

SIDNEY SÁRA ZANETTI

**MODELO COMPUTACIONAL PARA GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS
DE PRECIPITAÇÃO E DO SEU PERFIL INSTANTÂNEO**

Tese 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
2003**

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

T

Z28m
2003

Zanetti, Sidney Sára, 1977-

Modelo computacional para geração de séries sintéticas
de precipitação e do seu perfil instantâneo / Sidney Sára
Zanetti. – Viçosa : UFV,
71p. : il.

Orientador: Fernando Falco Pruski
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de
Viçosa

1. Precipitação (Meteorologia) – Simulação por com-
putador. 2. Precipitação (Meteorologia) – Probabilidades.
3. CLIMABR (Programa de computador). 4. Software -
Desenvolvimento. I. Universidade Federal de Viçosa. II.
Título.

CDD 19.ed. 551.577011
CDD 20.ed. 551.577011

SIDNEY SÁRA ZANETTI

**MODELO COMPUTACIONAL PARA GERAÇÃO DE SÉRIES
SINTÉTICAS DE PRECIPITAÇÃO E DO SEU PERFIL INSTANTÂNEO**

Tese 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: 27 de fevereiro de 2003.

Prof. Aristides Ribeiro

Prof. Frederico Terra de Almeida

Prof. Gilberto Chohaku Sedyama
(Conselheiro)

Prof. Antônio Teixeira de Matos

Prof. Fernando Falco Pruski
(Orientador)

Dedico este trabalho

Aos meus pais, Benedito Zanetti e Gertrudes Sára Zanetti,

Aos meus irmãos, Silvéria e Gilmar,

À minha namorada, Danieli e,

Aos meus parentes e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, Benedito Zanetti e Gertrudes Sára Zanetti, pelo apoio e por terem acreditado em mim.

À Danieli, pelo amor, paciência, apoio e compreensão em todos os momentos que passamos até hoje.

À Universidade Federal de Viçosa, mais especificamente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar este curso.

À CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

Ao professor Fernando Falco Pruski, pela orientação, amizade, confiança e apoio em todos os momentos.

Aos professores Demetrius David da Silva e Gilberto Chohaku Sedyama pelos conselhos e pela amizade.

Aos demais colegas e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola pela amizade e colaboração, em especial à colega Edna Maria Soares.

Aos amigos André Assis Pires, Fabiano Ricardo B. Caliman, Vicente de Paulo Santos de Oliveira, Michel Castro Moreira, Márcio Koetz e José Macio Alves da Silva pelo agradável convívio durante este curso.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho.

BIOGRAFIA

SIDNEY SÁRA ZANETTI, filho de Benedito Zanetti e Gertrudes Sára Zanetti, nasceu em Cachoeiro de Itapemirim, Estado do Espírito Santo, em 12 de fevereiro de 1977.

Em 1994, concluiu o 2º grau na Escola Agrotécnica Federal de Alegre, diplomando-se em Técnico em Agropecuária.

No primeiro semestre de 1996, iniciou o curso superior na Universidade Federal do Espírito Santo, diplomando-se, em maio de 2001, em Agronomia.

No segundo semestre de 2001, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa.

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Precipitação	4
2.2. Importância do conhecimento das precipitações	6
2.3. Chuvas intensas	8
2.4. Perfil de precipitação	10
2.5. Geradores de séries sintéticas	15
3. METODOLOGIA	22
3.1. Dados de entrada	25
3.1.1. Banco de dados da ANA	25
3.1.2. Arquivo texto	28
3.2. Parâmetros pluviográficos utilizados	29
3.3. Geração dos números aleatórios.....	30
3.4. Geração da série sintética	30
3.4.1. Precipitação diária.....	30
3.4.2. Duração da precipitação.....	32
3.4.3. Intensidade máxima instantânea de precipitação padronizada	35
3.4.4. Tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea	36

3.4.5. Perfil de precipitação	37
3.5. Formas de apresentação dos resultados.....	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1. Entrada de dados	43
4.2. Resultados obtidos com a aplicação do modelo computacional.....	47
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	64
6. RECOMENDAÇÕES	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

LISTA DE SÍMBOLOS

- a, b, c, d = parâmetros de ajuste da função dupla exponencial, adimensional;
- D = duração do evento de precipitação, h;
- DCC_i = dia chuvoso sendo o dia anterior também chuvoso no mês j , dia;
- DC_i = dia chuvoso do mês j , dia;
- DCS_i = dia chuvoso sendo o dia anterior seco do mês j , dia;
- DS_i = dia seco do mês j , dia;
- e = base do logaritmo neperiano;
- $F(x)$ = probabilidade de ocorrência do evento x ;
- g_j = coeficiente de assimetria mensal da precipitação total diária, adimensional;
- $i(t^*)$ = intensidade instantânea padronizada, adimensional;
- $I(t^*)$ = intensidade acumulada padronizada, adimensional;
- i_i = intensidade máxima instantânea de precipitação, mm h^{-1} ;
- i_i^* = intensidade máxima instantânea de precipitação padronizada, adimensional;
- i_m = intensidade máxima média de precipitação, mm h^{-1} ;
- n = número de dias chuvosos do mês, dia;

P	= precipitação total diária, mm;
P'	= precipitação total diária com média corrigida, mm;
P_c	= precipitação total diária corrigida, mm;
$P(C/C)_j$	= probabilidade, obtida para cada mês, de ocorrência de um dia chuvoso sendo o dia anterior chuvoso, decimal;
$P(C/S)_j$	= probabilidade, obtida para cada mês, de ocorrência de um dia chuvoso sendo o dia anterior seco, decimal;
$P(S/C)_j$	= probabilidade, obtida para cada mês, ocorrência de dia seco sendo o dia anterior chuvoso, decimal;
$P(S/S)_j$	= probabilidade, obtida para cada mês, de ocorrência de dia seco sendo o dia anterior seco, decimal;
s_j	= desvio padrão mensal da precipitação total diária observada;
$s_{j,c}$	= desvio padrão mensal da precipitação total diária estimada;
t^*	= tempo padronizado, adimensional;
t_i^*	= tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea, adimensional;
x	= variável aleatória contínua que representa a magnitude da variável $\alpha_{0,5}$;
x'	= variável aleatória padronizada
$\bar{x}_{j,c}$	= média mensal da precipitação total diária calculada, mm;
\bar{x}_j	= média mensal da precipitação total diária observada, mm;
x_i	= precipitação diária observada, mm;
α	= parâmetro de forma da distribuição gama;
$\alpha_{0,5}$	= máxima porção do total precipitado que ocorre em meia hora, adimensional;
β	= parâmetro de escala de x
Δ	= parâmetro que expressa a relação entre os valores diários de intensidade máxima instantânea e de intensidade média, adimensional;
$\Gamma(\alpha)$	= função gama do parâmetro α ;

RESUMO

ZANETTI, Sidney Sára, M.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2003. **Modelo computacional para geração de séries sintéticas de precipitação e do seu perfil instantâneo**. Orientador: Fernando Falco Pruski. Conselheiros: Demetrius David da Silva e Gilberto Chohaku Sedyama.

Desenvolveu-se um modelo computacional que permite a aplicação da metodologia para geração de séries sintéticas de precipitação desenvolvida por OLIVEIRA (2003). O desenvolvimento do aplicativo foi viabilizado pela elaboração de um algoritmo computacional em linguagem de programação Borland Delphi 5.0. Os dados de entrada necessários são provenientes de um banco de dados no formato padronizado pela Agência Nacional de Águas (ANA) com registros pluviométricos diários provenientes de estações meteorológicas, ou então um arquivo texto contendo os valores mensais da média, do desvio padrão e do coeficiente de assimetria da precipitação total diária e os valores mensais das probabilidades de ocorrência diária de chuva condicionados à ocorrência ou não de chuva no dia anterior. A partir dessas informações, o modelo computacional é capaz de gerar séries sintéticas de precipitações diárias contendo o total precipitado em milímetros, a duração do evento em horas, o tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea, a intensidade máxima instantânea padronizada e os parâmetros adimensionais (a, b, c, d) da função dupla exponencial que representa o perfil

de precipitação de cada evento de chuva gerado. A série sintética gerada é armazenada em arquivos no formato “Texto” que podem ser acessados posteriormente por outros aplicativos e, ou, planilhas eletrônicas. Além dos arquivos são apresentadas várias informações na forma de gráficos e quadros, facilitando a avaliação do desempenho da metodologia desenvolvida por OLIVEIRA (2003). As análises são feitas pela comparação da série sintética com os dados observados, sendo que os recursos gráficos disponibilizados no programa permitiram identificar tendências de comportamento nos resultados que servirão de subsídios para uma avaliação mais detalhada do desempenho do modelo e para a identificação de procedimentos na metodologia que poderão ser otimizados.

ABSTRACT

ZANETTI, Sidney Sára, M.S., Universidade Federal de Viçosa, February 2003.
Computational model for generating the synthetic series of rainfall precipitation and the instantaneous profile. Adviser: Fernando Falco Pruski. Committee members: Demetrius David da Silva and Gilberto Chohaku Sedyama.

A computational model was developed in order to allow the application of the methodology developed by OLIVEIRA (2003) for generating the synthetic series of precipitation. The development of this software turned possible by the elaboration of a computational algorithm in the programming language Borland Delphi 5.0. The input data were obtained from either a data file under a format standardized by the Agência Nacional de Águas (ANA) with daily pluviometric registers from weather stations, or a index book containing the monthly values of the average, the standard deviation and the asymmetry coefficient of the daily total precipitation, and the monthly values of the probabilities for daily rainfall event conditioned to either event or non-event of rainfall in the previous day. From these information the computational model is able to generate the synthetic series of daily precipitations containing the total precipitate in millimeters depth, the duration of the hourly event, the standardized event time of the maximum instantaneous intensity, and the dimensionless parameters (a, b, c, d) of the exponential double function representing the precipitation profile of each

rainfall event generated. The generated synthetic series are kept in files under document format, that may be subsequently accessed by other softwares and/or electronic data sheets. In addition to the files, several informations are presented under graphs and tables format, so making easier to evaluate the performance of the methodology developed by OLIVEIRA (2003). The analyses were accomplished by comparing the synthetic series with the observed data, whereas the graphic resources available in the program allowed to identify the behavior tendencies in the results, that will be useful as subsidies to a more detailed evaluation on the performance of the model, and to the identification of procedures in the methodology that might be optimized.

1. INTRODUÇÃO

Há muito tempo, os modelos de simulação têm sido bastante utilizados em algumas áreas da atividade humana, como na engenharia, e em aplicações com fins militares. Nas últimas décadas, o uso destes modelos foi identificado como uma opção interessante na área da pesquisa agrícola. Esta opção ganhou maior importância porque, além da complexidade própria da agricultura como uma atividade específica, as suas relações com outros setores da economia se tornaram cada vez mais importantes.

O desenvolvimento de modelos para a geração de elementos climáticos simulados é de grande importância para a avaliação de sistemas agrícolas e para a simulação do comportamento de sistemas hidrológicos. Na literatura existente sobre o assunto constam várias referências envolvendo o desenvolvimento de modelos computacionais para a geração de séries sintéticas de elementos climáticos, dentre eles o CLIGEN (Climate Generator), o WGEN (Weather Generator), o GEM (Generation of weather Elements for Multiple applications) e outros. Alguns desses modelos requerem a utilização de dados pluviográficos, o que, muitas vezes, impede a sua utilização em função da inexistência ou indisponibilidade de longas séries de dados históricos.

A precipitação é um dos elementos meteorológicos que exerce maior influência sobre as condições ambientais. Além do seu efeito direto no balanço hídrico ela também interfere, indiretamente, em outras variáveis, como nas

temperaturas do ar e do solo, na umidade do ar e na radiação solar incidente que, em conjunto, atuam como fatores básicos no comportamento dos sistemas hidrológicos.

O conhecimento da distribuição das precipitações no espaço e no tempo desempenha papel relevante no planejamento das atividades produtivas. Tal é a importância desse conhecimento, que este acaba por condicionar decisões, sejam de ordem tática ou estratégica, em atividades como a agropecuária, a construção civil, os transportes e o turismo.

No Brasil, a maioria dos dados de precipitação disponíveis diz respeito às alturas diárias de chuva. Dados horários, ou de menor duração, são bastante raros, sendo a falta de uma razoável densidade de estações pluviográficas e de um período de observação mais longo os maiores problemas para a obtenção destas séries.

As pesquisas sobre precipitação no Brasil têm se restringido, na maioria das vezes, à previsão da lâmina total máxima ou da intensidade máxima provável. Poucos trabalhos consideram o padrão dos eventos ou as características do perfil das precipitações. Nesse contexto, as pesquisas para a avaliação das perdas de água e solo têm utilizado, por falta de tecnologia local, geradores de séries sintéticas de precipitação desenvolvidos para outros países.

Visando apresentar alternativas para esta deficiência, OLIVEIRA (2003) desenvolveu e validou uma metodologia para geração de séries sintéticas de precipitação diária a partir de séries históricas de registros pluviométricos também diários. As informações geradas foram a precipitada total diária, a duração, o tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea e a própria intensidade máxima instantânea dos eventos, além do perfil instantâneo dos mesmos. A metodologia foi desenvolvida a partir da aplicação de princípios estatísticos e matemáticos associados às informações pluviográficas e pluviométricas de 11 estações meteorológicas situadas no Estado do Rio de Janeiro.

Os resultados obtidos mostraram o grande potencial da metodologia para gerar séries sintéticas de precipitação para as 11 localidades avaliadas, entretanto, a mesma apresentou limitações na sua aplicação em virtude da necessidade do grande número de procedimentos matemáticos repetitivos.

Com isso, o esforço computacional demandado se mostrou elevado, o que tornou inviável a aplicação do modelo com a utilização das planilhas eletrônicas convencionais.

Em razão da importância de se utilizar uma metodologia mais apropriada para a geração de séries sintéticas de precipitação, para as condições climáticas brasileiras, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo computacional capaz de aplicar a metodologia para geração de séries sintéticas de precipitação desenvolvida por OLIVEIRA (2003).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Precipitação

Precipitação pode ser definida como toda água, na forma líquida ou sólida, oriunda da atmosfera, que cai sobre a superfície terrestre. Os principais tipos de precipitação são a chuva, a garoa, a neve e o granizo. Para os estudos hidrológicos realizados no Brasil a chuva é o tipo de precipitação que tem a maior importância (FREITAS et al., 2001).

As precipitações podem ser classificadas de acordo com as condições que produzem o movimento vertical do ar e, neste sentido, existem três tipos principais: frontal, orográfica e convectiva.

As precipitações frontais são associadas com o movimento de massas de ar de regiões de alta pressão para regiões de baixa pressão. Essas diferenças de pressão são causadas por aquecimento desigual da superfície terrestre. São precipitações de longa duração apresentando de baixa a moderada intensidade, espalhando-se por grandes áreas e sendo sua previsão importante para o correto manejo de grandes bacias hidrográficas.

As precipitações orográficas são resultantes da ascensão mecânica de correntes de ar úmido sobre barreiras naturais, como as montanhas. Estas precipitações são típicas de regiões costeiras e apresentam intensidade de baixa a moderada. Quando os ventos conseguem ultrapassar as barreiras

montanhosas, do lado oposto surge a chamada *sombra pluviométrica*, dando lugar a áreas secas ou semi-áridas causadas pelo ar seco, já que a umidade foi descarregada na encosta oposta. Segundo TUCCI (1998) o volume deste tipo de precipitação tende a crescer exponencialmente com a altitude até a área de influência da condensação.

O processo de formação da precipitação inicia com o aquecimento do ar úmido das camadas mais baixas da atmosfera. O ar aquecido torna-se menos denso que o ar das vizinhanças e sofre ascensão adiabática. Nessa ascensão ele se expande e resfria até atingir o ponto de orvalho. A partir desse nível, em condições favoráveis, e com a existência de núcleos higroscópicos, o vapor d'água condensa, formando minúsculas gotas em torno desses núcleos. Essas gotas, entretanto, não possuem massa suficiente para vencer a resistência do ar, sendo portanto mantidas em suspensão até que, por um processo de crescimento, atinjam tamanho suficiente para precipitar (VILLELA e MATTOS, 1975).

As precipitações convectivas são típicas de regiões tropicais. A sua formação se dá por meio do aquecimento desigual da superfície terrestre, provocando o aparecimento de camadas de ar com densidades diferentes, o que gera uma estratificação térmica da atmosfera em equilíbrio instável. Se esse equilíbrio, por qualquer motivo (vento, superaquecimento), for quebrado, ocorre uma ascensão brusca e violenta do ar menos denso, capaz de atingir grandes altitudes. Essas precipitações caracterizam-se pela sua grande intensidade e curta duração e por serem concentradas em pequenas áreas. Esse tipo de precipitação é o causador das vazões máximas que ocorrem em pequenas bacias hidrográficas.

Para o adequado registro das precipitações é necessário uma densa rede de pluviômetros e pluviógrafos. Entretanto, na prática, as redes em funcionamento geralmente não são suficientes para representar as variabilidades temporais e espaciais da precipitação. Os maiores problemas são observados em bacias onde existe predominância de chuvas orográficas e convectivas ocorrendo sobre áreas menores. Quando a densidade da rede é pequena, a precipitação pode ser sub ou superestimada (TUCCI, 1997).

Segundo AYOADE (1998), a distribuição da precipitação sobre a superfície terrestre é muito mais complexa do que a da insolação ou da

temperatura do ar. Isso ocorre porque praticamente toda precipitação é resultante do resfriamento adiabático devido à ascensão das massas de ar, sendo o índice pluviométrico mais elevado nas áreas onde ocorre ascensão das massas de ar.

Analisando a distribuição mundial de precipitação verifica-se que elas são abundantes na zona equatorial e tropical, ocorrendo em quantidades de alta a moderada. As zonas subtropicais e as áreas circunvizinhas aos pólos são relativamente secas. As zonas litorâneas ocidentais nos subtrópicos tendem a ser secas, enquanto as zonas litorâneas orientais tendem a ser úmidas. Em locais com altas latitudes, as encostas ocidentais são, em geral, mais úmidas que as orientais. As áreas próximas dos grandes corpos hídricos tendem a receber mais precipitação do que os interiores dos continentes, já que esses se localizam distantes das fontes oceânicas de suprimento de umidade (AYOADE, 1998).

2.2. Importância do conhecimento das precipitações

O conhecimento das precipitações que ocorrem em uma região, assim como a sua distribuição espacial e temporal e a sua intensidade e duração, são fatores de caráter técnico determinantes para o sucesso ou fracasso de empreendimentos agrícolas e de obras de engenharia hidráulica, tais como: vertedores de barragens, sistemas de irrigação, sistemas de drenagem de estradas, estruturas para o controle de erosão, obras para o desvio de cursos d'água, entre outras. Na ausência de dados fluviométricos para o local de interesse, o dimensionamento dessas obras deve passar pelo estudo das chuvas intensas ocorridas no local (BELTRAME et al., 1991).

Sob condições de clima tropical, com incidência de chuvas de alta intensidade, como ocorre na maior parte do Brasil, o tipo de erosão que provoca maior degradação das terras é a causada pela chuva. Este tipo de erosão é também conhecido como erosão hídrica, sendo responsável pela perda de milhões de toneladas de solo agricultável a cada ano e também por inúmeros prejuízos em áreas urbanas e setores estratégicos da economia e da sociedade. Segundo HERNANI et al. (2002), estimativas feitas recentemente por profissionais ligados à conservação de solos projetaram para o Brasil

prejuízos da ordem de 4 bilhões de dólares por ano em decorrência da erosão hídrica. Citada por BAHIA et al. (1992), a Federação da Associação dos Engenheiros Agrônomos do Brasil, no início da década de 90, relatava que no Brasil eram perdidos anualmente, em média, 600 milhões de toneladas de solo agrícola devido à erosão conseqüente do mau uso do solo. A estas perdas de solo foram associadas perdas de nutrientes da ordem de 1,5 bilhão de dólares.

No Brasil, tem sido observada, com grande freqüência, a ocorrência de chuvas capazes de provocar sérios prejuízos, como quedas de barreiras nas estradas, deslizamentos de encostas nos morros, assoreamento de rios e enchentes, as quais têm causado muitas mortes e deixado várias famílias desabrigadas. O manejo adequado do solo e da água, buscando reduzir o escoamento superficial pelo aumento da sua infiltração no solo e conseqüente reabastecimento do lençol freático, representa uma prática fundamental para melhorar o aproveitamento das chuvas, minimizando os picos de vazão e reduzindo o déficit de água nos períodos de estiagem (OLIVEIRA, 1999).

A chuva é considerada o elemento climático mais importante na ocorrência do processo erosivo, entretanto, nos estudos de erosão hídrica tem sido dada uma importância demasiada à quantidade total precipitada, a qual pode ter pequeno efeito na erosão, uma vez que duas localidades sujeitas à mesma precipitação total anual poderão ter expressivas diferenças nas perdas de solo, visto que numa região a precipitação poderá ser decorrente de chuvas freqüentes de baixa intensidade, enquanto na outra duas ou três chuvas de alta intensidade poderão representar até 80% da precipitação total (WISCHMEIER, 1962). EDWARDS e OWENS (1991) obtiveram as perdas de solo em nove microbacias hidrográficas dos Estados Unidos, durante 28 anos, e constataram que apenas três chuvas, com períodos de retorno estimados em mais de 100 anos, foram responsáveis por 50% das perdas de solo.

O conhecimento das características da precipitação no que se refere à sua magnitude, intensidade e duração, além da sua distribuição espacial e temporal durante as estações do ano, permite um melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos de determinada região, possibilitando gerenciar a disponibilidade de água usada para diversos fins, tais como irrigação, geração de energia elétrica, abastecimento doméstico e industrial, além de possibilitar a prevenção e o controle de inundações e do processo erosivo.

2.3. Chuvas intensas

A chuva cuja intensidade ultrapassa um valor preestabelecido para determinada aplicação é denominada de chuva intensa. Do ponto de vista prático, é difícil determinar magnitudes para caracterizar as chuvas intensas. Em áreas rurais, uma chuva pode ser considerada não danosa, porém, em áreas urbanas, devido à maior intensidade de ações antrópicas, os danos poderão ser relevantes (FREITAS et al., 2001).

As chuvas intensas causam mais erosão do que as menos intensas, embora prolongadas. Se a chuva é menos intensa, a água tem mais tempo para infiltrar e se distribuir no solo. Chuvas intensas saturam rapidamente as primeiras camadas do solo e a água escoar pela superfície, provocando escoamento na direção do curso d'água mais próximo.

Em Engenharia Hidráulica e nos trabalhos hidrológicos, é interessante conhecer não somente as máximas precipitações observadas nas séries históricas mas também prever, com base nos dados observados e utilizando os princípios de probabilidade, quais as máximas precipitações que podem ocorrer em determinado local com certa frequência (FREITAS et al., 2001).

As curvas de intensidade-duração-frequência permitem caracterizar pontualmente as precipitações máximas prováveis, relacionando a probabilidade do evento ser igualado ou superado com sua intensidade e duração (TUCCI, 1998).

Tendo em vista a importância do conhecimento adequado da equação de chuvas intensas e a dificuldade de sua determinação, PRUSKI et al. (1997a), utilizando dados pluviográficos registrados no Estado do Paraná, desenvolveram metodologia de espacialização que permite determinar a equação de intensidade-duração-frequência da precipitação para amplas regiões de abrangência a partir de informações disponíveis em algumas localidades da região em estudo. O procedimento adotado baseou-se na regionalização de cada um dos parâmetros de ajuste da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação pelo uso de sistemas de informações geográficas e das técnicas de interpolação a eles relacionadas.

Analizando os dados históricos de precipitação de 29 estações pluviográficas distribuídas no Estado de Minas Gerais, PINTO et al. (1996) caracterizaram as relações de intensidade, duração e frequência da

precipitação e ajustaram distribuições de probabilidade aos eventos extremos máximos. SILVA et al. (1999a), utilizando registros de 13 estações pluviográficas localizadas no Estado do Rio de Janeiro e nove estações no Estado do Espírito Santo, fizeram a estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-freqüência da precipitação para ambos os Estados. Trabalho semelhante foi realizado por SILVA et al. (1999b) quando estimaram e espacializaram os parâmetros da equação de intensidade-duração-freqüência da precipitação para o Estado de São Paulo.

Objetivando ajustar modelos teóricos de distribuição de probabilidade aos dados de chuvas intensas e estabelecer a relação entre intensidade, duração e freqüência, FREITAS et al. (2001) analisaram as séries históricas de precipitação de 193 estações pluviográficas localizadas no Estado de Minas Gerais e nos Estados do Espírito Santo e da Bahia, nos limites com Minas Gerais. Os autores verificaram alta variabilidade nos parâmetros das equações ajustadas para as diferentes estações pluviográficas, o que demonstrou a importância da obtenção desses parâmetros para cada localidade.

Para o Estado do Paraná (FENDRICH, 1998) e para diversas outras localidades nos demais Estados Brasileiros (DENARDIN e FREITAS, 1982), também foram feitos estudos semelhantes que contribuíram para o aumento da base de dados com informações sobre as equações de chuvas intensas no Brasil.

O modelo computacional Plúvio 1.3, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (GPRH, 2000), permite a obtenção dos parâmetros da equação de chuvas intensas para diversas localidades brasileiras. Tendo em vista o fato de se dispor dos valores dos parâmetros da equação de intensidade-duração-freqüência da precipitação para diversas localidades dos Estados de Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná, além de diversas localidades em outros Estados, a metodologia desenvolvida por PRUSKI et al. (1997a) foi aplicada para a obtenção de cada um dos parâmetros da equação de intensidade-duração-freqüência da precipitação a partir das informações disponíveis em cada Estado. Desta forma, com o uso do programa Plúvio 1.3 é possível quantificar

os parâmetros e obter a equação de chuvas intensas para qualquer localidade desses Estados.

2.4. Perfil de precipitação

O perfil de precipitação é representado pela variação da intensidade ao longo da duração dos eventos. As características desse perfil influenciam, diretamente, na infiltração de água no solo, no escoamento superficial e nas perdas de solo, sendo importante sua consideração no dimensionamento de projetos de obras hidráulicas e de estruturas para o controle de erosão.

Apesar das limitações existentes na obtenção de um método representativo do perfil das precipitações, existem diversas proposições de metodologias para a sua representação matemática. Segundo BROW e FOSTER (1987) a desuniformidade e aleatoriedade da intensidade das chuvas dificultam a obtenção de equações que calculem informações diretas para o ajuste do perfil das precipitações e para quantificar a erosividade das chuvas intensas.

De acordo com sua intensidade, as chuvas são classificadas em padrões: avançado, intermediário e atrasado (Figura 1), quando a maior intensidade de precipitação está localizada no primeiro, segundo e último terço do período de duração das chuvas, respectivamente (HORNER e JENS, 1941).

Visando quantificar a influência dos padrões de chuvas no escoamento superficial, infiltração e perda de solo, FLANAGAN et al. (1988) simularam seis padrões distintos de precipitação. Em quatro dos padrões utilizados os picos de intensidade ocorreram no primeiro, segundo, terceiro e quarto quartis a partir do início da chuva, com intensidade máxima de 250 mm h^{-1} ; no quinto padrão o pico de intensidade ocorreu no segundo quartil, porém a intensidade máxima aplicada foi equivalente a 125 mm h^{-1} , e o sexto padrão considerou uma chuva de intensidade uniforme equivalente a 64 mm h^{-1} . As chuvas em que os picos de intensidade ocorreram no último quartil, quando comparadas com as chuvas de mesma magnitude e intensidade uniforme, proporcionaram taxas de escoamento superficial cerca de seis vezes maiores e o triplo de perdas de solo. Ainda, segundo o mesmo autor, o padrão atrasado é o que produz maior escoamento e perdas de solo devido, provavelmente, à maior umidade

anterior aos picos de chuva, o que reduz a capacidade de infiltração de água e favorece a desagregação do solo pelo impacto das gotas, causando o selamento e o escoamento superficial.

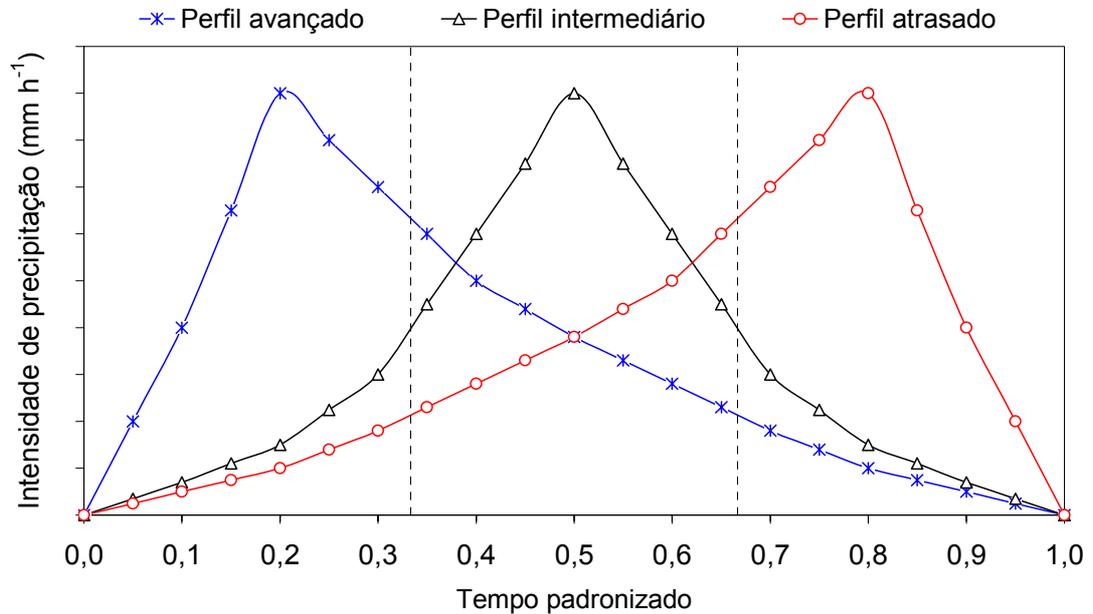


Figura 1 – Padrões de intensidade de chuvas.

Por meio do estudo de uma série de registros pluviográficos com 29 anos de extensão, MEHL (2000) verificou que o padrão de chuva de maior ocorrência na região de Santa Maria (RS) foi o avançado, seguido do atrasado e do intermediário, sendo que o padrão avançado apresentou a maior intensidade média dos picos. Os menores períodos de retorno foram estimados para os eventos com padrão avançado, seguido pelo padrão intermediário e atrasado, tendo sido observado ainda que a maioria das chuvas intensas ocorreram no padrão avançado.

Visando obter equações para estudar a erosividade das precipitações BROW e FOSTER (1987) utilizaram dados de 54 chuvas intensas ocorridas em 10 localidades dos Estados Unidos. As equações obtidas caracterizam o perfil de precipitação que apresenta o comportamento de uma exponencial decrescente com o tempo, sendo a intensidade máxima de precipitação sempre representada no início do evento. Após os testes estatísticos e visuais

adotados para avaliação do ajuste dos modelos obtidos, os autores recomendaram o uso da seguinte equação:

$$i(t^*) = i_i^* \exp(-m t^*) \quad (1)$$

em que

$i(t^*)$ = intensidade padronizada, adimensional;

i_i^* = razão entre intensidade máxima instantânea de precipitação e intensidade média, adimensional;

m = parâmetro da equação, adimensional; e

t^* = tempo padronizado, adimensional.

Outra equação em que a intensidade máxima instantânea decrescente exponencialmente com o tempo, sempre ocorrendo a partir do início do evento, é a característica no modelo proposto por PRUSKI et al. (1997b). Neste modelo, os parâmetros são obtidos a partir das equações de intensidade-duração-freqüência da precipitação para a localidade de interesse. As equações são representadas por:

$$i_i = i_m \left(1 - \frac{c t}{t + b} \right) \quad (2)$$

e

$$i_m = \frac{K T^a}{(t + b)^c} \quad (3)$$

em que

i_i = intensidade instantânea de precipitação, mm h^{-1} ;

i_m = intensidade máxima média de precipitação, mm h^{-1} ;

t = duração da precipitação, min;

T = período de retorno, anos; e

K, a, b, c = parâmetros de ajuste relativos à localidade de interesse, $\text{mm min}^c \text{h}^{-1} \text{anos}^{-a}$, adimensional, min e adimensional, respectivamente.

Um modelo para representar o perfil de chuvas intensas foi desenvolvido por HERNEK et al. (2001). Foram utilizados mais de 100 anos de registros pluviográficos de 6 em 6 minutos para cada uma das cidades Australianas de Brisbane, Sydney e Melbourne. A primeira fase do modelo gera pulsos retangulares de precipitação baseados em variáveis aleatórias referentes ao intervalo entre os eventos, à duração e a intensidade média das chuvas intensas. A lâmina precipitada é definida pelo produto da duração pela intensidade média de precipitação. A segunda fase envolve um esquema de desagregação para simular a distribuição temporal de cada evento de precipitação. Baseando-se nestes procedimentos e na análise de frequência dos eventos máximos anuais para diferentes durações, o modelo obtém curvas de intensidade, duração e frequência que, segundo o mesmo autor, são indicadas para estimativa de ocorrência de enchentes em áreas de risco.

Visando representar matematicamente os padrões de chuvas que ocorrem nos Estados Unidos, NICKS et al. (1995) desenvolveram um modelo baseado numa equação dupla exponencial. Neste modelo, o perfil de intensidade do evento de precipitação é representado por uma exponencial crescente com o tempo até a ocorrência da intensidade máxima instantânea e, a partir deste ponto, decrescente até o final do evento.

Na Figura 2 está representado um exemplo de aplicação da equação dupla exponencial ajustada a um evento de precipitação com 30 minutos de duração. A curva referente ao evento observado foi obtida a partir de registros pluviográficos, enquanto a curva da dupla exponencial foi obtida pelo ajuste da função dupla exponencial aos dados do evento observado. As áreas sob as curvas representam a lâmina total precipitada. O formato do perfil ajustado varia em função do tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea e da intensidade máxima instantânea padronizada, sendo que, para este caso, os valores foram de 0,2 e 6,0, respectivamente.

O perfil de precipitação ajustado pela função dupla exponencial é obtido pelas equações:

$$i(t^*) = a e^{bt^*} \quad (4)$$

$$i(t^*) = c e^{-dt^*} \quad (5)$$

em que

$i(t^*)$ = intensidade padronizada, adimensional;

a, b, c, d = parâmetros de ajuste do modelo; e

t^* = tempo padronizado, adimensional.

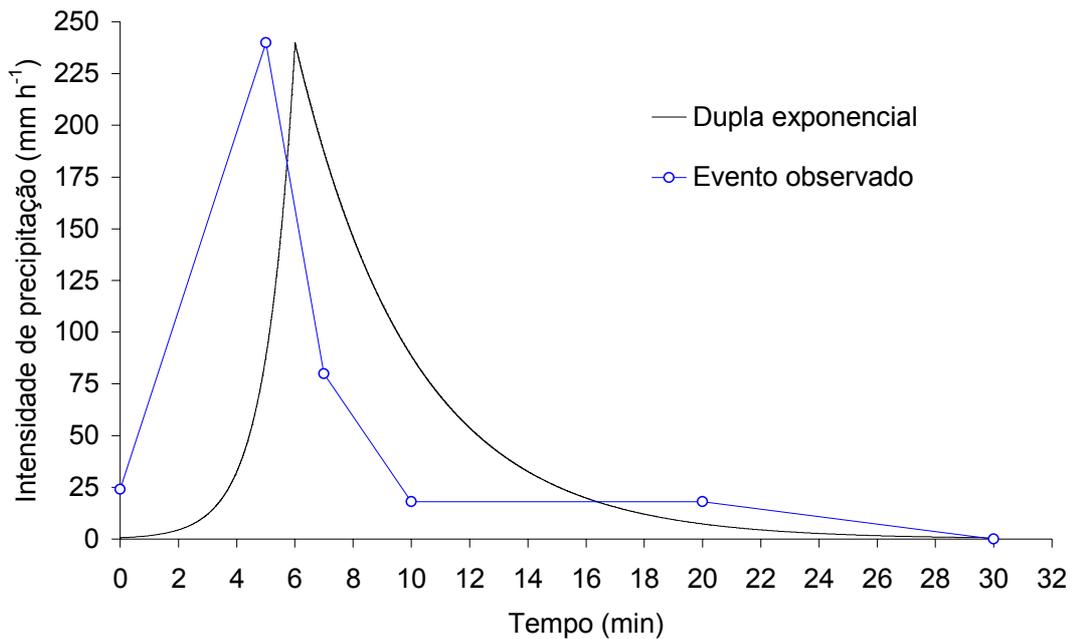


Figura 2 – Exemplo ilustrativo de ajuste usando a função dupla exponencial.

Para obtenção do perfil, a equação 4 é aplicada do início do evento até o tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea e a equação 5, desse ponto até o final do evento.

Os resultados obtidos com a aplicação da função dupla exponencial aos dados de pequenas bacias hidrográficas nos Estados Unidos demonstram que o escoamento superficial calculado utilizando dados observados de precipitação pouco diferiu daquele calculado usando o perfil ajustado pela função dupla exponencial, demonstrando assim seu grande potencial para uso em modelos hidrológicos (NICKS et al., 1995). Entretanto, utilizando esta mesma função para representar os perfis dos eventos de precipitação na Austrália, CONNOLLY et al. (1998) concluíram que esse método foi inadequado para representar alguns eventos de baixa intensidade e longa

duração, tendo ainda a desvantagem de ser impróprio para representar múltiplos picos em um único evento.

A partir de dados pluviográficos de chuvas intensas registradas em cinco localidades dos Estados Unidos, ARNOLD e WILLIAMS (1989) desenvolveram um modelo estocástico para a geração de intensidades máximas instantâneas de chuvas com intervalos de 30 minutos de duração. O tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea identificado como valor médio no estudo foi de 0,4, sendo este valor adotado como base no desenvolvimento do modelo.

$$i_i = -2P \ln(1 - \alpha_{0,5}) \quad (6)$$

em que

i_i = intensidade máxima instantânea de precipitação, mm h^{-1} ;

P = precipitação total diária, mm; e

$\alpha_{0,5}$ = variável que expressa a máxima porção do total precipitado que ocorre em meia hora.

2.5. Geradores de séries sintéticas

Dados pluviométricos disponíveis e confiáveis são fundamentais para uma eficaz previsão de eventos impactantes ao meio ambiente. Na maioria das vezes, as informações meteorológicas apresentam falhas que podem inviabilizar sua aplicação nos modelos de simulação hidrológica. Visando a solução para esses problemas, vários pesquisadores vêm se empenhando em obter técnicas que permitam a geração de dados sintéticos de precipitação que, realmente, representem o padrão de chuvas de determinada região. Sendo assim, torna-se necessário que esses dados simulados passem por uma avaliação no sentido de analisar a sua confiabilidade e a representação das condições climáticas reais do local de interesse.

A série sintética é o resultado da associação de séries de dados reais com números aleatórios produzidos por algoritmos computacionais a fim de gerar seqüências de números aleatórios que se assemelham aos dados climáticos reais (WILKS, 1999a). Para o Brasil, a aplicação destes

procedimentos apresenta um grande potencial, tendo em vista o fato da extensão das séries históricas disponíveis normalmente ser reduzida, principalmente quando se trata de dados pluviográficos.

Uma outra vantagem das séries sintéticas é a possibilidade de sua utilização na previsão do número, magnitude e distribuição dos eventos que poderão ocorrer em um determinado espaço de tempo futuro. Isso permite sua aplicação em modelos de previsão, que utilizam, ao invés de dados observados, dados que representam uma projeção futura do comportamento climático da localidade de interesse.

A geração de séries sintéticas de elementos climáticos é, normalmente, viabilizada pela aplicação de modelos computacionais especialmente desenvolvidos para esta finalidade, denominados de geradores climáticos. Estes geradores são, geralmente, probabilísticos ou estocásticos, ou seja, utilizam variáveis aleatórias que seguem distribuições estatísticas específicas. Uma característica de tais modelos é que seus resultados podem ter diferentes valores cada vez que o modelo é aplicado, considerando que são utilizados em cada simulação números gerados aleatoriamente para representar a variabilidade dos fenômenos naturais (PORTUGAL, 1983).

Os geradores climáticos são comumente usados porque são de fácil calibração, objetivos e de rápida implementação, sendo que, freqüentemente, apresentam escala de tempo diária, muito utilizada pelos modelos em que são normalmente aplicados. Porém, uma das limitações dos geradores climáticos está no fato de que os elementos climáticos gerados para diferentes localidades não reproduzem a alta correlação espacial que é observada nos elementos climáticos reais. Por causa da importância destas correlações, esforços têm sido feitos para melhorar o desempenho das variações espaciais e temporais destas séries, principalmente para a precipitação (WILKS, 1999a).

Na literatura existente sobre o assunto, constam várias referências envolvendo o desenvolvimento de modelos para geração de séries sintéticas de dados climáticos. Dentre os modelos comumente utilizados nos Estados Unidos, podem ser citados: CLIGEN (Climate Generator), USCLIMATE, WGEN (Weather Generator), WXGEN (componente do modelo EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator) e GEM (Generation of weather Elements for Multiple applications).

O WEPP, software desenvolvido por FLANAGAN e NEARING (1995), é composto por um grupo de módulos de simulação para predição da erosão e do escoamento superficial. Dentre os modelos que integram o WEPP, o CLIGEN é utilizado para a obtenção de séries sintéticas de dados climáticos a partir de registros históricos diários de estações meteorológicas. Suas estimativas incluem séries de precipitação, compostas pela precipitação total diária, duração, tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea e a própria intensidade máxima instantânea de cada evento gerado.

O modelo computacional USCLIMATE é um gerador estocástico de elementos climáticos capaz de gerar séries sintéticas compostas pela precipitação total diária, temperaturas máxima e mínima e radiação solar. No modelo a ocorrência de precipitação diária é estimada pela aplicação da cadeia de Markov de primeira ordem, sendo a lâmina de precipitação obtida da distribuição exponencial. As variações sazonais dos parâmetros são representadas pela série de Fourier. Por meio de um modelo computacional interativo, o usuário pode acessar informações para uma única estação ou estimar as características climáticas para qualquer local por meio da interpolação das informações das estações mais próximas (JOHNSON, 2003).

JOHNSON et. al. (1996) compararam o desempenho dos modelos USCLIMATE e CLIGEN, simulando dados de precipitação, temperatura e radiação solar para seis localidades dos Estados Unidos e concluíram, a partir dos resultados de vários testes estatísticos de significância aplicados à estimativa dos valores médios, do desvio padrão e dos valores extremos, que o modelo USCLIMATE foi que apresentou o melhor desempenho, decorrente principalmente da melhor representação da variabilidade dos dados climáticos e da manutenção da correlação entre os elementos climáticos. Diante disso, os autores recomendam que esse modelo seja utilizado em aplicações relativas à geração de energia elétrica que necessitem de estimativas de informações climáticas, entretanto, segundo os autores, o CLIGEN produz informações sobre a duração e a intensidade máxima instantânea das chuvas, o que não acontece com o USCLIMATE, sendo estas informações muito importantes em aplicações hidrológicas.

Estudando os códigos do algoritmo utilizado pelo modelo computacional CLIGEN (versão 4.2), YU (2001) verificou a existência de erros grosseiros como o simples fato de não ter sido feita conversões de unidades de polegadas para milímetros em alguns momentos oportunos durante a execução do aplicativo. As conseqüências desse erro superestimavam os valores da intensidade máxima instantânea de precipitação em média 3,1 vezes e a duração dos eventos sempre eram estimadas com valores próximos a três horas. YU (2001) incluiu, ainda, no algoritmo do CLIGEN, outros parâmetros utilizados no cálculo da duração dos eventos de precipitação.

MEYER et al. (2002) utilizaram os testes de Qui-quadrado e de intervalo de confiança para avaliar a distribuição dos números aleatórios gerados pelo CLIGEN e a sua influência na geração das séries sintéticas. Foi verificado que a distribuição dos conjuntos de números aleatórios produzidos em cada simulação influenciam a qualidade dos resultados, sendo que o USCLIMATE, o WGEN, o WXGEN e o GEM provavelmente apresentem o mesmo tipo de problema. MEYER et. al. (2002) desenvolveram e implementaram no CLIGEN (versão 5.1) um procedimento para controlar a qualidade dos números aleatórios gerados.

Utilizando o WEPP e variando os valores dos parâmetros de entrada do CLIGEN para três localidades dos Estados Unidos, PRUSKI e NEARING (2002) evidenciaram que 1% na variação da precipitação anual, em termos da quantidade de precipitação por dia chuvoso, resultou numa variação de 2,5% no escoamento superficial e 2,4% nas perdas de solo. Resultados como estes ressaltam a importância do desempenho do modelo computacional CLIGEN quando da geração de séries sintéticas de elementos climáticos para aplicações hidrológicas no WEPP.

Objetivando gerar séries sintéticas com valores diários de precipitação, radiação solar e temperaturas máxima e mínima, RICHARDSON (1981) desenvolveu e avaliou o gerador climático WGEN utilizando dados climáticos registrados em três localidades de diferentes estados norte-americanos. A ocorrência de precipitação foi representada pela cadeia de Markov de primeira ordem, enquanto a lâmina total diária foi estimada pela distribuição exponencial. Segundo CASTELLVI et. al. (2001), o WGEN é a base para vários

outros geradores climáticos, incluindo o WXGEN (WALLIS e GRIFFITHS, 1995), CLIGEN e USCLIMATE (JOHNSON et al., 1996).

A necessidade de desenvolvimento de metodologias específicas de geração de séries sintéticas para regiões com grande variabilidade climática fez com que WILKS (1999b) desenvolvesse um modelo para a região Oeste dos Estados Unidos, a partir de modificações no WGEN. Em seu trabalho, o autor apresenta uma discussão a respeito dos efeitos de diferentes formulações para os componentes ocorrência de precipitação e lâmina precipitada de séries sintéticas de precipitação diária. O enfoque do estudo foi a capacidade de representação da variabilidade de precipitações observadas, do total diário precipitado e da série sucessiva de dias secos e chuvosos.

SENTELHAS et al. (1999) avaliaram o desempenho dos geradores de dados climáticos WGEN e SIMMETEO, integrantes do DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology), versão 3.5, simulando dados de temperatura, precipitação e radiação solar global, para as localidades de Manduri, Piracicaba e Ribeirão Preto, no Estado de São Paulo, e Paranavaí e Ponta Grossa, no Estado do Paraná. Os autores avaliaram os referidos geradores comparando os dados observados e simulados nas escalas de tempo diária, decenal e mensal, sendo que os resultados mostraram que a simulação torna-se mais eficiente com o aumento da escala de tempo. No caso dos dados de precipitação gerados, mesmo considerando valores mensais, a correlação entre dados observados e simulados foi insatisfatória, tendo em vista a elevada dispersão entre estes valores para todos os meses.

WALLIS e GRIFFITHS (1995) avaliaram o desempenho do gerador climático WXGEN, utilizado no modelo EPIC, e concluíram que esse gerador simula satisfatoriamente seqüências de dados climáticos, representando razoavelmente os valores médios observados, a variabilidade e a freqüência dos eventos extremos. Os autores identificaram que a determinação de dias secos e úmidos poderia ser mais eficiente se o modelo fosse programado para usar a cadeia de Markov com ordem maior do que um.

O WeatherMan (Weather data Manager), software concebido por PICKERING et al. (1994), foi desenvolvido a partir de adaptações do WGEN e SIMMETEO, com o intuito de simplificar e automatizar muitas tarefas repetitivas associadas com o preparo de dados climáticos usados em modelos

agronômicos, permitindo a análise quantitativa dos mesmos e a obtenção de conjuntos de dados diários de precipitação e de outros elementos climáticos.

O modelo computacional GEM foi desenvolvido com base nos modelos WGEN e USCLIMATE e funciona acoplado ao bando de dados PRISM (Parameter-Regressions on Independent Slopes Model), o que possibilita a obtenção de dados de entrada estimados e espacializados em células quadradas com 4 km de extensão. A interface do GEM utiliza mapas que permitem ao usuário escolher qualquer localidade dos Estados Unidos para gerar séries sintéticas compostas por valores diários de precipitação e temperaturas máxima e mínima (JOHNSON, 2003). Segundo SCHEELE et al. (2001), a metodologia do PRISM está fundamentada na interpolação e extrapolação dos dados climáticos registrados pelas estações meteorológicas norte-americanas e também já foi implementado ao banco de dados utilizado pelo CLIGEN.

SEDIYAMA et al. (1978), além de apresentar uma metodologia para a estimativa das probabilidades de ocorrência e quantidades de chuvas esperadas, desenvolveu um modelo computacional estocástico determinístico para simular a distribuição semanal dos parâmetros climáticos de precipitação pluvial, temperatura do ar e umidade relativa para a época de crescimento das plantas. Os resultados obtidos apresentaram correlações com os dados observados sendo considerados de boa precisão para predizer as variáveis climáticas em bases semanais.

VIRGENS FILHO (1997) idealizou o GEPAC (Gerador Estocástico de Parâmetros Climáticos), modelo computacional para simulação de dados diários de precipitação e de outros elementos climáticos. A análise do desempenho do modelo evidenciou que os dados simulados não diferem estatisticamente dos observados, podendo o modelo ser eficiente como uma ferramenta alternativa em atividades de pesquisa para o planejamento agrícola e para a modelagem de processos hidrológicos.

OLIVEIRA (2003) desenvolveu um modelo estocástico para geração de séries sintéticas de precipitação diária baseando-se em registros pluviográficos históricos de onze estações meteorológicas do Estado do Rio de Janeiro.

O modelo requer, como dados de entrada, apenas registros pluviométricos diários. A metodologia desenvolvida permite gerar, diariamente,

dados de precipitação, incluindo informações como a lâmina precipitada, a duração, o tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea e a própria intensidade máxima instantânea para os eventos gerados, além do perfil instantâneo dos mesmos. O modelo foi desenvolvido com base na premissa de que para cada dia chuvoso é gerado um único evento de precipitação, estatisticamente equivalente ao somatório dos eventos que ocorreram diariamente na série histórica.

O desempenho do modelo foi comparado com os dados observados e com dados obtidos utilizando o CLIGEN, apresentando resultados que mostram a potencialidade de adoção da nova metodologia para a geração de séries sintéticas de precipitação para o Estado do Rio de Janeiro. O uso da metodologia, entretanto, apresenta grandes dificuldades devido aos numerosos e repetitivos procedimentos matemáticos demandados na sua aplicação. Em função disso, OLIVEIRA (2003) recomenda o desenvolvimento de um aplicativo computacional a fim de facilitar a utilização do modelo por ele desenvolvido.

3. METODOLOGIA

O procedimento utilizado para a geração das séries sintéticas de precipitação diária foi baseado na metodologia desenvolvida por OLIVEIRA (2003), a qual foi sistematizada em um modelo computacional que permite sua aplicação, bem como a realização de algumas análises para avaliação do seu desempenho.

O modelo computacional foi desenvolvido por meio da elaboração de um algoritmo em linguagem de programação Borland Delphi 5.0, possibilitando que as equações da metodologia desenvolvida por OLIVEIRA (2003) fossem aplicadas de forma lógica e seqüencial para gerar as séries sintéticas de precipitação, juntamente com o respectivo perfil instantâneo de cada evento. Os resultados gerados são armazenados em arquivos no formato "Texto" que podem ser acessados, posteriormente, por outros aplicativos e planilhas eletrônicas. Além dos arquivos, são apresentadas várias informações na forma de gráficos e quadros.

O programa foi projetado para ser executado numa plataforma "Windows 98" ou superior, possui uma interface de fácil utilização e auto-explicativa. Conta com um sistema de ajuda com informações pertinentes aos dados de entrada e de saída, bem como com informações para auxiliar o entendimento da parte técnica para a solução de dúvidas referentes ao uso da própria interface.

Ao ser executado, o modelo computacional permite que o usuário selecione o número de anos e a estação pluviométrica para a qual deseja gerar a série sintética de precipitação, sendo facultado ao usuário alterar os parâmetros de algumas das equações utilizadas, tendo à disposição, para isto, uma base de dados contendo as informações disponíveis. O número de anos gerados pode ser extrapolado para valores maiores que o da estação.

Na seqüência, o programa calcula, para cada dia simulado, cinco números aleatórios, uniformemente distribuídos no intervalo de 0 a 1. Tais valores são utilizados na estimativa de alguns dos parâmetros necessários para a geração da série sintética. Após a obtenção dos números aleatórios são executados os cálculos referentes à geração da série sintética propriamente dita. O fluxograma simplificado de execução do modelo computacional é mostrado na Figura 3.

Para a utilização do aplicativo é necessário que o usuário disponha de um banco de dados com registros pluviométricos diários provenientes da estação meteorológica de interesse, ou então, que forneça um arquivo texto contendo os valores mensais da média, do desvio padrão e do coeficiente de assimetria da precipitação total diária, além dos valores de $P(C/C)_j$ (probabilidade, obtida para cada mês, de ocorrência de um dia chuvoso sendo o dia anterior chuvoso) e $P(C/S)_j$ (probabilidade, obtida para cada mês, de ocorrência de um dia chuvoso sendo o dia anterior seco). Uma vez atendido esse requisito, é possível obter uma série sintética de precipitação, conforme ilustrado no Quadro 1.

As séries são geradas diariamente para todos os meses dos anos simulados. Nos dias chuvosos, o programa calcula o total precipitado em milímetros (P), a duração do evento em horas (D), o tempo padronizado decorrido entre o início da chuva até o momento da ocorrência da intensidade máxima instantânea, chamado de tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea (t_i^*), a intensidade máxima instantânea padronizada (i_i^*) e os parâmetros adimensionais (a , b , c , d) da função dupla exponencial que representam o perfil de cada evento de precipitação gerado.

Após a geração da série sintética, os procedimentos disponíveis são a construção de gráficos com o resumo dos resultados e o armazenamento da série sintética gerada em um arquivo texto.

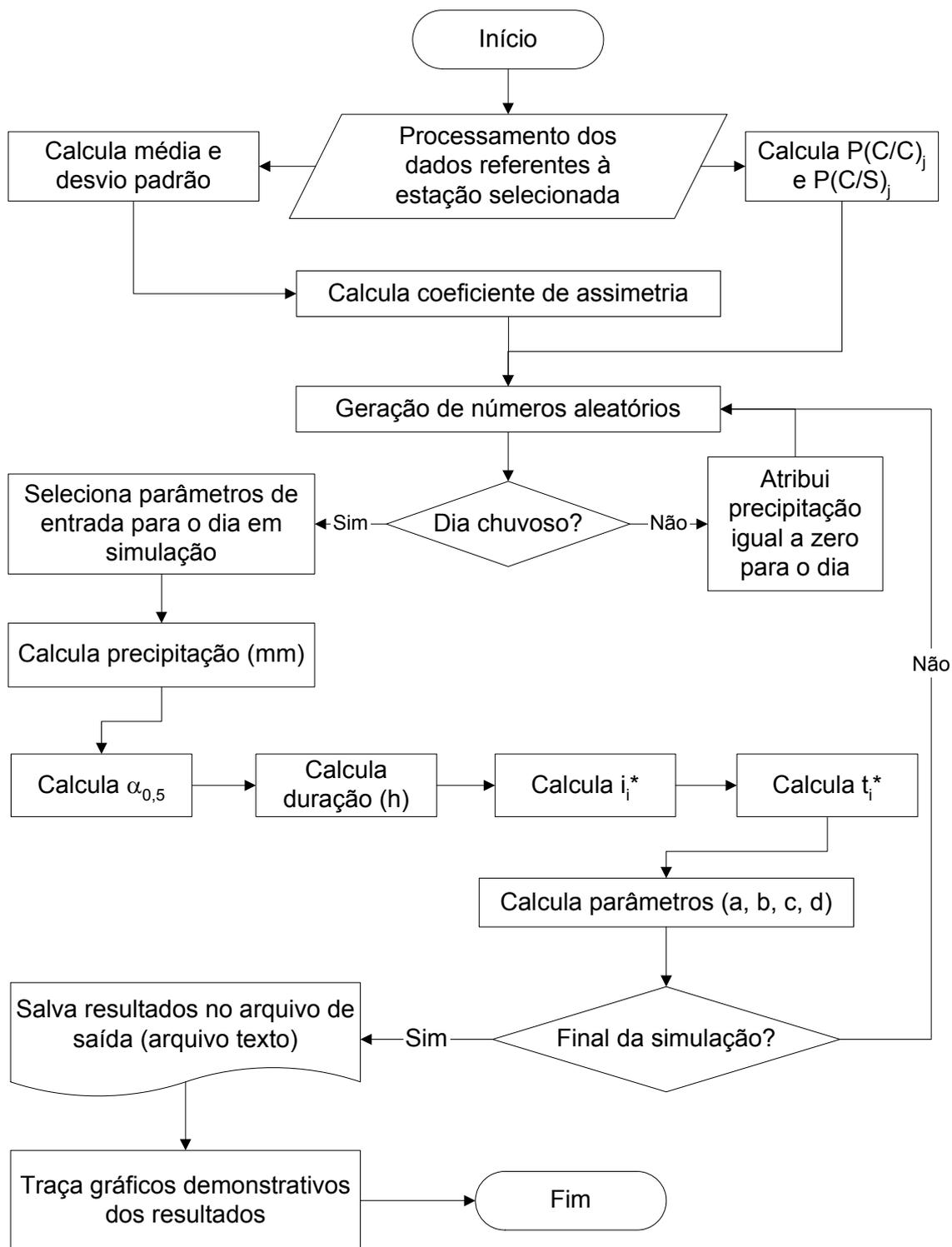


Figura 3 – Fluxograma simplificado demonstrando a seqüência de sub-rotinas que são executadas pelo modelo computacional.

Quadro 1 – Exemplo de série sintética de precipitação gerada pelo modelo computacional

Dia	Mês	Ano	P (mm)	D (h)	t_i^*	i_i^*	a	b	c	d
1	1	1	27,0	15,90	0,31	8,08	0,003	26,05	304,42	11,70
2	1	1	0,0	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00
3	1	1	0,0	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00
4	1	1	12,6	1,60	0,14	1,64	0,553	7,76	1,95	1,26
5	1	1	0,0	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00
6	1	1	0,0	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00
7	1	1	4,6	8,58	0,11	4,75	0,043	42,79	8,49	5,28
8	1	1	0,0	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00
9	1	1	2,6	0,32	0,24	3,22	0,149	12,79	8,49	4,04
.
.
.
31	12	100	8,4	0,70	0,28	9,04	0,001	32,28	303,93	12,55

3.1. Dados de entrada

Os dados de entrada, necessários ao funcionamento do modelo computacional, podem ser obtidos a partir do processamento de bancos de dados contendo informações de séries históricas de dados pluviométricos, entretanto o usuário pode optar, também, por utilizar como dados de entrada um arquivo contendo um resumo das informações pluviométricas requeridas pelo modelo. Os procedimentos correspondentes a estas duas opções de entrada de dados estão detalhados a seguir.

3.1.1. Banco de dados da ANA

O formato do arquivo de entrada de dados adotado como padrão no modelo computacional corresponde ao utilizado pela ANA (Agência Nacional de Águas). No Quadro 2 está apresentado um exemplo do formato simplificado deste tipo de arquivo, mostrando a disposição dos dados de precipitação referenciados pelo código da estação, dia, mês e ano de ocorrência do registro.

Uma vez feita a seleção desse tipo de entrada de dados, o primeiro procedimento executado pelo modelo computacional é a verificação de falhas nos registros da série histórica. Uma vez identificadas falhas nos dados em um determinado ano, o procedimento adotado é a eliminação completa do ano, sendo a série utilizada no processamento, portanto, somente aquela pertinente aos anos que não possuem nenhuma falha no banco de dados.

Quadro 2 – Formato simplificado do banco de dados da ANA com os dados diários de precipitação utilizados pelo modelo computacional

Código da estação	Data	Dia 1	Dia 2	Dia 3	...	Dia 31
02141003	01/01/65	0	4,0	6,8	...	0
02141003	01/02/65	11,8	0	0	...	0
02141003	01/03/65	0	0	42,4	...	0
02141003	01/04/65	0	0	6,2	...	1,2
02141003	01/05/65	0	15,0	0	...	0
02141003	01/06/65	0	0	0	...	0
02141003	01/07/65	0	0	0	...	11,0
02141003	01/08/65	25,2	0	0,4	...	0
02141003	01/09/65	0	0	0	...	0
02141003	01/10/65	0	0	0	...	0
02141003	01/11/65	0	0	0	...	0
02141003	01/12/65	0	0	0	...	10,8
...
02141003	01/12/98	0	5,5	0	...	0

A partir da série de dados completos, o programa calcula as seguintes informações necessárias à geração da série sintética: valores mensais da média, do desvio padrão e do coeficiente de assimetria do total precipitado diário; valores mensais das probabilidades de ocorrência diária de chuva, condicionado à ocorrência ou não de chuva no dia anterior.

Para o cálculo das médias, desvios padrão e coeficientes de assimetria, os dados diários de precipitação são, primeiramente, separados em doze grupos mensais, sendo considerados apenas os dias com ocorrência de precipitação. As médias e os desvios padrão mensais são obtidos com o uso das equações:

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (7)$$

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \quad (8)$$

em que

\bar{x}_j = média da precipitação total diária mensal, mm;

n = número de dias chuvosos do mês;

x_i = precipitação diária observada no mês, mm; e

s_j = desvio padrão da precipitação total diária mensal, mm.

O coeficiente de assimetria, correspondente à razão entre a assimetria adimensionalizada e o cubo do desvio padrão, é calculado com o uso da equação proposta por ASSIS (1996):

$$g_j = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}_j}{s_j} \right)^3 \quad (9)$$

em que g_j representa o coeficiente de assimetria da precipitação total diária mensal, adimensional.

As probabilidades condicionais de ocorrência de dias chuvosos são, também, estimadas mensalmente pelo processo estocástico denominado cadeia de Markov, sendo que o modelo computacional utiliza, para a determinação dessas probabilidades, a primeira ordem da cadeia de Markov, com apenas dois estados, ou seja:

$$P(C/C)_j = \frac{\sum_{i=1}^n DCC_i}{\sum_{i=1}^n DC_i} \quad (10)$$

$$P(C/S)_j = \frac{\sum_{i=1}^n DCS_i}{\sum_{i=1}^n DS_i} \quad (11)$$

em que

$P(C/C)_j$ = probabilidade, obtida para cada mês, de ocorrência de um dia chuvoso sendo o dia anterior chuvoso, decimal;

DCC_i = dia chuvoso sendo o dia anterior também chuvoso;

DC_i = dia chuvoso;

$P(C/S)_j$ = probabilidade, obtida para cada mês, de ocorrência de um dia chuvoso sendo o dia anterior seco, decimal;

DCS_i = dia chuvoso sendo o dia anterior seco; e

DS_i = dia seco.

As probabilidades de transição correspondentes são dadas por:

$$P(S/C)_j = 1 - P(C/C)_j \quad (12)$$

$$P(S/S)_j = 1 - P(C/S)_j \quad (13)$$

em que

$P(S/C)_j$ = probabilidade, obtida para cada mês, de ocorrência de dia seco sendo o dia anterior chuvoso, decimal; e

$P(S/S)_j$ = probabilidade, obtida para cada mês, de ocorrência de dia seco sendo o dia anterior seco, decimal.

3.1.2. Arquivo texto

Uma outra opção para a entrada de dados é o uso de arquivo texto contendo um resumo, previamente calculado, das informações pluviométricas requeridas pelo modelo. O procedimento para obtenção desses valores, a partir dos dados pluviométricos diários, é igual ao descrito no item 3.1.1. No Quadro 3 está apresentado exemplo do formato do arquivo de dados de entrada requerido pelo modelo computacional.

Quadro 3 – Formato do arquivo texto apresentando o resumo dos dados pluviométricos de entrada requeridos pelo modelo computacional

Mês	Média (\bar{x}_j)	Desvio padrão (s_j)	Coef. de assimetria (g_j)	$P(C/C)_j$	$P(C/S)_j$
Jan	14,7	16,6	1,72	0,68	0,40
Fev	14,7	17,8	1,62	0,62	0,33
Mar	14,7	15,2	1,35	0,60	0,38
Abr	12,3	17,0	1,84	0,55	0,30
Mai	10,4	13,1	1,54	0,39	0,28
Jun	8,3	9,6	1,68	0,42	0,15
Jul	8,3	10,7	1,54	0,38	0,19
Ago	7,1	7,4	0,92	0,45	0,19
Set	8,9	9,7	1,77	0,59	0,29
Out	9,0	10,6	1,39	0,56	0,35
Nov	13,0	16,8	1,65	0,62	0,35
Dez	7,0	23,0	2,13	0,63	0,50

3.2. Parâmetros pluviográficos utilizados

O modelo computacional permite o acesso a uma base de dados com informações pluviográficas pertinentes a 11 estações pluviográficas situadas no Estado do Rio de Janeiro (Quadro 4). Cada estação possui todos os parâmetros utilizados para gerar a série sintética de precipitações. O usuário pode selecionar os parâmetros de uma das estações ou, então, optar pela utilização dos valores determinados por OLIVEIRA (2003) com a utilização dos dados pluviográficos das 11 estações, ou seja, os parâmetros generalizados para todas as estações.

Quadro 4 – Estações pluviográficas situadas no Estado do Rio de Janeiro cujos parâmetros estão incluídos na base de dados do modelo

Estação	Código	Entidade	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Ilha dos Pombos	02142362	LIGHT	21°51'05"	42°36'33"	143
Lajes	02243251	LIGHT	22°42'03"	43°52'42"	462
Santa Cecília	02243205	LIGHT	22°28'55"	43°50'21"	371
Tocos	02244103	LIGHT	22°45'15"	44°07'11"	479
Cachoeiras de Macacu	02242095	SERLA	22°28'46"	42°39'28"	40
Capela Mayrink	02242239	SERLA	21°51'05"	42°36'33"	460
Eletróbrás	02243083	SERLA	22°55'18"	43°25'12"	40
Escola União	02242094	SERLA	22°35'03"	42°56'27"	10
Posto Garrafão	02242098	SERLA	22°28'56"	42°59'46"	640
Rio Mole	02242101	SERLA	22°51'11"	42°33'07"	10
Tanguá	02242091	SERLA	22°42'29"	42°42'15"	40

3.3. Geração dos números aleatórios

O modelo computacional gera, para cada dia da série sintética, cinco números aleatórios distintos e uniformemente distribuídos no intervalo de 0 a 1. Os números são gerados por meio de uma rotina interna que pertence ao próprio software Delphi 5.0. O primeiro número aleatório é utilizado na determinação da ocorrência ou não de chuva no dia simulado; o segundo aleatório é utilizado na estimativa da lâmina de precipitação dos dias chuvosos; o terceiro é necessário para estimar o parâmetro $\alpha_{0,5}$ e os dois últimos são utilizados para estimar o tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação dos dias com ocorrência de chuva.

Foi criada a opção de manter fixo o conjunto de números aleatórios. Esse procedimento consiste na utilização de um número inteiro, adotado como ponto de partida, chamado de “semente dos números aleatórios”. Sempre que o programa for executado utilizando o mesmo número como “semente”, os números aleatórios produzidos serão os mesmos. Isto possibilita a comparação do desempenho da série sintética produzida para diferentes estações pluviométricas sem que haja a variabilidade proveniente da aleatoriedade dos diferentes números gerados em cada nova simulação.

A “semente” dos números aleatórios pode ser alterada pelo usuário. Quando um mesmo valor é mantido como “semente”, os mesmos resultados são sempre reproduzidos quando o programa é rodado utilizando os mesmos dados de entrada.

3.4. Geração da série sintética

Os procedimentos a seguir descritos para a geração da série sintética seguem, basicamente, a proposição de OLIVEIRA (2003). Alguns outros procedimentos foram inseridos para a melhor visualização dos resultados gerados.

3.4.1. Precipitação diária

Primeiramente, é verificado se há ou não ocorrência de precipitação para o dia que está sendo analisado. Se o dia anterior ao dia simulado tiver

se o dia for chuvoso, a probabilidade de ocorrência de chuva considerada para aquele dia é $P(C/C)_j$, caso contrário adota-se $P(C/S)_j$. Para determinar a ocorrência de um dia seco ou chuvoso é utilizado, para cada dia simulado, um número aleatório. Se o número aleatório for menor ou igual à probabilidade de ocorrência de chuva para aquele dia, considera-se o dia como chuvoso, caso contrário considera-se o dia como seco. Para o primeiro dia simulado, considerou-se o dia anterior seco.

Para os dias chuvosos, a precipitação diária é estimada a partir da distribuição Pearson tipo III, sendo calculada pela equação:

$$P = \bar{x}_j + \frac{2s_j}{g_j} \left\{ \left[\frac{g_j}{6} \left(x' - \frac{g_j}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1 \right\} \quad (14)$$

em que

P = precipitação total diária, mm; e

x' = variável aleatória padronizada, adimensional.

Os valores diários de x' são obtidos a partir da padronização do número aleatório correspondente àquele dia. A padronização consiste em um procedimento matemático que transforma os números aleatórios, de tal forma que apresentem média igual a 0 e desvio padrão igual a 1. As equações propostas por MEYER (2001) para este fim são:

$$z = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{hp^2}\right)} \quad (15)$$

$$x' = \frac{z - (2,30753 + 0,27061z)}{1 + 0,99229z + 0,04481z^2} \quad (16)$$

em que hp é igual a $1,0 -$ (número aleatório) quando o número aleatório do dia em simulação for igual ou maior que 0,5. Caso contrário, hp assume o valor do próprio número aleatório e o valor de x' calculado por meio da equação 16 é utilizado na equação 14, com sinal invertido.

Considerou-se chuvoso o dia em que a lâmina de precipitação pluviométrica gerada foi igual ou superior a 0,2 mm. Em caso contrário, o dia foi considerado seco.

Após a geração da precipitação total diária para todos os dias chuvosos dos anos simulados, o modelo computacional realiza a correção das médias e dos desvios padrão mensais com a finalidade de melhorar o ajuste da série sintética em relação à série real. As correções são efetuadas por meio de um ajuste proporcional em todos os valores diários de precipitação. A correção da média é obtida com o uso da equação:

$$P' = \frac{\bar{x}_j}{\bar{x}_{jC}} P \quad (17)$$

em que

P' = precipitação total diária com média corrigida, mm; e

\bar{x}_{jC} = média da precipitação total diária mensal calculada a partir dos valores de precipitação obtidos pela equação 14.

e a correção do desvio padrão, sem alterar a média, é feita por:

$$P_c = (P' - \bar{x}_j) \frac{s_j}{s_{jC}} + \bar{x}_j \quad (18)$$

P_c = precipitação total diária corrigida, mm; e

s_{jC} = desvio padrão da precipitação total diária mensal calculada a partir dos valores de precipitação obtidos pela equação 17.

3.4.2. Duração da precipitação

A estimativa da duração do evento diário de precipitação somente é feita para os dias previamente considerados como chuvosos. Conforme NICKS et al. (1995), a estimativa da duração da precipitação é obtida pela equação:

$$D = \frac{\Delta}{-2 \ln(1 - \alpha_{0,5})} \quad (19)$$

em que

D = duração do evento, horas;

Δ = parâmetro que expressa a relação entre os valores diários de intensidade máxima instantânea e de intensidade média, adimensional; e

$\alpha_{0,5}$ = razão entre os valores do máximo total precipitado em meia hora e a precipitação diária, adimensional.

O valor de Δ utilizado na versão mais recente do CLIGEN (5.1) corresponde a 3,99, porém OLIVEIRA (2003), estudando este parâmetro para várias localidades do Estado do Rio de Janeiro, concluiu que um valor mais representativo seria 3,33, sendo, portanto, esse o valor adotado como padrão na estimativa da duração de cada evento de precipitação. O usuário pode selecionar o valor específico de uma das 11 estações incluídas na base de dados ou inserir o valor para um outro local de interesse, caso tenha acesso a essa informação.

Os valores diários de $\alpha_{0,5}$ são obtidos a partir da distribuição gama, cuja função densidade de probabilidade é expressa por:

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (20)$$

em que

$F(x)$ = probabilidade de ocorrência do evento x ;

x = variável aleatória contínua, que representa a magnitude do $\alpha_{0,5}$;

α = parâmetro de forma;

β = parâmetro de escala de x ;

$\Gamma(\alpha)$ = função gama do parâmetro α ; e

e = base do logaritmo neperiano.

Os parâmetros α , β e $\Gamma(\alpha)$ adotados como padrão são os valores generalizados das 11 estações incluídas na base de dados para consulta, e equivalem a 2,3250; 0,1603 e 1,1845, respectivamente. O usuário pode

selecionar os valores específicos de uma das 11 estações (Quadro 5) ou inserir os valores para uma outra estação de interesse, caso tenha conhecimento do valor desses parâmetros.

Quadro 5 – Parâmetros da função gama incluídos na base de dados do modelo computacional

Estação	Código	α	β	$\Gamma(\alpha)$
Cachoeiras de Macacu	02242095	2,4704	0,1441	1,3022
Capela Mayrink	02242239	2,1920	0,1311	1,0970
Eletróbrás	02243083	2,0156	0,1634	1,0067
Escola União	02242094	2,2802	0,1677	1,1531
Ilha dos Pombos	02142362	3,4406	0,1345	3,1144
Lajes	02243251	2,5043	0,1574	1,3333
Posto Garrafão	02242098	2,0301	0,1730	1,0131
Rio Mole	02242101	2,3488	0,1557	1,2021
Santa Cecília	02243205	2,9167	0,1456	1,8547
Tanguá	02242091	2,5564	0,1408	1,3842
Tocos	02244103	3,1426	0,1433	2,2904

Para a estimativa do $\alpha_{0,5}$, o modelo computacional novamente utiliza números aleatórios diários uniformemente distribuídos no intervalo de 0 a 1. Conforme a proposição de SEDIYAMA et al. (1978), ilustrada na Figura 4, para cada dia chuvoso, o valor da função de distribuição acumulada $P(x)$ é substituído por um número aleatório, sendo $F(x)$ - função densidade de probabilidade (equação 20) resolvida para encontrar o valor correspondente ao parâmetro $\alpha_{0,5}$ estimado.

A resolução é efetuada pelo método das somas de Riemann, pelo qual a integração é feita, progressivamente, somando-se pequenas áreas sob a curva até que o valor da integral seja, aproximadamente, igual ao valor de $F(x)$. O valor de x obtido para esta condição corresponde ao valor de $\alpha_{0,5}$ para o dia em simulação.

A precisão obtida com a aplicação desse método de integração varia com o número de partes em que for dividido o domínio da função. Adotou-se a divisão em 100 mil partes, resultando na estimativa do valor diário de $\alpha_{0,5}$ com uma precisão da ordem de 10^{-5} , aproximadamente.

De acordo com a metodologia proposta por OLIVEIRA (2003), o valor diário mínimo do parâmetro $\alpha_{0,5}$ é 0,0208, portanto os valores menores que este limite são reajustados para o valor mínimo, ou seja, para 0,0208.

Uma vez estimado o valor diário do parâmetro $\alpha_{0,5}$ a equação 19 é aplicada para estimar a duração do evento de precipitação correspondente ao dia em simulação.

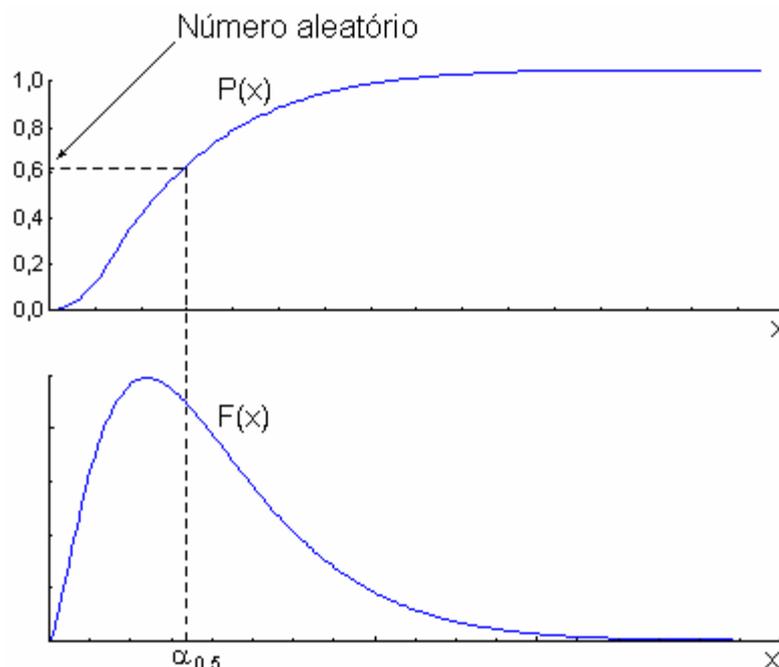


Figura 4 – Procedimento para gerar o valor diário de $\alpha_{0,5}$.

3.4.3. Intensidade máxima instantânea de precipitação padronizada

Conforme metodologia proposta por OLIVEIRA (2003), o modelo computacional estima a intensidade máxima instantânea de precipitação com o uso da equação:

$$i_i = 5,6378 \left(\frac{P_c}{D} \right)^{0,8334} \quad (21)$$

em que i_i é a intensidade máxima instantânea do evento, mm h^{-1} .

Os coeficientes 5,6378 e 0,8334 são adotados como padrão e representam os coeficientes obtidos com base nas 11 estações consideradas no estudo feito por OLIVEIRA (2003). Caso faça a opção por não usar os coeficientes padrão, o usuário pode selecionar os valores específicos de uma

das 11 estações ou inserir os valores para um outro local de interesse, caso tenha acesso a esses coeficientes.

Os valores diários de i_i são padronizados, resultando num valor adimensional (i_i^*), que é razão entre a intensidade máxima instantânea (i_i) e a intensidade média do evento $\left(\frac{P_c}{D}\right)$. O valor mínimo de i_i^* adotado por OLIVEIRA (2003) corresponde a 1,01, portanto os valores menores que este limite são reajustados para o valor mínimo, ou seja, 1,01.

3.4.4. Tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea

A obtenção do tempo padronizado decorrido entre o início da chuva até o momento da ocorrência da intensidade máxima instantânea, (t_i^*), é estimado para cada dia com ocorrência de precipitação.

Conforme metodologia proposta por NICKS et al.(1995), o modelo inicialmente gera internamente 12 classes com intervalos iguais, variando de 0,0 a 1,0, que são: 0,0-0,0833; 0,0833-0,1667; 0,1667-0,25; 0,25-0,3333; 0,3333-0,4167; 0,4167-0,5; 0,5-0,5833; 0,5833-0,6667; 0,6667-0,75; 0,75-0,8333; 0,8333-0,9167; e 0,9167-1,0. São utilizados como parâmetros de entrada 12 valores, correspondentes às freqüências acumuladas da ocorrência de t_i^* em cada classe.

Os parâmetros adotados como padrão são os obtidos com base nas 11 estações em que foram determinados e podem ser alterados, por meio de consulta à base de dados, para os valores específicos de uma das 11 estações cadastradas. Caso o usuário queira utilizar outros valores, é possível alterá-los manualmente utilizando os recursos da interface do programa.

Para essa análise, o modelo computacional utiliza dois novos números aleatórios diários. O primeiro número aleatório é considerado, para o evento, como sendo a freqüência de ocorrência de t_i^* acumulada nas 12 classes estabelecidas. O segundo aleatório representa a localização do tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea dentro da classe selecionada pelo primeiro aleatório. O cálculo de t_i^* será efetuado pela soma do limite inferior da classe correspondente à freqüência selecionada pelo primeiro aleatório, com a proporção da amplitude de classe quantificada pelo segundo aleatório.

Adotando-se, como exemplo, os valores de frequência acumulada da ocorrência de t_i^* , apresentados na Figura 5, se para um determinado dia o primeiro número aleatório gerado for 0,5652, então a quarta classe de t_i^* é automaticamente selecionada. Se o segundo número aleatório gerado equivaler a 0,8248, então o valor de t_i^* calculado por interpolação será $0,2500 + 0,0833 \times 0,8248$, resultando em 0,3187.

	Freq. acumulada	Classes de t_i^*
	0,000	0,0000
	0,240	0,0833
	0,389	0,1667
1º aleatório →	0,505	0,2500
2º aleatório →	0,591	0,3333
	0,672	0,4167
	0,750	0,5000
	0,801	0,5833
	0,855	0,6667
	0,900	0,7500
	0,938	0,8333
	0,976	0,9167
	1,000	1,0000

Figura 5 – Exemplo de procedimento para o cálculo do tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea para cada evento de precipitação.

3.4.5. Perfil de precipitação

O perfil instantâneo de precipitação foi determinado a partir dos dados gerados pelo próprio modelo computacional, sendo utilizado para este fim uma função dupla exponencial. As informações necessárias para obter essa função são:

- precipitação total diária corrigida (P_c), mm;
- duração do evento (D), h;
- tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea (t_i^*), adimensional; e
- intensidade máxima instantânea padronizada (i_i^*), adimensional.

A função dupla exponencial é expressa com o uso das seguintes equações:

$$i(t^*) = a e^{bt^*} \dots\dots\dots 0 \leq t^* \leq t_i^* \quad (22)$$

e

$$i(t^*) = c e^{-dt^*} \dots\dots\dots t_i^* < t^* \leq 1,0 \quad (23)$$

em que

- $i(t^*)$ = intensidade padronizada, adimensional;
- a, b, c, d = parâmetros de ajuste do modelo; e
- t^* = tempo padronizado, adimensional.

Os valores de a, b, c, d , foram obtidos com base nas equações propostas por NICKS et al. (1995) para calcular estes parâmetros:

$$1 - e^{-bt_i^*} = \frac{bt_i^*}{i_i^*} \quad (24)$$

$$a = i_i^* e^{-bt_i^*} \quad (25)$$

$$d = \frac{bt_i^*}{(1 - t_i^*)} \quad (26)$$

$$c = i_i^* e^{dt_i^*} \quad (27)$$

Primeiramente o valor de b é determinado solucionando a equação 24 por meio do método iterativo de Newton-Raphson. Os demais parâmetros são calculados pela aplicação direta das equações 25, 26 e 27.

Uma vez obtidos os parâmetros a, b, c, d , foi possível plotar as duas funções exponenciais que, em conjunto, representam o perfil diário de precipitação. Antes, porém, foi necessário efetuar alguns procedimentos matemáticos para adequar as equações.

A integral $I(t^*)$ das equações 22 e 23 resulta nas seguintes equações:

$$I(t^*) = \frac{a}{b} (e^{bt^*} - 1) \dots\dots\dots 0 \leq t^* \leq t_i^* \quad (28)$$

e

$$I(t^*) = \left(-\frac{c}{d}\right) (e^{-d} - e^{-dt^*}) \dots\dots\dots t_i^* < t^* \leq 1,0 \quad (29)$$

Os valores de $I(t^*)$ e de t^* nas equações 28 e 29 estão padronizados e variam de 0 a 1. Dividindo-se os valores de $I(t)$ em n subintervalos iguais e nomeando cada um tem-se F_1, F_2, \dots, F_n . Para cada um desses valores foi calculado um valor de t correspondente.

Isolando a variável t das equações 28 e 29 tem-se que:

$$t^* = \frac{\ln \left[\frac{\left(I(t^*) + \frac{a}{b} \right) b}{a} \right]}{b} \dots\dots\dots 0 < t^* \leq t_i^* \quad (30)$$

$$t^* = -\frac{\ln \left[\frac{\left(I(t^*) + \frac{c}{d} e^{-d} \right) d}{c} \right]}{d} \dots\dots\dots t_i^* < t^* \leq 1,0 \quad (31)$$

A equação 30 é aplicada no intervalo de tempo de 0 a t_i^* e a equação 31 no intervalo de t_i^* a 1,0. Os valores calculados foram denominados de T_1, T_2, \dots, T_{n+1} , sendo que, para o instante T_1 , o valor de $I(t^*)$ é zero. A partir de F_i e T_i , foram obtidos os n valores médios de intensidade padronizada no intervalo entre T_i e T_{i+1} , por meio da equação:

$$I_i = \frac{F_{i+1} - F_i}{T_{i+1} - T_i} \quad (32)$$

em que I_i é a intensidade padronizada média entre os tempos T_i e T_{i+1} .

O passo subsequente foi dar dimensão a todas as variáveis padronizadas. O procedimento consistiu em multiplicar todos os valores de T_i pela duração (D) do respectivo evento e todos os valores de I_i pela intensidade média do evento, ou seja, $\frac{P_c}{D}$. A partir desse conjunto com $n+1$ pontos coordenados, foi representado graficamente o perfil instantâneo de cada evento de precipitação da série sintética.

3.5. Formas de apresentação dos resultados

No final da geração da série sintética, o modelo computacional salva todos os dados diários estimados num arquivo texto, ficando este disponível para aplicação em outros aplicativos e, ou, planilhas eletrônicas.

Todas as opções a seguir descritas sobre a apresentação dos resultados ficam disponíveis ao usuário por meio de telas componentes da interface do modelo computacional.

Utilizando a forma gráfica, os valores diários de precipitação da série sintética são plotados em gráficos de barras, juntamente com os valores diários da série histórica selecionada do banco de dados. A visualização obtida permite a comparação entre as magnitudes das precipitações de cada conjunto de dados, assim como a distribuição e frequência de ocorrência das mesmas. Tal comparação pode expressar o desempenho do modelo em reproduzir os eventos extremos observados nos registros pluviométricos históricos.

Um resumo dos resultados é obtido por meio do cálculo dos valores mensais da média, desvio padrão e coeficiente de assimetria das precipitações diárias. Também são obtidos os valores mensais de $P(C/C)_j$ e $P(C/S)_j$ para os dados de precipitação da série produzida. O usuário tem a opção de visualizar a comparação entre os valores médios mensais obtidos na série sintética e os respectivos valores observados por meio de vários gráficos de barras.

O programa calcula, ainda, a média mensal da duração, do tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea e da própria intensidade máxima instantânea padronizada, mesmo não existindo dados observados para serem comparados. Para estes valores, são plotados gráficos de barras individuais para cada valor mensal.

Uma outra opção de visualização dos resultados permite obter os gráficos correlacionando os valores gerados e observados, onde é traçada uma reta de regressão linear simples passando pela origem do plano cartesiano. São apresentados na área do gráfico a equação de regressão, o coeficiente de determinação e o erro padrão de estimativa, como informações adicionais para análise do ajuste do modelo em relação aos dados observados.

Por meio de um dos recursos de sua interface, o programa exibe um quadro com os valores diários da precipitação total diária, da duração dos eventos, da intensidade máxima instantânea padronizada e do seu tempo padronizado de ocorrência, ambos referenciados pelo dia, mês e ano de simulação, semelhante ao que está apresentado no Quadro 1. Selecionando um determinado dia, o usuário pode visualizar o gráfico do perfil instantâneo, caso tenha ocorrido precipitação no referido dia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo computacional desenvolvido foi denominado CLIMABR, sendo a Figura 6 ilustrativa da tela de apresentação do software, constando nesta o seu nome, sua finalidade e o grupo responsável pelo seu desenvolvimento.

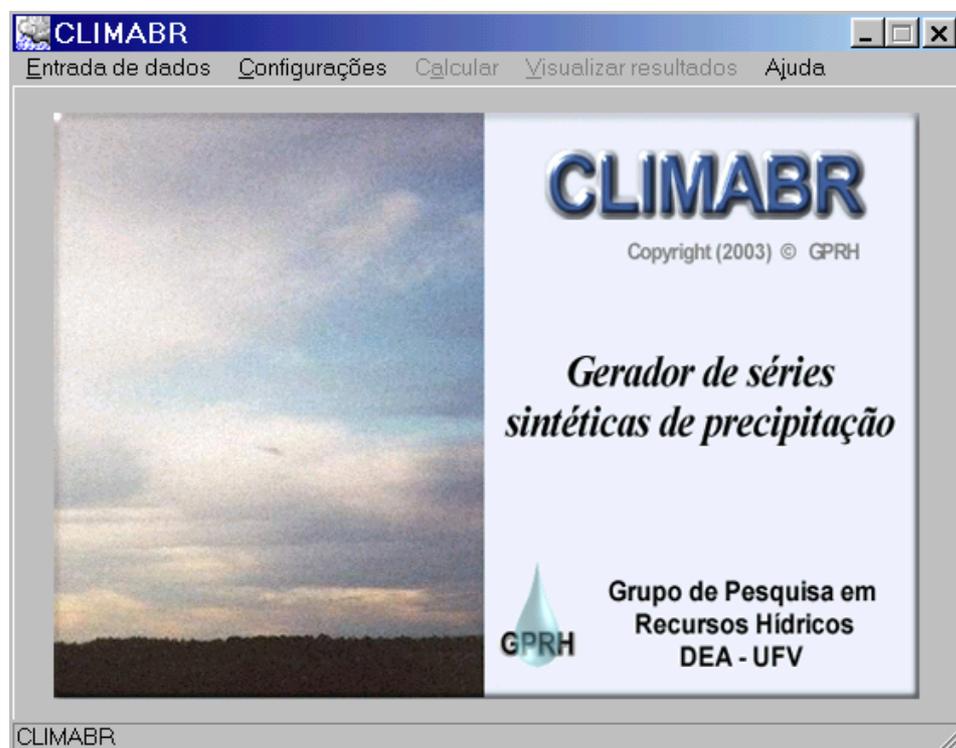


Figura 6 – Tela de apresentação do modelo computacional desenvolvido.

Para fins práticos de apresentação do software desenvolvido, os itens subseqüentes estão apresentados em dois tópicos, o primeiro referente à entrada de dados e o segundo referente aos resultados obtidos com a aplicação do modelo computacional.

4.1. Entrada de dados

Conforme descrito na metodologia, a escolha dos dados de entrada pode ser feita a partir do banco de dados pluviométricos da ANA ou a partir de um arquivo texto que contenha as informações requeridas pelo modelo computacional.

Na Figura 7 está apresentada a tela pertinente à seleção dos dados de entrada a partir do banco de dados da ANA. Neste caso, o usuário primeiramente deve escolher o Estado onde se encontra a localidade desejada e, em seguida, escolher a estação meteorológica de interesse, podendo ser observado nesta tela, para a estação selecionada, quantos e quais são os anos que não possuem falhas nos registros da série histórica, já que o CLIMABR elimina automaticamente, da série histórica, os registros dos anos com falhas. Como exemplo podem ser observadas as informações referentes à estação Afonso Arinos (RJ), que possui uma série histórica com dez anos de registros consecutivos, (1973 a 1982). Constam ainda nesta tela, as informações pertinentes ao código da estação, latitude, longitude e altitude disponibilizadas pela ANA.

Uma vez tendo selecionado a estação de interesse, o usuário pode confirmar a escolha clicando no botão “Ok”, caso contrário pode clicar no botão “Cancelar” e optar pelo uso dos dados de entrada a partir do arquivo texto.

Na Figura 8 está apresentada a tela relativa à seleção dos dados de entrada a partir de um arquivo texto. Esta opção foi criada para os casos em que os dados da série histórica de determinada estação não estejam contemplados no banco de dados da ANA. Neste caso, o usuário deve localizar o diretório com os dados e, em seguida, escolher o arquivo referente à estação meteorológica de interesse. O procedimento para obtenção deste tipo de entrada de dados deve seguir a seqüência de cálculos apresentados no item 3.1.1 referente à metodologia. Após a abertura do arquivo, suas informações

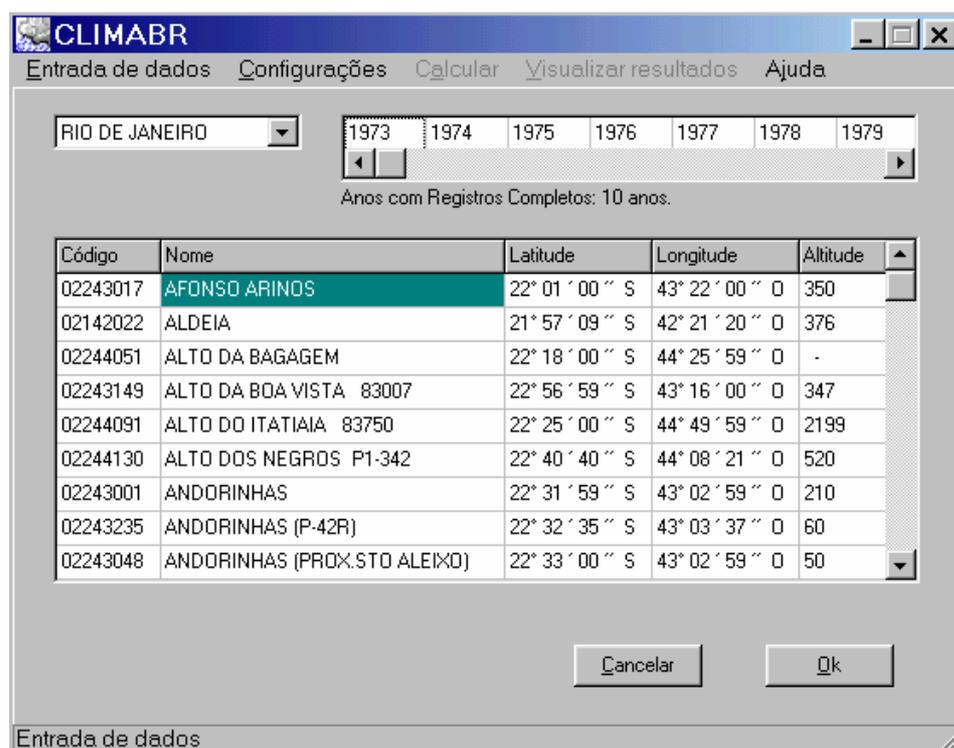


Figura 7 – Escolha da estação se interesse a partir do banco de dados da ANA.

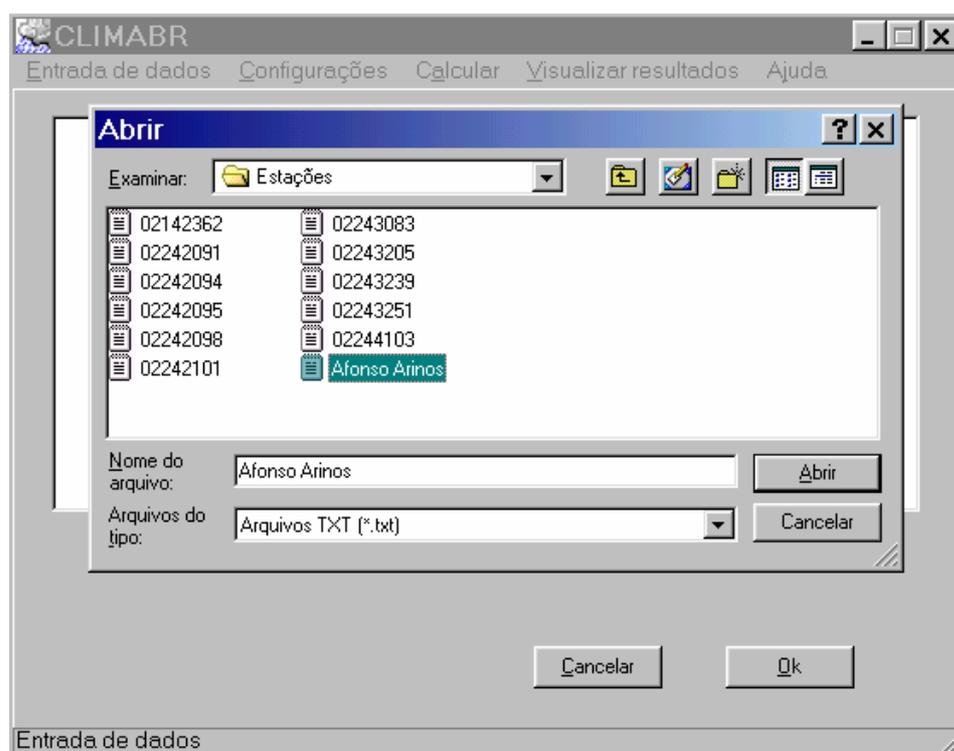


Figura 8 – Seleção dos dados de entrada a partir de um arquivo texto.

podem ser visualizadas, conforme apresentado na Figura 9. A primeira linha do arquivo deve conter um título, especificando o nome de cada coluna, e outras informações referentes à estação para a qual os dados foram obtidos. Os dados de entrada devem estar dispostos em cinco colunas, seguindo obrigatoriamente a seguinte ordem: valores mensais da média (mm), desvio padrão (mm), coeficiente de assimetria (adimensional), $P(C/C)_j$ e $P(C/S)_j$ (decimal), respectivamente. O usuário pode cancelar a operação ou confirmar o uso dos dados selecionados.

No item “Configurações” do menu principal é feita a abertura da tela representada na Figura 10, pela qual o usuário pode fornecer informações necessárias para a geração da série sintética. Os campos indicados pelos círculos brancos enumerados se referem aos seguintes propósitos:

- 1 – fornecimento do tamanho da série sintética, em anos, e o ano a partir do qual a série começará a ser gerada;
- 2 – fornecimento dos valores dos parâmetros alfa, beta e da função gama do parâmetro alfa que serão utilizados pela equação 19 para gerar o valor diário de $\alpha_{0,5}$ necessário para a estimativa da duração dos eventos de precipitação (equação 19);
- 3 – fornecimento do parâmetro delta (Δ), requerido pela equação 19 para cálculo da duração das precipitações;
- 4 – fornecimento de um valor inteiro (“semente dos números aleatórios”) utilizado como ponto de partida para a geração dos cinco conjuntos de números aleatórios uniformemente distribuídos no intervalo entre 0 e 1;
- 5 – opção de consulta à base de dados para seleção dos parâmetros pluviográficos das estações apresentadas na Figura 11;
- 6 – fornecimento dos valores de frequência acumulada do tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea (t_i^*), correspondentes aos 12 intervalos de classe adotados por OLIVEIRA (2003); e
- 7 – fornecimento dos coeficientes utilizados pela equação 21 para estimativa da intensidade máxima instantânea de precipitação.

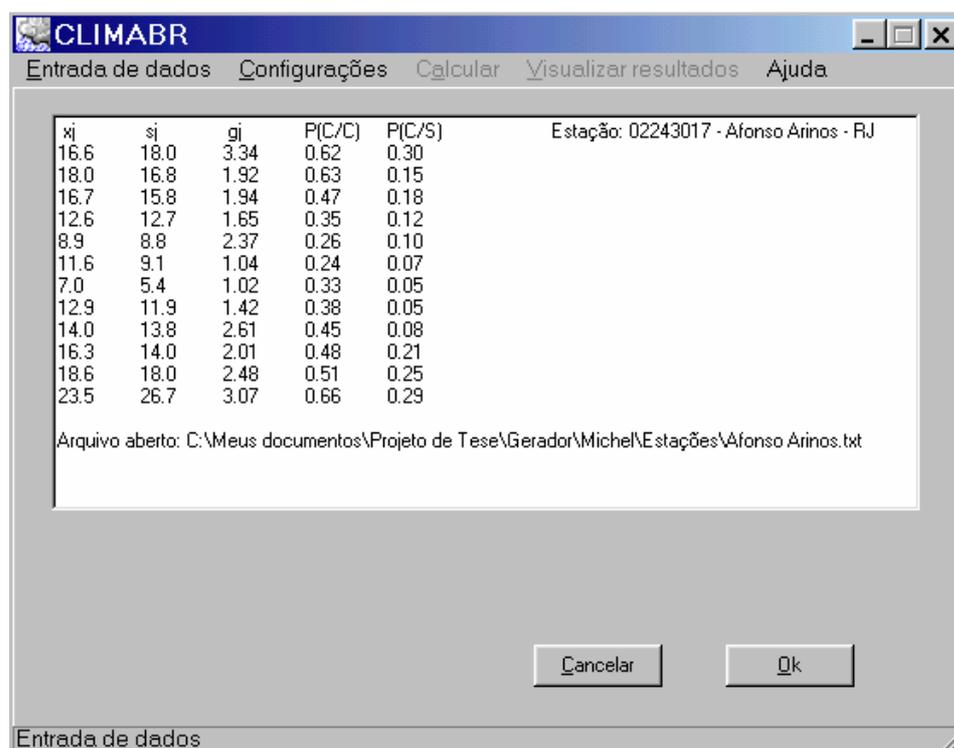


Figura 9 – Tela de visualização e confirmação do uso do arquivo texto para a entrada de dados.

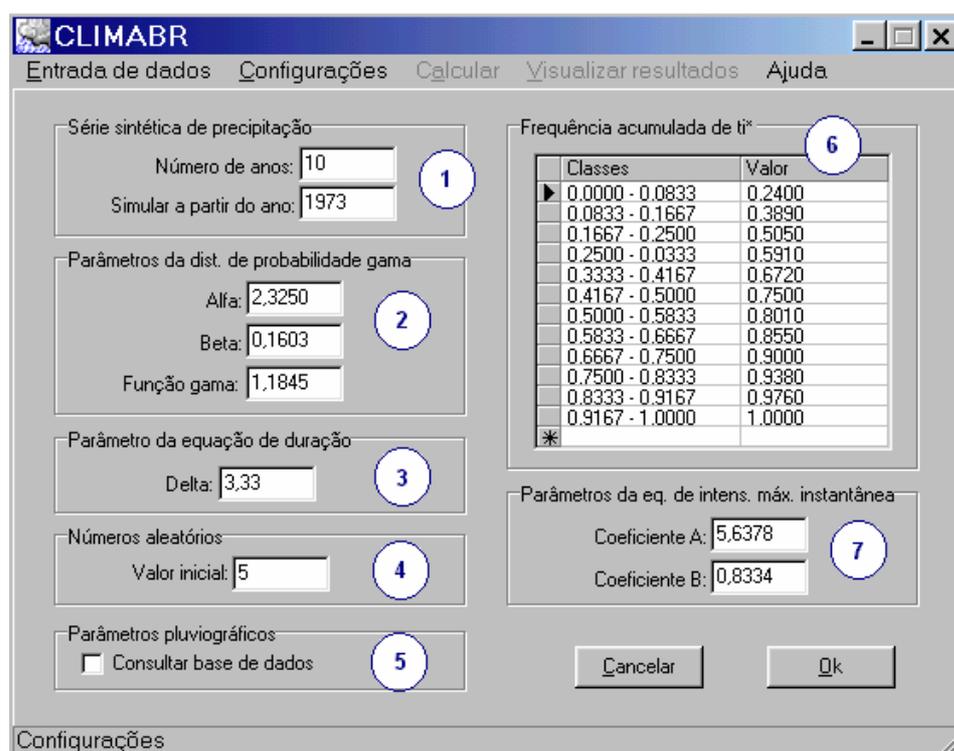


Figura 10 – Fornecimento das informações pertinentes à série sintética, parâmetros das equações e valor inicial (“semente”) dos números aleatórios.

Os valores que, inicialmente, aparecem nos campos 2, 3, 6 e 7 da Figura 10 referem-se aos parâmetros generalizados, obtidos por OLIVEIRA (2003), sendo adotados como valores padrão no modelo computacional CLIMABR.

Na Figura 11 está apresentada a tela de consulta à base de dados contendo os parâmetros pluviográficos específicos para cada uma das 11 estações pluviográficas utilizadas no trabalho. Pelo acesso à base de dados, o usuário pode adotar os parâmetros de uma das estações para serem utilizados nos campos 2, 3, 6 e 7, enumerados na Figura 10.

Código	Nome	Alfa	Beta	F. gama	Delta	Coef. A	Coef. B
02142362	Ilha dos Pombos	3.4406	0.1345	3.1144	3.365	7.6978	0.6842
02242091	Tanguá	2.5564	0.1408	1.3842	3.218	5.8646	0.8223
02242094	Escola União	2.2802	0.1677	1.1531	3.206	5.5066	0.8223
02242095	Cachoeira de Macacú	2.4704	0.1441	1.3022	3.081	6.4345	0.8044
02242098	Posto Garrafão	2.0301	0.1730	1.0131	3.29	4.8422	0.8802
02242101	Rio Mole	2.3488	0.1557	1.2021	3.517	5.2512	0.8407
02243083	Eletrobrás	2.0156	0.1634	1.0067	3.086	5.2307	0.8482
02243205	Santa Cecília	2.9167	0.1456	1.8547	3.441	6.4345	0.8044
02243239	Capela Mayrink (P-36R)	2.1920	0.1311	1.0970	4.048	5.5322	0.8604
02243251	Lajes	2.5043	0.1574	1.3333	3.178	6.4187	0.8239
02244103	Tocos	3.1426	0.1433	2.2904	3.602	6.8708	0.7958

Dados da Estação 02243083 selecionados.

Cancelar Ok

Configurações

Figura 11 – Tela de consulta à base de dados com os parâmetros pluviográficos das estações.

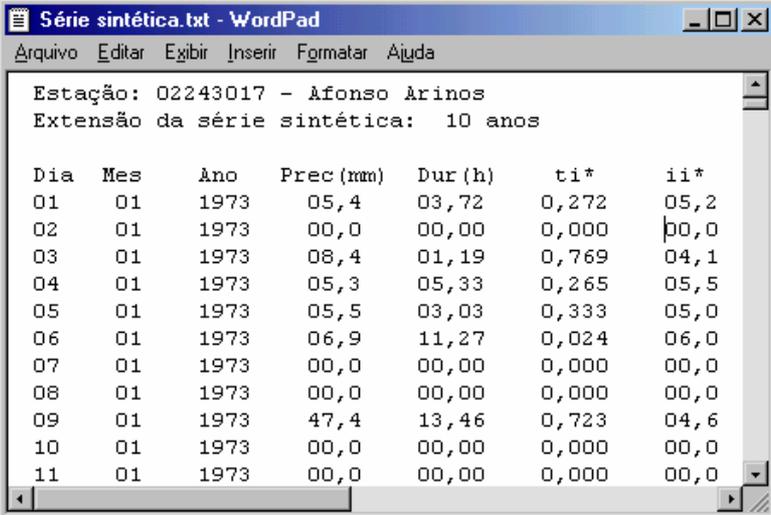
4.2. Resultados obtidos com a aplicação do modelo computacional

Para a apresentação dos resultados obtidos com a aplicação do modelo computacional CLIMABR, foi tomada como exemplo uma série sintética de precipitações gerada para a estação Afonso Arinos (02243017), localizada no Município de Três Rios no Estado do Rio de Janeiro.

Para fins de análise e comparação da série gerada com a série original, foi simulada uma série sintética de precipitações com a mesma extensão da série observada, ou seja, 10 anos (Figura 7). Os parâmetros pluviográficos de

entrada adotados para a geração da série sintética foram os valores de referência inicialmente apresentados pelo CLIMABR.

Clicando no item “Calcular” da barra de menu principal, o CLIMABR inicia os cálculos para a geração da série sintética, sendo que, no final da operação, as informações diárias geradas são salvas em um arquivo texto (Figura 12) com o nome e diretório escolhido pelo usuário. Conforme pode ser visto no Quadro 1, apresentado na metodologia, os dados que compõem esse arquivo foram referenciados pelo dia, mês e ano, sendo quantificados para cada uma destas datas a precipitação total diária em milímetros (P), a duração do evento em horas (D), o tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea (t_i^*) e a intensidade máxima instantânea padronizada (i_i^*).



Dia	Mes	Ano	Prec (mm)	Dur (h)	t_i^*	i_i^*
01	01	1973	05,4	03,72	0,272	05,2
02	01	1973	00,0	00,00	0,000	00,0
03	01	1973	08,4	01,19	0,769	04,1
04	01	1973	05,3	05,33	0,265	05,5
05	01	1973	05,5	03,03	0,333	05,0
06	01	1973	06,9	11,27	0,024	06,0
07	01	1973	00,0	00,00	0,000	00,0
08	01	1973	00,0	00,00	0,000	00,0
09	01	1973	47,4	13,46	0,723	04,6
10	01	1973	00,0	00,00	0,000	00,0
11	01	1973	00,0	00,00	0,000	00,0

Figura 12 – Dados da série sintética gerada armazenados no arquivo texto.

Além dos resultados apresentados na Figura 12, o CLIMABR disponibiliza informações gráficas para a avaliação do desempenho do modelo proposto por OLIVEIRA (2003), por meio da sua comparação com os dados climáticos originais.

Na Figura 13 estão apresentadas, em azul, as precipitações diárias estimadas para os 10 anos da série sintética produzida e, em vermelho, os dados da série histórica original utilizada pelo CLIMABR, o que permite verificar o seu desempenho em reproduzir os eventos e a sua distribuição temporal. Apesar de não existir uma correspondência cronológica entre as magnitudes dos eventos simulados e os observados, o CLIMABR reproduziu, durante os 10 anos de simulação, eventos máximos com magnitudes e freqüências

semelhantes às verificadas nos registros históricos. Analisando os eventos máximos de ambas as séries constatou-se que os três maiores eventos de precipitação de cada série ocorreram nos meses de janeiro e dezembro, sendo estes de 200,0, 136,4 e 125,0 mm na série observada e de 196,1, 138,8 e 124,4 mm na série sintética, o que mostra que os eventos extremos máximos foram reproduzidos, de forma representativa, para estas condições de simulação.

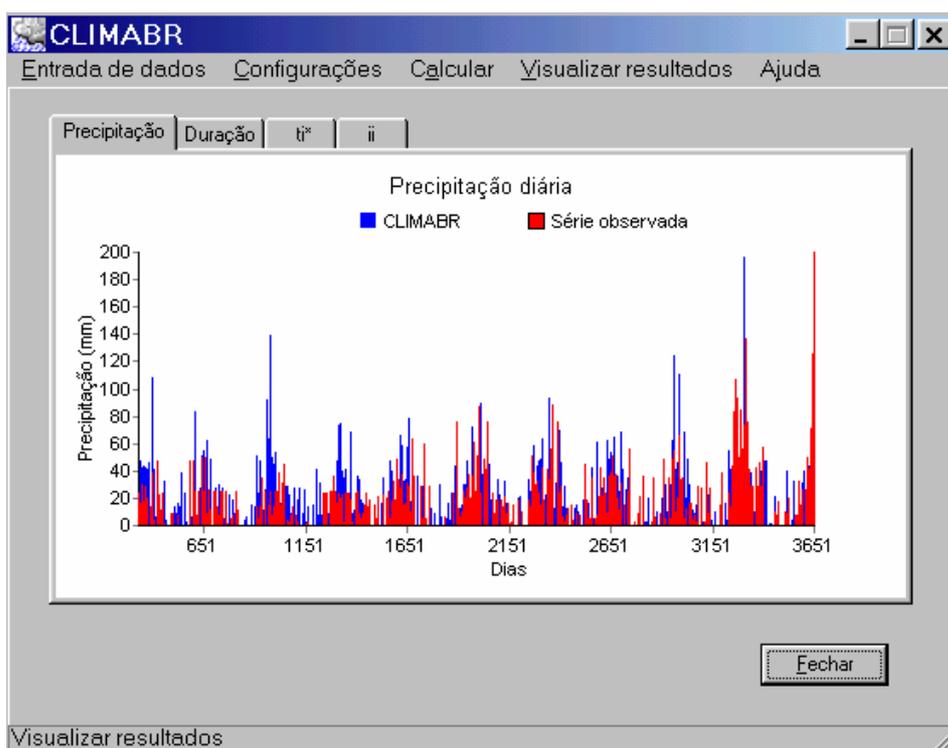


Figura 13 – Precipitações diárias observadas e simuladas pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

Nas Figuras 14 a 19 estão apresentadas comparações gráficas entre os valores médios mensais simulados e observados para a precipitação total diária, desvio padrão, coeficiente de assimetria, $P(C/C)_j$, $P(C/S)_j$ e para o número de dias chuvosos, respectivamente, por meio das quais pode ser verificado o ajuste do modelo na reprodução dos valores médios mensais observados.

Na Figura 14, evidencia-se que as maiores variações dos valores médios mensais das precipitações diárias, nesta simulação, ocorreram nos meses de junho (superestimativa de 1,0%) e agosto (superestimativa de 2,1%). Em cinco meses houve uma tendência de superestimativa dos valores

mensais, sendo que nos outros seis meses a variação foi praticamente nula. As menores variações ocorreram nos meses mais chuvosos dos anos, o que indica o melhor ajuste do CLIMABR em representar o período que mais contribui com o total anual da precipitação.

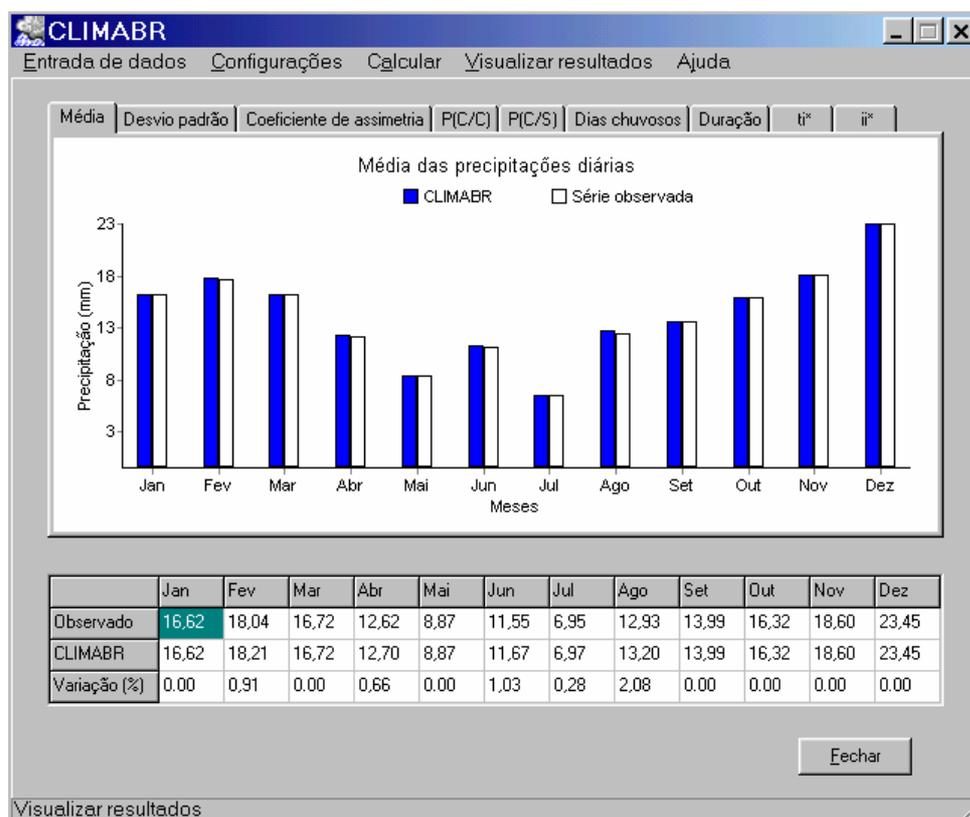


Figura 14 – Comparação entre os valores médios mensais das precipitações diárias observadas e simuladas pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

Na Figura 15, notou-se que as maiores variações dos valores médios mensais do desvio padrão também ocorreram nos meses de junho (subestimativa de 1,8%) e agosto (subestimativa de 2,7%), sendo que, em sete dos 12 meses, a variação apresentou-se nula. O bom ajuste apresentado pelos valores mensais de média e do desvio padrão demonstra o efeito das correções realizadas com uso das equações 17 e 18, respectivamente.

A maior variação média mensal foi verificada na estimativa do coeficiente de assimetria (Figura 16), para o qual percebe-se uma nítida tendência de subestimativa em 11 dos 12 valores médios mensais simulados. Evidenciou-se uma subestimativa máxima de 51,0% no mês de maio, sendo que no único mês com superestimativa (março), a variação foi de 55,0%, para

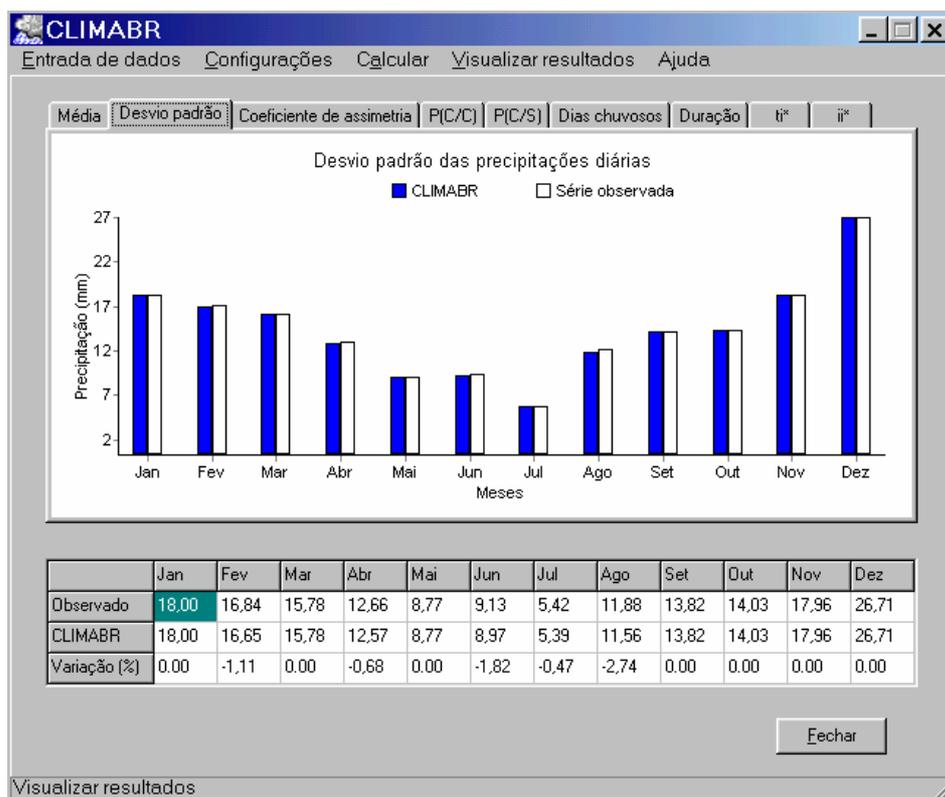


Figura 15 – Comparação entre os valores médios mensais do desvio padrão das precipitações diárias observadas e simuladas pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

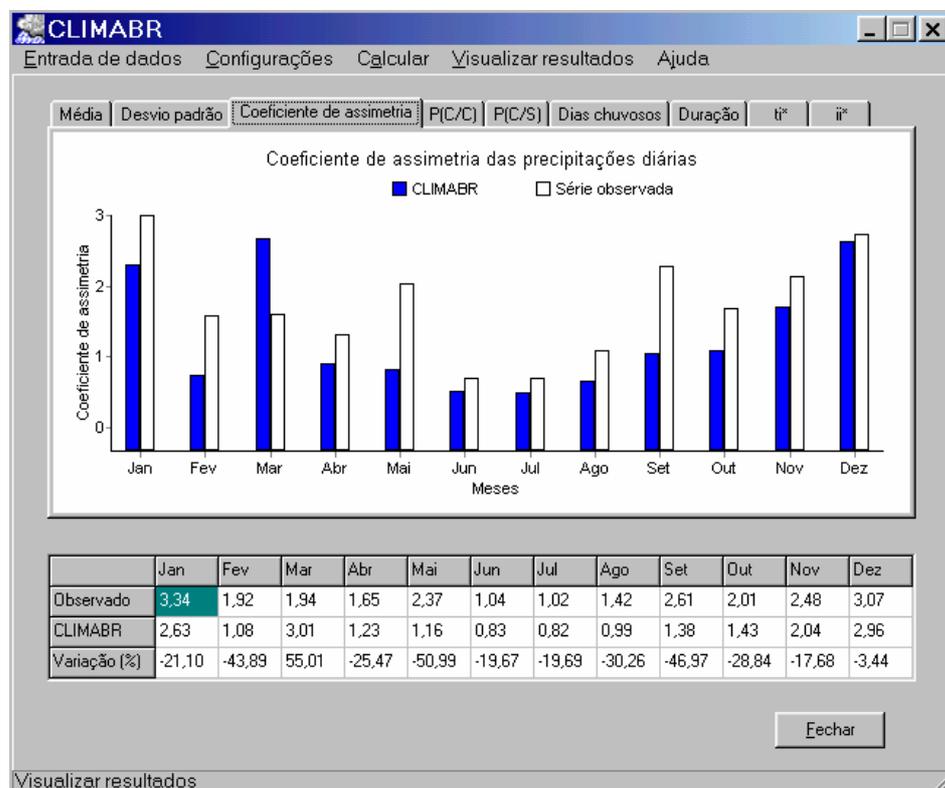


Figura 16 – Comparação entre os valores médios mensais do coeficiente de assimetria das precipitações diárias observadas e simuladas pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

as condições de simulação. Pelos testes realizados com o CLIMABR, foi observado que, ao gerar séries sintéticas com maior número de anos, o ajuste tende a melhorar. Como exemplo, pode-se observar que, para uma série com 50 anos de extensão, gerada utilizando os mesmos dados de entrada, a variação máxima obtida foi uma subestimativa de 30,2% em relação ao valor observado para o mês de agosto. O fato do CLIMABR ter apresentado bom desempenho em reproduzir os valores médios mensais da precipitação total diária e do desvio padrão não refletiu num ajuste equivalente para o coeficiente de assimetria das precipitações diárias, sendo este um dos pontos que merece ser aprimorado.

Pelas informações apresentadas na Figura 17, não se evidencia tendências de comportamento na estimativa dos valores mensais de $P(C/C)_j$, sendo que a maior variação dos valores médios mensais ocorreu no mês de maio (subestimativa de 24,0%) e a menor variação no mês de março (subestimativa de 2,1%).

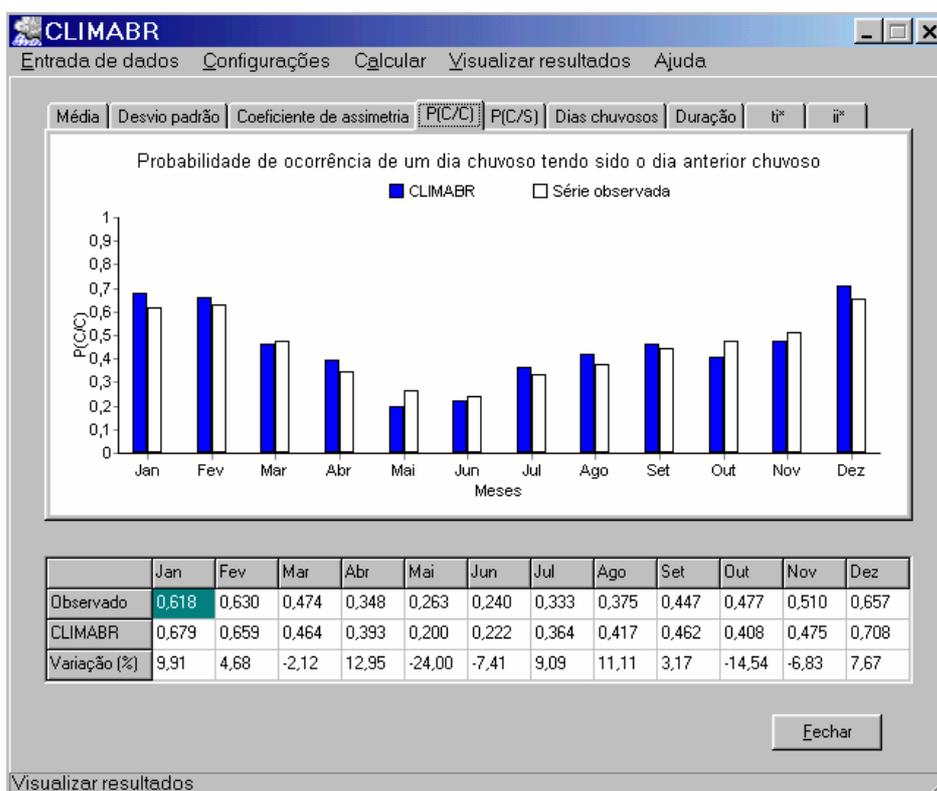


Figura 17 – Comparação entre os valores médios mensais de $P(C/C)_j$ observados e simulados pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

Na Figura 18 está ilustrado o desempenho dos valores mensais de $P(C/S)_j$, cujo valor máximo de variação foi obtido para o mês de agosto (superestimativa de 46,1%) e a mínima variação para o mês de setembro (0,0%), sendo que também não foi verificada tendência na estimativa dos valores mensais observados. A maior variação observada no mês de agosto e em outros meses mais secos, tanto para $P(C/C)_j$ quanto para $P(C/S)_j$, foi influenciada pela baixa probabilidade de ocorrência de chuva, considerando nesses casos que pequenas variações entre os valores observados e simulados resultam em grandes variações em termos proporcionais.

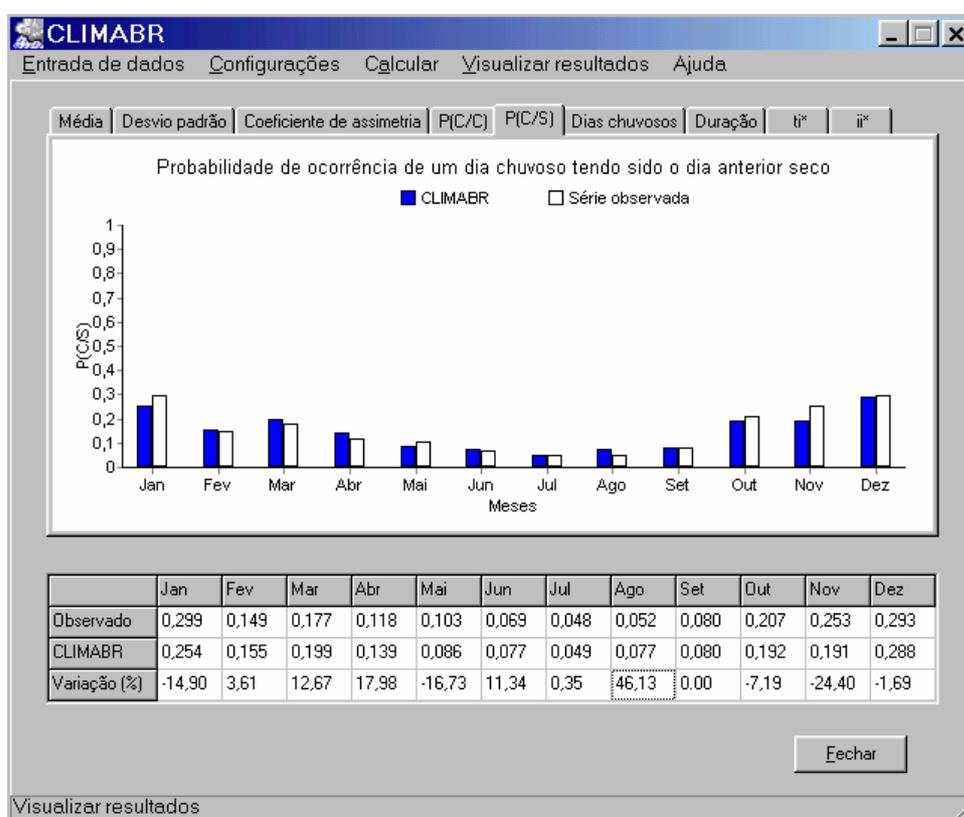


Figura 18 – Comparação entre os valores médios mensais de $P(C/S)_j$ observados e simulados pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

O número de dias chuvosos para cada mês (Figura 19) apresentou variação máxima no mês de agosto (superestimativa de 50,0%) e mínima em janeiro (superestimativa de 0,7%), sendo, no geral, verificado que o CLIMABR superestimou nove dos 12 valores médios mensais.

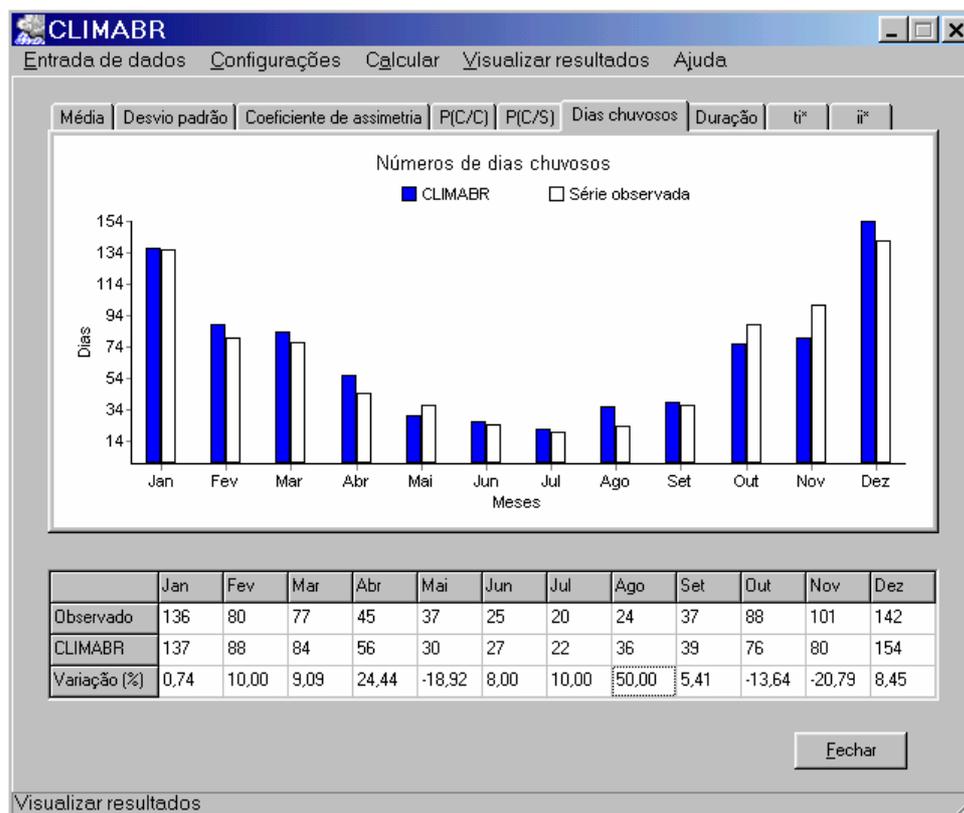


Figura 19 – Comparação entre os valores mensais do número de dias chuvosos observados e simulados pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

Visando, também, avaliar os resultados gerados pela sua comparação com a série pluviométrica histórica, o CLIMABR permite correlacionar os pares de dados mensais por meio de regressões lineares simples com passagem forçada pela origem do plano cartesiano, já que a condição ótima de simulação corresponde à disposição dos 12 pontos médios mensais sobre uma reta correspondente à função identidade, para a qual tem-se uma completa correspondência entre os pares de valores comparados.

Além da equação de regressão ajustada, estão apresentados na área do gráfico o coeficiente de determinação e o erro padrão da estimativa, conforme pode ser observado na Figura 20. Os valores do erro padrão da estimativa (0,09 mm), do coeficiente angular da reta (1,003) e do coeficiente de determinação (1,000) demonstram o bom desempenho do CLIMABR na representação dos valores médios mensais das precipitações diárias para essas condições de simulação. O mesmo tipo de análise é realizado para o desvio padrão, coeficiente de assimetria, $P(C/C)_j$ e $P(C/S)_j$ apresentados nas Figuras 21, 22, 23 e 24, respectivamente.

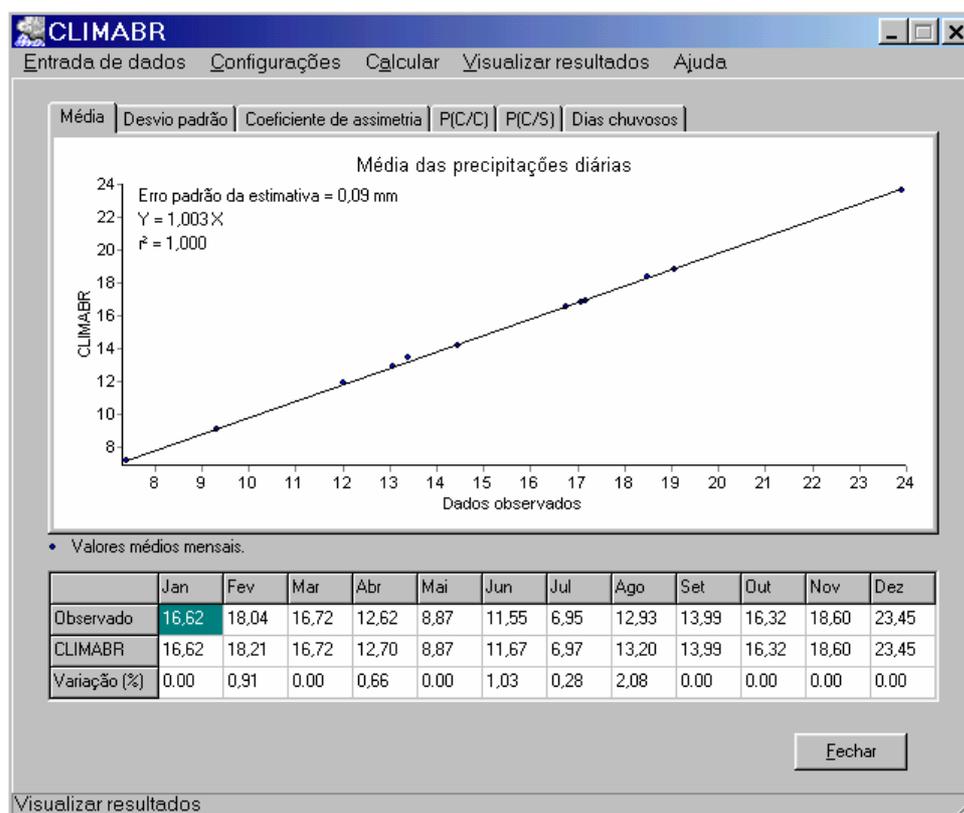


Figura 20 – Regressão linear ajustada para os valores mensais da média das precipitações diárias observadas e geradas pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

O comportamento do ajuste do desvio padrão (Figura 21) foi equivalente ao obtido para a média, entretanto os valores do erro padrão da estimativa (0,58), do coeficiente angular da reta (0,787) e do coeficiente de determinação (0,498), obtidos para os valores mensais do coeficiente de assimetria (Figura 22), confirmam a maior variabilidade entre os valores gerados e observados.

Para os valores mensais das probabilidades condicionais $P(C/C)_j$ e $P(C/S)_j$ (Figuras 23 e 24, respectivamente), os coeficientes angulares das retas (1,023 e 0,931), os coeficientes de determinação (0,928 e 0,907) e os valores do erro padrão da estimativa (0,04 e 0,02) também confirmam resultados satisfatórios para estas condições de simulação. É interessante ressaltar que à medida em que se aumenta a extensão da série sintética gerada, todos os elementos climáticos estimados tendem a apresentar melhor ajuste, devido à maior estabilização dos conjuntos de números aleatórios.

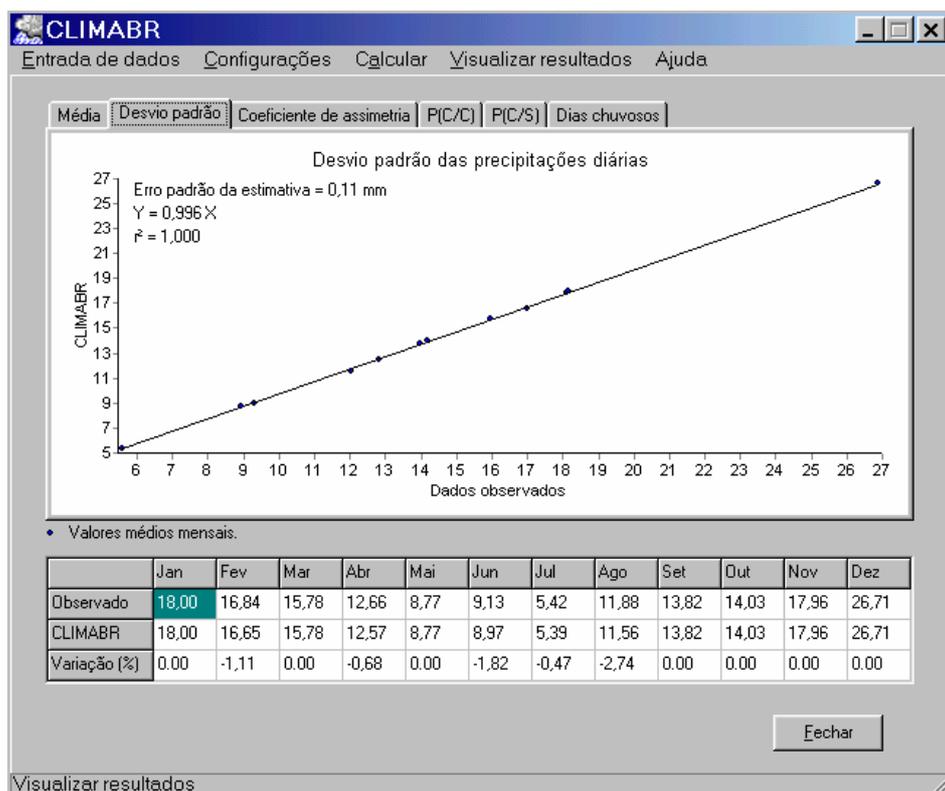


Figura 21 – Regressão linear para os valores mensais do desvio padrão das precipitações diárias observadas e simuladas pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

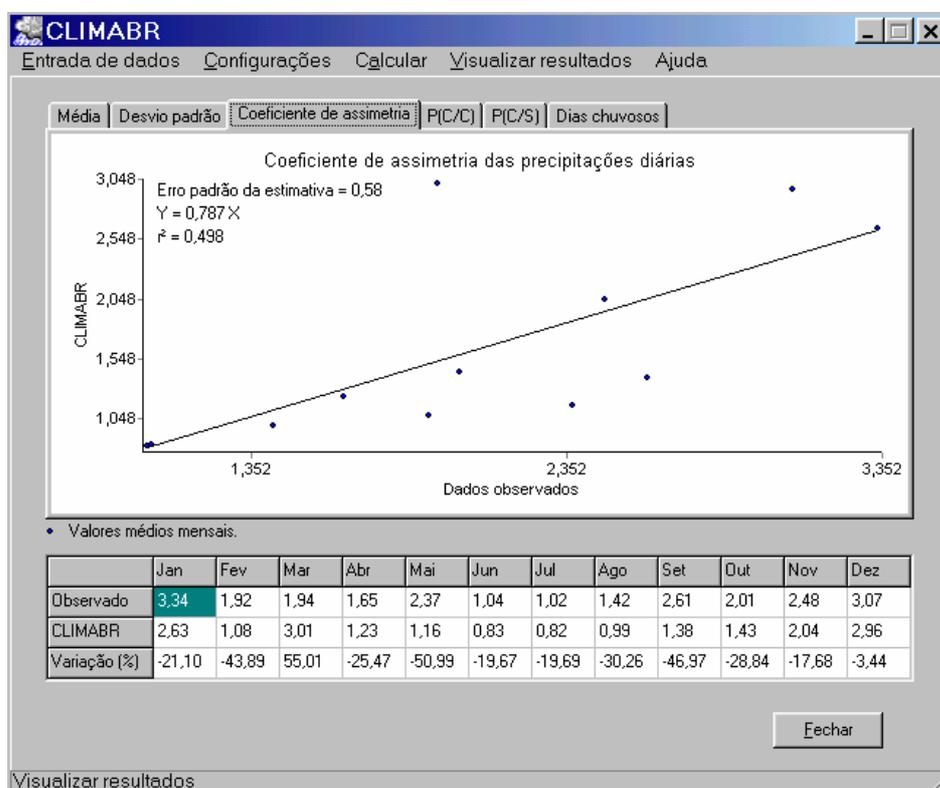


Figura 22 – Regressão linear para os valores mensais do coeficiente de assimetria das precipitações diárias observadas e simuladas pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

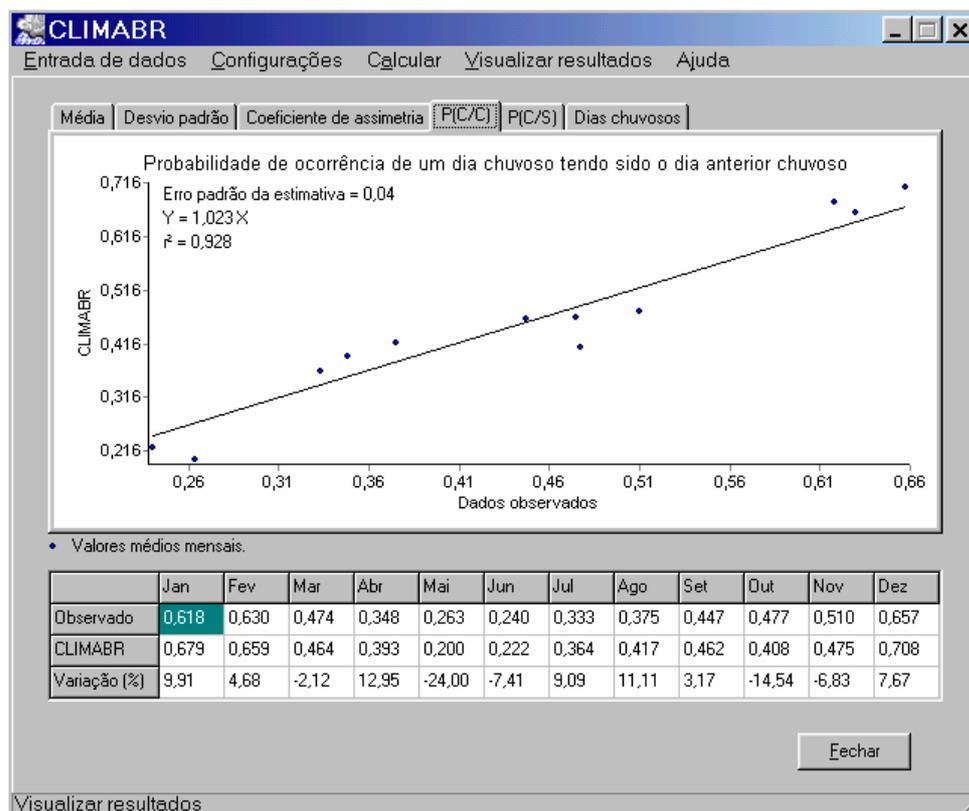


Figura 23 – Regressão linear para os valores mensais de $P(C/C)_j$ observados e simulados pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

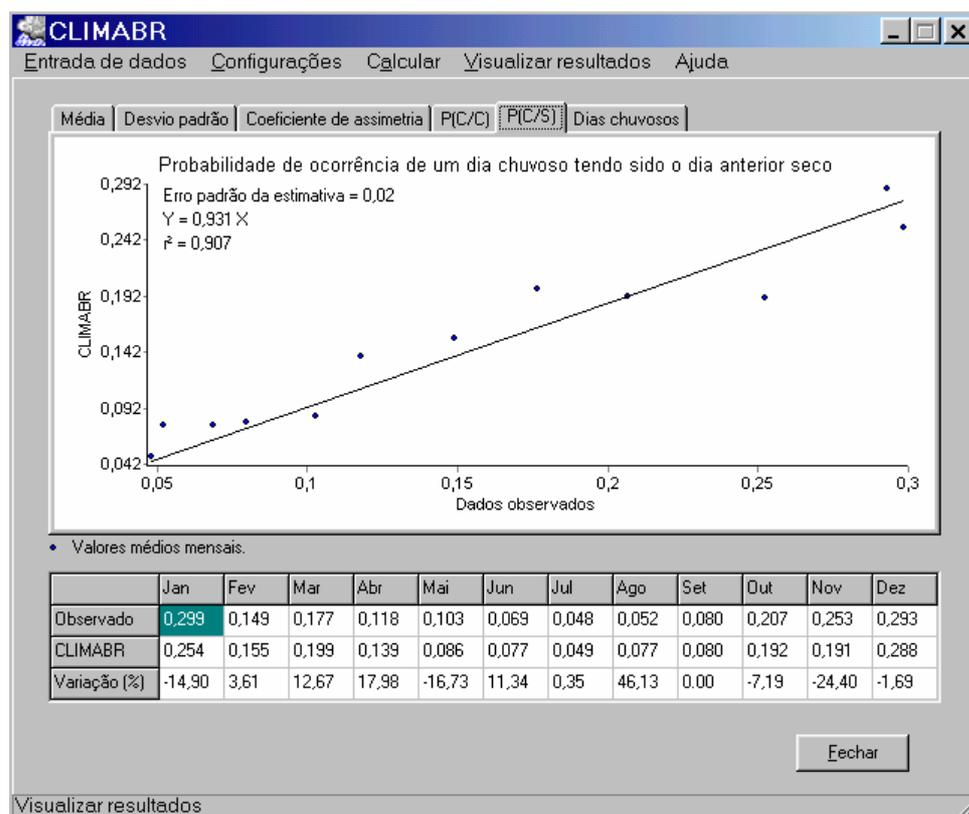


Figura 24 – Regressão linear para os valores mensais de $P(C/S)_j$ observados e simulados pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

Na Figura 25 estão apresentadas as durações correspondentes a cada uma das precipitações geradas pelo CLIMABR. Nesta simulação, ficou evidenciado um grande número de precipitações com duração de 24 h (4,83%), fato não correspondente ao observado na série histórica, na qual, dos 7824 dias chuvosos de 11 estações pluviográficas estudadas por OLIVEIRA (2003), foi observado que apenas 0,13% das precipitações apresentaram duração de 24 h. A evidência deste comportamento, somente possível a partir dos recursos disponibilizados pelo modelo computacional CLIMABR, permitiu caracterizar a necessidade de aprimoramento do modelo desenvolvido por OLIVEIRA (2003) para a estimativa da duração das precipitações. Apesar de existir esta tendenciosidade de geração de eventos com duração de 24 h, observou-se uma tendência de subestimativa da duração média mensal das precipitações (Figura 26), tendo sido constatada uma variação das médias da série sintética de 5,56 a 8,50 h, enquanto os valores mensais da série histórica ficaram situados entre 5,74 e 10,97 h.

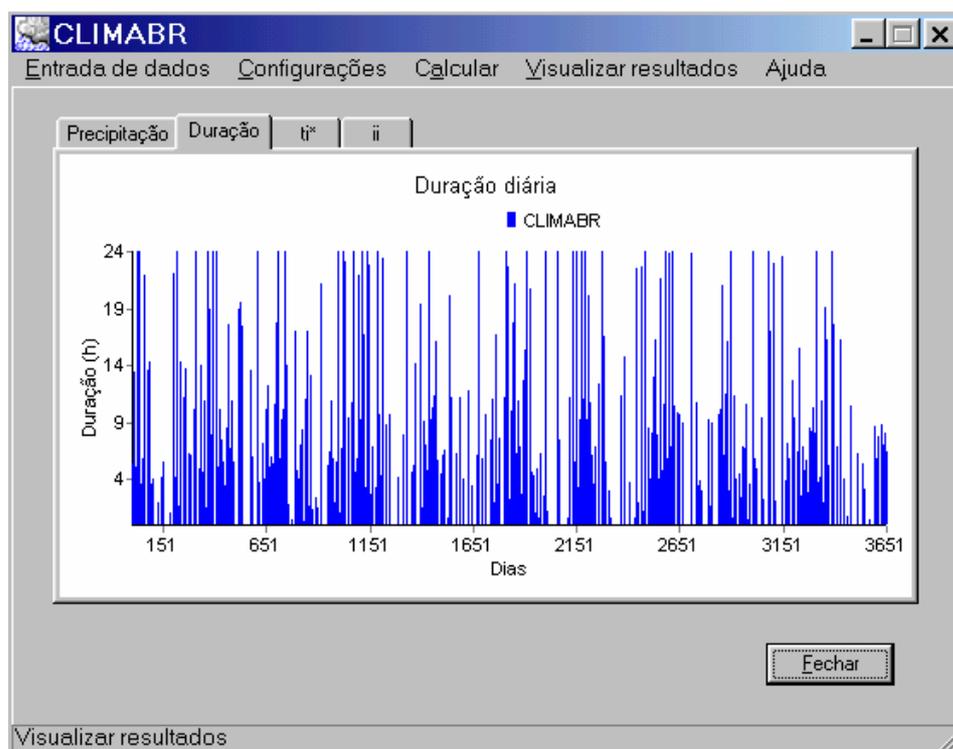


Figura 25 – Duração das precipitações diárias geradas pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

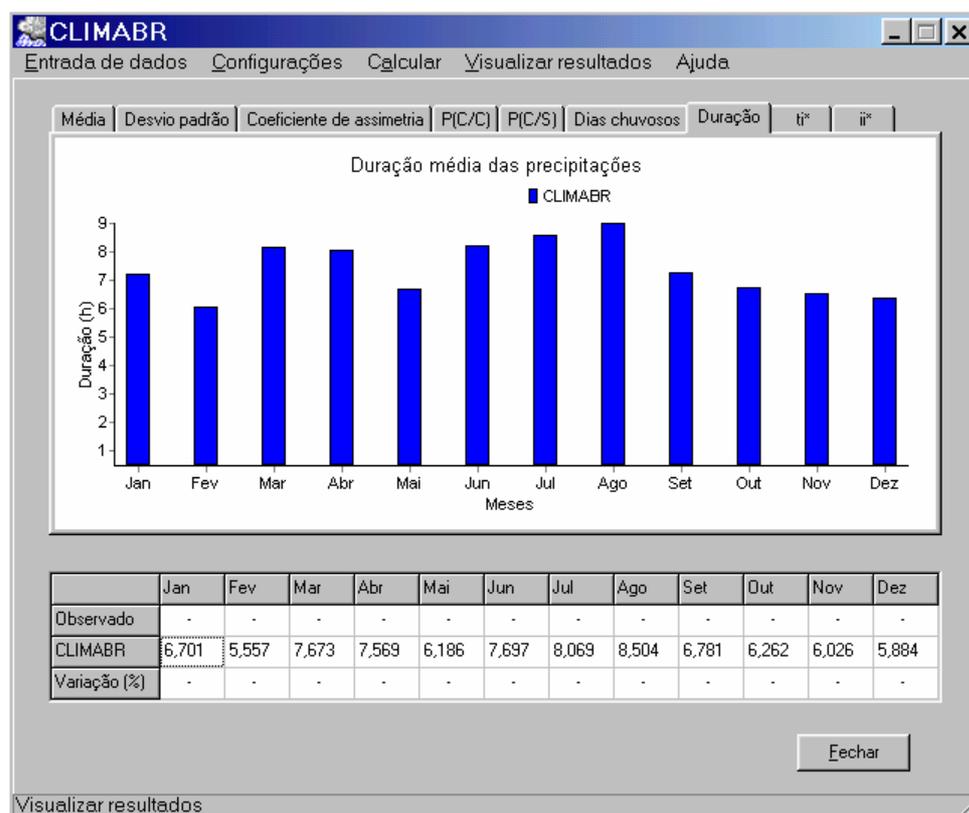


Figura 26 – Valores médios mensais da duração das precipitações diárias simuladas pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

As intensidades máximas instantâneas correspondentes a cada um dos eventos diários de precipitação podem ser observadas na Figura 27, na qual evidencia-se que a máxima intensidade instantânea observada para série gerada foi de $246,2 \text{ mm h}^{-1}$, enquanto que o máximo valor observado na série histórica foi de $186,4 \text{ mm h}^{-1}$.

Na Figura 28, pode-se evidenciar uma variação dos valores mensais médios da intensidade máxima instantânea padronizada, entre 4,67 e 6,08, enquanto os valores reais variam entre 4,63 e 6,00. O fato da estimativa da intensidade máxima instantânea (equação 21) estar diretamente correlacionada com a duração das precipitações influenciou, negativamente, os resultados, considerando que a estimativa da duração ainda necessita de mais estudos para obtenção de melhores resultados. Desta forma, uma avaliação mais consistente do desempenho do CLIMABR, ao gerar as intensidades máximas instantâneas, é recomendada após a resolução dos problemas relacionados à estimativa da duração das precipitações.

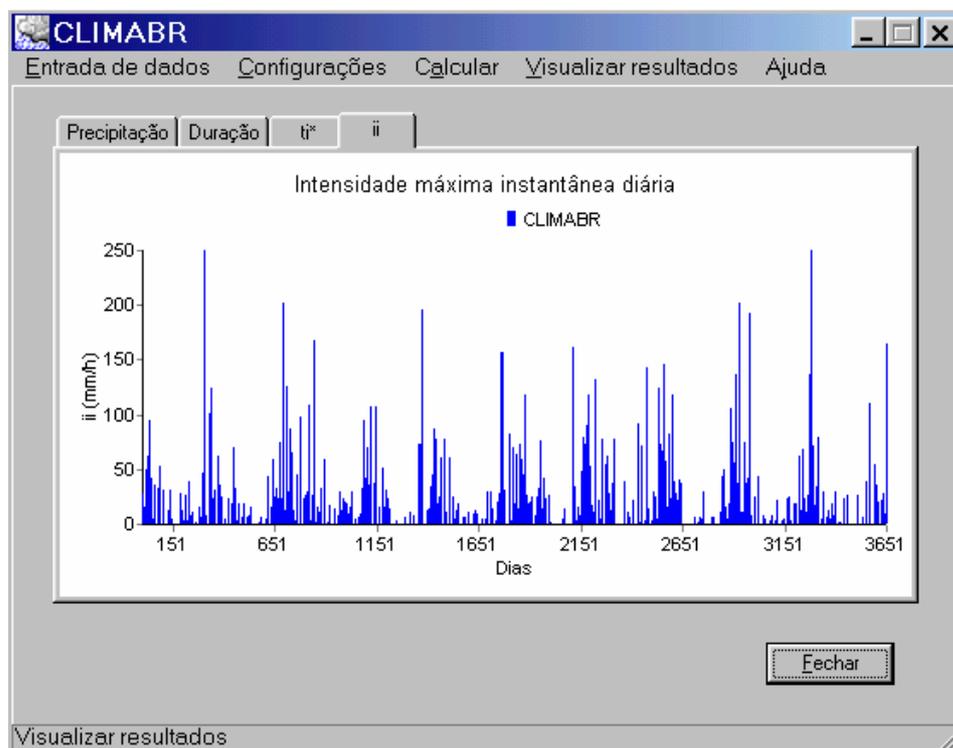


Figura 27 – Intensidade máxima instantânea das precipitações diárias simuladas pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

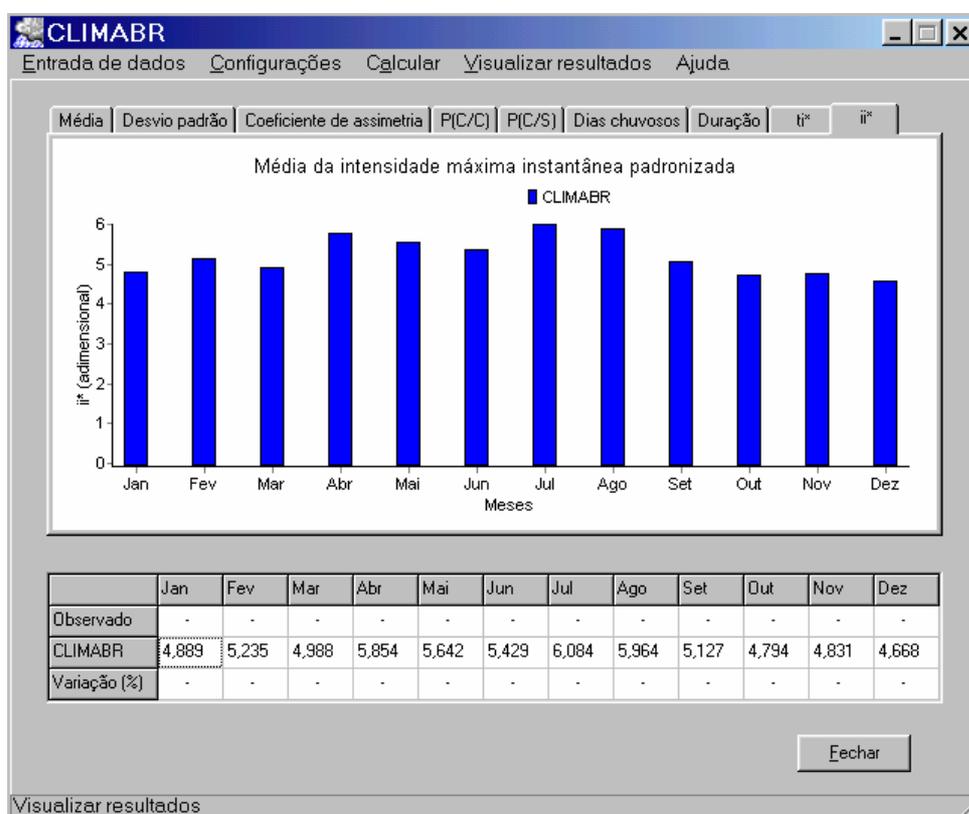


Figura 28 – Valores mensais médios da intensidade máxima instantânea padronizada das precipitações diárias simuladas para a estação Afonso Arinos.

De forma similar ao comportamento da intensidade máxima instantânea, a simulação do seu tempo padronizado de ocorrência também apresentou variabilidade acentuada (Figura 29). Os valores mensais médios também evidenciaram uma tendência de comportamento numa faixa de variação entre 0,234 e 0,411, para praticamente todos os meses (Figura 30). Esse comportamento não comprometeu o desempenho do modelo, já que os valores médios dos eventos observados em 11 estações pluviográficas também demonstram faixa de variação próxima (0,291 a 0,350), sendo o valor médio geral de 0,326 para os dados reais e 0,310 para a série sintética gerada pelo CLIMABR.

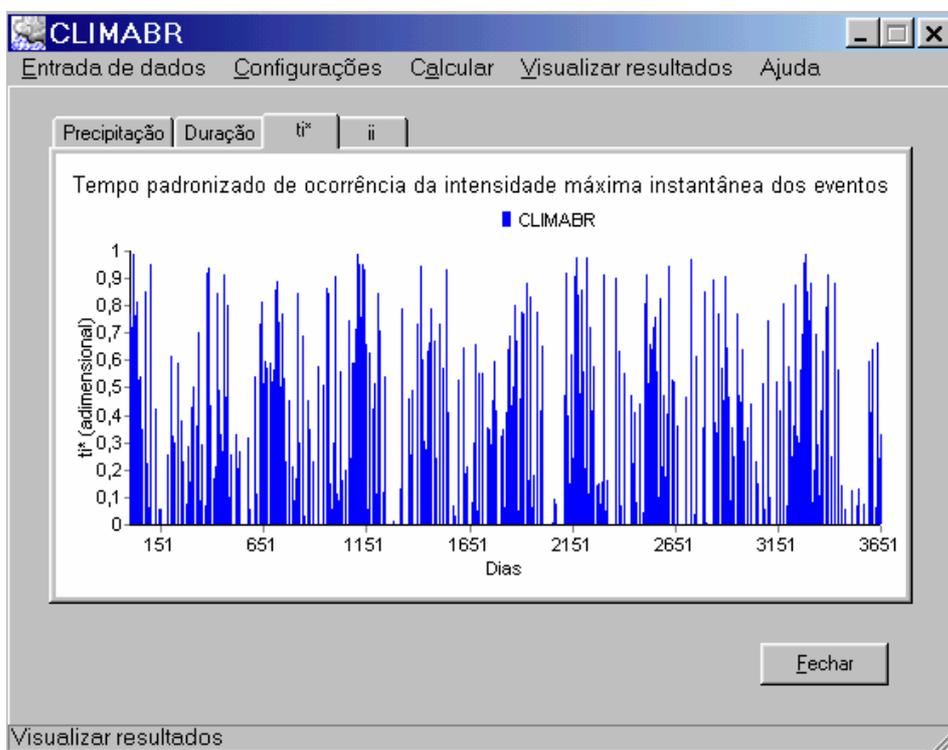


Figura 29 – Tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea da precipitação diária simulada pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

Por meio de um dos recursos de sua interface, o programa permite visualizar em um quadro os valores diários da precipitação total diária, da duração dos eventos, da intensidade máxima instantânea padronizada e do seu tempo padronizado de ocorrência, referenciados pelo dia, mês e ano de simulação (Figura 31), sendo estas as mesmas informações armazenadas no arquivo texto (Figura 12).

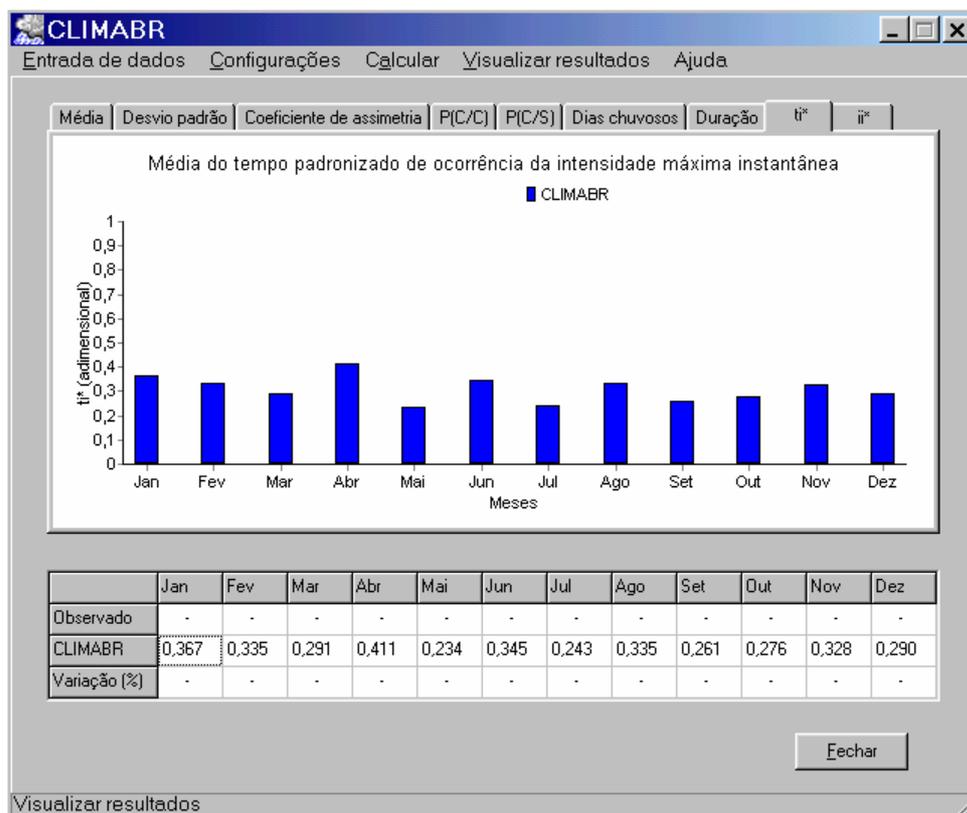


Figura 30 – Valores mensais médios do tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea das precipitações diárias simuladas pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.



Figura 31 – Tela demonstrativa da série sintética de precipitação gerada pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

Com um clique sobre a linha correspondente ao dia de interesse, é gerado um gráfico referente ao perfil de precipitação instantânea do evento ocorrido naquele dia (Figura 32). Para o evento selecionado como exemplo, evidencia-se que a intensidade máxima instantânea foi de $29,6 \text{ mm h}^{-1}$, sendo o tempo de ocorrência desta de 2,52 h, a partir do início do evento com duração de 5,81 h. Nesta tela, pode-se ainda observar os parâmetros das equações 22 e 23, a partir das quais são traçadas as duas equações exponenciais que descrevem o perfil da intensidade instantânea das precipitações.

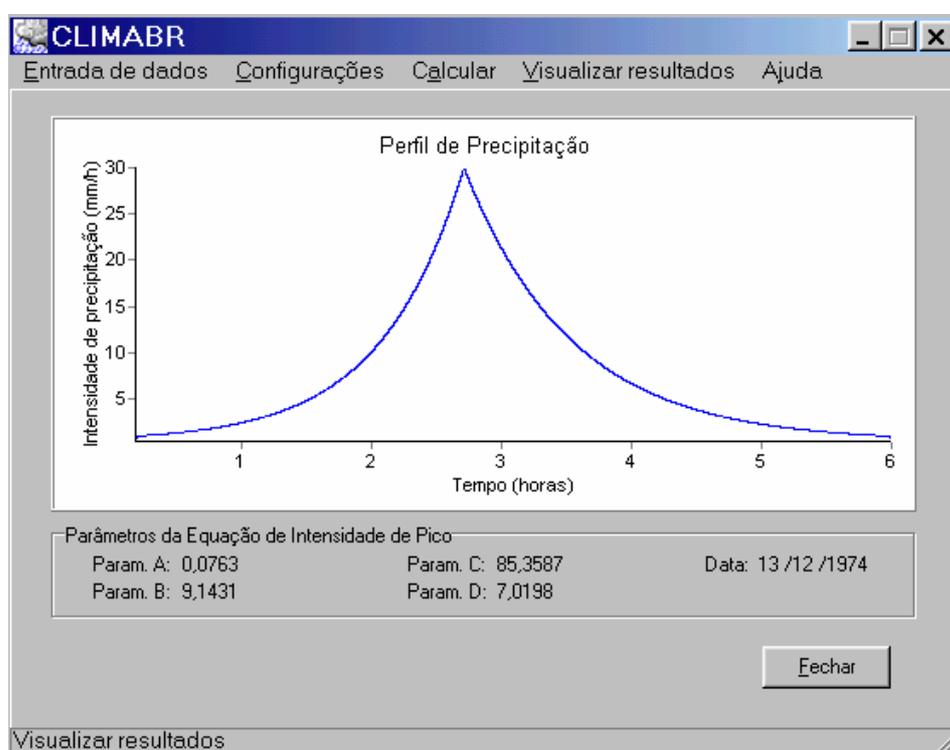


Figura 32 – Perfil instantâneo de um evento de precipitação diário gerado pelo CLIMABR para a estação Afonso Arinos.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver um modelo computacional capaz de aplicar a metodologia para geração de séries sintéticas de precipitação desenvolvida por OLIVEIRA (2003). O desenvolvimento do modelo foi viabilizado pela elaboração de um algoritmo computacional em linguagem de programação Borland Delphi 5.0.

O modelo computacional necessita, como dados de entrada, de um banco de dados no formato padronizado pela ANA, com registros pluviométricos diários provenientes da estação meteorológica de interesse, ou então um arquivo texto contendo os valores mensais da média, do desvio padrão e do coeficiente de assimetria da precipitação total diária e os valores mensais das probabilidades de ocorrência diária de chuva, condicionados à ocorrência ou não de chuva no dia anterior. A partir dessas informações, o programa é capaz de gerar uma série sintética de precipitações diárias contendo o total precipitado em milímetros, a duração do evento em horas, o tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea, a intensidade máxima instantânea padronizada e os parâmetros adimensionais (a, b, c, d) da função dupla exponencial que representam o perfil de precipitação de cada evento de chuva gerado.

Os resultados gerados são armazenados em arquivos no formato "Texto", que poderão ser acessados posteriormente por outros aplicativos e, ou, planilhas eletrônicas. Além dos arquivos, são apresentadas várias

informações na forma de gráficos e quadros, facilitando a avaliação do desempenho da metodologia de estimativa. As análises são feitas pela comparação da série sintética com os dados observados, sendo que os recursos gráficos disponibilizados no programa permitiram identificar tendências de comportamento nos resultados, que servirão de subsídios para uma avaliação mais detalhada do desempenho do modelo e para a identificação de procedimentos na metodologia que poderão ser otimizados.

Com base nos resultados obtidos no trabalho, pode-se concluir que:

- O CLIMABR permite, de forma fácil e rápida, a geração de séries sintéticas de precipitação contendo as seguintes informações: precipitação total diária, duração, intensidade máxima instantânea e o seu tempo padronizado de ocorrência, além do perfil instantâneo das precipitações.
- O CLIMABR disponibiliza dispositivos para a avaliação do desempenho do modelo proposto por OLIVEIRA (2003) e para a sua comparação com os dados climáticos originais.
- Os recursos computacionais utilizados pelo CLIMABR permitiram caracterizar que a maior necessidade de aprimoramento do modelo desenvolvido por OLIVEIRA (2003) diz respeito à estimativa da duração das precipitações.

6. RECOMENDAÇÕES

Mesmo com o cumprimento dos objetivos propostos no presente trabalho ficou evidenciado ainda a necessidade de desenvolvimento de outras atividades que possam vir a contribuir com a produção científica, até então obtida, para esta área de conhecimento. Por isso, sugere-se a continuidade deste trabalho a partir do desenvolvimento das seguintes recomendações:

- aperfeiçoar primeiramente a metodologia desenvolvida por OLIVEIRA (2003) para a geração da duração efetiva dos eventos diários de precipitação e, na seqüência, para a geração da intensidade máxima instantânea de precipitação, considerando que a estimativa da segunda variável climática citada depende da primeira;
- implementar a aplicação dos elementos climáticos gerados pelo CLIMABR nos modelos hidrológicos desenvolvidos pelo GPRH e outros;
- ampliar a base de dados pluviográficos utilizada neste trabalho para outras regiões do Brasil;
- incorporar ao modelo computacional CLIMABR a geração de outros elementos climáticos tais como a temperatura, a radiação solar, a velocidade do vento, dentre outros; e
- desenvolver uma metodologia para desagregar os eventos diários de precipitação em múltiplos eventos ao longo do dia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNOLD, J.G., WILLIAMS, J.R. Stochastic generation of internal storm structure at a point. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. v.32, n.1, p.161-167, 1989.
- ASSIS, F.N., ARRUDA, H. V., PEREIRA, A. R. *Aplicações estatísticas à climatologia*. Pelotas, Ed. Universitária / UFPel, 161p, 1996.
- AYOADE, J.O. *Introdução à climatologia para os trópicos*. 5.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. 332p.
- BAHIA, V.G., CURI, N., CARMO, D.N., et al. Fundamentos de erosão do solo (tipos, formas, mecanismos, fatores determinantes e controle). *Informe Agropecuário*, v.176, n.16, p.25-31, 1992.
- BELTRAME, L.F.S, LANNA, A.E.L., LOUZADA, J.A.S. *Chuvas intensas*. Porto Alegre, IPH, UFRGS, 1991. 69p.
- BROWN, L.C., FOSTER, G.R. Storm erosivity using idealized intensity distributions. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, Michigan, v. 30, n.2, p. 379-386, 1987.
- CASTELLVI, F., STOCKLE, C.O., IBAÑEZ, M. Comparing a locally calibrated versus a generalized temperature generation process. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v.44, n.5, p.1143-1148, 2001.

- CONNOLLY, R.D., SCHIRMER, J., DUNN, P.K. A daily rainfall disaggregation model. *Agricultural and Forest Meteorology*. n.92, p.105-117, 1998.
- DENARDIN, J.L., FREITAS, P.L. Características fundamentais da chuva no Brasil. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v.17, n.10, p.1409-1416, 1982.
- EDWARDS, W.M., OWENS, L.B. Large storm effects on total soil erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 46, n.1, p.75-78, 1991.
- FLANAGAN, D.C., FOSTER, G.R., MODENHAUER, W.C. Storm pattern effect on infiltration, runoff and erosion. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, Michigan, v.31, n.2, p.414-420, 1988.
- FLANAGAN, D.C., NEARING, M.A., eds 1995. *USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*. NSERL Report n.10. West Lafayette, Ind: USDA-ARS Nat. Erosion Research Lab.
- FENDRICH, R. *Chuvas intensas para obras de drenagem no Estado do Paraná*. Curitiba: Champangnat, 1998. 99p.
- FREITAS, A.J., SILVA, D.D., PRUSKI, F.F., PINTO, F.A. et al. *Equações de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Companhia de Saneamento de Minas Gerais; Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 65p.
- GPRH – Grupo de pesquisas em recursos hídricos. *Plúvio 1.3 – Chuvas intensas para o Brasil (software)*. Departamento de Engenharia Agrícola – UFV. 2000.
- HERNANI, L.C., FREITAS, P.L., PRUSKI, F.F., DE MARIA, I.C., CASTRO FILHO, C., LANDERS, J.N. A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C.V. FREITAS JUNIOR, E., PERES, J.R.R. *Uso agrícola dos solos brasileiros*. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2002. p.47-60.
- HENEKER, T. M., LAMBERT, M. F., KUCZERA, G. A point rainfall model for risk-based design. *Journal of hydrology*. v. 247, p. 54-71, 2001.
- HORNER, W. W.; JENS, S. W. Surface runoff determination from rainfall without using coefficients. *Transactions of the América Society of Civil Engineering*, v. 107, p. 1039-1117, 1941.

- JOHNSON, G.J., CLAYTON, L.H., STUART, P.H., BALLARD, E.B. Stochastic weather simulation: Overview and analysis of two commonly used models. *Journal Applied Meteorology*, v.35, p.1878-96, 1996.
- JOHNSON, G.J. *Weather generator technology*. 2003, Portland, United States Department of Agriculture – NRCS/ARS. Disponível em: < <http://www.wcc.nrcs.usda.gov/water/climate/gem/gem.html> > Acesso em: 02 fev. 2003.
- MEHL, H.U. Caracterização de padrões de chuvas em Santa Maria (RS). Santa Maria. *Revista brasileira de ciência do solo*. n.25, p. 475-483, 2000.
- MEYER, C.R. Cligen version 5.110. code font 10/26/2001.
- MEYER, C.R., RENSCHLER, C. VINING, R.C. Implementing quality control techniques for random number generators to improve stochastic weather generators: the CLIGEN experience. *Journal of Applied Meteorology*. mai., p.12-16, 2002.
- NICKS, A.D., LANE, L.J., GANDER, G.A. *Weather Generator: USDA-Water erosion prediction project (WEPP)*. West Lafayette, In: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, Cap.2, 1995. 22p.
- OLIVEIRA, L.F.C, *Modelo para transporte de solutos no solo e no escoamento superficial*. Viçosa, MG: UFV, 1999. 171p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- OLIVEIRA, V.P.S. *Modelo para geração de séries sintéticas de precipitação*. Viçosa, MG: UFV, 2003. 156p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2003.
- PICKERING, N.B., HANSEN, J.W., JONES, J.W., WELLS, C.M., CHAN, V.K., GODWIN, D.C. WeatherMan: A utility for managing and generating daily weather data. *Agronomy Journal*, v.86, p.332-7, 1994.
- PINTO, F.A., FERREIRA, P.A., PRUSKI, F.F., ALVES, A.R.,CECON, P.R. Equações de chuvas intensas para algumas localidades do Estado de Minas Gerais. *Engenharia Agrícola*, 16(1): 91-104, 1996.
- PORTUGAL, A.D. Simulação de sistemas agropecuários. *Pesquisa agropecuária brasileira*. v.18, n.4, p. 335-42, 1983.

- PRUSKI, F.F.; CALIJURI, M.L., BHERING, E.M., SILVA, J.M.A. Metodologia baseada no uso de sistemas de informações geográficas para a obtenção de equações de chuvas intensas em qualquer localidade do Estado do Paraná. *Revista Engenharia na Agricultura*, Viçosa, 5(3):254-265. 1997a.
- PRUSKI, F.F., FERREIRA, P.A., RAMOS, M.M., CECON, P.R. A model to design level terraces. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(1):8-12, 1997b.
- PRUSKI, F.F., NEARING, M.A. Runoff and soil-loss responses to changes in precipitation: A computer simulation study. *Journal of Soil and Water Conservation*, v.57, p.7-16, 2002.
- RICHARDSON, C.W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Research*, v.17, n.1, p.182-190, 1981.
- SCHEELE, D. I., ELLIOT, W. J., HALL, D. E. Enhancements to the CLIGEN weather Generator for mountainous or custom applications. *Soil Erosion Research for the 210 Century*. Proc. Int. Symp. American Society of Agricultural Engineers. Honolulu, HI, USA. 2001. p. 392-395.
- SEDIYAMA, G.C., CHANCELLOR, W.J., BURKHARDT, T.H., GOSS, J.R. Simulação de parâmetros climáticos para a época de crescimento das plantas. *Revista Ceres*. v.25, n.141, 1978.
- SENTELHAS, M.A., FARIA, R.T., CHAVES, M.O. Avaliação do desempenho dos geradores de dados climáticos do DSSAT v. 3.5 I – Comparação entre dados observados e gerados. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 11, Reunião Latino-Americana de Agrometeorologia, 2, 1999, Florianópolis. CD-ROM. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1999.
- SILVA, D.D.; PINTO, F.R.L.P.; PRUSKI, F.F.; PINTO, F.A. Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-freqüência da precipitação para os Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. *Revista Engenharia Agrícola*, SBEA. Jaboticabal, SP, 18(3):11-21, 1999a.
- SILVA, D.D.; VALVERDE, A.E.L.; PRUSKI, F.F.; GONÇALVES, R.A.B. Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-freqüência da precipitação para o Estado de São Paulo. *Revista Engenharia na Agricultura*, Viçosa, MG, v.7, n.2, p.70-87, 1999b.

- TUCCI, C. E. M. et al. *Hidrologia ciência e aplicação*. 2ª Ed. Porto Alegre: ABRH, 1997. 943p.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. 669p.
- VILLELA, S.M., MATTOS, A. *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1975. 245p.
- VIRGENS FILHO, J.S. *Modelo computacional para simulação de dados climáticos*. Botucatu, 1997. 86p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- WALLIS, T.W.R., GRIFFITHS, J.F. An assessment of the weather generator (WXGEN) used in the erosion/productivity impact calculator (EPIC). *Agricultural and Forest Meteorology*, v.73, p.115-33, 1995.
- WILKS, D.S. Simultaneous stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation at multiple sites in complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*. v.96, p.85-101, 1999a.
- WILKS, D.S. Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models. *Agricultural and Forest Meteorology*. v.93, p.153-169, 1999b.
- WISCHMEIER, W.H. Storms and soil conservation. *Journal of Soil and Water Conservation*, v.17, n.2, p. 55-59, 1962.
- YU, B. Improvement and evaluation of CLIGEN for storm generation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v.43, n.2. p.301-307, 2001.