > 0.22 \quad [23]$$



Esse conjunto de equações estimam valores para os valores de  $c_g$  da ordem que varia entre 0.001 e 0.02.

### 5.3.2.3 Tamanho dos sedimentos

É essencial que o usuário entenda a significância do diâmetro efetivo das partículas ( $D_{50}$ ) para a simulação com o CHDM. Ele representa o valor médio do diâmetro das partículas da região, onde os valores de transporte e deposição são bastante sensíveis a esse fator. Ele também pode representar o valor médio das partículas erodidas naquele elemento. Sedimentos transportados de um elemento anterior são considerados no elemento estudado. Portanto a simulação no CHDM exige que os elementos não tenham uma variação exagerada entre os diâmetros dos elementos.

### 5.3.3 Calibração dos Parâmetros para as parcelas 1 e 4

Os parâmetros calibrados para as parcelas 1 e 4 foram os de infiltração (potencial mátrico, porosidade, saturação máxima e saturação inicial) e de erosão (coeficiente de erodibilidade por impacto de gotas, empoçamento, e fator de transporte-deposição).

Primeiramente, procurou-se verificar a consistência e dos dados a serem utilizados, totalizando 59 eventos; então calibrou-se os parâmetros de infiltração que determinariam a lâmina calculada pelo programa. Entre os parâmetros citados o de saturação inicial seria o único que, teoricamente, dependeria das condições de cada evento. Porém para se ter os valores dos outros parâmetros, que dependem das condições da região é necessária a calibração de diversos eventos para se obter os seus valores médios.

Então, a priori, os parâmetros de potencial mátrico, saturação máxima, e porosidade tiveram os valores iniciais de 30 mm, 90% e 48%, respectivamente. A partir daí começou-se o procedimento da calibração propriamente dita: o potencial mátrico, por ser bastante sensível, é o primeiro a ser calibrado, em seguida a porosidade e por fim a saturação inicial. A saturação final, que varia na região entre 85 e 95%, mostrou-se eficiente com o valor inicial adotado de 90% e raramente foi alterado.

Para os parâmetros de erosão alterou-se primeiro o valor do coeficiente de erodibilidade devido ao empoçamento (mais sensível), seguido pelo coeficiente devido aos

impactos da gota de chuva. O coeficiente da erosão de erosão e deposição, por se mostrar bastante insensível, foi fixado em 0.001/ s.

Tendo em vista a inviabilidade da calibração simultânea de tantos parâmetros, buscou-se na literatura especializada valores condizentes com a realidade da localidade de Sumé. Então, passou-se a adotar, através do manual da versão original do CHDM, valores para a porosidade (39,8%), Saturação Final (83%), Potencial Mátrico (263mm) e Condutividade Hidráulica Saturada (4,3 mm/h).

No entanto, devido aos estudos na localidade, pôde-se constatar que a condutividade hidráulica saturada deveria permanecer com o já adotado valor de 5mm/h e a saturação final permaneceria com 90%. Porém o valor do Potencial Mátrico não se mostrou confiável passando-se este a ser o valor a ser calibrado. Diversos valores foram testados, porém quatro foram mais intensamente avaliados e colocados à prova com os dados da parcela 4: 263mm, 200mm, 100mm e 160mm.

Por fim, organizou-se o banco de dados com os arquivos de chuva e de geometria de elementos para o CHDM 2001, que foi sendo elaborado ao longo do período de estágio.

## 6 Resultados

Com as atividades realizadas, descritas na seção 5.3.3, obteve-se resultados que podem-se observados nos Anexo I e II, nas Tabelas de 1 a 8 e nas Figuras de 1 a 4.

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos pela calibração dos parâmetros de infiltração e as lâminas obtidas para a parcela 4 com o CHDM 2001. Observa-se na Tabela 2 os resultados obtidos para a calibração dos parâmetros de erosão da parcela 4 para os eventos bem-sucedidos na simulação. Igualmente, temos para as tabelas 3 e 4 os resultados análogos das tabelas 1 e 2, respectivamente, para a parcela 1.

Por último, as tabelas, 5, 6, 7 e 8 apresentam os resultados obtidos para a calibração da lâmina na parcela 4 com os valores de potencial mátrico, respectivamente, de 263mm, 200mm, 100mm e 160mm.

No anexo II encontram-se as Figuras 1 a 4. A Figura 1 mostra as comparações entre a lâmina observada e a calculada pelo CHDM 2001. A Figura 2 mostra o mesmo para a erosão observada e as poucas calculadas pelo mesmo programa.

Procurando-se provar a ausência de uma relação entre a saturação inicial e lâmina caculada, obteve-se o gráfico desta relação na Figura 3.

## 7 Considerações Finais

Como as parcelas 1 e 4 têm o mesmo tratamento superficial (desmatado), mesmo tipo de solo (bruno não cálcico vértico) podemos relacionar a influência da mudança de declividade e do tamanho do experimento sobre a produção de água e sedimento e estudar a influência do desmatamento sobre o comportamento da erosão.

A chegada do modelo CHDM 2001, assim como em outros programas, determinou a necessidade do processo de calibração. O potencial mátrico calibrado indicou um valor médio de 47,72 mm. A saturação máxima ficou em 90%. A porosidade resultou em uma média de 45,63%. Os valores de lâmina observada e calculada, e de erosão observada e calculada (para eventos selecionados) foram bastante aceitáveis, quando comparados com a linha de valores iguais (Figuras 1 e 2). Figura 3 deixa claro que não houve a indução de se aumentar ou diminuir em demasia o valor da saturação inicial para se atingir determinado valor de lâmina. A equação apresentada na Figura 4 não indica nenhum estudo ou análise mais aprofundada da relação entre o potencial mátrico e a saturação inicial: ela apenas é um resultado do número limitado de simulações realizadas neste programa.

Ao longo deste relatório ficou claro que as simulações de erosão do CHDM 2001 foram mal-sucedidas. Porém, como explicado na seção 5.3.2.3, esse fato pode ser explicado pela utilização do valor de tamanho dos sedimentos médio da parcela. Esse valor corresponde a 0.730 mm para a parcela 4. Para a solução deste problema aconselha-se a utilização do tamanho médio dos sedimentos que foram transportados pela lâmina d'água. No entanto, esse valor não foi avaliado na época da pesquisa em campo de forma que, provavelmente, terá que ser calibrado.

O que se pôde avaliar com a fixação de alguns dos parâmetros do CHDM 2001 (seção 5.3.3), foi que o valor de 42,77mm de potencial mátrico não poderia estar fornecendo um valor real de saturação inicial do solo. Com a fixação dos seguintes valores: porosidade: 39,8%, saturação máxima: 90%; condutividade hidráulica saturada: 5 mm/h;

teve-se a possibilidade de se avaliar o valor mais aceitável do potencial mátrico que, por fim, será adotado para a região o valor de **160mm** que indicou os valores de saturação inicial com a menor incidência de problemas no processo de simulação como se observa no gráfico 1 em anexo.

]

## 8 Referências Bibliográficas

- Aragão, Ricardo de (2000), Estimativa dos Parâmetros do Modelo Distribuído WESP com os Dados da Bacia Experimental de Sumé – PB.
- Bennett, J. P. (1974) Concepts of mathematical modeling of sediment yield. *Water Resources Research*, 10(3): 485-492.
- Beven, K. (1989). Changing Ideas in Hydrology - The Case of Physically Based Models. *J. Hydrol.*, 105: 157-172.
- Cadier, E.; Freitas, B. J. de & Leprun J. C. (1983) Bacia Experimental de Sumé-PB; Instalação e primeiros resultados. In: Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Blumenau, ABRH. Vol. 1, p. 69-90.
- Cadier, E.; Lanna, A. E.; Menezes, M. & Catnpello, M. S.. (1987). Avaliação dos estudos referentes aos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste Brasileiro. Anais do VII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Salvador, ABRH. Vol. 2, p. 225-239.
- Figueiredo, E. E. (1998) Estimativa de parâmetros físicos do solo da bacia representativa de Sumé com base na textura, In: Anais IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Campina Grande, Paraíba, ABRH, Anais em CDROM.
- Foster, G. R. (1982) Modeling the erosion process. In: Haan, C. T. ; Johnson, H. P. & Brakensiek, D. L., Ed. *Hydrologic modeling of small watersheds*, St. Joseph, American Society Agricultural Engineers, p. 297-380.
- Galvão, C. de O . (1990). Modelagem do escoamento superficial e da erosão do solo em microbacias. Campina Grande. 185p. Dissertação de Mestrado.
- Green, W. H. & Ampt, G. A (1911) Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal Agr. Sci.*, 4(1) : 1-24. Apud Mein & Larson (1 973).
- Leprun, J. C. (1981) A erosão, a conservação e manejo do solo no Nordeste Brasileiro; balanço, diagnóstico e novas linhas de pesquisa. Recife, SUDENE/ORSTOM, 107 p.

- Liong, S. Y.; Selvalingam, S. & Brady, D. K. (1989) Roughness values. For overland flow in sub-catchments. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 115(2) : 203-214. Apud Galvão (1990).
- Lopes, V. L. (1995) CHDM: Catchment Hydrology Distributed Model. In: Proceedings of the ASCE Watershed Management Symposium, ASCE, San Antonio, Texas, pp.144-154.
- Lopes, V. L. (1987) A numerical model of watershed erosion and sediment yield. Tucson, 148 p. PHD. Dissertation, University of Arizona.
- Lopes, V. L. & Lane, L. J. (1987) Um modelo computacional de simulação hidrológica. In: Anais do VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Salvador, ABRH, Vol. 2, p. 481-494.
- Lopes, V. L.; Srinivasan, V. L. (1981) Erosão superficial e produção de sedimentos pelas chuvas: o estado de conhecimento e perspectivas. In: Anais do IV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Fortaleza-CE.
- Meyer L. D. and Wischmeyer. (1969) Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *TRANSACTIONS of the ASAE* 12(6):754-758, 762. Apud Foster (1982).
- Santos, C. A. G.. (1994). Runoff-erosion process modeling and determination of model parameters. Ehime, 103p. Dissertation, Ehime University.
- Srinivasan. V. S. & Galvão, C. de O. (1990) Previsão do escoamento superficial e da erosão do solo através do modelo hidrodinâmico WESP. In: Anais II Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Fortaleza, ABRH, Vol 1. p. 231-240.
- Streeter, V. L. & Wyle, E. B.. (1982) *Mecânica dos fluidos*. 7º ed. São Paulo, McGrawHill, 585p.
- Tucci, C. E. M. (1987) Modelos determinísticos. In: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos, Nobel/ABRH, p. 211-324.

## 9 Anexos

## Anexo I - Tabelas

Tabela 1 – Calibração dos parâmetros de infiltração para o CHDM 2001 na parcela 4

CH	DURAT(min)	DT(min)	Ks(mm/h)	Suction(mm)	Smáx(%)	Sinicial(%)	Por %	Lobservada	Lcalculada
004	200	0,08	5	100	90	5	50	11,003	11,071
016	900	0,5	5	34	90	10	48	12,225	12,205
019	300	0,1	5	400	95	5	55	1,340	1,336
045	500	0,2	5	13	90	60	35	3,530	3,539
047	500	0,2	5	6,5	90	60	35	6,230	6,233
051	600	0,5	5	5	90	85	30	4,430	4,432
052	1500	1	5	56,6	90	10	48	5,010	5,012
053	1500	1	5	82	90	10	48	8,156	8,180
055	600	0,5	5	39,1	90	10	48	6,160	6,161
057	500	0,5	5	30,7	90	10	48	2,860	2,860
058	300	0,1	5	1	90	89,9	30	6,114	0,000
059	400	0,1	5	30	85	15	40	20,907	20,941
060	1500	1	5	40	90	10	52	60,878	60,896
061	1000	1	5	35	90	10	48	10,818	10,844
063	1000	1	5	2	90	85	30	14,126	7,893
066	700	0,5	5	8	85	48,7	30	18,839	18,832
068	1500	1	5	50	90	48	48	27,392	19,613
071	300	0,1	5	24	90	22	48	11,200	11,258
072	150	0,08	5	100	90	5	45	3,670	3,670
075	600	0,5	5	32	90	10	48	2,430	2,413
078	1500	1	5	16290	90	10	48	1,610	1,611
106	900	0,5	5	1300	90	6,5	48	7,830	7,848
108	900	1	5	25	90	38,6	48	5,050	5,049
110	400	0,5	5	70	90	8,38	48	7,181	7,181
111	500	0,5	5	22,5	90	30	48	20,450	20,447
114	600	0,5	5	20	90	35,3	43	1,949	1,949
116	500	0,5	5	58,9	90	10	50	52,100	52,097
117	1000	1	5	40	90	9,6	55	4,990	4,971
118	800	1	5	30	90	23,5	48	10,577	10,575
119	1000	1	5	47,6	90	10,5	48	11,620	11,643
120	1500	1,5	5	20	90	26	48	1,070	1,070
122	50	0,01	5	20	90	45	43	6,140	6,147
123	250	0,1	5	20	90	19,4	48	6,680	6,678
124	200	0,08	5	44	90	5	55	18,160	18,101
130	1500	1	5	120,7	90	12	48	14,290	14,290
132	400	0,5	5	10	90	49	30	12,710	12,712

136	600	0,5	5	20	90	48	25	14,790	14,795
137	150	0,1	5	20	90	11,5	48	3,150	3,151
139	1500	1	5	15	90	30,6	48	3,290	3,291
143	1200	1	5	46	90	13	46	4,343	4,373
144	100	5	5	46,7	90	5	55	2,841	2,835
146	300	0,5	5	20	90	16,7	48	1,344	1,344
150	1000	1	5	37,5	90	10	48	1,300	1,306
152	500	0,5	5	37,7	90	11,7	48	11,843	11,844
155	450	0,1	5	47	90	8	55	6,429	6,430
158	1200	1	5	10	90	25,1	48	5,974	5,961
159	600	0,5	5	10	90	42,3	48	1,203	1,204
162	300	0,5	5	142	90	10	48	5,695	5,665
173	200	0,1	5	30	90	40	35	21,676	21,632

Onde: DURAT – tempo de simulação  
DT- intervalo de tempo para a simulação  
Ks – Condutividade hidráulica saturada  
Suction – Potencial Mátrico  
Smáx – Saturação Máxima  
Sini – Saturação inicial do solo  
Por – Porosidade do solo

Tabela 2 – Calibração dos parâmetros de erosão (selecionados) para o CHDM 2001 na parcela 4

Chuva	DURAT(min)	DT(min)	CF	CH	CG	Eobservada	Ecalculada
004	200	0,08	100000000	360	0,001	20,444	20,161
019	300	0,1	300000000	298	0,001	0,720	0,720
059	400	0,1	2000000	0	9,001	119,796	0,860
060	1500	1	4000000000	21,9	0,001	95,436	95,496
066	700	0,5	379540000	100	0,001	141,000	141,005
072	150	0,08	67500000	300	0,001	13,170	13,130
106	900	0,5	200000000	379	0,001	14,451	14,466
122	50	0,01	500000000	282	0,001	2,813	2,817
124	200	0,08	450000000	138	0,001	8,185	8,143
173	200	0,1	5000000000	71	0,001	42,985	42,925

Onde: CF – coeficiente de erodibilidade por impacto de gotas de chuva ( $\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^4$ )  
CH – coeficiente de erodibilidade devido ao empoçamento (1/m)  
CG – coeficiente de erodibilidade por transporte e deposição (1/s)



Tabela 3 – Calibração dos parâmetros de infiltração para o CHDM 2001 na parcela 1

CH	DURAT(min)	DT(min)	Ks(mm/h)	Suction(mm)	Smáx(%)	Sinicial(%)	Por %	Lobs (mm)	Lcal (mm)
004	200	0,08	5	53	90	12	48	14,400	14,400
016	900	0,5	5	35	90	68,5	48	17,870	17,851
019	300	0,1	5	528,6	90	5	48	1,210	1,209
045	500	0,2	5	35	90	50,9	48	1,730	1,730
047	500	0,2	5	17	90	80,2	48	6,050	6,055
052	1500	1	5	75	90	11,63	48	3,640	3,640
053	1500	1	5	125	90	6,6	48	5,745	5,745
055	600	0,5	5	55	90	51,65	48	7,740	7,740
057	500	0,5	5	55	90	73,05	48	4,860	4,860
059	400	0,1	5	25	90	16	48	20,700	20,706
060	1500	1	5	130	90	7	48	52,500	52,516
061	1000	1	5	2	90	85	48	16,000	11,858
066	700	0,5	5	1	85	84,9	48	26,000	21,265
071	300	0,1	5	35	90	16,8	48	8,820	8,819
072	150	0,08	5	594,7	90	5	48	1,120	1,121
075	600	0,5	5	40	90	11,76	48	1,540	1,547
106	900	0,5	5	60,6	90	5	48	3,890	3,889
108	900	1	5	2	90	83	48	7,780	7,692
110	400	0,5	5	120	90	12,6	48	3,672	3,678
111	500	0,5	5	35	90	21,1	48	17,091	17,096
117	1000	1	5	30	90	57,7	48	7,750	7,750
124	200	0,08	5	125	90	6	48	13,580	13,592
144	100	5	5	53	90	5,4	48	2,588	2,586
150	1000	1	5	40	90	17,1	48	1,341	1,340
163	300	0,5	5	120	90	18,1	48	44,829	44,822
164	300	0,1	5	70	90	15,6	48	18,019	18,019
166	800	0,8	5	60	90	85	48	34,641	26,117
167	400	0,5	5	2	90	85	48	7,719	5,823
169	800	0,8	5	55	90	55	48	3,984	3,984
170	300	0,5	5	55	90	40,4	48	33,006	33,005
172	200	0,1	5	30	90	83,4	48	7,092	7,092
173	200	0,1	5	45	90	68,12	48	21,841	21,840
175	500	0,5	5	50	90	65,65	48	12,868	12,867

Onde: DURAT – tempo de simulação  
 DT- intervalo de tempo para a simulação  
 Ks – Condutividade hidráulica saturada  
 Suction – Potencial Mátrico  
 Smáx – Saturação Máxima  
 Sini – Saturação inicial do solo  
 Por – Porosidade do solo

Tabela 4 – Calibração dos parâmetros de erosão (selecionados) para o CHDM 2001 na parcela 1

Chuva	DURAT(min)	DT(min)	CF	CH	CG	Eobs (kg)	Ecal (kg)
004	200	0,08	100000	723,5	0,001	5,740	5,741
016	900	0,5	110000000	71	0,001	8,290	8,291
019	300	0,1	100000	630	0,001	1,170	1,170
045	500	0,2	990000000	159	0,001	6,220	6,221
047	500	0,2	900000000	23	0,001	19,780	19,064
059	400	0,1	500000000	131	0,001	43,344	43,355
060	1500	1	700000000	18	0,001	37,309	37,282
066	700	0,5	937000000	5	0,001	94,028	94,152
072	150	0,08	100000000	91,4	0,001	1,810	1,810
106	900	0,5	350000	250	0,001	1,870	1,834
117	1000	1	100000000	115	0,001	4,232	4,232
124	200	0,08	100000000	83	0,001	5,197	5,199

Onde: CF – coeficiente de erodibilidade por impacto de gotas de chuva ( $\text{kg.s/m}^4$ )

CH – coeficiente de erodibilidade devido ao empocamento (1/m)

CG – coeficiente de erodibilidade por transporte e deposição (1/s)

Tabela 5 – Resultados obtidos na simulação da lâmina para a parcela 4 com os seguintes valores: Intervalo de tempo: 0,5 min; condutividade hidráulica saturada: 5 mm/h; porosidade: 39,8%; saturação máxima: 90%; suction: 263 mm

CH	Duration	Lobs(mm)	Lcal(mm)	Si(%)	CH	Duration	Lobs(mm)	Lcal(mm)	Si(%)
004	135	11,003	11,006	49,50	119	695	11,620	11,622	72,75
016	495	12,225	12,221	77,70	120	745	1,070	1,071	84,04
019	175	1,340	1,414	0,00	122	55	6,140	6,140	86,29
036	1025	21,312	9,354	89,90	123	165	6,680	6,690	83,31
045	325	3,530	3,529	88,75	124	115	18,160	18,156	70,89
047	295	6,230	6,225	89,37	130	845	14,290	14,256	46,35
051	325	4,430	4,430	89,94	132	245	12,710	12,706	88,82
052	675	5,010	5,011	69,36	136	355	14,790	14,780	70,79
053	615	8,156	8,156	60,00	137	105	3,150	36,609	0,00
055	315	6,160	6,161	75,75	139	905	3,290	3,292	85,90
057	265	2,860	2,859	78,91	143	685	4,343	4,049	72,80
058	195	6,114	6,019	89,99	144	74	2,841	2,837	74,50
059	280	20,907	20,905	82,00	146	170	1,344	1,345	83,28
060	765	60,878	60,877	74,07	150	585	1,300	1,300	76,13
061	685	10,818	10,807	89,62	152	275	11,843	11,843	76,60
063	495	14,126	7,907	89,99	155	275	6,429	6,429	70,25
066	365	18,839	18,835	89,18	158	695	5,974	5,970	87,05
068	975	27,392	20,483	89,99	159	405	1,203	1,202	87,81
071	185	11,200	11,205	82,41	162	175	5,695	5,697	38,02
072	475	3,670	3,669	70,56	163	185	41,805	41,805	38,22
075	475	2,430	2,435	78,50	164	155	19,854	19,854	74,77
078	785	1,610	1,165	89,99	166	465	16,476	16,476	74,32
106	495	7,830	7,829	83,41	167	255	5,137	5,137	89,57
108	505	5,050	5,049	84,07	169	365	5,345	5,345	84,50
110	215	7,181	7,181	63,80	170	195	29,87	29,872	64,67
111	255	20,450	20,448	83,81	172	135	6,249	6,254	87,66
114	415	1,949	1,950	85,51	173	125	21,676	21,676	85,17
116	275	52,100	52,096	67,49	175	315	11,825	11,824	82,06
117	715	4,990	4,988	74,80	227	325	12,785	85,083	0,00
118	745	10,577	10,579	80,84					

Onde: Duration – tempo de simulação (min)

Sini – Saturação inicial do solo

Lobs – Lâmina Observada em campo

Lcal – Lâmina calculada pelo CHDM 2001

Tabela 6 – Resultados obtidos na simulação da lâmina para a parcela 4 com os seguintes valores: Intervalo de tempo: 0,5 min; condutividade hidráulica saturada: 5 mm/h; porosidade: 39,8%; saturação máxima: 90%; suction: 200 mm

CH	Duration	Lobs(mm)	Lcal (mm)	Si (%)	CH	Duration	Lobs mm)	Lcal (mm)	Si (%)
004	135	11,003	11,009	36,77	119	695	11,620	11,601	67,32
016	495	12,225	12,222	73,82	120	745	1,070	1,070	82,17
019	175	1,340	1,854	0,00	122	55	6,140	6,141	85,13
036	1025	21,312	9,592	89,99	123	165	6,680	6,683	81,26
045	325	3,530	3,530	88,36	124	115	18,160	18,162	65,00
047	295	6,230	6,235	89,18	130	845	14,290	14,341	32,90
051	325	4,430	4,427	89,92	132	245	12,710	12,709	88,46
052	675	5,010	5,010	62,85	136	355	14,790	14,792	64,98
053	615	8,156	8,156	50,54	137	105	3,150	38,799	0,00
055	315	6,160	6,160	71,25	139	905	3,290	3,289	84,60
057	265	2,860	2,860	75,42	143	685	4,343	4,359	66,96
058	195	6,114	6,032	89,99	144	74	2,841	2,841	70,30
059	280	20,907	20,907	79,55	146	170	1,344	1,344	72,36
060	765	60,878	60,879	69,06	150	585	1,300	1,299	71,94
061	685	10,818	10,828	89,51	152	275	11,843	11,841	72,00
063	495	14,126	7,915	89,99	155	275	6,429	6,429	64,02
066	365	18,839	18,833	88,92	158	695	5,974	5,974	86,18
068	975	27,392	20,463	89,99	159	405	1,203	1,202	87,12
071	185	11,200	11,200	81,58	162	175	5,695	5,693	21,81
072	475	3,670	3,670	65,68	163	185	41,805	41,805	21,97
075	475	2,430	2,419	74,99	164	155	19,854	19,854	70,04
078	785	1,610	1,172	89,99	166	465	16,476	16,488	69,37
106	495	7,830	7,829	81,36	167	255	5,137	5,140	89,44
108	505	5,050	5,051	82,21	169	365	5,345	5,347	82,84
110	215	7,181	7,182	55,55	170	195	29,87	29,870	56,68
111	255	20,450	20,448	81,86	172	135	6,249	6,080	86,79
114	415	1,949	1,949	84,09	173	125	21,676	21,674	83,69
116	275	52,100	52,098	60,36	175	315	11,825	11,823	79,59
117	715	4,990	4,989	70,50	227	325	12,785	85,754	0,00
118	745	10,577	10,577	77,95					

Onde: Duration – tempo de simulação (min)

Sini – Saturação inicial do solo

Lobs – Lâmina Observada em campo

Lcal – Lâmina calculada pelo CHDM 2001

Tabela 7 – Resultados obtidos na simulação da lâmina para a parcela 4 com os seguintes valores: Intervalo de tempo: 0,5 min; condutividade hidráulica saturada: 5 mm/h; porosidade: 39,8%; saturação máxima: 90%; suction: 100 mm

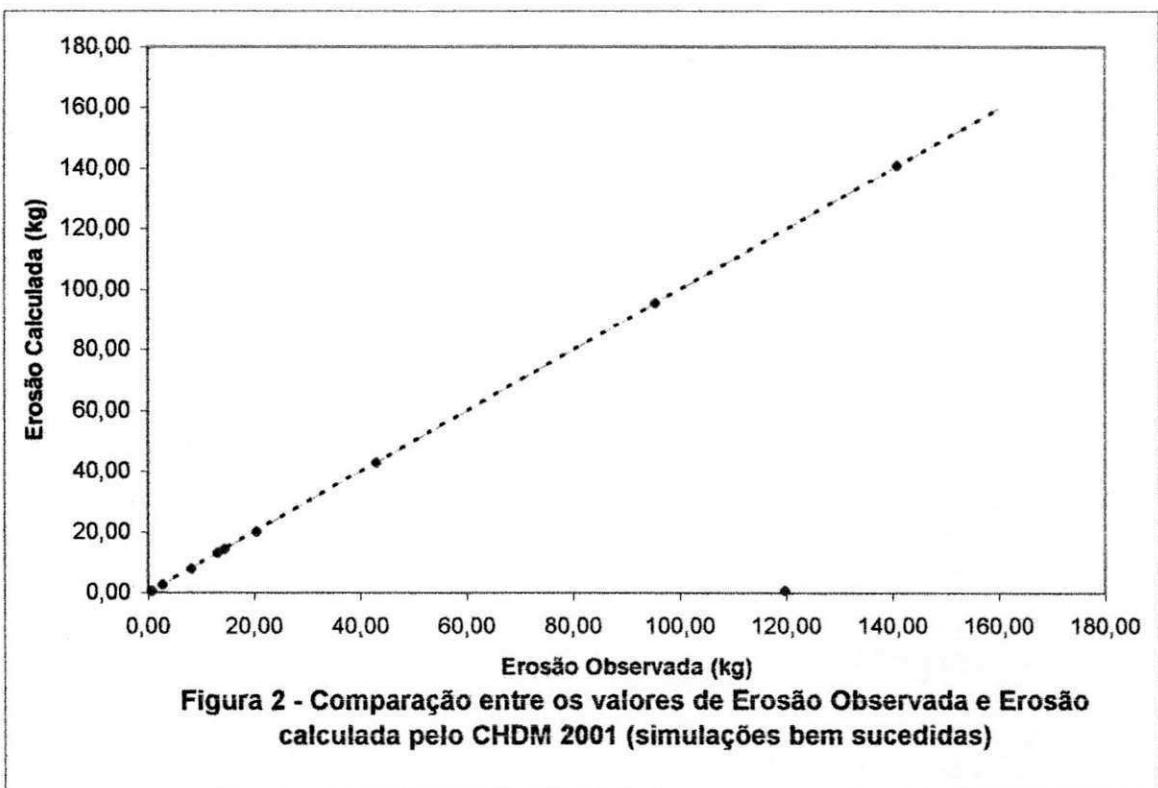
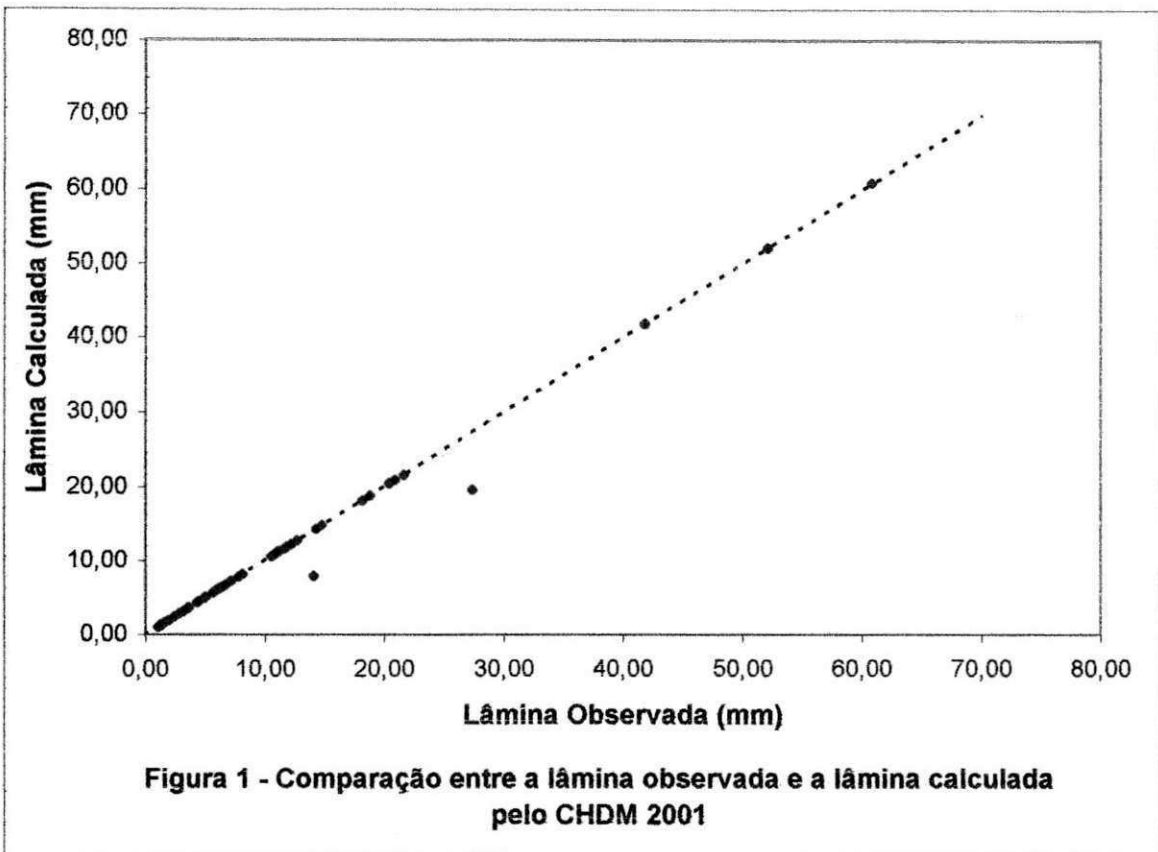
CH	Duration	Lobs(mm)	Lcal(mm)	Si(%)	CH	Duration	Lobs(mm)	Lcal(mm)	Si(%)
004	135	11,003	11,793	0,00	119	695	11,620	11,638	44,47
016	495	12,225	12,226	57,81	120	745	1,070	1,071	74,32
019	175	1,340	2,865	0,00	122	55	6,140	6,140	80,25
036	1025	21,312	9,563	89,99	123	165	6,680	6,686	72,40
045	325	3,530	3,530	86,79	124	115	18,160	18,161	40,11
047	295	6,230	6,230	88,38	130	845	14,290	16,084	0,00
051	325	4,430	4,425	89,85	132	245	12,710	12,712	86,91
052	675	5,010	5,010	35,88	136	355	14,790	14,786	39,31
053	615	8,156	8,156	11,08	137	105	3,150	43,750	0,00
055	315	6,160	6,160	52,50	139	905	3,290	3,291	79,21
057	265	2,860	2,860	60,84	143	685	4,343	4,388	43,94
058	195	6,114	6,055	89,99	144	74	2,841	2,839	50,37
059	280	20,907	20,909	69,04	146	170	1,344	1,344	72,32
060	765	60,878	60,878	48,11	150	585	1,300	1,301	53,83
061	685	10,818	10,812	89,01	152	275	11,843	11,841	54,00
063	495	14,126	7,927	89,99	155	275	6,429	6,429	38,04
066	365	18,839	18,840	87,85	158	695	5,974	5,973	82,19
068	975	27,392	20,521	89,99	159	405	1,203	1,202	84,24
071	185	11,200	11,203	70,06	162	175	5,695	8,697	0,00
072	475	3,670	3,670	38,90	163	185	41,805	46,321	0,00
075	475	2,430	2,434	59,99	164	155	19,854	19,854	49,94
078	785	1,610	1,186	89,99	166	465	16,476	16,475	48,78
106	495	7,830	7,429	72,73	167	255	5,137	5,137	88,87
108	505	5,050	5,049	74,41	169	365	5,345	5,345	75,59
110	215	7,181	7,181	21,09	170	195	29,870	29,870	23,36
111	255	20,450	20,451	73,73	172	135	6,249	6,237	83,56
114	415	1,949	1,949	78,18	173	125	21,676	21,676	77,30
116	275	52,100	52,099	30,79	175	315	11,825	11,826	69,13
117	715	4,990	4,990	51,20	227	325	12,785	88,331	0,00
118	745	10,577	10,577	65,90					

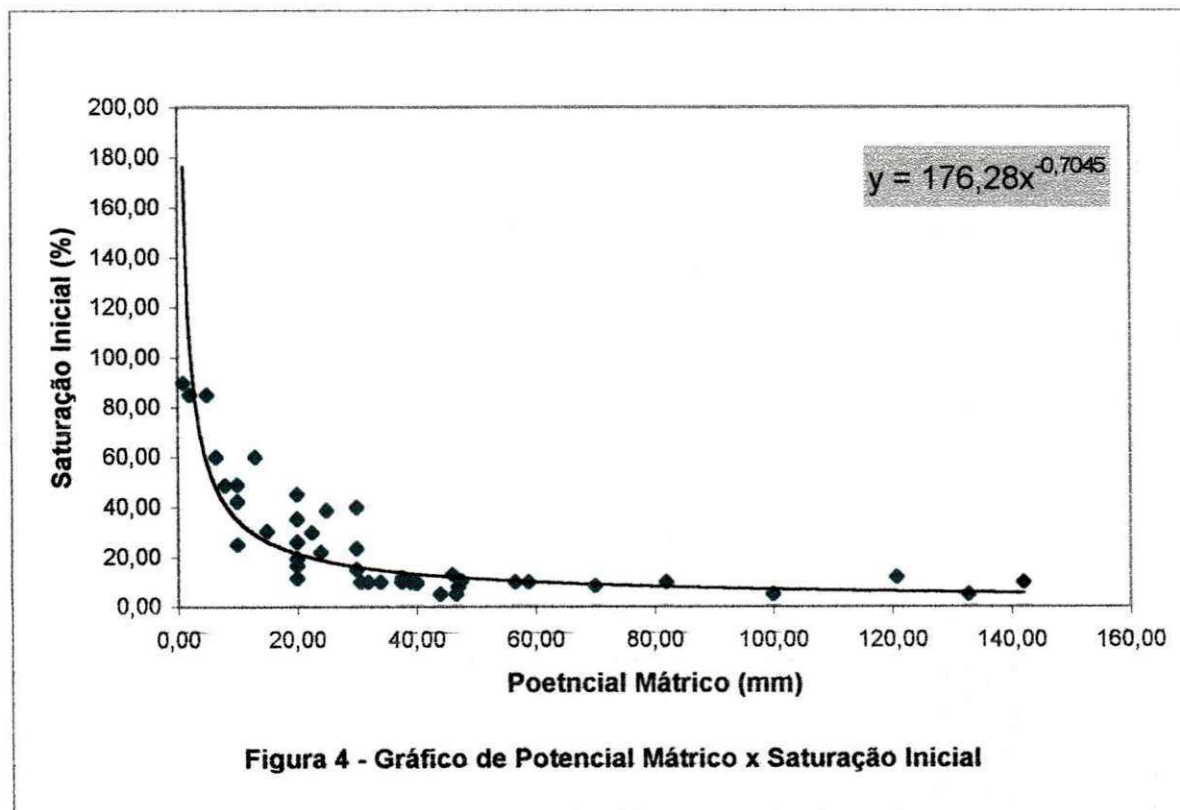
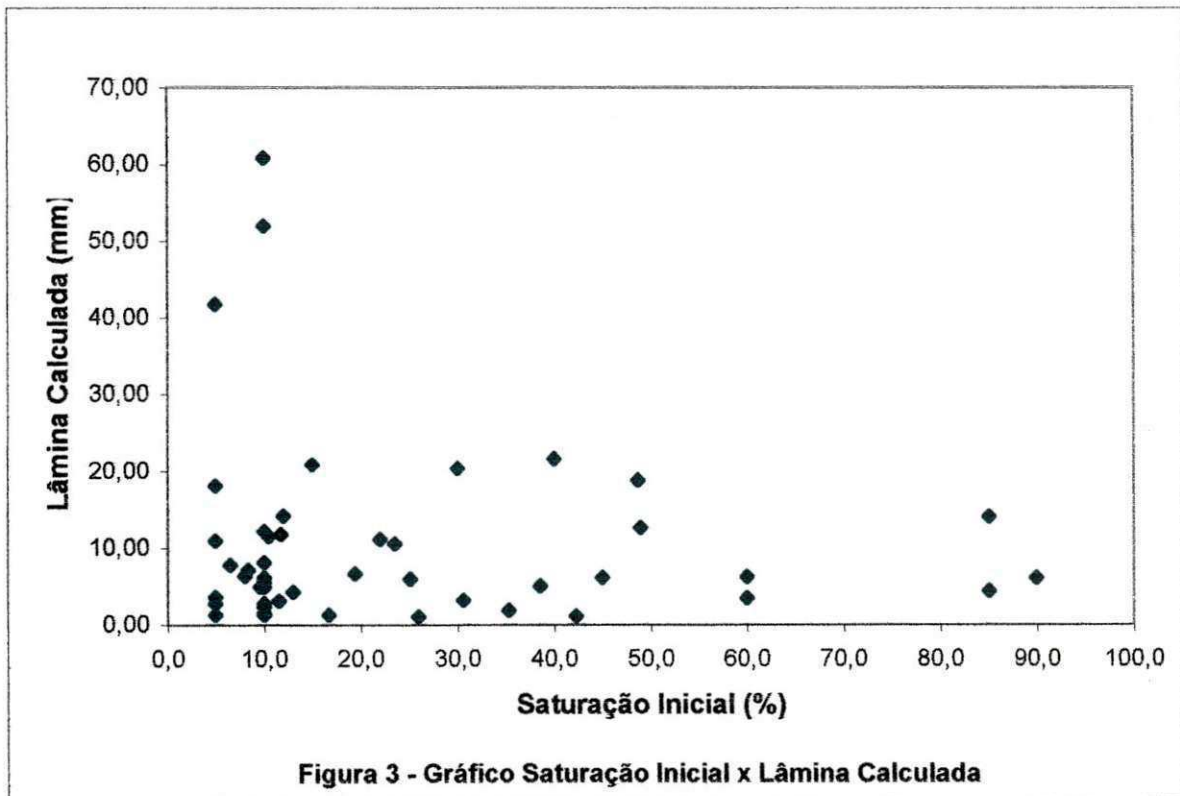
Onde: Duration – tempo de simulação (min)  
 Sini – Saturação inicial do solo  
 Lobs – Lâmina Observada em campo  
 Lcal – Lâmina calculada pelo CHDM 2001

Tabela 8 – Resultados obtidos na simulação da lâmina para a parcela 4 com os seguintes valores: Intervalo de tempo: 0,5 min; condutividade hidráulica saturada: 5 mm/h; porosidade: 39,8%; saturação máxima: 90%; suction: 160 mm

CH	Duration	Lobs(mm)	Lcal(mm)	Si (%)	CH	Duration	Lobs(mm)	Lcal(mm)	Si (%)
004	135	11,003	11,005	23,30	119	695	11,620	11,600	61,70
016	495	12,225	12,225	69,80	120	745	1,070	1,071	80,20
019	175	1,340	2,212	0,00	122	55	6,140	6,141	83,91
036	1025	21,312	9,600	89,99	123	165	6,680	6,680	79,07
045	325	3,530	3,530	87,95	124	115	18,160	18,159	58,59
047	295	6,230	6,229	88,97	130	845	14,290	14,259	15,26
051	325	4,430	4,428	89,90	132	245	12,710	12,173	88,07
052	675	5,010	5,010	56,06	136	355	14,790	14,804	58,37
053	615	8,156	8,154	40,56	137	105	3,150	40,550	0,00
055	315	6,160	6,160	66,57	139	905	3,290	3,289	83,25
057	265	2,860	2,860	71,78	143	685	4,343	4,341	63,42
058	195	6,114	6,041	89,99	144	74	2,841	2,844	64,50
059	280	20,907	20,905	76,85	146	170	1,344	1,344	78,95
060	765	60,878	60,878	63,82	150	585	1,300	1,301	67,21
061	685	10,818	10,812	89,38	152	275	11,843	11,844	67,83
063	495	14,126	7,920	89,99	155	275	6,429	6,430	57,54
066	365	18,839	18,833	88,65	158	695	5,974	5,978	85,15
068	975	27,392	20,507	89,99	159	405	1,203	1,204	86,41
071	185	11,200	11,202	77,54	162	175	5,695	5,695	4,57
072	475	3,670	3,669	59,03	163	185	41,805	41,804	4,88
075	475	2,430	2,436	71,00	164	155	19,854	19,854	64,96
078	785	1,610	1,176	89,99	166	465	16,476	16,472	64,18
106	495	7,830	7,830	79,17	167	255	5,137	5,133	89,29
108	505	5,050	5,050	80,26	169	365	5,345	5,342	80,98
110	215	7,181	7,181	46,93	170	195	29,870	29,870	48,35
111	255	20,450	20,451	79,83	172	135	6,249	6,151	85,85
114	415	1,949	1,950	82,62	173	125	21,676	21,677	82,07
116	275	52,100	52,102	52,98	175	315	11,825	11,825	76,95
117	715	4,990	4,988	65,02	227	325	12,785	86,767	0,00
118	745	10,577	10,578	74,94					

Onde: Duration – tempo de simulação (min)  
 Sini – Saturação inicial do solo  
 Lobs – Lâmina Observada em campo  
 Lcal – Lâmina calculada pelo CHDM 2001







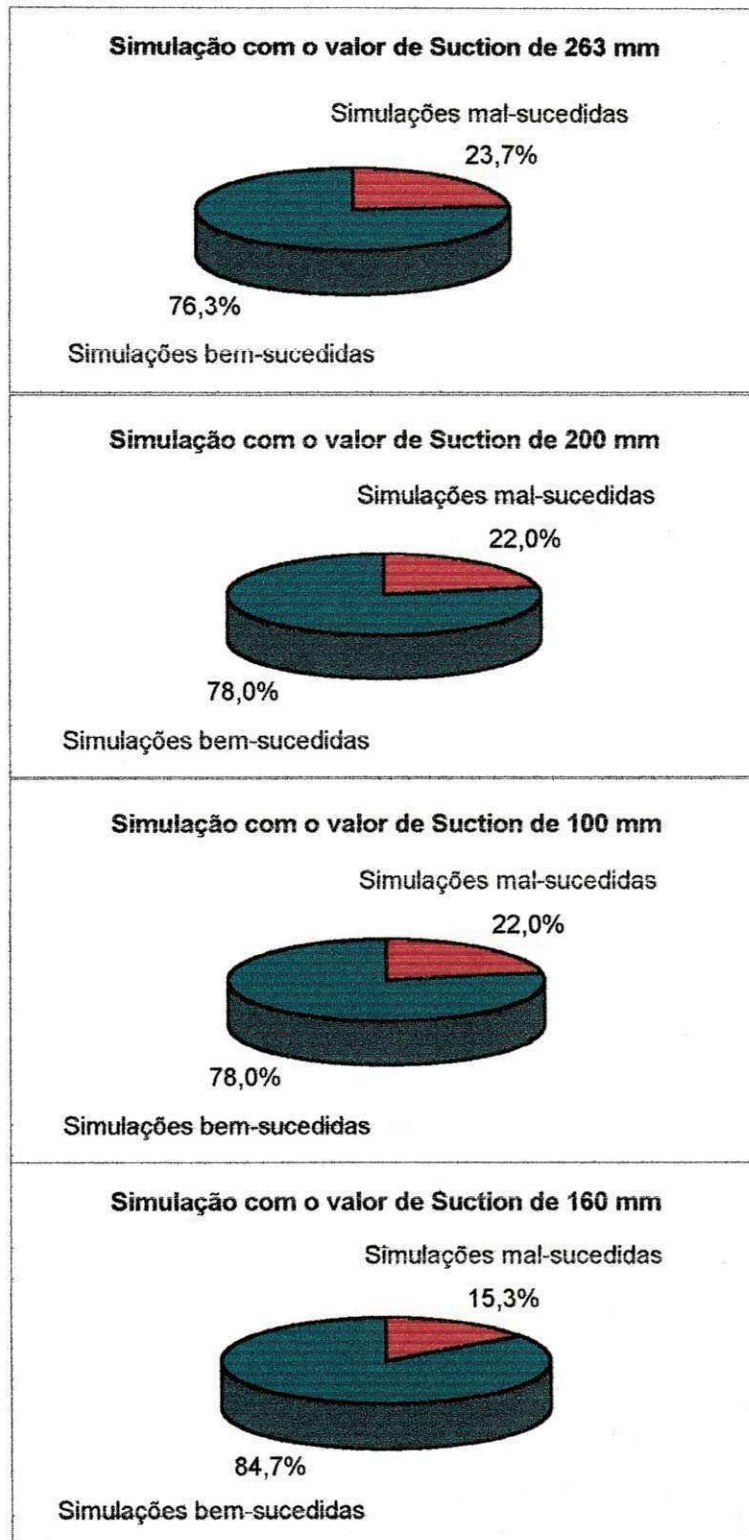


Gráfico 1 - Representação das Percentagens das Simulações



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
PRÓ-REITORIA PARA ASSUNTOS DO INTERIOR  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
COORDENAÇÃO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

### FICHA DE ESTÁGIO

NOME DO(A) ALUNO(A): <i>Fabio Faizi Rahmany Rabhani</i>	
NÚMERO DE MATRÍCULA: <i>29711135</i>	
NÚMERO DO PROCESSO: <i>002313</i>	
ÁREA DO ESTÁGIO (SUPERVISÃO): <i>Engenharia de Recursos Hídricos</i>	
ÓRGÃO CONCEDENTE: <i>DEC/UFPB</i>	
LOCAL DO ESTÁGIO: <i>Lab. de Hidráulica - DEC/CCI/UFPB, Campus II</i>	
INÍCIO DO ESTÁGIO: <i>16.03.2001</i>	TÉRMINO: <i>30.09.2001</i>
INÍCIO DA SUPERVISÃO: <i>16.03.2001</i>	TÉRMINO: <i>30.09.2001</i>
PROFESSOR(A) SUPERVISOR(A): <i>Vajapeyam S. Srinivasan</i>	
ORIENTADOR NO ÓRGÃO CONCEDENTE: <i>Vajapeyam S. Srinivasan</i>	
NÚMERO DE HORAS DE ESTÁGIO: <i>300</i>	Nº DE CRÉDITOS: <i>10</i>
CONCEITO: <i>Aprovado</i>	NOTA: <i>9,0</i>

OBSERVAÇÕES: *Os termos de estágio foram cumpridos satisfatoriamente. Alguns resultados esperados do modelo utilizado não se caracterizaram que mostra a necessidade de aperfeiçoar o modelo utilizado*

*Vajapeyam S. Srinivasan*  
SUPERVISOR