

DANILO PAULÚCIO DA SILVA

**MODELO DE DIMENSIONAMENTO DE BACIAS DE ACUMULAÇÃO PARA
ESTRADAS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S586m
2009

Silva, Danilo Paulúcio da, 1984-
Modelo de dimensionamento de bacias de acumulação para
estradas / Danilo Paulúcio da Silva. – Viçosa, MG, 2009.
xiii, 57f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Fernando Falco Pruski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 50-53.

1. Estrada de terra. 2. Erosão. 3. Precipitação (Meteorologia) -
Modelos matemáticos. 4. Escoamento superficial. 5. Modelos
matemáticos. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 625.73

DANILO PAULÚCIO DA SILVA

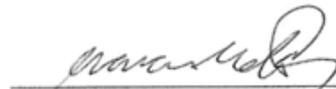
**MODELO DE DIMENSIONAMENTO DE BACIAS DE ACUMULAÇÃO PARA
ESTRADAS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

Aprovada em: 12 de fevereiro de 2009



Prof. José Márcio Alves da Silva
(Coorientador)



Prof. Márcio Mota Ramos
(Coorientador)



Prof. Carlos Alexandre B. de Carvalho



Prof. Carlos Cardoso Machado



Fernando Falco Pruski
(Orientador)

*“A mente que se abre a novas idéias jamais
retorna ao seu tamanho original.”*

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e oportunidade concedida.

Aos meus pais, Darci Carneiro e Neide Maria, por terem me ensinado o respeito, a educação, a honestidade e, a cima de tudo, por me amarem.

Aos meus irmãos, Darcila, Daiane, Daisa e Dailson, pelo apoio, incentivo e conselhos nas horas difíceis.

Ao professor Fernando Falco Pruski, por ter sido além de um grande orientador, um segundo pai.

Ao professor Márcio Mota Ramos e ao Dr. José Márcio Alves da Silva, pelos conselhos durante a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao programa CT-HIDRO do CNPq, pelo apoio financeiro.

Aos grandes amigos, André, Antônio, David, Eloy, Felipe, João Batista e Marcelo que me auxiliaram, aconselharam e ajudaram durante esta jornada.

Aos colegas da computação, em especial ao Denver, cuja dedicação e competência foram de grande importância para o êxito deste trabalho.

Também aos professores e funcionários do DEA que, além de me ajudar, também me ensinaram.

Enfim, a todos os amigos e colaboradores que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso deste trabalho.

BIOGRAFIA

DANILO PAULÚCIO DA SILVA, filho de Darci Carneiro da Silva e Neide Maria Paulúcio da Silva, nasceu no dia 29 de março de 1984, em Muniz Freire, Estado do Espírito Santo.

Em fevereiro de 1999, ingressou na Escola Agrotécnica Federal de Alegre-ES, onde obteve a formação de Técnico Agrícola com Habilitação em Pecuária em dezembro de 2001.

No primeiro semestre de 2002, ingressou na Universidade Federal do Espírito Santo, concluindo o curso de Agronomia em julho de 2006.

Em outubro de 2006, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da dissertação em fevereiro de 2009.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Estradas não pavimentadas e sua importância sócioeconômica.....	3
2.2. Erosão em estradas não pavimentadas	4
2.3. Controle da erosão em estradas não pavimentadas	5
2.4. Estruturas hidráulicas utilizadas para armazenamento do escoamento superficial provindo de estradas não pavimentadas	7
2.5. Modelagem hidrológica associada ao dimensionamento de bacias de acumulação em estradas não pavimentadas	9
2.6. Geradores de séries sintéticas de dados climáticos	11
3. MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1. Desenvolvimento do modelo	14
3.1.1. Obtenção da série sintética de dados de precipitação.....	16
3.1.2. Cálculo do volume escoado	17
3.1.3. Cálculo do volume armazenado	20
3.1.4. Cálculo do volume requerido para a bacia de acumulação	22
3.1.5. Software para a aplicação da metodologia.....	23
3.2. Avaliação do modelo.....	23
3.2.1. Análise de sensibilidade.....	23
3.2.2. Condições adotadas para a avaliação do modelo	25
3.3. Comparação dos valores obtidos pelo modelo desenvolvido com os obtidos pelo modelo desenvolvido por Griebeler et al. (2005)	25

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1. Análise de desempenho do modelo desenvolvido.....	26
4.1.1. Análise do modelo considerando diferentes períodos de retorno e taxas de infiltração estável	26
4.1.2. Análise do modelo com base na alteração da declividade do talude de jusante e da largura da bacia de acumulação	34
4.1.3. Análise do modelo considerando diferentes localidades	38
4.1.4. Análise comparativa dos índices de sensibilidade.....	39
4.2. Comparação do modelo desenvolvido com o modelo desenvolvido por Griebeler et al. (2005)	41
5. CONCLUSÕES	48
6. RECOMENDAÇÕES.....	49
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
APÊNDICES	54

LISTA DE SÍMBOLOS

a, b, c, K	= parâmetros da equação de chuvas intensas, adimensionais.
a', b', c', d'	= parâmetros da função dupla exponencial relativos ao evento de precipitação, adimensionais.
A_c	= Área de contribuição, m^2 .
D	= duração da precipitação, h.
H_i	= nível máximo atingido pelo volume armazenado na bacia de acumulação no dia i , m.
i^*	= intensidade instantânea padronizada de precipitação, adimensional.
i_i	= intensidade instantânea de precipitação, $mm\ h^{-1}$.
l_1	= menor valor de entrada do fator analisado.
l_2	= maior valor de entrada do fator analisado.
l_{12}	= média dos valores de entrada do fator analisado.
i_m	= intensidade máxima média de precipitação, $mm\ h^{-1}$.
i_{med}	= intensidade média de precipitação, $mm\ h^{-1}$.
K'	= fator de frequência, adimensional.
L_B	= largura da bacia de acumulação, m.
LES^*	= lâmina de escoamento padronizada, adimensional.
LES	= lâmina de escoamento superficial, mm.
P	= precipitação total, mm.
S	= sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada, adimensional.
s_1 e s_2	= declividade dos taludes da bacia de acumulação, $m\ m^{-1}$.
t^*	= intervalo de tempo, adimensional.
t	= duração da precipitação relativa à equação de intensidade, duração e frequência, min.
T	= período de retorno, anos.
t_f	= tempo padronizado de fim do escoamento, adimensional.

t_i	= tempo padronizado de início do escoamento, adimensional.
Tie_{bac}	= taxa de infiltração estável da água no solo do fundo da bacia de acumulação, $mm\ h^{-1}$.
Tie_{est}	= taxa de infiltração estável do leito da estrada, $mm\ h^{-1}$.
tp^*	= tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação, adimensional.
V_A	= volume armazenado na bacia de acumulação, m^3 .
V_R	= volume armazenado remanescente na bacia de acumulação, m^3 .
V_B	= volume requerido para a bacia de acumulação, m^3 .
V_{B1}	= valor de volume requerido para a bacia de acumulação para o menor valor de entrada do fator analisado, m^3 .
V_{B2}	= valor de requerido para a bacia de acumulação para o maior valor de entrada do fator analisado, m^3 .
V_{B12}	= média dos resultados obtidos com os valores de entrada, m^3 .
VES	= volume do escoamento superficial, m^3 .
VI	= volume infiltrado, m^3 .
V_{max}	= volume máximo armazenado na bacia durante o ano, m^3 .
\bar{V}_{max}	= média dos volumes máximos armazenados em cada ano da série, m^3 .
ΔH	= variação diária do nível da água na bacia, m.
Δt	= intervalo de tempo em que ocorre a infiltração da água no fundo da bacia durante o dia, h.
σ	= desvio padrão dos volumes máximos armazenados em cada ano da série, adimensional.

RESUMO

SILVA, Danilo Paulúcio da, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2009. **Modelo de dimensionamento de bacias de acumulação para estradas.** Orientador: Fernando Falco Pruski. Co-orientadores: Márcio Mota Ramos e José Márcio Alves da Silva.

As estradas não pavimentadas, além de exercerem um papel fundamental na economia brasileira, possuem uma atribuição de grande importância social, que é permitir o acesso da população rural às necessidades básicas da sociedade como saúde, educação, lazer e trabalho, que muitas das vezes estão disponíveis apenas nos centros urbanos. Tendo em vista que o principal causador da degradação das estradas é a erosão causada pela concentração de escoamento superficial ao longo destas, desenvolveu-se um modelo para a determinação do volume requerido para a bacia de acumulação destinada ao armazenamento do escoamento superficial provindo de estradas não pavimentadas. O modelo se baseou no princípio de que uma análise dia a dia do volume escoado em cada evento da série de precipitação é um critério mais coerente para o dimensionamento de bacias de acumulação, uma vez que é considerado o efeito acumulativo de precipitações que ocorrem de forma sucessiva na série. O modelo utiliza dados sintéticos de precipitação para a obtenção de uma série diária de volumes escoados, com a qual é realizado o balanço diário do volume armazenado na bacia. A partir da série de volumes armazenados é identificado o maior valor obtido em cada ano e, assim, é criada uma série anual de volumes máximos armazenados na bacia, à qual é aplicada a distribuição de Gumbel para a obtenção do volume requerido para a bacia de acumulação (V_B). De acordo com os resultados obtidos verificou-se que, para as menores Tie_{bac} , o tempo

necessário para que a água armazenada na bacia infiltre totalmente no solo é maior, desta forma mais acentuado é o efeito acumulativo dos eventos de precipitação e, conseqüentemente, maior o valor de V_B . Comparando os dados obtidos pelo modelo desenvolvido com os do modelo proposto por Griebeler et al. (2005) verificou-se que, para a Tie_{bac} de 2 mm h^{-1} , os valores de V_B obtidos pelo modelo desenvolvido foram sempre maiores do que os valores obtidos pelo modelo proposto por Griebeler et al. (2005) e que a diferença aumentou com o aumento do período de retorno (T). Observou-se ainda que, para os menores valores de Tie_{bac} , o aumento dos valores de V_B a partir do aumento de T foi, em geral, proporcionalmente maior para o modelo proposto por Griebeler et al. (2005) do que para o modelo desenvolvido.

ABSTRACT

SILVA, Danilo Paulúcio da, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2009. **Model of the accumulation basin dimensioning for roads.** Adviser: Fernando Falco Pruski. Co-advisers: Márcio Mota Ramos and José Márcio Alves da Silva.

Besides their fundamental role in Brazilian economy, the unpaved roads have a highly important social role, since they allow for the access of the rural population to their basic needs such as health, education, leisure and work, that frequently are available only in the urban centers. So, taking into account that the main cause of degradation in the roads is the erosion caused by the concentration of the runoff along them, a model was developed for determination of the volume required for the accumulation basin addressed to store the water from runoff of the unpaved roads. The model was based on the principle that a daily analysis of the volume flowed in each event of the precipitation series is a more coherent criterion for dimensioning the accumulation basins, since the accumulative effect from the precipitations successively occurring in the series is considered. The model uses the synthetic rainfall data to obtaining the daily series of the flowed volumes, whereas the daily balance of the volume stored in the basin is accomplished with this series. The highest value obtained in each year is identified from the series of the stored volumes. So, an annual series of the highest volumes stored in the basin is created. Then, the Gumbel distribution is applied to this series in order to obtaining the volume required for the accumulation basin (V_B). According to results, the following conclusions were drawn: for the lowest $T_{ie_{bac}}$ value, the time needed for the water stored in the basin to infiltrate totally into soil is longer, therefore the accumulative effect of the precipitation events are more accentuated

and, consequently, higher the V_B value will be. When comparing the data obtained by the developed model with those of the model proposed by Griebeler et al. (2005), it was verified that, for the Tie_{bac} equal to 2mm h^{-1} , the V_B values obtained by the developed model were always higher than those obtained by the model proposed by Griebeler et al. (2005), and an increased difference occurred with the increase in the return period (T). For the lowest values of Tie_{bac} , the increase in the V_B values from the increased T was, in general, proportionally higher for the model proposed by Griebeler et al. (2005) than for the developed model.

1. INTRODUÇÃO

As estradas não pavimentadas, também chamadas de estradas vicinais, estradas rurais ou estradas de terra, representam cerca de 87% dos 1.603.131 km que constituem a malha viária brasileira (DNIT, 2007a). Essas estradas são responsáveis pelo desenvolvimento das comunidades rurais, uma vez que permitem interligação entre propriedades e povoados vizinhos e, ainda, o acesso às vias principais ou à sede dos municípios onde estão disponíveis bens e serviços indispensáveis à população. Essas estradas também são de fundamental importância sob o ponto de vista econômico, uma vez que a produção de produtos primários de origem agrícola constitui-se na base da economia brasileira. De acordo com Thomaz (1984), estradas que apresentam problemas de trafegabilidade afetam diretamente o valor final dos produtos, interferindo também no lucro obtido bem como no preço dos produtos comercializados. Dados publicados pelo DNIT (2007b) mostram que cada R\$ 1,00 investido na melhoria das condições de tráfego das rodovias gera uma economia de R\$ 3,00 nos gastos operacionais dos veículos.

A erosão provocada pela água no leito e nas margens de estradas não pavimentadas é um dos principais fatores para sua degradação, sendo responsável por grande parte dos problemas ambientais advindos da erosão dos solos. Anjos Filho (1998) afirma que cerca de 50% das perdas de solo no estado de São Paulo são ocasionadas pela erosão em estradas. No setor florestal, Machado et al. (2003a) salientam que as estradas têm sido a principal causa da erosão e assoreamento dos cursos d'água em florestas plantadas.

No controle da erosão em estradas não pavimentadas é necessário atuar de maneira eficiente na origem do problema, que é o escoamento superficial. Este deve ser controlado de forma a não causar problemas para as estradas, bem como para as áreas adjacentes a esta. Portanto, é de grande importância que, na

implantação de práticas conservacionistas em estradas não pavimentadas seja considerada a implantação de estruturas hidráulicas capazes de reter o volume de escoamento superficial proveniente daquelas.

A implantação de bacias de acumulação destinadas à contenção do escoamento superficial proveniente das estradas consiste em uma alternativa de grande potencial de uso, principalmente, nas situações em que não há sistemas de terraceamento para os quais possa ser conduzido o escoamento superficial.

No dimensionamento de bacias de acumulação, a utilização de uma única chuva intensa associada a um período de retorno é o critério normalmente utilizado. Dentre os modelos que consideram a chuva crítica para o dimensionamento de bacia de acumulação se destaca o modelo desenvolvido por Griebeler et al. (2005). Este modelo considera fatores como as características da precipitação do local de interesse, a capacidade de infiltração da água no solo da estrada e a área de contribuição para a bacia.

No entanto, considerar apenas uma única chuva intensa nem sempre representa a condição mais crítica para o projeto da bacia, uma vez que, em condições reais, o efeito acumulativo de eventos de menores magnitudes que ocorram de forma sucessiva na série pode produzir uma condição mais crítica que aquela específica para o período de retorno considerado no projeto.

Tendo em vista a necessidade do desenvolvimento de metodologias para a implementação de técnicas mais confiáveis para o projeto de bacias de acumulação associadas a estradas e o grande potencial de uso de técnicas de modelagem para o alcance de um maior nível de eficiência no dimensionamento dessas estruturas, desenvolveu-se o presente trabalho, cujos objetivos foram:

- desenvolver um modelo para a determinação do volume requerido para bacias de acumulação instaladas em estradas não pavimentadas, a partir da consideração de uma série sintética de dados diários de precipitação;
- avaliar a sensibilidade do modelo às variáveis estudadas; e
- comparar a metodologia proposta com a metodologia desenvolvida por Griebeler et al. (2005).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Estradas não pavimentadas e sua importância sócioeconômica

As estradas não pavimentadas, também chamadas de estradas vicinais, estradas rurais, agrovias ou, estradas de terra, são vias caracterizadas pela ausência de revestimento, com pavimento constituído com materiais locais apenas conformados, ou por possuírem algum tipo de revestimento primário, ou seja, conformação do leito da estrada acompanhado por tratamentos físicos, químicos, compactação, mistura com outros materiais, e outros processos com finalidade de aumentar a sua estabilidade e capacidade de receber ou transmitir esforços (OLIVEIRA, 2005a).

O Brasil, assim como a maioria dos países de economia emergente, apresenta uma malha rodoviária composta predominantemente por estradas não pavimentadas. De acordo com os dados publicados pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes (DNIT, 2007a), dos 1.603.131 km de estradas que compõem a malha rodoviária brasileira, 87 % são compostos por estradas não pavimentadas. Além destas, existem ainda as estradas que são responsáveis pela interligação entre propriedades rurais e povoados vizinhos, as que permitem o acesso às vias principais ou à sede dos municípios e, ainda, aquelas destinadas unicamente à movimentação interna da propriedade, com a função de permitir o trânsito dos moradores, máquinas, equipamentos, e produtos agrícolas até as rodovias vicinais (PRUSKI, 2006).

No que diz respeito ao aspecto social da sua funcionalidade, variados benefícios são atribuídos às estradas não pavimentadas, sendo estas destacadas por diversos autores. Ariel e Gucinski (2000) salientam a importância dessas estradas no acesso das pessoas à educação, trabalho e contemplação da

natureza, características estas também salientadas por Oliveira (2005a), que acrescenta ainda, o fato de as rodovias também promoverem o acesso à saúde, lazer e ao comércio. Para Viviane et al. (2006), as estradas não pavimentadas são, na maioria das vezes, o único caminho das comunidades rurais na busca por serviços essenciais disponíveis apenas nos centros urbanos. Para Caixeta e Martins (1998), as estradas não pavimentadas possuem a função de permitir a mobilidade das pessoas, estimulando assim a disseminação de informações e idéias.

Grande parte da economia brasileira está baseada na produção e comercialização de produtos primários de origem agropecuária. O escoamento desses produtos depende da existência de estradas não pavimentadas em boas condições de trafegabilidade, uma vez que esse tipo de rodovia está presente na primeira fase do transporte, que é o caminho que vai da propriedade rural até os pontos de comercialização desses produtos. Nunes (2003) afirma que essas vias exercem a função de “alimentadoras”, ou seja, através delas é estabelecida a ligação entre as comunidades produtoras e as grandes rodovias pavimentadas, por onde circularão as mercadorias até o seu destino final.

Rodovias que apresentam problemas de trafegabilidade afetam diretamente o valor final dos produtos, interferindo também no lucro obtido bem como no preço dos produtos comercializados (THOMAZ, 1984). Dados publicados pelo DNIT (2007b) mostram que cada R\$ 1,00 investido na melhoria das condições de tráfego das rodovias gera uma economia de R\$ 3,00 nos gastos operacionais dos veículos.

No setor florestal, as estradas não pavimentadas também assumem papel estratégico, uma vez que o transporte da madeira é feito, principalmente, através de rodovias, podendo este representar até 50% do custo final da madeira, dependendo das condições das rodovias (MACHADO et al., 2003 b).

2.2. Erosão em estradas não pavimentadas

Um dos principais problemas relacionados às estradas não pavimentadas consiste na ocorrência de processos erosivos provocados pela água que cai no seu leito e nas regiões marginais a esta.

Em estradas não pavimentadas, a principal forma de ocorrência da erosão está associada à concentração do escoamento superficial, uma vez que praticamente toda a água precipitada é escoada devido à baixa capacidade de infiltração da água no leito da estrada, visto que para a construção das estradas são necessárias a eliminação da cobertura vegetal e a compactação do solo (PRUSKI, 2006).

O escoamento superficial, quando atinge determinada tensão cisalhante que supera a tensão crítica de cisalhamento do solo, passa a promover o desprendimento de partículas de solo, o que pode conduzir a processos erosivos intensos, principalmente, nos canais de escoamento. O problema torna-se mais acentuado em trechos com maior declive. Essa forma de erosão, quando não controlada devidamente, pode comprometer o tráfego na estrada (GRIEBELER, 2002).

Estradas em condições inadequadas podem iniciar ou agravar processos erosivos em áreas agrícolas, prejudicando a produtividade e, conseqüentemente, a lucratividade dos produtores rurais, além de afetarem a qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos (GRIEBELER, 2002). Viviane et al. (2006) acrescenta ainda que o processo erosivo em estradas traz consigo sérios problemas ambientais, tais como a poluição e assoreamento de mananciais.

Egan (1999) afirma que, em áreas florestais, a ocorrência de erosão hídrica está associada principalmente à construção de estradas. Antonangelo e Fenner (2005) e Grace III (2002) reiteram que, além do processo de degradação do leito das vias, a erosão em estradas florestais é, também, a principal causa do assoreamento dos cursos d'água nas florestas plantadas.

2.3. Controle da erosão em estradas não pavimentadas

A forma mais eficiente de controlar os prejuízos causados pela erosão em estradas não pavimentadas consiste na adoção de medidas que intervenham diretamente na causa do problema, ou seja, medidas capazes de evitar que a água proveniente do escoamento superficial, tanto aquele gerado na própria estrada como o proveniente das áreas nas suas margens, se acumule na estrada e passe a utilizá-la para o seu escoamento. A água provinda do escoamento do

leito da estrada deve ser drenada nas suas laterais e encaminhada, de modo a não provocar erosão, para os escoadouros naturais, artificiais, bacias de acumulação ou outro sistema de retenção localizado no terreno marginal (GRIEBELER, 2002).

Na implantação de um sistema de drenagem em estradas não pavimentadas, deve-se considerar o abaulamento do leito, a construção de canais de escoamento e à instalação de desaguadouros para a remoção do escoamento superficial para fora da estrada.

De acordo com Pruski (2006), abaulamento é o nome dado à forma convexa que se dá à seção transversal do leito da estrada para que a água da chuva não permaneça sobre ela. Deve ser construído de forma que possibilite a rápida remoção da água da chuva, permitindo que a superfície não a retenha por muito tempo, evitando que a água escoe longitudinalmente sobre a estrada, se concentrando e adquirindo força suficiente para erodí-la. O abaulamento deve ser projetado levando-se em conta, além da necessidade de drenagem, a comodidade e segurança dos usuários. Baesso e Gonçalves (2003) sugerem um valor médio de 4% de declividade, salientando que declividades transversais inferiores ao valor citado podem comprometer a drenagem superficial e, conseqüentemente provocar a degradação da estrada, enquanto que declividades mais elevadas oferecem maior insegurança aos usuários da pista.

Outra estrutura de grande importância a ser considerada na implantação de um sistema de drenagem é o canal de escoamento, que consiste em um dispositivo construído nas margens das estradas e objetiva a coleta das águas proveniente do escoamento superficial da pista e de áreas externas localizada às margens da estrada, para um desaguador (BAESSO e GONÇALVES, 2003). Estes autores afirmam ainda que, mesmo estando a drenagem da água no leito da estrada funcionando corretamente, canais de drenagem em condições inapropriadas podem provocar séria degradação da estrada já nas primeiras chuvas.

No que diz respeito à concentração do escoamento ao longo do canal, é de grande importância a instalação de canais desaguadores com a finalidade de drenar a água para fora das estradas. Isto evita que o escoamento atinja uma energia erosiva capaz de degradar o canal de drenagem e, conseqüentemente, comprometer a estrada (BAESSO e GONÇALVES, 2003).

Nas situações em que o leito das estradas se encontra encaixado, ou seja, o leito se encontra rebaixado em relação ao nível do terreno, a construção de canais desaguadouros é geralmente difícil, uma vez que é necessária a remoção de um volume muito grande de solo para a sua construção. Quando as estradas se encontram em maiores trechos encaixados, o volume de escoamento que se concentra ao longo desse trecho é maior e, conseqüentemente, possui maior capacidade de provocar processos de intensa degradação da pista de rolamento. Santos (1988) sugere que nesses casos é necessário a implantação de estruturas para a dissipação da energia do escoamento, como barreiras de estacas de madeira ou de pedras, até que seja possível a retirada adequada dessa água escoada para fora da estrada.

2.4. Estruturas hidráulicas utilizadas para armazenamento do escoamento superficial provindo de estradas não pavimentadas

Na implantação de sistemas de drenagem em estradas não pavimentadas não se pode deixar de considerar a estrada como elemento integrante do ambiente rural, tendo em vista a interferência mútua entre estas e as áreas marginais (PRUSKI et al., 2006). Desta forma, não basta promover a retirada da água que escoa nas estradas se não houver uma destinação racional para esta, pois haverá apenas uma transferência do problema da estrada para áreas adjacentes. Diante desse contexto, é de grande importância que, dentre as metas traçadas para a implantação de práticas conservacionistas em estradas não pavimentadas, seja considerada a implantação de estruturas hidráulicas capazes de reter, de forma adequada, o volume do escoamento superficial proveniente das estradas.

Quando a estrada é integrada a áreas de cultivo, recomenda-se que o escoamento superficial coletado nas estradas seja conduzido para essas, a fim de que seja infiltrado, uma vez que a capacidade de infiltração nestas áreas é superior à das estradas. Pruski (2006) descreve que uma alternativa para esse tipo de situação, seria a criação de sistemas especiais para o escoamento e acumulação da água, de modo a não provocar nenhum tipo de prejuízo às áreas agrícolas. Estes sistemas podem ser implantados com o avanço de camalhões ou

segmentos de terraços partindo da estrada, em cota superior, adentrando nas áreas agrícolas, em cota inferior, de maneira que a água seja conduzida lentamente.

Em estradas situadas em áreas com terraceamento é possível dimensionar os canais desaguadouros de maneira que estes conduzam o escoamento para dentro dos terraços. Nesse sistema, a água é direcionada à área de cultivo para ser retida pelo sistema de terraceamento, o qual, para evitar o rompimento dos mesmos, deve-se ter atenção para que estes sejam dimensionados já prevendo o volume adicional de escoamento proveniente das estradas. A diferença entre o sistema com segmento de terraços e aquele integrado ao sistema de terraceamento é que no primeiro a extensão da estrutura corresponde ao comprimento necessário para a acumulação da água para posterior infiltração, não sendo necessário que funcione como sistema de terraceamento agrícola (PRUSKI, 2006).

A implantação de bacias de acumulação destinadas à contenção do escoamento superficial proveniente das estradas, também consiste em uma alternativa de grande importância, sendo viável, principalmente, para as situações em que o terreno não permite a construção de terraços. De acordo com Griebeler (2002), a técnica para a implantação de bacias de acumulação consiste na escavação do solo das áreas marginais às estradas para permitir a captação e o armazenamento da água escoada e, conseqüentemente, permitir a posterior infiltração. A Figura 1 apresentada bacias de acumulação construídas às margens de uma estrada não pavimentadas para a contenção do escoamento superficial.

Pruski (2006) sugere que as práticas a serem utilizadas para o controle da erosão devem estar relacionadas ao grau de risco de ocorrência e a forma com que o processo se apresenta. Para o dimensionamento, utiliza-se normalmente o volume máximo que pode ocorrer durante um determinado período de retorno, a capacidade infiltração da água no solo, as características de resistência do solo, devendo o espaçamento entre estes canais ser calculado de modo que o volume de água não seja demasiadamente elevado.

O uso de estruturas hidráulicas para a contenção do escoamento superficial em estradas não pavimentadas, além de ser técnica importante para a contenção do processo erosivo, também possui uma atribuição funcional que

proporciona benefícios expressivos à bacia, que é a recarga do lençol freático e, conseqüentemente, à conservação do recurso água (BERTOLINI et al., 1993).



Figura 1 – Bacias de acumulação para a contenção do escoamento superficial em estradas não pavimentadas.

2.5. Modelagem hidrológica associada ao dimensionamento de bacias de acumulação em estradas não pavimentadas

As estradas são construídas em diferentes tipos de solos, declividades transversais e longitudinais, com variadas larguras e em regiões com características de precipitação diferentes. Portanto, volume e a energia associada ao escoamento superficial, podem apresentar diferenças expressivas dependendo das condições locais.

Diante da grande complexidade dos processos envolvidos no dimensionamento das estruturas hidráulicas para a contenção do escoamento superficial de estradas não pavimentadas, é de grande importância a utilização de técnicas de modelagem, com as quais pode-se alcançar um maior grau de eficiência e segurança do projeto dessas estruturas.

De acordo com Rennó e Soares (2000), um modelo pode ser definido como a representação simplificada de um determinado processo. Hoogenboom (2000) acrescenta que, mesmo sendo uma representação simplificada dos processos naturais, é possível a simulação de variadas condições que podem intervir nesse processo. Contudo, este autor ressalta que é impossível incluir todas as interações que ocorrem no ambiente em um único modelo.

Em estradas, o entendimento do processo hidrológico relacionado ao escoamento superficial decorrente das chuvas é menos complexo do que em áreas sob terrenos reflorestados ou agricultáveis. Entretanto, mesmo envolvendo uma complexidade maior, diversos são os estudos e modelos desenvolvidos para a compreensão e atenuação do processo erosivo em áreas cultivadas, enquanto que modelos voltados à minimização do processo erosivo em estradas não pavimentadas ainda são bastante escassos (PRUSKI, 2006).

Dentre as metodologias disponíveis para o dimensionamento de bacias de acumulação em estradas não pavimentadas, pode-se citar as desenvolvidas por Pires e Souza (2006), Griebeler et al. (2005) e Bertolini et al. (1993). As metodologias apresentadas por Pires e Souza (2006) e Bertolini et al. (1993) consideram, na estimativa do volume requerido para a bacia de acumulação, apenas a área de drenagem e a precipitação. Na primeira delas, é sugerido um valor médio de lâmina de precipitação de 100 mm, enquanto que na segunda metodologia é proposto a utilização de um valor de lâmina de precipitação associada a um período de retorno proposto pelo projetista.

O modelo desenvolvido por Griebeler et al. (2005) está baseado em uma análise mais ampla dos fatores envolvidos no processo de produção de escoamento superficial e de erosão hídrica. Este modelo permite a estimativa, não só do volume requerido para a bacia de acumulação mas, também, o espaçamento máximo recomendado entre os desaguadouros.

A metodologia desenvolvida por Griebeler et al. (2005) foi implementada na forma de um software denominado Estradas. Neste software o dimensionamento da bacia de acumulação, é feito considerando as interações existentes entre fatores como as características da precipitação no local de interesse, a capacidade de infiltração da água no leito da estrada, a área de contribuição para a bacia de acumulação e a presença de contribuições de áreas externas à estrada.

O evento de precipitação considerado neste modelo corresponde à chuva máxima esperada para um período de retorno determinado. O perfil de precipitação que caracteriza esse evento consiste em uma exponencial decrescente, de acordo com o modelo proposto por Pruski et al. (1997), onde a intensidade máxima instantânea de precipitação ocorre logo no início do evento. O perfil de precipitação no formato de uma exponencial negativa é descrito pela seguinte equação.

$$i_i = \frac{K T^a}{(b + t)^c} \left(1 - \frac{c t}{t + b}\right) \quad (1)$$

em que:

i_i = intensidade instantânea de precipitação, mm h⁻¹; e
a, b, c, K = parâmetros da equação de chuvas intensas, adimensionais.

No dimensionamento de estruturas hidráulicas destinadas à contenção do escoamento superficial e, conseqüentemente, do controle do processo erosivo, é normalmente considerada apenas uma única chuva intensa, associada ao período de retorno de projeto. Contudo, esse critério não leva em consideração o efeito acumulativo dos eventos de escoamento superficial que ocorram de forma sucessiva na série. Esses eventos podem provocar uma condição mais crítica para o projeto da bacia de acumulação do que o evento específico para o período de retorno considerado no projeto.

2.6. Geradores de séries sintéticas de dados climáticos

Nos modelos utilizados para descrever o comportamento hidrológico de uma região, ou mesmo para a realização de simulações de processos que ocorrem normalmente na natureza, dados climáticos são variáveis de entrada fundamentais, principalmente para aqueles modelos que estão baseados em conceitos físicos.

De acordo com Hoogenboom (2000), as séries de dados climáticos são importantes para todas as aplicações de modelagem na agricultura. Contudo,

muitas vezes, esses dados são reduzidos ou a extensão da série é insuficiente para que possam ser aplicadas nos modelos. Evangelista et al. (2006) afirmam que a grande limitação para a utilização de modelos hidrológicos para as regiões brasileiras tem como limitação principal, a falta de alguns elementos climáticos não registrados nas estações climáticas locais. Nesses casos, geradores de séries climáticas são alternativas importantes para contornar o problema, uma vez que esses modelos de simulação matemática são capazes de gerar um conjunto de valores numéricos (denominado série sintética) com as mesmas características estatísticas da série histórica. Os modelos de simulação, uma vez ajustados e testados, podem ser utilizados para preencher lacunas existentes nas séries de informações registradas em estações hidrológicas ou meteorológicas.

De acordo com Evangelista et al. (2006), na literatura existente sobre o assunto são apresentados vários modelos para a geração de séries sintéticas de dados climáticos. Dentre estes, os de uso mais generalizado são: o CLIGEN (Climate Generator), o WGEN (Weather Generator), o WXGEN (componente do modelo EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator), o WEATHERMAN e o USCLIMATE. Além dos modelos citados anteriormente, Virgens Filho (2006) acrescenta ainda os modelos SINMETEO e LARS-WG.

Apesar da grande importância e a indiscutível relevância dos modelos utilizados para a obtenção de séries sintéticas citados até agora, é imprescindível a realização de ajuste criterioso de boa parte dos parâmetros, para que estes possam ser utilizados para as condições brasileiras. Diante desses obstáculos, o desenvolvimento de modelos para as condições brasileiras, é fundamental para a viabilização de dados consistentes que representem de forma confiável as características climáticas locais, principalmente com relação às singularidades das precipitações que ocorrem em clima tropical.

Com o objetivo de apresentar alternativas para as pesquisas envolvendo a perda de água e solo, Oliveira (2003) desenvolveu e testou uma metodologia para a geração de séries sintéticas de precipitação diária a partir de séries históricas de registros pluviométricos diários para as condições climáticas encontradas no Estado do Rio de Janeiro. O modelo desenvolvido e apresentado por Oliveira et al. (2005a, 2005b), denominado ClimaBr, foi capaz de gerar série sintética de valores mensais de precipitação total diária (P) ocorrida nesses dias, além das informações relativas ao perfil de precipitação: duração, o tempo padronizado de

ocorrência da intensidade máxima instantânea e a própria intensidade máxima instantânea dos eventos.

A metodologia desenvolvida por Oliveira (2003) foi aperfeiçoada por Zanetti (2003) e por Baena (2004) permitindo, assim, o aprimoramento das variáveis associadas ao perfil de precipitação além de permitir a geração de séries sintéticas de temperaturas máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Baena et al. (2005) visando otimizar a aplicação do modelo, desenvolveu um programa computacional denominado ClimaBr 2.0 e concluiu que este permitiu a geração de séries sintéticas de dados climáticos para diversas localidades brasileiras.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho constitui uma nova proposição para o dimensionamento de bacias de acumulação em estradas não pavimentadas que se baseia, ao contrário do modelo desenvolvido por Griebeler et al. (2005) e de outros modelos, não mais na consideração de um único evento de precipitação, mas na sucessão de eventos que venham a produzir escoamento superficial. Ao contrário do modelo desenvolvido por Griebeler et al. (2005), neste trabalho não é feita nenhuma proposição do cálculo do espaçamento máximo de estruturas para a contenção do escoamento superficial.

3.1. Desenvolvimento do modelo

O desenvolvimento do modelo se baseou no princípio de que, para o cálculo do volume de uma bacia de acumulação destinada à contenção do escoamento superficial em estradas não pavimentadas, a realização de uma análise dia a dia do volume escoado em cada evento da série é um critério mais coerente, uma vez que é considerado o efeito acumulativo de precipitações que ocorrem de forma sucessiva na série.

Para o desenvolvimento do modelo foram adotadas as seguintes premissas:

- a área de contribuição para a bacia de acumulação é formada exclusivamente pelo leito da estrada, sendo a taxa de infiltração estável deste igual a 1 mm h^{-1} ;
- bacia de acumulação possui formato retangular, e esta não sofre alteração de armazenamento no período para qual é feita a simulação;

- a taxa de infiltração estável da água no solo do fundo da bacia não varia com a variação da carga hidráulica;

- o volume requerido para a bacia de acumulação é suficiente para garantir que não ocorra o transbordamento da água na bacia; e

- o balanço do volume de água armazenado na bacia é feito em uma base diária, sendo a contabilização do volume escoado e volume armazenado remanescente do dia anterior feita no início do dia.

O modelo utiliza dados sintéticos de precipitação, advindos do modelo ClimaBr, para a obtenção de uma série diária de volumes escoados, com a qual é realizado o balanço diário do volume armazenado na bacia. A partir da série de volumes armazenados é identificado o maior valor obtido em cada ano e, assim, é criada uma série anual de volumes máximos armazenados na bacia, à qual é aplicada a distribuição de Gumbel para a obtenção do volume requerido para a bacia de acumulação. Na Figura 2 é apresentado um fluxograma simplificado da seqüência dos cálculos utilizados pelo modelo.



Figura 2 - Fluxograma simplificado da seqüência dos cálculos utilizados pelo modelo desenvolvido.

3.1.1. Obtenção da série sintética de dados de precipitação

O modelo ClimaBr, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (www.ufv.br/dea/gprh), foi desenvolvido com a finalidade de gerar séries sintéticas de precipitação, temperaturas máximas e mínimas, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. No presente trabalho, o ClimaBr foi utilizado para a geração de séries sintéticas de precipitação.

O perfil de precipitação considerado no ClimaBr é representado por uma função dupla exponencial, que consiste em uma exponencial crescente do início do evento até o momento em que ocorre a intensidade de precipitação máxima e, a partir deste momento, uma exponencial decrescente descreve o comportamento do perfil até o fim do evento. Na Figura 3 é apresentado um perfil de precipitação adimensionalizado que representa a variação da intensidade instantânea de precipitação padronizada (i^*) em função do tempo padronizado (t^*).

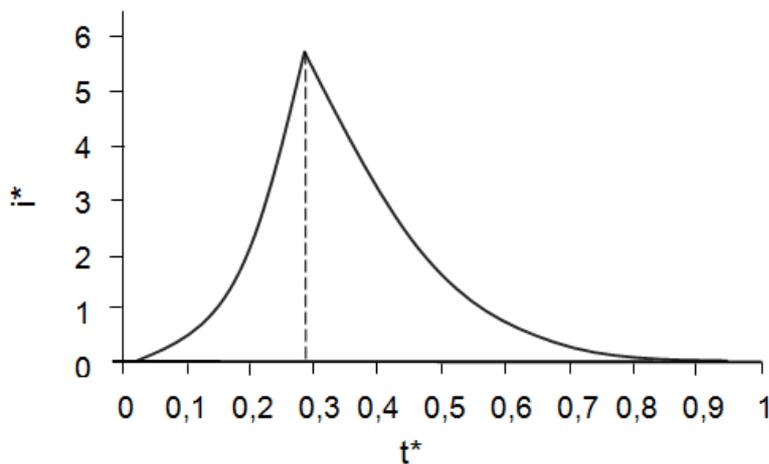


Figura 3 - Representação do perfil de precipitação adimensionalizado.

A função dupla exponencial que representa o perfil de precipitação é dada por:

$$i^* = \begin{cases} a' e^{b' t^*} & \dots\dots\dots 0 \leq t^* \leq t_p^* \\ c' e^{-d' t^*} & \dots\dots\dots t_p^* \leq t^* \leq 1,0 \end{cases} \quad (2)$$

em que:

a', b', c', d' = parâmetros da função dupla exponencial relativos ao evento de precipitação, adimensionais; e

tp^* = tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação, adimensional.

A intensidade instantânea de precipitação padronizada representa a relação entre a intensidade instantânea de precipitação (i_i) e a intensidade média de precipitação (i_{med}), sendo a intensidade média de precipitação obtida a partir da relação entre a lâmina total precipitada (P) e a duração total da precipitação (D).

O tempo padronizado representa a relação entre o tempo em que ocorre uma determinada intensidade i_i e a duração total da precipitação, sendo os valores compreendidos entre zero e um.

3.1.2. Cálculo do volume escoado

O cálculo do volume de escoamento superficial é obtido a partir do produto da lâmina de escoamento superficial e da área de contribuição da estrada para a bacia de acumulação:

$$VES = \frac{LES A_c}{1.000} \quad (3)$$

em que:

VES = volume do escoamento superficial, m^3 ;

LES = lâmina de escoamento superficial, mm; e

A_c = área de contribuição da estrada para a bacia de acumulação, m^2 .

O valor de A_c representa a área da estrada em que todo o escoamento superficial que ocorre nesse local é drenado para a bacia de acumulação, sendo este obtido a partir do produto da semilargura pelo comprimento da estrada.

Na obtenção de LES é considerado o perfil de precipitação adimensionalizado (Figura 4), sendo que a área sob o perfil corresponde à lâmina precipitada adimensionalizada e igual a um. Para a obtenção da lâmina precipitada para um tempo t basta multiplicar a lâmina precipitada adimensionalizada para este tempo pela precipitação total correspondente ao dia considerado.

O escoamento superficial inicia quando a intensidade instantânea de precipitação é superior à taxa de infiltração da água no solo do leito da estrada ($i_i > T_{ie_{est}}$). Considerando o perfil de precipitação adimensionalizado representado na Figura 3 tem-se que o escoamento superficial no tempo t_i^* , no qual i^* iguala ao valor resultante da relação entre $T_{ie_{est}}$ e i_{med} ($T_{ie_{est}}/i_{med}$), e termina no tempo t_f^* , em que i^* volta a igualar a $T_{ie_{est}}/i_{med}$. Durante o intervalo compreendido entre o t_i^* e t_f^* , i^* supera o valor de $T_{ie_{est}}/i_{med}$ e, conseqüentemente, ocorre a produção de escoamento superficial.

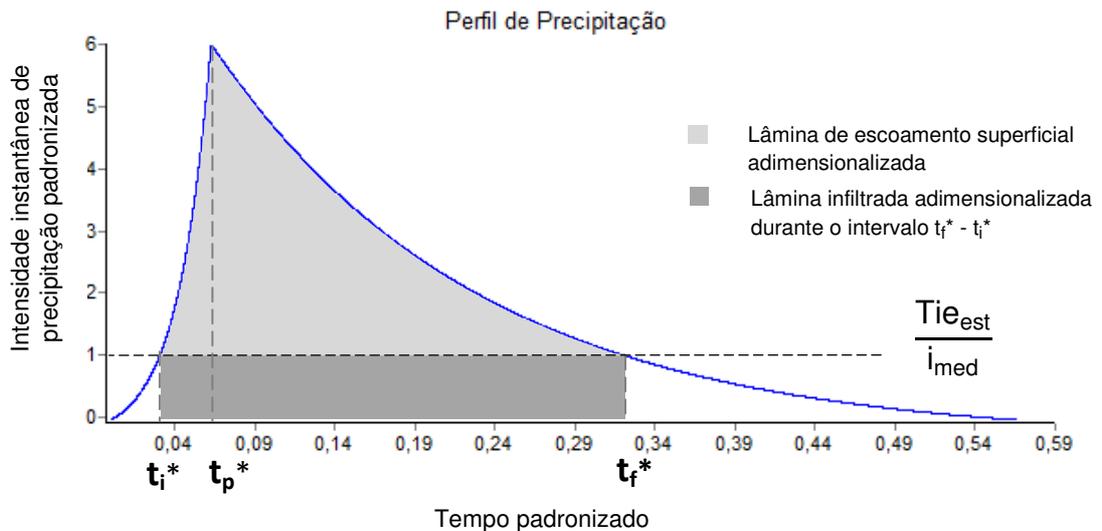


Figura 4 - Esquema ilustrativo do cálculo da lâmina de escoamento superficial.

Os valores de t_i^* e t_f^* são obtidos a partir das equações:

$$t_i^* = \frac{\ln \left(\frac{T_{ie_{est}}}{i_{med}} \right) - \ln a'}{b'} \quad (4)$$

$$t_f^* = \frac{\ln c' - \ln \left(\frac{Tie_{est}}{i_{med}} \right)}{d'} \quad (5)$$

em que:

t_i^* = tempo padronizado de início do escoamento, adimensional;

t_f^* = tempo padronizado de fim do escoamento, adimensional;

Tie_{est} = taxa de infiltração estável do leito da estrada, mm h^{-1} ; e

i_{med} = intensidade média de precipitação, mm h^{-1} .

A lâmina precipitada adimensionalizada que ocorre durante o intervalo compreendido entre os tempos padronizados de início (t_i^*) e fim (t_f^*) do escoamento superficial é obtida a partir da soma do valor resultante da integração da área correspondente ao ramo ascendente do perfil de precipitação, de t_i^* a t_p^* , e da área correspondente ao ramo descendente do perfil, de t_p^* a t_f^* . O valor correspondente a t_p^* , é obtido diretamente do ClimaBr.

O valor padronizado da LES (LES^*) é obtido a partir da diferença entre a área do perfil correspondente à lâmina precipitada adimensionalizada ocorrida durante o intervalo de tempo compreendido entre t_i^* e t_f^* e a área correspondente à lâmina infiltrada, também adimensionalizada, ocorrida no leito da estrada durante o mesmo intervalo de tempo. A lâmina infiltrada é obtida pelo produto de Tie_{est} / i_{med} pelo intervalo de tempo em que ocorre o escoamento superficial ($t_f^* - t_i^*$). Portanto, o cálculo de LES^* é realizado a partir da equação:

$$LES^* = \int_{t_i^*}^{t_p^*} a' e^{b't^*} dt + \int_{t_p^*}^{t_f^*} c' e^{-d't^*} dt - (t_f^* - t_i^*) \frac{Tie_{est}}{i_{med}} \quad (6)$$

Os valores de LES^* , que variam entre zero e um, representam a porcentagem da lâmina precipitada que é convertida em escoamento superficial. Sendo assim, para a transformação da lâmina de escoamento superficial em seu valor real é necessário multiplicar esse valor pela precipitação, obtendo-se assim, a LES em mm.

Assim sendo a LES após a integração da equação 6 e multiplicação de P resulta em:

$$LES = \left[\left(\frac{a'}{b'} e^{b't_p^*} - \frac{a'}{b'} e^{b't_i^*} \right) + \left(\frac{c'}{d'} e^{-d't_p^*} - \frac{c'}{d'} e^{-d't_f^*} \right) - (t_f^* - t_i^*) \frac{Tie_{est}}{i_{med}} \right] P \quad (7)$$

Os cálculos do volume de escoamento superficial são realizados para todos os eventos de precipitação da série, o que permite a obtenção de uma série diária de volumes de escoamento superficial.

3.1.3. Cálculo do volume armazenado

O volume armazenado na bacia de acumulação em um determinado dia da série (V_{Ai}) é obtido a partir da soma do volume de escoamento superficial que chega à bacia nesse dia e do volume armazenado remanescente do dia anterior ($V_{R\ i-1}$), que é o volume que já se encontrava armazenado na bacia desse dia. Estes volume são obtidos pelas equações:

$$V_{Ai} = VES_i + V_{R\ i-1} \quad (8)$$

$$V_{Ri} = \frac{(Hi - \Delta H)^2 (s_1 + s_2) L_B}{2 s_1 s_2} \quad (9)$$

em que:

V_{Ri} = volume armazenado remanescente do dia i , m^3 ;

Hi = altura atingida pela água correspondente ao volume armazenado do dia i , m ;

ΔH = rebaixamento do nível da água na bacia, m ;

s_1 = declividade do talude de jusante da bacia de acumulação, $m\ m^{-1}$;

s_2 = declividade do talude de montante da bacia de acumulação, $m\ m^{-1}$; e

L_B = largura da bacia de acumulação, m .

As simulações se iniciam no dia em que ocorre o primeiro evento chuvoso da série, onde o volume armazenado é estimado considerando apenas o volume de escoamento superficial. Se este volume não infiltrar completamente no fundo da bacia ficará um volume remanescente para o dia subsequente.

O volume que infiltra na bacia de acumulação está diretamente relacionado às características geométricas da bacia (Figura 5) e à taxa de infiltração estável da água no solo do fundo da bacia (Tie_{bac}). Bacias que apresentam menores declividades dos taludes (s_1 e s_2) e maior largura tendem a proporcionar uma maior área da superfície líquida quando cheias, fato esse que leva a um maior volume infiltrado para uma mesma Tie_{bac} .

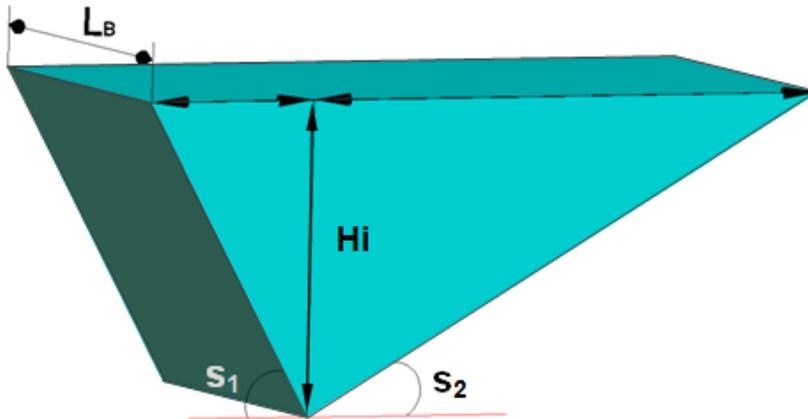


Figura 5 - Características geométricas da bacia de acumulação.

A altura atingida pela água correspondente ao volume armazenado é estimada pela equação:

$$H_i = \sqrt{\frac{2 V_{Ai} s_1 s_2}{L_B (s_1 + s_2)}} \quad (10)$$

O rebaixamento do nível da água na bacia (ΔH) em decorrência de infiltração é calculado pela equação:

$$\Delta H = \frac{Tie_{bac} \Delta t}{1.000} \quad (11)$$

em que

Tie_{bac} = taxa de infiltração da água no solo do fundo da bacia de acumulação, $mm\ h^{-1}$; e

Δt = intervalo de tempo em que ocorre a infiltração da água no fundo da bacia durante o dia, h.

O valor de Δt é igual a 24 horas para os casos em que o volume remanescente é diferente de zero, ou igual ao intervalo de tempo necessário para que o volume armazenado na bacia infiltre completamente no fundo desta.

A rotina de cálculos descrita é repetida para todos os dias da série, com a finalidade de obter uma série diária de volumes armazenados. A cada ano da série é identificado o maior valor de V_A , o que permite a obtenção de uma série anual de volumes máximos armazenados (V_{\max}).

3.1.4. Cálculo do volume requerido para a bacia de acumulação

O volume requerido para a bacia de acumulação (V_B) é obtido, aplicando à série de volumes máximos acumulados, a distribuição de Gumbel.

Segundo Kite (1988), a magnitude do evento para séries finitas é dada por:

$$V_B = \bar{V}_{\max} + K'\sigma \quad (12)$$

em que:

\bar{V}_{\max} = média dos volumes máximos armazenados, m³;

K' = fator de freqüência, adimensional; e

σ = desvio padrão dos volumes máximos armazenados em cada ano da série, adimensional.

O fator de freqüência para séries finitas é calculado da seguinte forma:

$$K' = - \left(0,45 + 0,7797 \ln \left(- \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right) \quad (13)$$

em que T é o período de retorno, anos.

3.1.5. Software para a aplicação da metodologia

Tendo em vista o fato de que os cálculos descritos são realizados em uma base diária e para um número de anos expressivo, que garante a estabilidade da série, houve a necessidade do desenvolvimento de um aplicativo computacional que permite a realização da grande quantidade de cálculos requeridos.

O software foi desenvolvido em ambiente de programação Borland Delphi 7.0 e permite obter o volume requerido para bacias de acumulação destinadas à contenção do escoamento superficial em estradas não pavimentadas. Este software, entretanto, ainda não possui uma interface amigável, motivo pelo qual não é feita a sua disponibilização.

3.2. Avaliação do modelo

3.2.1. Análise de sensibilidade

Adotando-se a metodologia proposta por Nearing, citado por Griebeler (2002), foi analisada a sensibilidade dos parâmetros do modelo na determinação do volume da bacia de acumulação, a qual está baseada na equação:

$$S = \frac{\frac{V_{B1} - V_{B2}}{V_{B12}}}{\frac{I_1 - I_2}{I_{12}}} \quad (14)$$

em que:

S = sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada;

V_{B1} = volume requerido para a bacia de acumulação, obtido pelo modelo para o menor valor de entrada;

V_{B2} = volume requerido para a bacia de acumulação, obtido pelo modelo para o maior valor de entrada;

V_{B12} = média dos volumes requeridos para a bacia de acumulação obtida com os valores de entrada;

I_1 = menor valor de entrada da variável em análise;

I_2 = maior valor de entrada da variável em análise; e

I_{12} = média dos valores de entrada.

De acordo com McCuen e Snyder, citados por Evangelista (2003), o índice S reflete a mudança gerada na saída do modelo pela alteração dos parâmetros de entrada, permitindo ainda comparar a sensibilidade dos diferentes parâmetros. Quanto maiores forem os valores de S, mais sensível é o modelo à variável de entrada, enquanto os valores próximos a zero indicam que o modelo não apresenta sensibilidade expressiva à variável de entrada.

Para a realização das análises de sensibilidade foi criado um arquivo com dados de entrada, sendo esta considerada a condição padrão. Em todas as simulações realizadas, foi alterada a característica em análise, permanecendo as demais constantes. Na seqüência é apresentada a condição padrão para a análise do modelo desenvolvido e são apresentados os dados de entrada relativos à condição padrão.

Quadro 1 - Dados de entrada relativos à condição padrão considerada para as análises de sensibilidade

Especificação	Descrição
Bacia de Acumulação	
Tie_{bac}	15 mm h ⁻¹
S_1	1 m m ⁻¹
S_2	0,5 m m ⁻¹
L_B	6 m
Precipitação	
Localidade	João Pinheiro
T	10 anos
Estrada	
Área de contribuição da estrada para a bacia	300 m ²
Tie_{est}	1 mm h ⁻¹

O cálculo de V_B é realizado como base em uma série sintética de 50 anos, considerando o ano hidrológico com início no dia primeiro de julho.

3.2.2. Condições adotadas para a avaliação do modelo

A análise de sensibilidade foi realizada considerando:

a) Cinco taxas de infiltração estáveis da bacia de acumulação representativas das condições normalmente encontradas em campo, sendo empregados os valores de 2, 5, 10, 15 e 20 mm h⁻¹.

b) A declividade do talude de montante foi mantida constante, enquanto que os valores da declividade do talude de jusante foram de: 2; 1; 0,67; 0,5; e 0,25 m m⁻¹.

c) Largura da bacia (L_B) varia de acordo com a demanda do projeto para bacia e das limitações físicas do local onde esta será implantada. Foram consideradas nas análises as larguras de 4, 5, 6, 7 e 8 m.

d) Foram adotados os períodos de retornos de 5, 10, 15, 18 e 20 anos.

e) As localidades selecionadas são pertencentes à bacia do Rio Paracatu, afluente da bacia do Rio São Francisco. Foram selecionadas seis cidades que continham tanto estações pluviográficas como pluviométricas. As localidades selecionadas foram: Buritizeiro – MG; João Pinheiro – MG; Patos de Minas – MG; Presidente Olegário – MG; São Gonçalo do Abaeté – MG; e Cabeceiras – GO.

3.3. Comparação dos valores obtidos pelo modelo desenvolvido com os obtidos pelo modelo desenvolvido por Griebeler et al. (2005)

A comparação foi realizada a partir dos valores de V_B obtidos pelos dois modelos, considerando diferentes valores de $T_{ie_{bac}}$ e T , e as condições de precipitação correspondentes às localidades de Buritizeiro – MG; João Pinheiro – MG; Patos de Minas – MG; Presidente Olegário – MG; São Gonçalo do Abaeté – MG; e Cabeceiras – GO. Os valores de $T_{ie_{bac}}$ considerados na comparação dos resultados foram de 2, 5, 10, 15 e 20 mm h⁻¹. Para cada $T_{ie_{bac}}$ considerada foram calculados os volumes da bacia de acumulação admitindo os períodos de retorno de 5, 10, 15, 18 e 20 anos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise de desempenho do modelo desenvolvido

4.1.1. Análise do modelo considerando diferentes períodos de retorno e taxas de infiltração estável

Na Figura 6 está representado o comportamento do volume requerido para a bacia de acumulação (V_B) em função do período de retorno (T) para diferentes taxas de infiltração estável da água no solo do fundo da bacia (Tie_{bac}). Observa-se que, para cada Tie_{bac} considerada, V_B aumentou com o aumento do valor de T , uma vez que o aumento de T implica na consideração de eventos de precipitação mais críticos para o projeto da bacia de acumulação, ou seja, correspondentes à produção de maiores volumes de escoamento superficial (VES). Os valores de VES obtidos na série de eventos diários representam a diferença entre o volume total precipitado e o volume infiltrado no leito da estrada. Neste caso, tanto a série diária de volumes de escoamento superficial como as séries de volumes diários armazenados e de volumes máximos anuais armazenados na bacia (V_{max}) não sofrem alteração, sendo as variações nas estimativas do V_B decorrentes da aplicação da distribuição de Gumbel. O aumento do T implica no aumento do valor de K' (equação 13) e, conseqüentemente, do valor de V_B (equação 12).

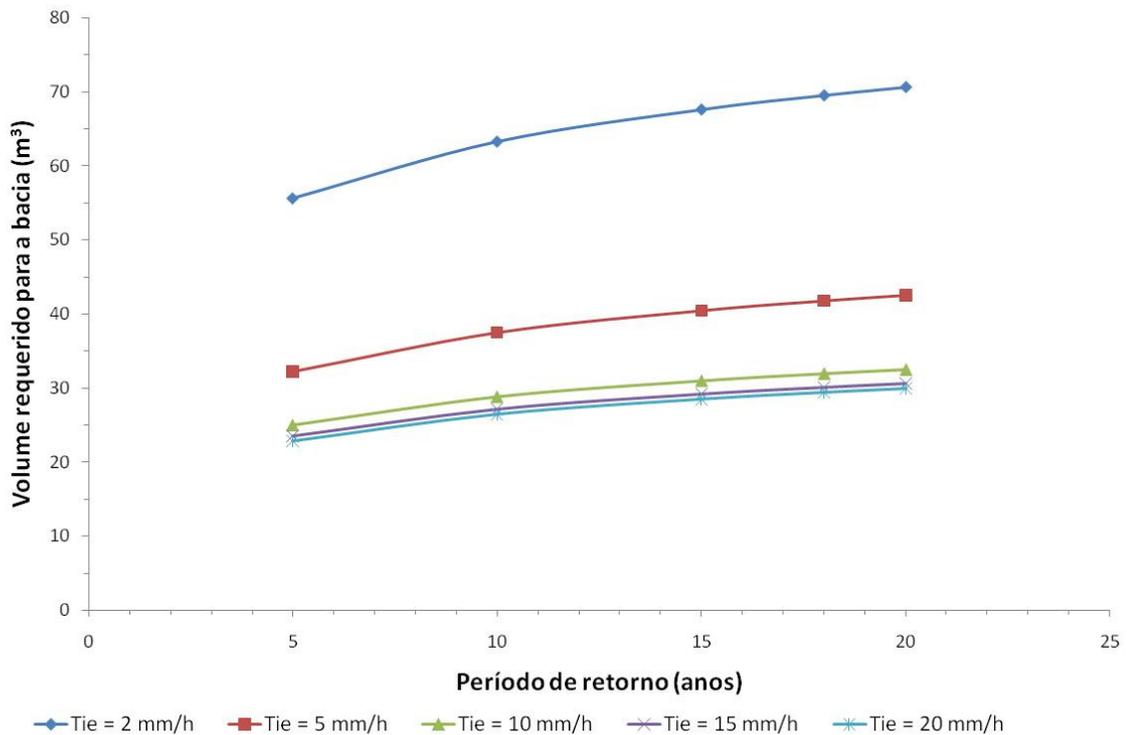


Figura 6 - Volume requerido para a bacia de acumulação em função de T , considerando diferentes taxas de infiltração estável da água no solo do fundo da bacia (Tie_{bac}).

No Quadro 2 são apresentados os valores do índice de sensibilidade do modelo ao período de retorno para diferentes Tie_{bac} . O modelo apresentou uma redução de sensibilidade com o aumento do período de retorno, para todas as Tie_{bac} consideradas. Esse comportamento pode ser também observado na Figura 6, uma vez que, para todos os valores de Tie_{bac} , a declividade da curva diminui com o aumento do período de retorno.

Ao analisar a influência da Tie_{bac} nos valores de V_B (Figura 6) evidencia-se que, para um mesmo valor de T , o aumento da Tie_{bac} implica na redução de V_B , uma vez que maiores valores de Tie_{bac} estão associados a uma maior capacidade de infiltração e, conseqüentemente, a uma maior taxa de rebaixamento do nível da água na bacia de acumulação. Sendo assim, para uma maior Tie_{bac} , menores são os volumes máximos anuais armazenados na bacia (V_{max}) e, desta forma, menor é o valor de V_B (equação 12), uma vez que o valor de \bar{V}_{max} (média dos valores de V_{max}) possui relação inversa com os valores de Tie_{bac} , sendo que o valor de K' não varia, pois o período de retorno é mantido constante.

Quadro 2 - Índice de sensibilidade do modelo a T (anos), para diferentes Tie_{bac}

$Tie_{bac} = 2 \text{ mm h}^{-1}$				
Valor de entrada (T)		Resposta do modelo (V_B)		Índice de sensibilidade
T_1	T_2	V_{B1}	V_{B2}	
5	10	55,63	63,3	0,193
10	15	63,30	67,63	0,165
15	18	67,63	69,55	0,154
18	20	69,55	70,66	0,150
$Tie_{bac} = 5 \text{ mm h}^{-1}$				
5	10	30,94	35,42	0,203
10	15	35,42	37,94	0,172
15	18	37,94	39,06	0,160
18	20	39,06	39,71	0,157
$Tie_{bac} = 10 \text{ mm h}^{-1}$				
5	10	25,05	28,86	0,212
10	15	28,86	31,01	0,180
15	18	31,01	31,97	0,168
18	20	31,97	32,52	0,162
$Tie_{bac} = 15 \text{ mm h}^{-1}$				
5	10	23,49	27,14	0,216
10	15	27,14	29,2	0,183
15	18	29,2	30,11	0,169
18	20	30,11	30,64	0,166
$Tie_{bac} = 20 \text{ mm h}^{-1}$				
5	10	22,91	26,49	0,217
10	15	26,49	28,51	0,184
15	18	28,51	29,41	0,171
18	20	29,41	29,93	0,166

A Figura 7 mostra o comportamento do modelo no cálculo de V_A ao longo de um ano da série, para cinco diferentes Tie_{bac} . Nota-se que o volume máximo armazenado durante o ano (representado na figura pelas setas vermelhas), foi maior para os menores valores de Tie_{bac} . Os valores de V_{max} obtidos no ano para as Tie_{bac} de 2, 5, 10, 15 e 20 mm h^{-1} foram de 60,1; 28,1; 20,7; 18,9 e 18,5 m^3 , respectivamente. Esses dados são resultantes do balanço realizado em base diária e que considera o volume de escoamento superficial que chega à bacia, o

volume infiltrado (VI), que deixa a bacia, e o volume armazenado remanescente do dia anterior (V_{Ri-1}).

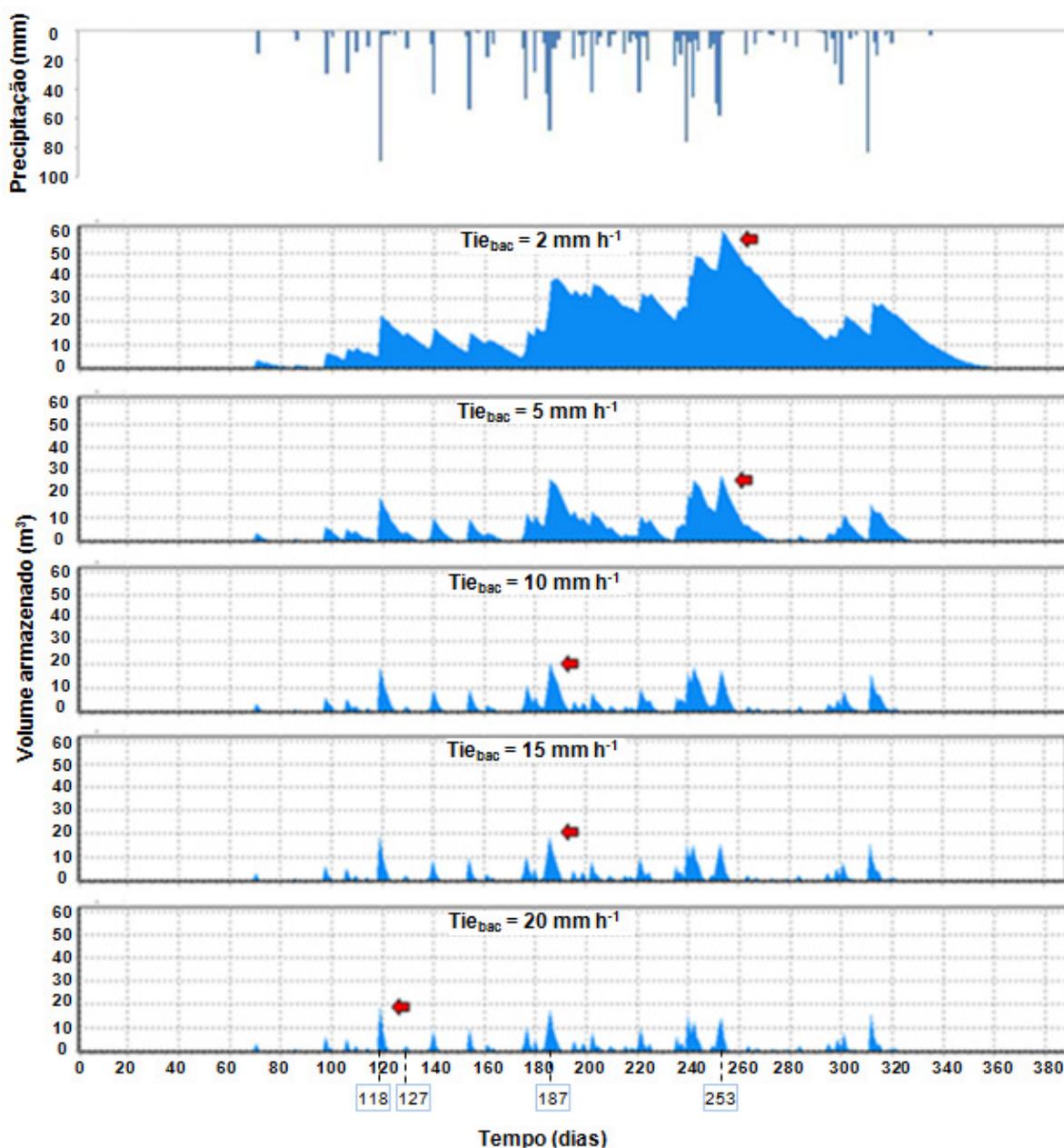


Figura 7 – Evolução do volume armazenado ao longo de um ano da série, considerando cinco Tie_{bac} diferentes.

Os valores de VES estão diretamente relacionados com os volumes totais precipitados ao longo da série, que são mantidos constantes para uma mesma localidade, com a taxa de infiltração estável da água no solo do leito da estrada (Tie_{est}) e com a área de drenagem, que nos cálculos de V_B também são mantidos constantes.

Na Figura 7 nota-se que os valores de V_A no dia 118 foram iguais para as Tie_{bac} de 5, 10, 15 e 20 $mm\ h^{-1}$, e correspondentes a 18,5 m^3 . Estes valores foram iguais devido ao fato da bacia de acumulação estar vazia no dia 117, ou seja, o volume armazenado remanescente do dia anterior é igual a zero. Nestas condições, o valor de V_A é igual ao valor de VES (equação 8), que, por sua vez, não varia para diferentes Tie_{bac} . Para a Tie_{bac} de 2 $mm\ h^{-1}$, o valor de V_A no dia 118 foi de 22,6 m^3 , uma vez que o volume armazenado remanescente do dia 117 era de 4,1 m^3 .

Analisando a Figura 7 é possível notar que, de maneira geral, para as maiores Tie_{bac} , a magnitude dos valores de V_A ao longo do ano está relacionada à magnitude dos eventos de precipitação que ocorrem no mesmo período, enquanto que para menores Tie_{bac} os valores de V_A estão associados à ocorrência de eventos de precipitação em dias sucessivos.

O comportamento do volume infiltrado está diretamente relacionado aos valores de Tie_{bac} . Na Figura 7 observa-se, para um mesmo evento, um menor decaimento dos valores de V_A ao longo do tempo para as menores Tie_{bac} , ou seja, menores valores de Tie_{bac} implicam em menores valores de VI e, conseqüentemente, em um maior tempo necessário para a água armazenada na bacia infiltrar totalmente no solo.

O volume de escoamento superficial correspondente ao dia 118 (Figura 6) é totalmente infiltrado na bacia de acumulação, para uma Tie_{bac} de 10 $mm\ h^{-1}$, com cinco dias. Já para as Tie_{bac} de 15 e 20 $mm\ h^{-1}$, o volume de escoamento superficial levou menos tempo para infiltrar totalmente na bacia, necessitando para isso, quatro e três dias, respectivamente.

Para a Tie_{bac} de 5 $mm\ h^{-1}$ nota-se que o tempo não foi suficiente para que o VES infiltrasse totalmente na bacia antes do dia 127. Neste dia ocorreu um novo evento de escoamento superficial com magnitude de 2,4 m^3 , e como nesse dia ainda haviam na bacia 1,7 m^3 correspondente ao valor de V_{Ri-1} , o volume armazenado foi de 4,1 m^3 . Para a Tie_{bac} de 2 $mm\ h^{-1}$, o valor de V_A no dia 127 foi ainda maior, e correspondente a 14,3 m^3 , sendo devido à redução dos volumes que infiltraram no fundo da bacia no período que antecede este dia, o que acarreta no aumento do valor V_A nesse dia.

A magnitude e o período de ocorrência do volume máximo armazenado na bacia de acumulação (V_{max}) são condicionados pela capacidade de infiltração de

água no fundo da bacia e pela magnitude e seqüência com que ocorrem os eventos de escoamento superficial. Na Figura 7 é possível observar que o valor de V_{max} (indicado pelas setas vermelhas) ocorre em dias diferentes para as diferentes Tie_{bac} . Para a Tie_{bac} de 20 mm h^{-1} o dia em que ocorreu o valor de V_{max} foi o mesmo em que ocorreu o evento de escoamento superficial de maior magnitude do ano (dia 118), uma vez que maiores valores de Tie_{bac} reduzem o tempo necessário para que o volume armazenado na bacia infiltre totalmente. Conseqüentemente, há uma menor propensão de que a ocorrência de novos eventos com escoamento superficial encontre a bacia ainda com volume remanescente armazenado. Portanto quanto maior for o valor da Tie_{bac} , maior será a probabilidade de que o valor de V_{max} ocorra no dia em que ocorrer o maior valor de VES.

Para as Tie_{bac} de 10 e 15 mm h^{-1} o valor de V_{max} foi obtido no dia 187. Nesse dia, o valor de VES foi de $15,3 \text{ m}^3$ e, mesmo não sendo o maior do ano, provocou a condição mais crítica, pois quando este evento ocorreu a bacia apresentava um volume armazenado remanescente do dia anterior. Para as Tie_{bac} de 2 e 5 mm h^{-1} , o valor de V_{max} foi obtido no dia 253, caracterizando que quando a Tie_{bac} é mais baixa a magnitude do evento não representa, em geral, a condição mais crítica, sendo o efeito acumulativo dos eventos de escoamento superficial correspondente, em geral, à condição mais crítica, fazendo com que, para baixos valores de Tie_{bac} os valores de V_{max} tendam a ocorrer mais para o final do período chuvoso.

Desta forma, a distribuição dos valores de VES na série é um fator determinante do valor de V_{max} , sendo esse efeito mais acentuado para as menores Tie_{bac} . Na Figura 7 é apresentado, para as diferentes Tie_{bac} estudadas, o número médio de dias por mês, em que ocorre o escoamento superficial tendo a bacia ainda volume armazenado remanescente de dias anteriores ($VES > 0$ e $VA_{i-1} > 0$).

De acordo com a Figura 8, observa-se que, com a diminuição do valor da Tie_{bac} , houve um aumento do número médio de dias em que a chuva ocorre estando a bacia ainda armazenando um volume de água remanescente de dias anteriores, uma vez que o tempo requerido para a infiltração total da água na bacia é maior para menores Tie_{bac} . Para Tie_{bac} de 2 mm h^{-1} observa-se que, no período que vai de dezembro a fevereiro, o número médio de dias que atendem à

condição descrita é igual ao número de dias chuvosos, ou seja, o acúmulo dos volumes escoados nos dias anteriores fez com que a bacia se mantivesse sempre cheia nesse período do ano.

Nos meses menos chuvosos do ano, o número médio de dias que atende à condição descrita, não varia muito para as diferentes Tie_{bac} , em virtude da baixa ocorrência de eventos de precipitação nesses meses e, conseqüentemente, menor a probabilidade da bacia de acumulação estar ainda com volume armazenado remanescente de dias anteriores quando ocorrer uma chuva. Portanto, mesmo que eventualmente ocorra um evento e, ainda que, a bacia apresente baixa capacidade de infiltração da água no solo do fundo da bacia, o tempo para que essa água infiltre totalmente é maior.

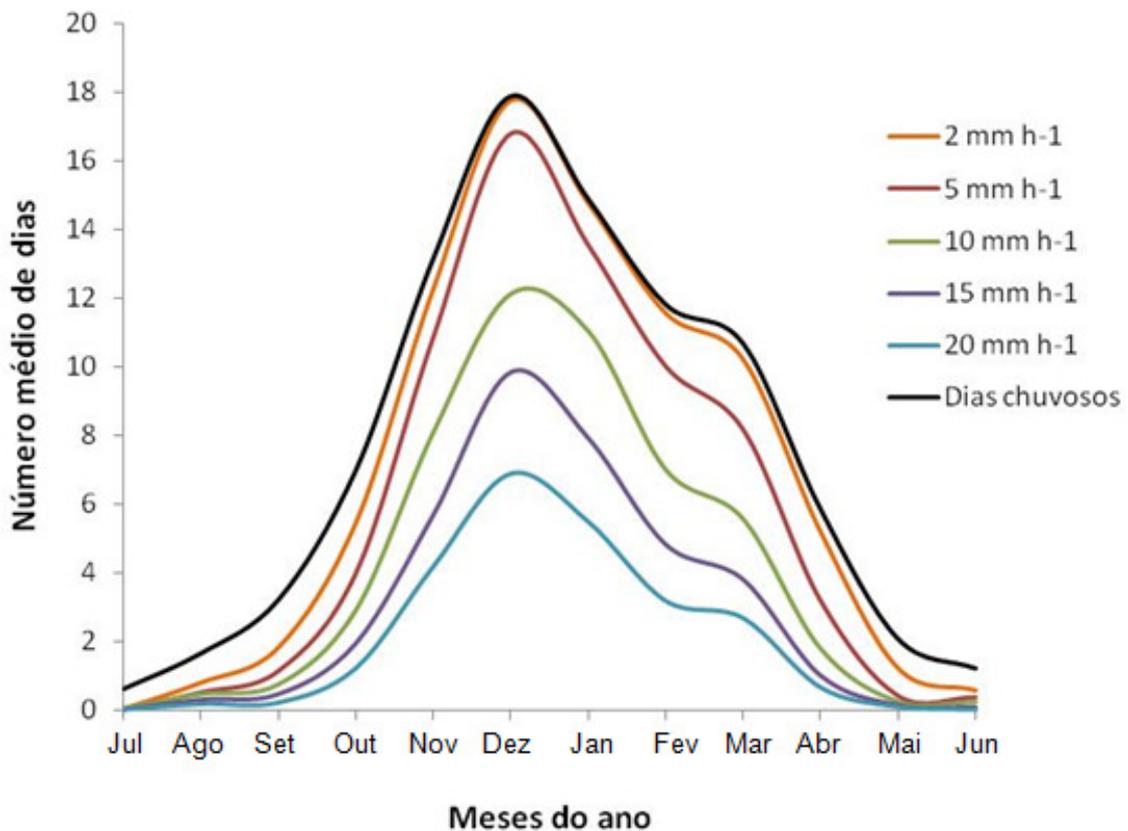


Figura 8 – Número médio de dias chuvosos por mês e número médio de dias por mês em que a chuva ocorre estando a bacia ainda com volume armazenado remanescente de dias anteriores, considerando diferentes Tie_{bac} , para as condições de precipitação do município de João Pinheiro – MG.

No Quadro 3 estão apresentados os índices de sensibilidade do modelo à Tie_{bac} . Os valores negativos indicam a relação inversamente proporcional entre os dados de Tie_{bac} e os dados de V_B obtidos pelo modelo. Os índices indicam, ainda, que o modelo apresentou uma sensibilidade decrescente com o aumento da Tie_{bac} .

Quadro 3 - Índice de sensibilidade do modelo à Tie_{bac} , para diferentes valores de retorno

T = 5 anos				
Valor de entrada (Tie)		Resposta do modelo (V_B)		Índice de sensibilidade
Tie_1	Tie_2	V_{B1}	V_{B2}	
2	5	55,63	30,94	- 0,665
5	10	30,94	25,05	- 0,316
10	15	25,05	23,49	- 0,161
15	20	23,49	22,91	- 0,087
T = 10 anos				
2	5	63,30	35,42	- 0,659
5	10	35,42	28,86	- 0,306
10	15	28,86	27,14	- 0,154
15	20	27,14	26,49	- 0,085
T = 15 anos				
2	5	67,63	37,94	- 0,656
5	10	37,94	31,01	- 0,302
10	15	31,01	29,2	- 0,150
15	20	29,2	28,51	- 0,084
T = 18 anos				
2	5	69,55	39,06	- 0,655
5	10	39,06	31,97	- 0,299
10	15	31,97	30,11	- 0,150
15	20	30,11	29,41	- 0,082
T = 20 anos				
2	5	70,66	39,71	- 0,654
5	10	39,71	32,52	- 0,299
10	15	32,52	30,64	- 0,149
15	20	30,64	29,93	- 0,082

A maior sensibilidade do modelo a menores valores de Tie_{bac} também pode ser observada na Figura 7 a partir dos valores de V_A calculados para diferentes Tie_{bac} . Nota-se que a variação dos valores de V_A considerando as Tie_{bac} de 10, 15 e 20 $mm\ h^{-1}$ é pequena em comparação com os valores de V_A obtidos para as Tie_{bac} de 5 e 2 $mm\ h^{-1}$, que por sua vez, são nitidamente superiores.

4.1.2. Análise do modelo com base na alteração da declividade do talude de jusante e da largura da bacia de acumulação

Na Figura 9 está representado o comportamento do modelo nos cálculos do volume requerido para a bacia de acumulação (V_B), em função de T , para diferentes declividades do talude de jusante da bacia de acumulação (s_1). De acordo com a Figura 9, nota-se que o valor de V_B , para todos os valores de s_1 , aumentou com o aumento do valor de T , tendência essa condicionada em função da aplicação da distribuição de Gumbel, conforme foi discutido no item 4.1.1.

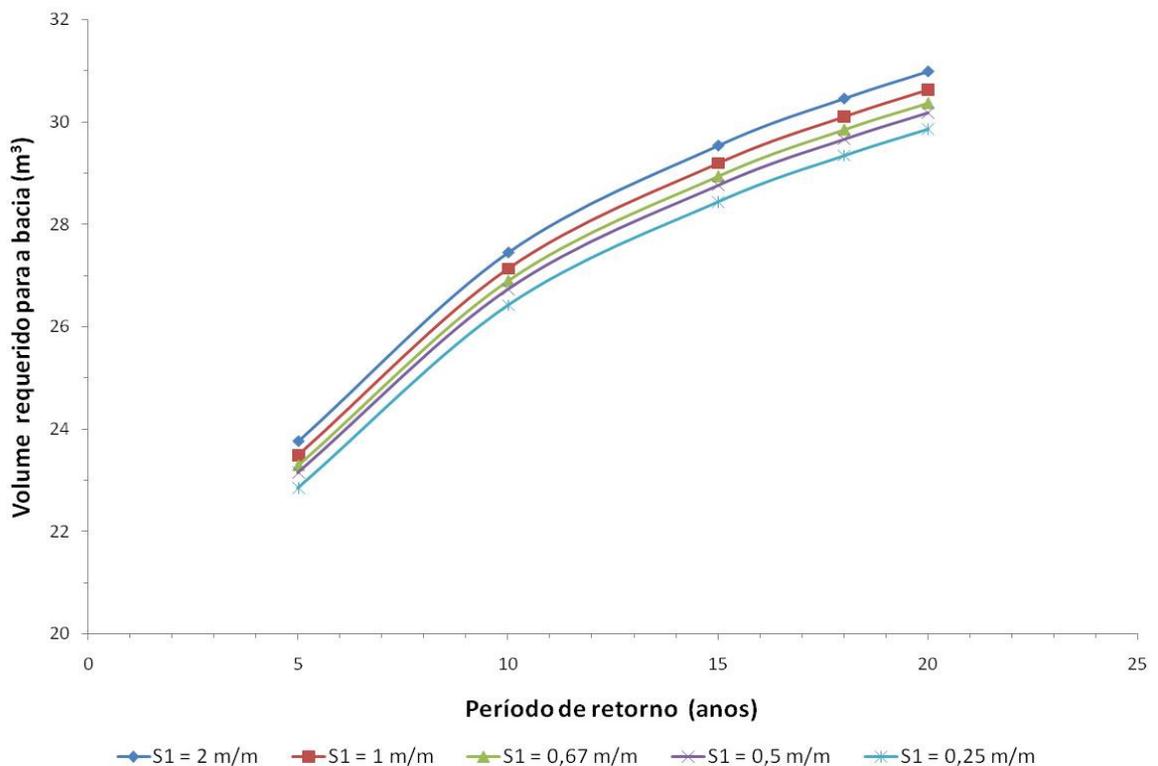


Figura 9 - Volume requerido para a bacia de acumulação em função de T considerando diferentes declividades do talude de jusante da bacia (s_1).

Ao analisar o comportamento dos valores de s_1 para um mesmo valor de T , observou-se que os menores valores de (V_B) estão associados a menores valores de s_1 , uma vez que, para um mesmo valor de V_A , a redução da declividade do talude implica na redução dos valores de H_i (equação 9). Nessas condições, o rebaixamento do nível de água na bacia (ΔH) não varia, pois a $T_{ie_{bac}}$ é mantida constante, desta forma a diferença entre H_i e ΔH é menor e, conseqüentemente, menor o valor de V_{Ri} (equação 8).

No Quadro 4 estão apresentados os índices de sensibilidade do modelo à variável s_1 , para diferentes T . Observou-se que os menores índices ocorreram quando foram considerados os maiores e os menores valores de s_1 . Contudo, esses resultados não correspondem a uma maior sensibilidade do modelo para os valores medianos considerados no Quadro 4, uma vez que esses dados, assim como os calculados para os demais intervalos, estão bem próximos de zero o que indica a baixa sensibilidade do modelo à variável s_1 . A baixa sensibilidade do modelo à s_1 também pode ser notada na Figura 9, uma vez que as curvas que representam a variação de V_B em função de T , para cada valor de s_1 , estão muito próximas umas das outras.

A Figura 10 apresenta o comportamento do modelo no cálculo dos valores de V_B obtidos em função de T , para diferentes larguras da bacia de acumulação (L_B). Nota-se que para um mesmo valor de T , o aumento da largura da bacia de acumulação resulta em menores valores de V_B , uma vez que, para bacias mais largas, o valor de H_i é menor considerando um mesmo valor de V_A , o que implica em um menor volume armazenado remanescente nesse dia. Sendo assim, quando o valor de L_B é maior, menos intenso é o efeito da sobreposição dos eventos que ocorrem seguidamente na série e, conseqüentemente menor o volume requerido para a bacia de acumulação.

Quadro 4 - Índice de sensibilidade do modelo a s_1 , para diferentes T

T = 5 anos				
Valor de entrada (s_1)		Resposta do modelo (V_B)		Índice de sensibilidade
s_{11}	s_{12}	V_{B1}	V_{B2}	
2	1	23,76	23,49	0,017
1	0,67	23,49	23,29	0,022
0,67	0,5	23,29	23,15	0,021
0,5	0,25	23,15	22,85	0,020
T = 10 anos				
2	1	27,45	27,14	0,017
1	0,67	27,14	26,9	0,022
0,67	0,5	26,9	26,74	0,021
0,5	0,25	26,74	26,42	0,018
T = 15 anos				
2	1	29,54	29,2	0,017
1	0,67	29,2	28,94	0,023
0,67	0,5	28,94	28,76	0,021
0,5	0,25	28,77	28,44	0,017
T = 18 anos				
2	1	30,46	30,11	0,017
1	0,67	30,11	29,85	0,022
0,67	0,5	29,85	29,67	0,021
0,5	0,25	29,67	29,34	0,017
T = 20 anos				
2	1	30,99	30,64	0,017
1	0,67	30,64	30,37	0,022
0,67	0,5	30,37	30,19	0,020
0,5	0,25	30,19	29,86	0,016

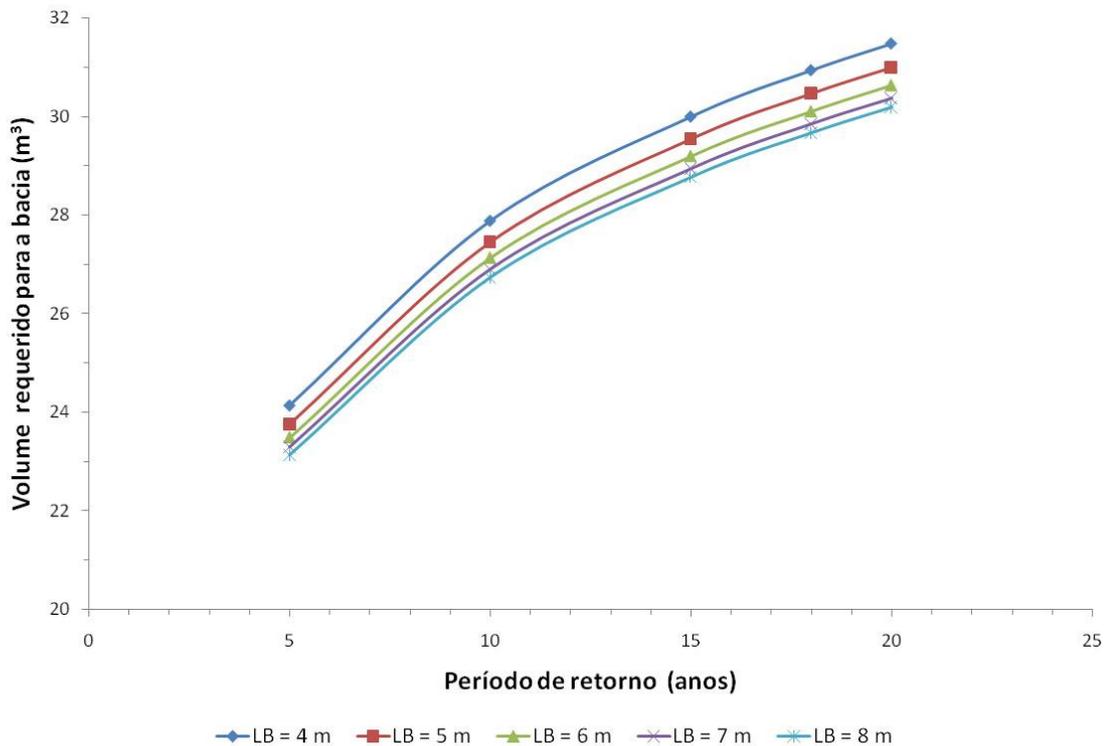


Figura 10 - Volume requerido para a bacia de acumulação para diferentes períodos de retorno, considerando diferentes larguras da bacia de acumulação (L_B).

No Quadro 5 estão apresentados os índices de sensibilidade do modelo à largura da bacia de acumulação, para diferentes T . Observa-se que os índices apresentados foram negativos, o que corresponde a uma relação inversamente proporcional do modelo nos cálculos de V_B a partir da variação de L_B . Nota-se ainda, que os índices de sensibilidade a L_B foram maiores do que os índices apresentados para s_1 , contudo, assim como os valores obtidos para s_1 , os valores obtidos para L_B se mantiveram próximos a zero, indicando a baixa sensibilidade do modelo à variação de V_B a partir da variação dos dados de L_B .

Quadro 5 - Índice de sensibilidade do modelo ao parâmetro L_B , para diferentes T

T = 5 anos				
Valor de entrada (L_B)		Resposta do modelo (V_B)		Índice de sensibilidade
L_{B1}	L_{B2}	V_{B1}	V_{B2}	
4	5	24,14	23,76	- 0,071
5	6	23,76	23,49	- 0,063
6	7	23,49	23,29	- 0,056
7	8	23,29	23,14	- 0,048
T = 10 anos				
4	5	27,88	27,45	- 0,070
5	6	27,45	27,14	- 0,062
6	7	27,14	26,9	- 0,058
7	8	26,9	26,74	- 0,045
T = 15 anos				
4	5	29,99	29,54	- 0,068
5	6	29,54	29,2	- 0,064
6	7	29,2	28,94	- 0,058
7	8	28,94	28,77	- 0,044
T = 18 anos				
4	5	30,93	30,46	- 0,069
5	6	30,46	30,11	- 0,064
6	7	30,11	29,85	- 0,056
7	8	29,85	29,67	- 0,045
T = 20 anos				
4	5	31,47	30,99	- 0,069
5	6	30,99	30,64	- 0,062
6	7	30,64	30,37	- 0,058
7	8	30,37	30,19	- 0,045

4.1.3. Análise do modelo considerando diferentes localidades

A Figura 11 apresenta o comportamento do modelo no cálculo do volume requerido para a bacia de acumulação para diferentes localidades. Os resultados demonstrados nessa figura evidenciam uma grande variabilidade no cálculo de V_B ao se considerar características de precipitação de regiões diferentes. Tais variações dos resultados se devem à propensão à ocorrência de eventos capazes

de gerar valores diferentes de VES para um mesmo dia da série e, ainda, a distribuição desses eventos de forma sucessiva ao longo da série.

Esses resultados refletem a importância da utilização de informações de precipitação representativas da região em estudo, para o cálculo de V_B .

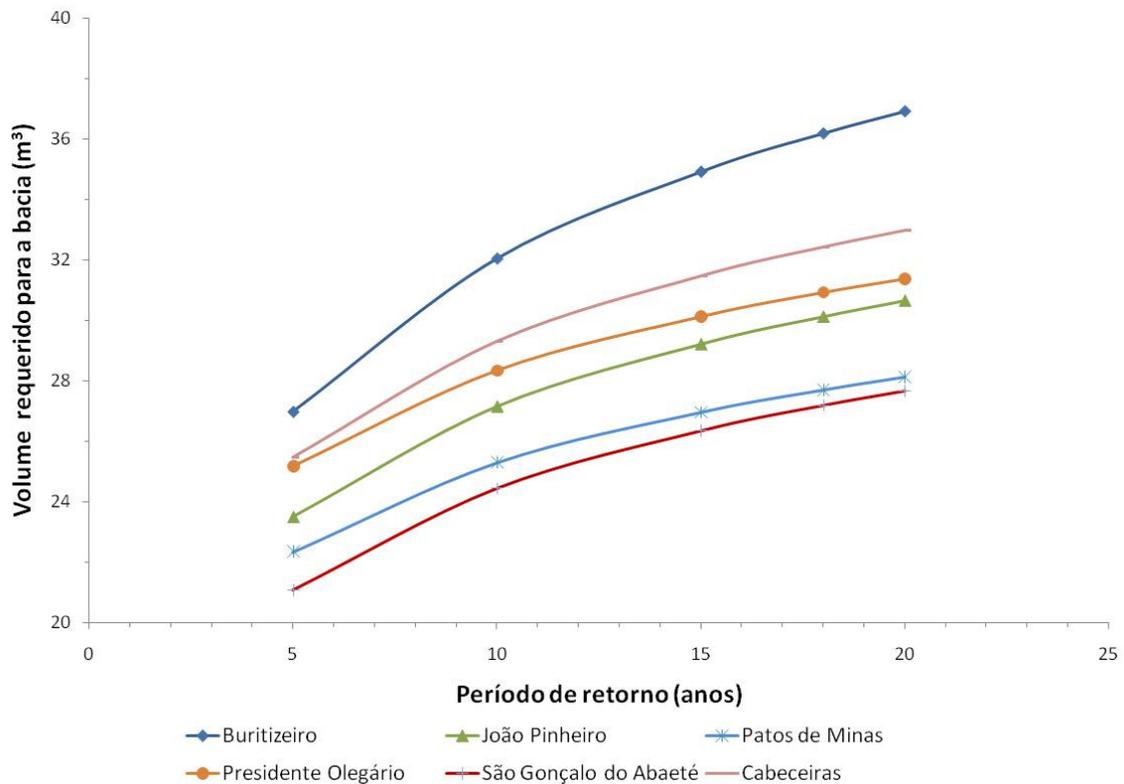


Figura 11 - Volume requerido para a bacia de acumulação para diferentes períodos de retorno, considerando diferentes localidades.

4.1.4. Análise comparativa dos índices de sensibilidade

Apresenta-se na Figura 12 a variação proporcional dos valores de V_B a partir da variação dos valores correspondentes às variáveis de entrada do modelo. A abscissa mostra a variação dos valores de entrada das variáveis estudadas e, na ordenada, a variação do volume requerido para a bacia de acumulação em relação a condição padrão estabelecida. Os índices de sensibilidade obtidos para as variáveis estudadas são apresentados no Quadro 6.

Os índices de sensibilidade obtidos indicam que o modelo apresenta a maior sensibilidade à variação da Tie_{bac} , sendo essa sensibilidade maior quando

da variação de menores valores de Tie_{bac} (Figura 12), uma vez que o efeito da sobreposição dos eventos torna-se mais intenso para essas condições, conforme apresentado na Figura 6. Desta forma, pequenas alterações dessa variável resultam em diferenças expressivas nos valores de V_B . Logo, a determinação e a utilização dessa variável deve ser criteriosa e realizada com maior rigor, de modo que os resultados obtidos sejam condizentes com a realidade.

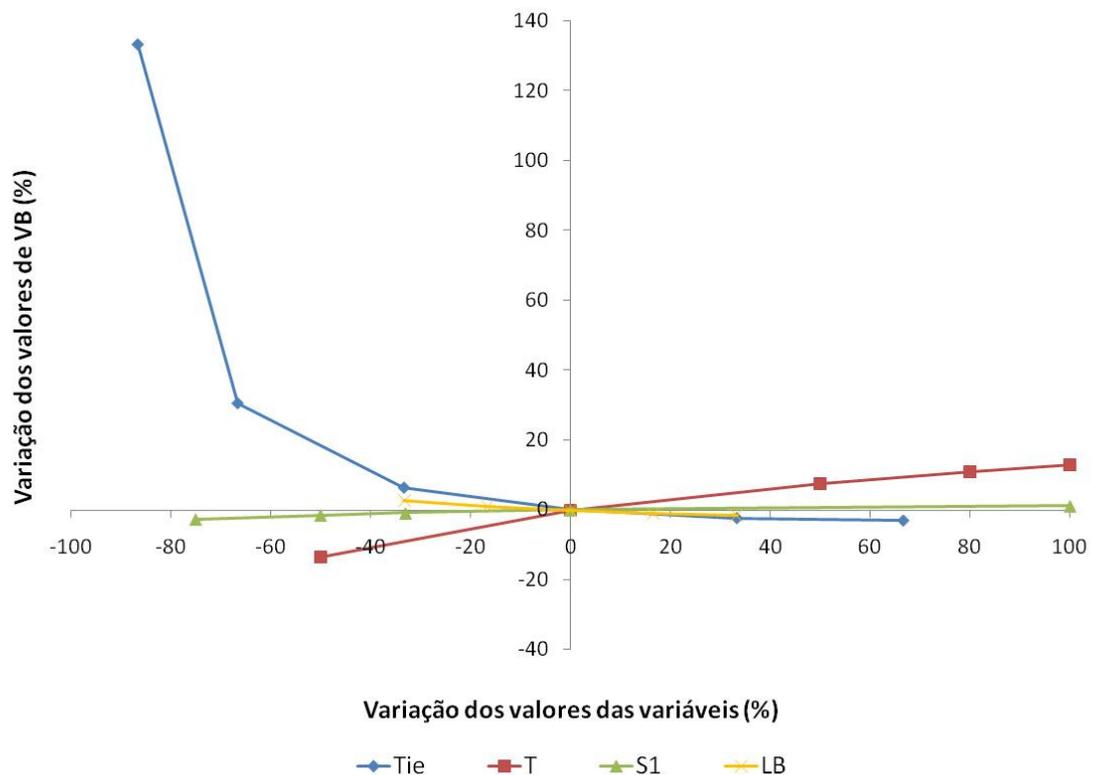


Figura 12 - Variação dos valores de V_B em função da variação dos valores das variáveis de entrada do modelo desenvolvido.

O modelo mostrou sensibilidade à variável período de retorno, contudo, esta se mostrou menos expressiva do que aquela apresentada para a variável Tie_{bac} (Quadro 6).

Quadro 6 - Índices de sensibilidade obtidos para as diferentes variáveis estudadas

Variáveis de entrada	Intervalo de valores	Índice de sensibilidade
Tie _{bac} (mm h ⁻¹)	2 – 5	- 0,659
	15 – 20	- 0,085
T (anos)	5 – 10	0,216
	18 – 20	0,166
L _B (m)	4 – 5	- 0,070
	7 – 8	- 0,045
s ₁ (m m ⁻¹)	2 – 1	0,018
	0,5 – 0,25	0,017

De acordo com a Figura 12 observa-se que as menores variações dos valores de V_B ocorreram a partir da variação dos valores correspondente às características geométricas da bacia, ou seja, dos valores de s_1 e L_B , refletindo assim os baixos índices de sensibilidade do modelo a estas variáveis (Quadro 6). Os resultados indicam que a alteração dessas variáveis não é decisiva no cálculo de V_B .

4.2. Comparação do modelo desenvolvido com o modelo desenvolvido por Griebeler et al. (2005)

A comparação entre os valores de V_B obtidos pelo modelo desenvolvido e pelo Estradas (Griebeler et al., 2005), foi realizada para seis localidades. Entretanto, para fins de discussão foram selecionadas os municípios de João Pinheiro e São Gonçalo do Abaeté que apresentaram resultados bastante distintos, sendo os resultados obtidos para as demais localidades apresentados em anexo.

Na Figura 13 é apresentada, para diferentes Tie_{bac}, a comparação dos valores de V_B calculados pelo modelo desenvolvido (MD) com os calculados pelo modelo Estradas (ME), sendo que para cada Tie_{bac} foram obtidas, para as condições de precipitação do município de João Pinheiro, as relações considerando diferentes valores de T. As retas apresentadas na figura, dizem

respeito à reta identidade e à regressão linear ajustada aos pontos do V_B calculado pelo modelo desenvolvido versus o V_B calculado pelo modelo Estradas.

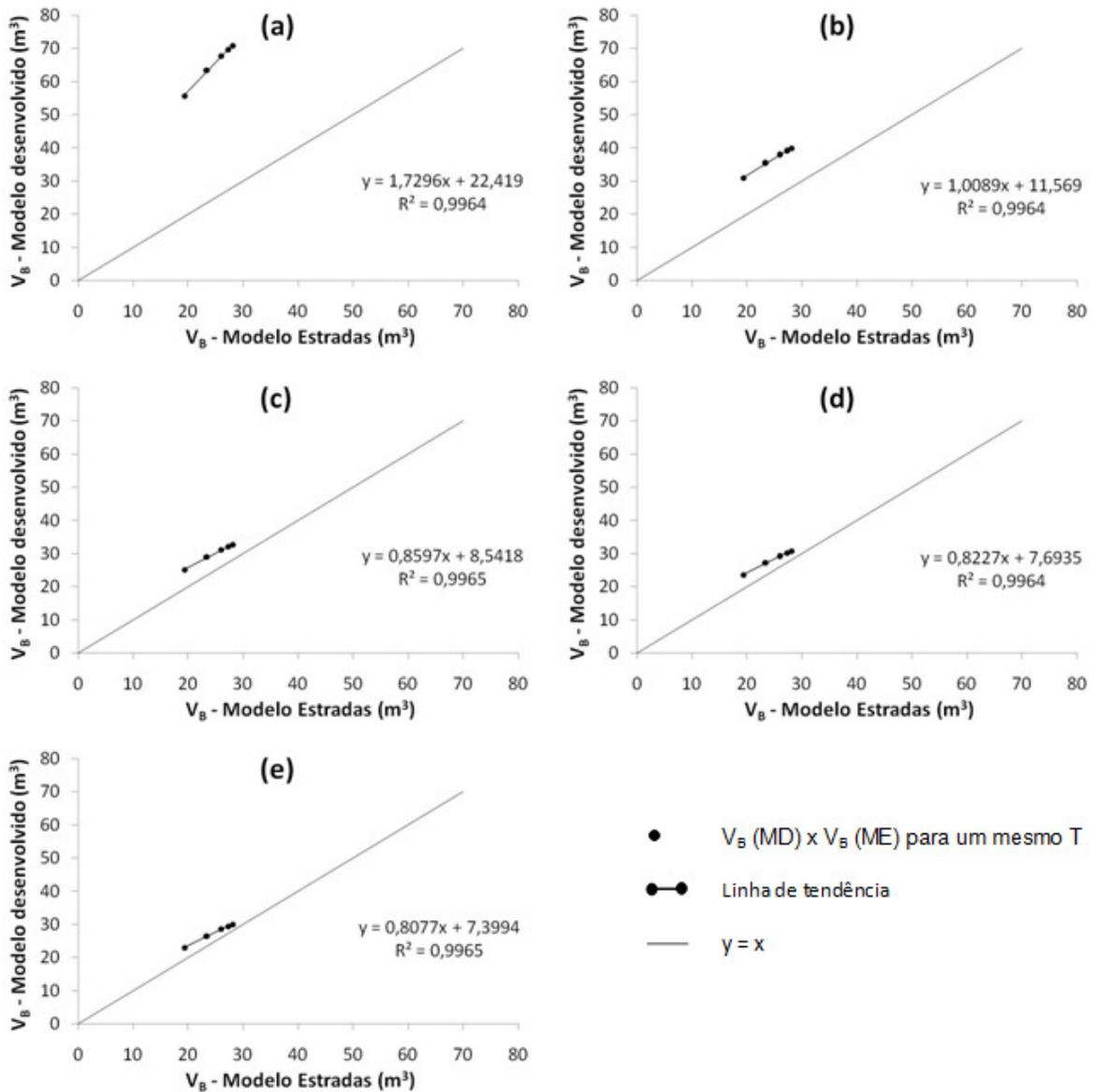


Figura 13 – Volumes requeridos para a bacia de acumulação calculados pelo modelo desenvolvido, considerando as Tie_{bac} de 2 (a), 5 (b), 10 (c), 15 (d) e 20 $mm\ h^{-1}$ (e), e pelo Estradas considerando os períodos de retorno de 5, 10, 15, 18 e 20 anos e as condições de precipitação do município de João Pinheiro – MG.

De acordo com a Figura 13 nota-se que, para João Pinheiro, os valores de V_B obtidos pelo modelo desenvolvido foram sempre superiores aos obtidos pelo Estradas. A tendência dos valores de V_B obtidos pelo modelo desenvolvido serem

maiores que os obtidos pelo Estradas é justificada pela própria concepção teórica dos modelos. No modelo desenvolvido, é levado em consideração o efeito da sobreposição dos eventos de escoamento superficial nos volumes armazenados em cada dia da série e, conseqüentemente, no volume requerido para a bacia de acumulação. No Estradas é levado em consideração apenas um evento associado ao período de retorno determinado, não sendo portanto, considerado o fato de existirem inúmeros eventos ao longo da série em que o volume escoado não infiltra totalmente durante o dia, e que o acúmulo desses volumes ao longo de um período chuvoso pode representar uma condição mais crítica para o projeto da bacia do que o volume advindo de uma única chuva, como é considerado pelo Estradas.

A comparação entre os modelos para diferentes Tie_{bac} mostra que para menores valores de Tie_{bac} obtêm-se maiores diferenças nos valores de V_B calculados pelos dois modelos. Para a Tie_{bac} de 2 mm h^{-1} , observa-se que os valores de V_B obtidos pelo modelo desenvolvido estimou maiores valores de V_B , cuja magnitude, em média, foram 2,65 vezes maiores que os obtidos pelo Estradas. Para as Tie_{bac} de 5, 10, 15 e 20 mm h^{-1} , foram observadas diferenças em média, de 1,48; 1,21; 1,14 e 1,11 vezes, respectivamente.

Esse comportamento é resultante de um efeito mais acentuado da sobreposição dos eventos de escoamento superficial quando a Tie_{bac} é mais baixa (Figura 7), fazendo com que os volumes armazenados na bacia e, conseqüentemente, o valor de V_B calculado pelo modelo desenvolvido seja maior. Como o Estradas não considera essa característica, a diferença entre os valores de V_B calculados pelos modelos aumenta.

Comparando os modelos para diferentes valores de T observou-se que, para os diferentes valores de Tie_{bac} , houve uma tendência de comportamento linear entre os valores de V_B obtidos pelos modelos (Figura 13). Para a Tie_{bac} de 2 mm h^{-1} , os valores de V_B obtidos pelo modelo desenvolvido apresentaram um aumento da diferença em relação aos obtidos pelo modelo Estradas com o aumento de T , representado pelo coeficiente angular de equação, superior a 1. Com o aumento da Tie_{bac} os coeficientes angulares das equações de regressão diminuem, sendo, inclusive para as Tie_{bac} de 10, 15 e 20 mm h^{-1} inferiores a 1, o que indica a redução das diferenças entre os modelos com o aumento de T .

A tendência evidenciada da diferença entre os valores obtidos pelos modelos de aumentar com o período de retorno para menores Tie_{bac} decorre das diferenças dos procedimentos utilizados para a estimativa de V_B , sendo que enquanto no Estradas o valor de V_B é estimado considerando uma única chuva associada ao período de retorno de interesse, estimada pela equação de intensidade, duração e frequência (equação 1), no modelo proposto o valor de V_B é calculado a partir da aplicação da distribuição de Gumbel à série anual de volumes máximos armazenados.

O valor do V_B calculado pelo Estradas não varia com a variação da Tie_{bac} do fundo da bacia, sendo, o valor de V_B calculado pelo Estradas para um período de retorno constante, independente do valor da Tie_{bac} . Em contrapartida, o modelo desenvolvido apresenta, conforme discutido no item 4.1.1, uma expressiva sensibilidade à variação na Tie_{bac} , sendo esta mais acentuada para os menores valores desta variável. Assim sendo, para um mesmo valor de T , enquanto o valor de V_B permanece constante pelo Estradas, este apresenta uma variação considerável pelo modelo desenvolvido, sendo esta mais acentuada para as menores Tie_{bac} .

A comparação entre os valores de V_B obtidos pelo Estradas e pelo modelo desenvolvido foi também realizada considerando as condições de precipitação características do município de São Gonçalo do Abaeté – MG, (Figura 14), sendo que para estas condições, os valores de V_B obtidos pelo modelo desenvolvido foram maiores do que o Estradas apenas para a Tie_{bac} de 2 mm h^{-1} .

A diferença entre os resultados obtidos para as duas localidades estudadas se deve às diferenças nas condições de precipitação inerentes a cada localidade estudada, que influenciaram tanto os valores de V_B obtidos pelo modelo desenvolvido quanto os valores obtidos pelo Estradas. Enquanto os valores de V_B calculados pelo modelo desenvolvido foram maiores para as condições de João Pinheiro, os valores obtidos pelo Estradas foram maiores para as condições de precipitação de São Gonçalo do Abaeté. Desta forma, somente quando a Tie_{bac} foi de 2 mm h^{-1} os valores calculados pelo modelo desenvolvido foram maiores que os obtidos pelo Estradas.

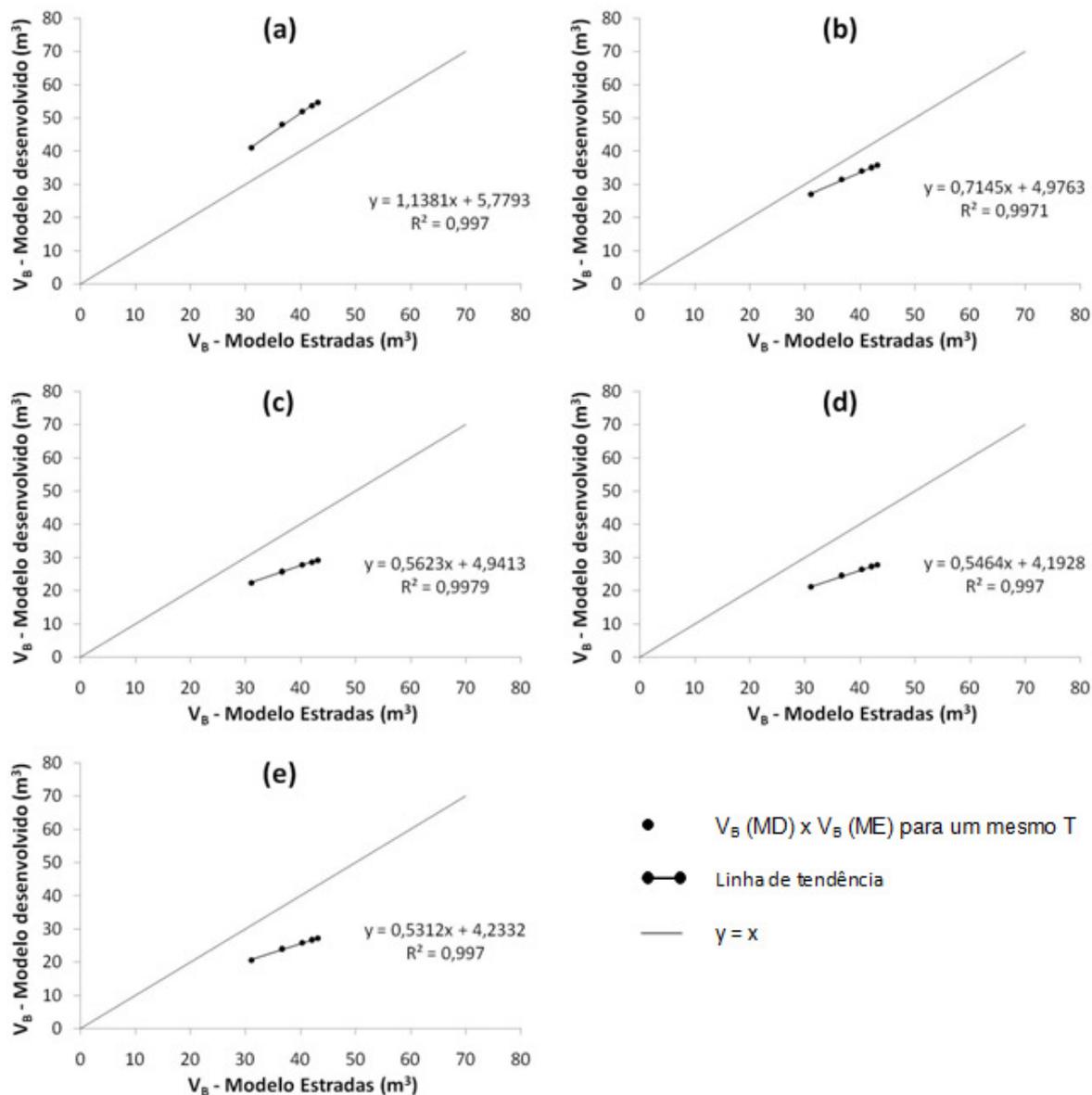


Figura 14 – Volumes requeridos para a bacia de acumulação calculados pelo modelo desenvolvido, considerando as $T_{ie_{bac}}$ de 2 (a), 5 (b), 10 (c), 15 (d) e 20 $mm\ h^{-1}$ (e), e pelo modelo Estradas admitindo-se os períodos de retorno de 5, 10, 15, 18 e 20 anos e as condições de precipitação do município de São Gonçalo do Abaeté – MG.

Na Figura 15 estão apresentados os perfis de intensidade de precipitação instantânea obtidos para São Gonçalo do Abaeté e João Pinheiro considerando um evento com período de retorno de 10 anos e a taxa de infiltração do leito da estrada ($1\ mm\ h^{-1}$). Para São Gonçalo do Abaeté, a duração crítica da precipitação, isto é, a duração capaz de causar o maior escoamento superficial é de 28,1 horas, e corresponde a uma lâmina de precipitação total 152,7 mm,

enquanto que para João Pinheiro a duração crítica da precipitação é de 13,3 horas que corresponde a uma lâmina de precipitação de 93,3 mm. Assim sendo, a lâmina precipitada para São Gonçalo do Abaeté para a condição crítica, isto é, que produz o máximo escoamento superficial ($i_i = Tie_{est}$), é cerca de 64 % maior que a evidenciada para João Pinheiro.

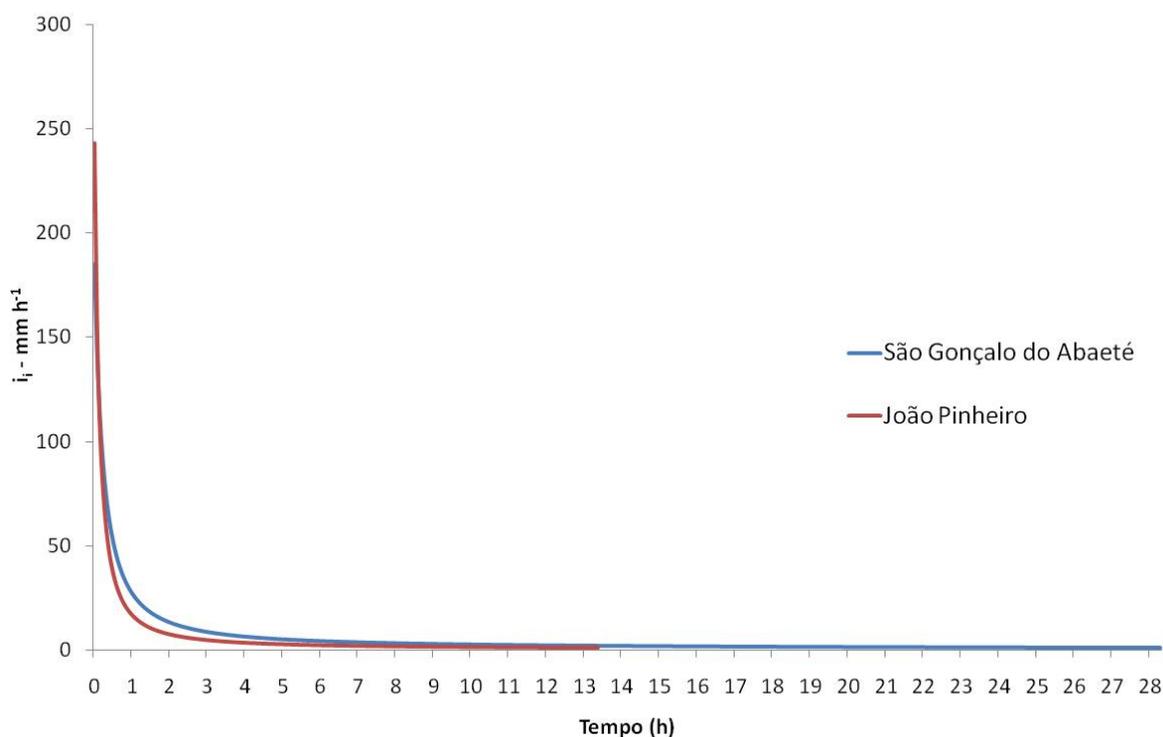


Figura 15 - Perfis de intensidade de precipitação instantânea correspondentes à chuva máxima esperada para um período de retorno de 10 anos nos municípios de São Gonçalo do Abaeté e João Pinheiro.

Com relação às diferenças entre os valores de V_B obtidos pelo modelo desenvolvido, o fato de João Pinheiro ter apresentado os maiores valores de V_B se deve à maior precipitação média anual e ao efeito mais expressivo da sobreposição dos eventos ao longo da série observados para essa localidade.

A precipitação média anual apresenta uma influência expressiva no cálculo de V_B , principalmente para baixas Tie_{bac} , conforme apresentado no item 4.1.1, sendo esta a 1.164,5 mm para João Pinheiro e de 900,9 mm para São Gonçalo do Abaeté.

Quanto ao efeito da sobreposição dos eventos de escoamento superficial evidencia-se pela análise das Figuras 8 e 16 que o número médio de dias

chuvosos que ocorrem em João Pinheiro é maior do que o número médio de dias chuvosos que ocorrem em São Gonçalo do Abaeté e, ainda, que o número médio de dias chuvosos que ocorrem quando a bacia ainda contém volume armazenado remanescente de eventos anteriores é maior, para todas as Tie_{bac} , para João Pinheiro.

Observa-se ainda, pela comparação das Figuras 8 e 16 que, enquanto para João Pinheiro e para a Tie_{bac} de 2 mm h^{-1} no período que vai de dezembro a fevereiro, não há esvaziamento da bacia, para São Gonçalo do Abaeté, nota-se que há anos em que a bacia esvazia, o que caracteriza um efeito de sobreposição mais acentuado para João Pinheiro.

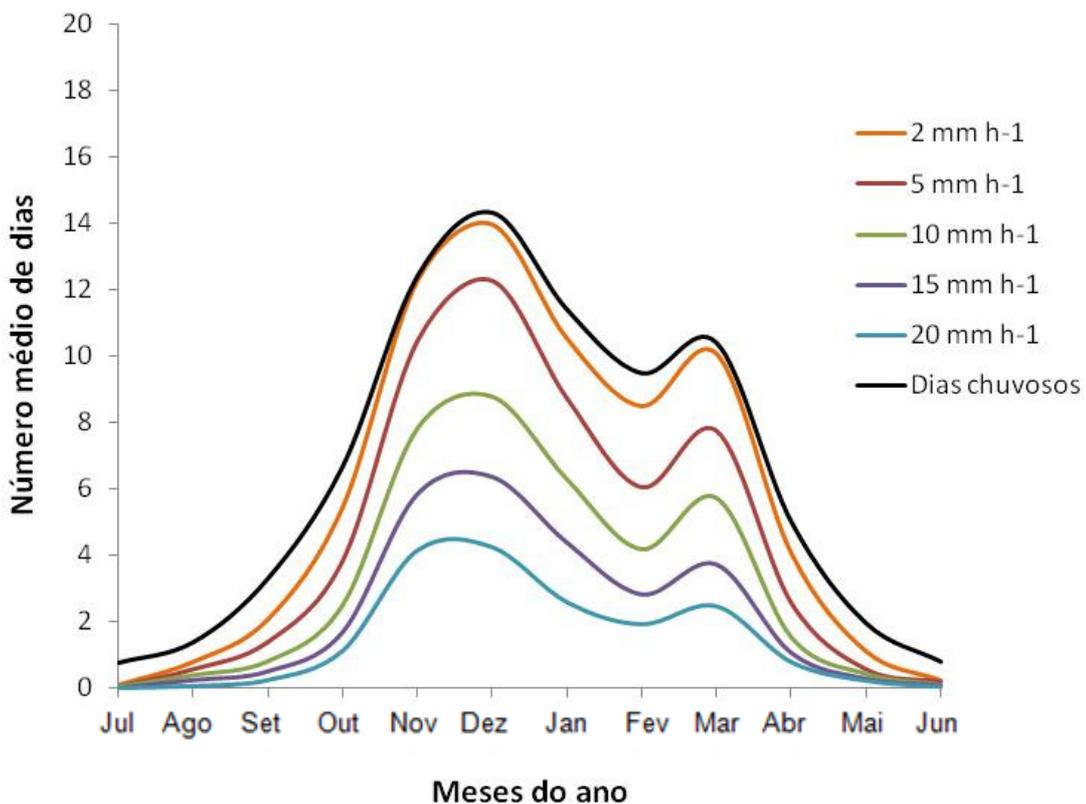


Figura 16 – Número médio de dias chuvosos por mês e número médio de dias por mês em que a chuva ocorre estando a bacia ainda com volume armazenado remanescente de dias anteriores, considerando diferentes Tie_{bac} , para as condições de precipitação do município de São Gonçalo do Abaeté – MG.

5. CONCLUSÕES

- O volume requerido para a bacia de acumulação (V_B) aumenta com a redução da taxa de infiltração da água no solo do fundo da bacia (Tie_{bac}), tendo o modelo desenvolvido apresentado uma sensibilidade alta às variações de Tie_{bac} para baixos valores dessa variável e uma sensibilidade muito baixa para altos valores de Tie_{bac} ;
- O efeito da sobreposição dos eventos de precipitação é mais acentuado quando o valor da Tie_{bac} é menor;
- A magnitude dos volumes armazenados na bacia de acumulação (V_A) ao longo do ano está relacionada à magnitude dos eventos de precipitação quando a Tie_{bac} é maior;
- A magnitude dos valores de V_A , para menores valores de Tie_{bac} , estão associados ao efeito mais acentuado da sobreposição dos eventos de precipitação que ocorrem em dias sucessivos;
- O modelo desenvolvido apresentou baixa sensibilidade às variáveis largura da bacia de acumulação (L_B) e declividade do talude de jusante da bacia (s_1);
- Os valores de V_B obtidos pelo modelo desenvolvido foram maiores que os obtidos pelo modelo Estradas para a Tie_{bac} de 2 mm h^{-1} , sendo a diferença entre os valores aumentada com o aumento de T ;
- Para as Tie_{bac} maiores, o aumento dos valores de V_B a partir do aumento dos valores de T , foi, em geral, proporcionalmente maior para o modelo Estradas.

6. RECOMENDAÇÕES

Este trabalho buscou o desenvolvimento de uma nova proposição metodológica para o controle do processo erosivo em estradas não pavimentadas a partir do dimensionamento de bacias de acumulação, realizado por meio de uma análise mais condizente com os processos que ocorrem naturalmente em campo. No entanto, são necessários estudos complementares para o aprimoramento da metodologia proposta. Sendo assim, recomenda-se:

- Desenvolvimento de módulo de cálculo para a locação de bacias de acumulação a partir da determinação das perdas de solo, considerando para tanto, series diárias de precipitação e as características de solo locais;
- Avaliar a variação da taxa de infiltração estável da água no solo do fundo da bacia de acumulação em função da carga hidráulica do volume armazenado na bacia e do assoreamento que ocorre nesta durante o período chuvoso;
- A implementação de módulos para o dimensionamento de bacias de acumulação com diferentes padrões construtivos;
- A consideração de trechos de estrada que recebem volume de escoamento superficial proveniente de áreas adjacentes a estas;

Sugeri-se ainda, o uso da metodologia que considera o balanço diário do volume armazenado considerando séries diárias de precipitação, desenvolvida neste trabalho, para o dimensionamento de obras hidráulicas para o controle da erosão hídrica em áreas agrícolas, como, por exemplo, o sistema de terraceamento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJOS FILHO, O. **Estradas de terra**. Jornal O Estado de São Paulo. São Paulo. Suplemento agrícola, 29 abr. 1998.

ANTONANGELO, A.; FENNER, P. T. Identificação dos riscos de erosão em estradas de uso florestal através do critério do fator topográfico LS. **Energia na Agricultura**. v. 20 n. 3, p. 1 – 20, 2005.

ARIEL, E.; GUCINSKI, L.H., 2000. Function, effects, and management of forest roads. **Forest Ecology . Management**. 133, 249–262.

BAENA, L. G. N. ; PRUSKI, Fernando Falco ; MOREIRA, Michel Castro ; SOUZA, V. B. C. ; ZANETTI, Sidney Sára ; OLIVEIRA, V. P. S. Programa Computacional para Geração de Séries de Dados Climáticos. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa-MG, v. 13, p. 210-220, 2005

BAENA, L.G.N. **Modelo para geração de séries sintéticas de dados climáticos**. Viçosa, MG: UFV, 2004. 154p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2004.

BAESSO, D. P.; GONÇALVES, F. L. R. **Estradas Rurais: técnicas adequadas de manutenção**. Florianópolis, DER, 2003. 236 p.

BERTOLINI, D.; DRUGOWICH, M. I.; LOMBARDE NETO, F.; BELINAZZE JÚNIOR, R. **Controle de erosão em estradas rurais**. Campinas: Coordenadoria de Assistência Técnica Integral – CATI, 1993. 37p.

CAIXETA, J. V. e R. S. MARTINS. O Desenvolvimento dos sistemas de Transporte: Auge, Abandono e Reativação Recente das Ferrovias. **Revista Teoria e Evidência Econômica**. v. 6. n. 11. p. 69-91. Passo Fundo, RS.

Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT. **Anuário estatístico dos transportes terrestres – AETT/2006**. 2007a. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/menu/rodovias/planejamentos/invescov>>. Acesso em: 24 jun. 2008

Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT. **Investimentos x custo operacional dos veículos**. 2007b. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/aett/aett_2006/index.htm>. Acesso em: 26 jun. 2008.

EGAN, A.F. Forest Roads: Mere Soil and Water Don't Mix. **Journal of Forest**, Bethesda, vol. 97, n. 8, p.18-21, 1999.

EVANGELISTA, A.W.P. ; FERREIRA, P.A. ; PRUSKI, F.F. ; SEDIYAMA, G.C. Avaliação do desempenho do modelo CLIGEN em gerar dados climáticos para modelos agrônômicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 119-127, 2006

EVANGELISTA, A. W. P. **Metodologia para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola**. Viçosa, MG: UFV, 2003, 102f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, 2003.

GRACE III, J. M. Sediment Moviment from Forest Road Systems. American Society of Agricultural Engineers, p. 13 – 14, 2002.

GRIEBELER, N.P., PRUSKI, F.F., SILVA, J.M.A., RAMOS, M.M., SILVA, D.D. **Modelo para a determinação do espaçamento entre desaguadouros em estradas não pavimentadas**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.29, n.3, p 397- 405, 2005.

GRIEBELER, N.P. **Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas**. Viçosa, MG: UFV, 2002. 121p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2002.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 103, p. 137 – 157, 2000.

KITE, G. W. **Frequency and risk analyses in hydrology**. 5. ed. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications.1988. 257p.

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

MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S.; SANT'ANNA, G. L. Estradas florestais: o fator determinante do transporte rodoviário florestal. **Revista da Madeira**, n. 73, 2003 b. Disponível em: <<http://www.remade.com.br>>. Acesso em: 12 set 2008.

NUNES, V.L. **Método de previsão de defeitos em estradas vicinais de terra com base no uso das redes neurais artificiais: trecho de Aquiraz – CE**. Fortaleza, CE: UFC, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, 2003.

OLIVEIRA, M. J. G. **Hierarquização para orientar a manutenção de rodovias não pavimentadas**. São Carlos, SP: USP, 2005. 112p. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo, 2005a.

OLIVEIRA, V. P. S. ; ZANETTI, Sidney Sara ; PRUSKI, Fernando Falco. CLIMABR: modelo para a geração de séries sintéticas de precipitação - Parte I. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 9, p. 356-363, 2005b.

OLIVEIRA, V. P. S. ; ZANETTI, Sidney Sara ; PRUSKI, Fernando Falco. CLIMABR: modelo para a geração de séries sintéticas de precipitação - Parte II. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 9, p. 349-355, 2005c.

OLIVEIRA, V. P. S. **Modelo de geração de séries sintéticas de precipitação**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 156p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2003.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental**. Relatório técnico parcial. São Paulo, SP: INPE, 2000. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf>. Acesso em: 11 out. 2007.

PIRES, F. R.; SOUZA, C. M. **Práticas mecânicas de conservação do solo e da água**. 2. ed. Viçosa-MG: Editora UFV, 2006. 216 p.

PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 1. ed. Viçosa - MG: Editora UFV, 2006. v. 1. 240 p.

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; TEIXEIRA, A. F.; CECÍLIO, R. A.; SILVA, J. M. A.; GRIEBELER, N. P. **HIDROS: dimensionamento de sistemas hidroagrícolas**. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. v. 1. 259 p.

PRUSKI, F.F., CALIJURI, M.L., BHERING, E.M., SILVA, J.M. Metodologia baseada no uso de sistemas de informações geográficas para obtenção de equações de chuvas intensas em qualquer localidade do Estado do Paraná. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.5, n.3, p.254-265, 1997.

SANTOS, A. **Estradas vicinais de terra**. São Paulo, IPT,1988

THOMAZ, C. A., **Pavimentação de Estradas Vicinais**. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo – SP, 1984, 58p.

VIRGENS FILHO, J. S. ; LEITE, Maysa de Lima ; CATANEO, Angelo . Avaliação de três geradores de dados climáticos na simulação da temperatura do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, n. 12, p. 196-209, 2006.

VIVIANE, E.; RAMOS, R. A. R. Proposta de indicadores para suporte a decisão em gerência de vias não pavimentadas. In: CONGRESSO LUSO BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO REGIONAL INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, 2., 2006, Braga, Portugal. **Anais eletrônicos**. Disponível em <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/7195/1/ramos-cn-4-2006-proposta%20de%20indicadores%20para%20suporte.pdf>>. Acesso em 12 jun. 2008.

ZANETTI, S.S. **Modelo computacional para geração de séries sintéticas de precipitação e do seu perfil instantâneo**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 71p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2003.

APÊNDICES

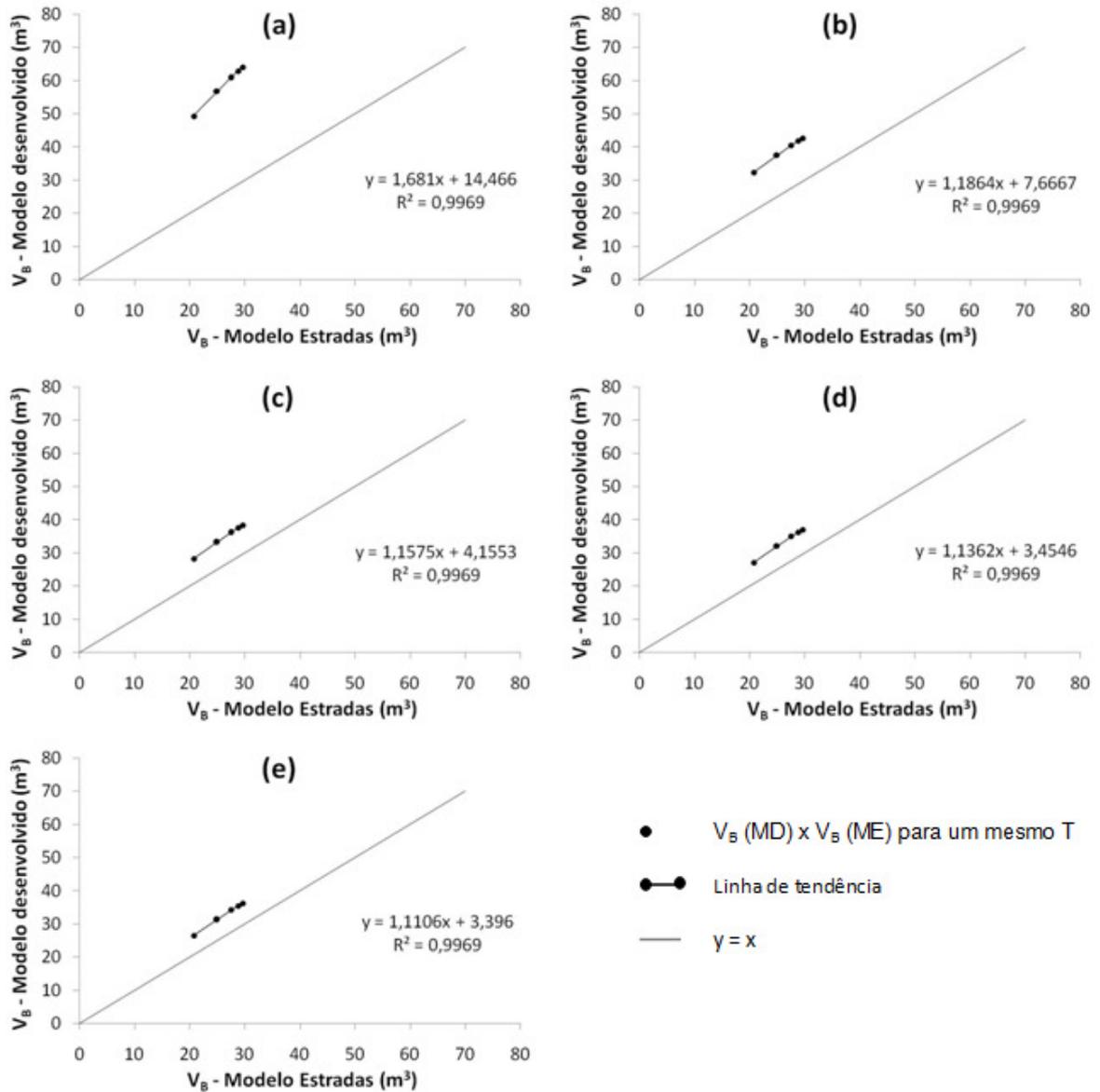


Figura A1 - Volumes requeridos para a bacia de acumulação calculados pelo modelo desenvolvido, considerando as Tie_{bac} de 2 (a), 5 (b), 10 (c), 15 (d) e 20 $mm\ h^{-1}$ (e), e pelo Estradas admitindo-se os períodos de retorno de 5, 10, 15, 18 e 20 anos e as condições de precipitação do município de Buritizeiro – MG.

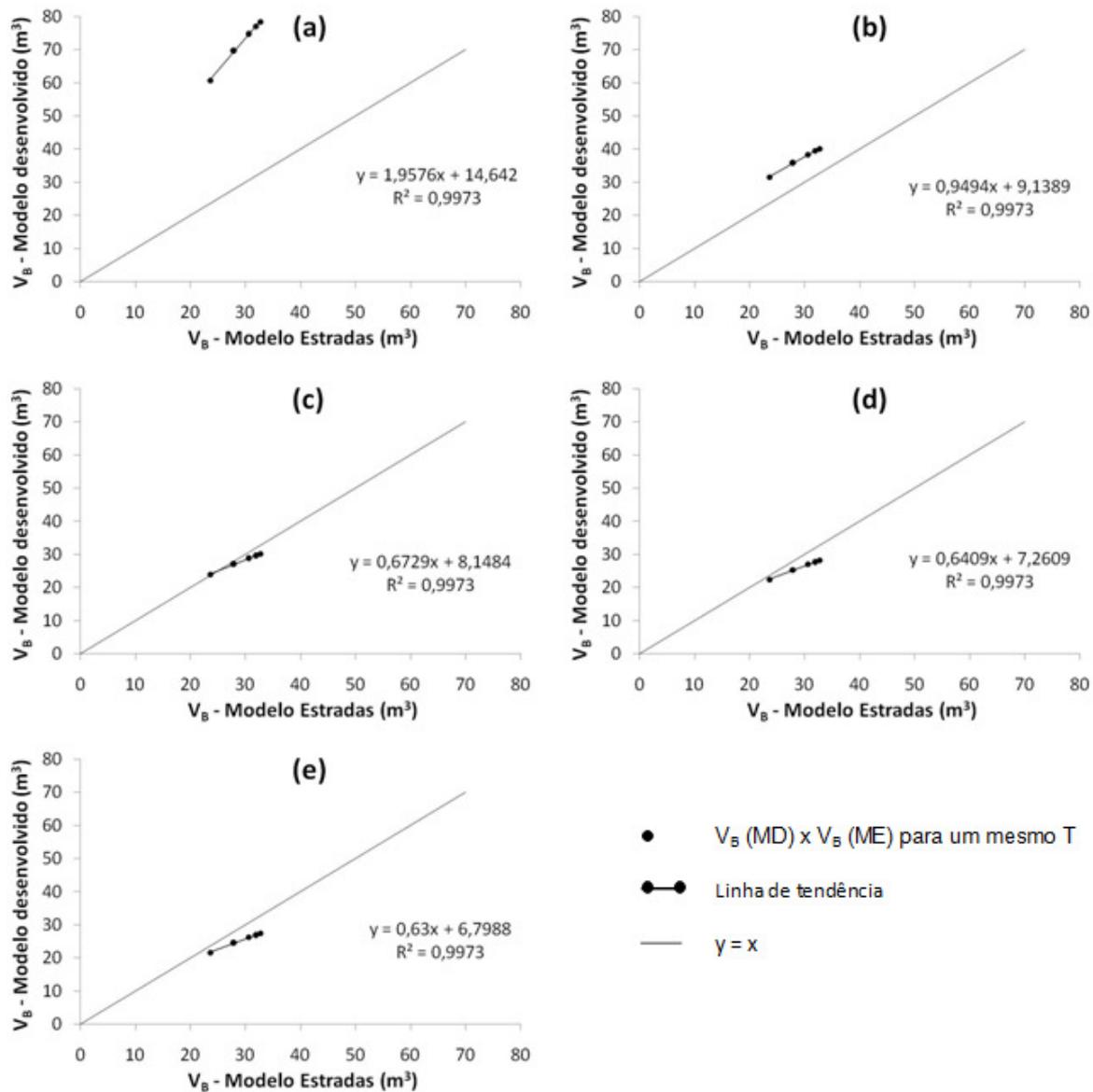


Figura A2 - Volumes requeridos para a bacia de acumulação calculados pelo modelo desenvolvido, considerando as Tie_{bac} de 2 (a), 5 (b), 10 (c), 15 (d) e 20 $mm\ h^{-1}$ (e), e pelo Estradas admitindo-se os períodos de retorno de 5, 10, 15, 18 e 20 anos e as condições de precipitação do município de Patos de Minas – MG.

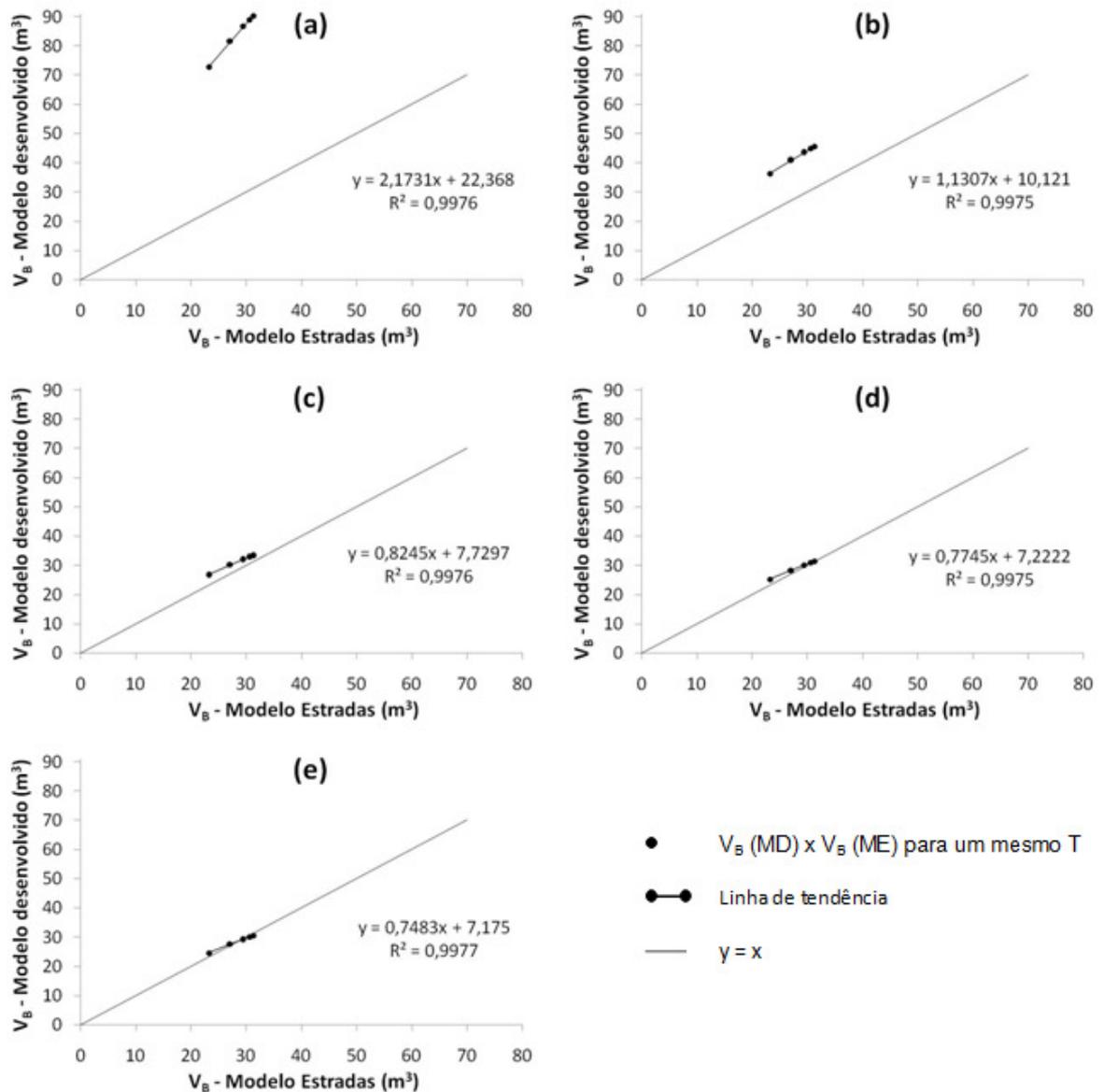


Figura A3 - Volumes requeridos para a bacia de acumulação calculados pelo modelo desenvolvido, considerando as Tie_{bac} de 2 (a), 5 (b), 10 (c), 15 (d) e 20 $mm\ h^{-1}$ (e), e pelo Estradas admitindo-se os períodos de retorno de 5, 10, 15, 18 e 20 anos e as condições de precipitação do município de Presidente Olegário – MG.

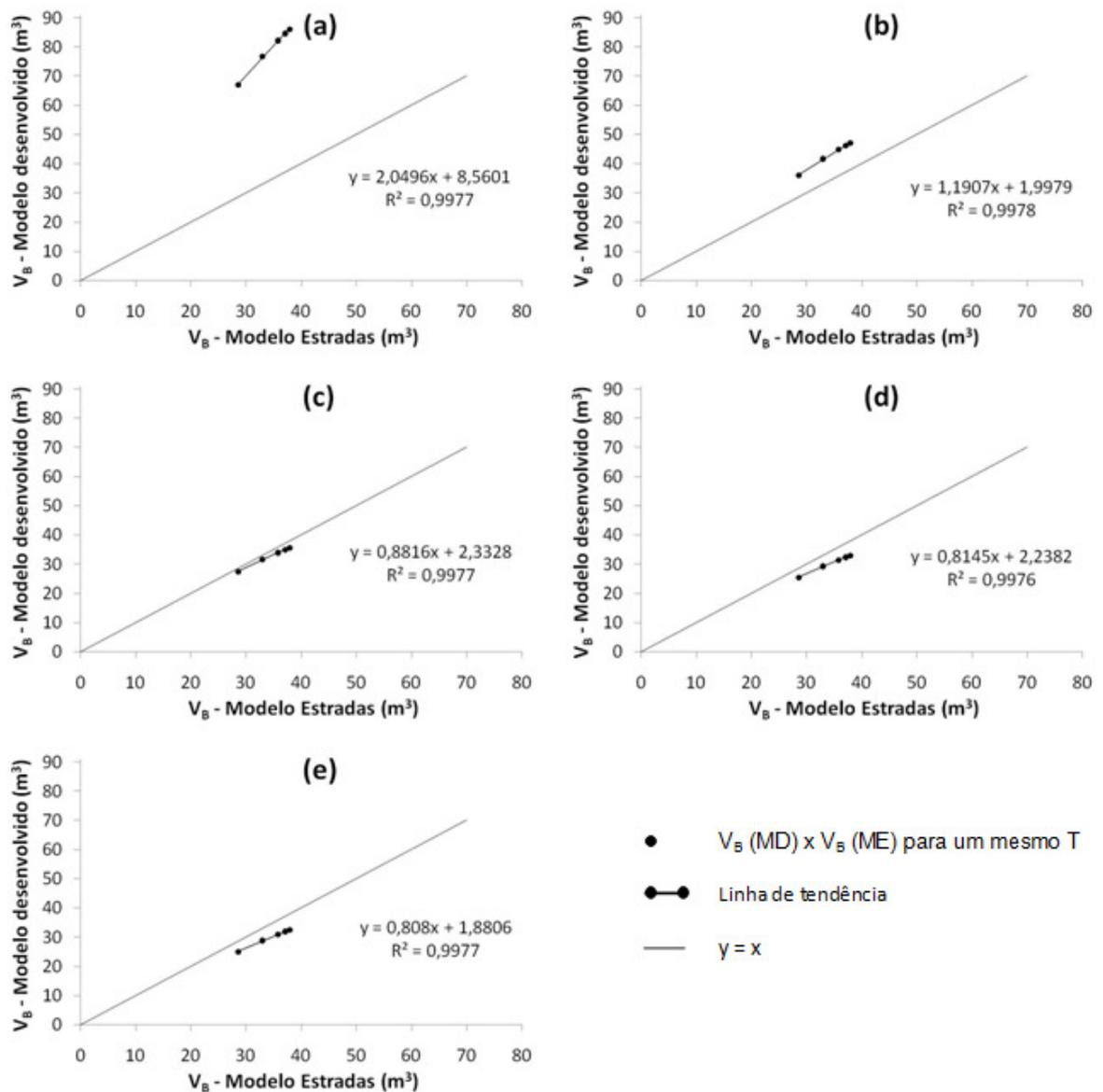


Figura A4 - Volumes requeridos para a bacia de acumulação calculados pelo modelo desenvolvido, considerando as Tie_{bac} de 2 (a), 5 (b), 10 (c), 15 (d) e 20 $mm\ h^{-1}$ (e), e pelo Estradas admitindo-se os períodos de retorno de 5, 10, 15, 18 e 20 anos e as condições de precipitação do município de Cabeceiras – GO.