

APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SIMULADOR ESTOCÁSTICO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS. O CASO DA PRECIPITAÇÃO

Herlander Mata Fernandes Lima, Izilda Pereira da Mata e Albertino Vicente Fernandes Lima

Resumen:

A carência de informação meteorológica é uma realidade comum a todas as regiões de Portugal. Muitos são os estudos que estão condicionados a esta lacuna o que conduz, mormente, à realização de estudos e projectos revestidos de incertezas e, talvez, à inibição de certas intervenções no âmbito da Hidrologia e Hidráulica.

Neste trabalho descrevem-se a metodologia e os dados necessários para o ajustamento e aplicação do gerador climático CLIGEN no Sul de Portugal (VALE FORMOSO).

Avalia-se a performance do CLIGEN na simulação da precipitação diária e mensal. A importância do conceito da normal climatológica é outro aspecto evidenciado no âmbito deste trabalho. Apresenta-se a análise de sensibilidade do modelo aos diferentes parâmetros de entrada – considerando três períodos distintos de registos de dados climáticos (10, 20 e 30 anos).

O CLIGEN gera parâmetros climáticos indispensáveis para a aplicação de vários modelos hidrossedimentológicos dentre os quais se destacam o WEPP (Water Erosion Prediction Project), EPIC (Erosion/ Productivity Impact Calculator), SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins), AGNPS (Agricultural Nonpoint Source Pollution Model) e CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System).

Este estudo permitiu concluir que o modelo reproduz de modo significativo o padrão da precipitação e também evidencia que a extensão da série de precipitação considerada exerce considerável influência nos resultados.

Palabras clave: Precipitação; Normal Climatológica; Validação, cligen

INTRODUÇÃO

A modelação dos processos hidrossedimentológicos (hidrológicos e erosivos) está, necessariamente, condicionada à existência de dados climáticos, sendo a precipitação a principal variável necessária para a modelação dos processos de erosão hídrica.

Na simulação contínua dos processos hidrológicos e erosivos para longos períodos de tempo, o modelador depara-se com imensas dificuldades visto não dispor, na maioria das vezes, de séries longas de registo de dados climáticos com a qualidade desejada. Por forma a ultrapassar esta dificuldade, comum aos cinco continentes do planeta, desenvolveram-se nas últimas décadas diversos modelos de geração de dados de clima como sejam a precipitação (quantidade, intensidade, duração), temperatura, radiação solar e vento (velocidade e direcção).

Para a consecução deste objectivo é, de todo, conveniente que se disponha de registos de dados climáticos de grande precisão (no mínimo, valores diários) correspondentes a um período recomendável de 30 anos (*normal climatológica*).

Existe na região de Alentejo, mais precisamente no Centro Experimental de Erosão de Vale Formoso (doravante designado por CEEFV), uma estação meteorológica com registo de precipitação com intervalo inferior a 15 minutos (*vide* Tomás & Coutinho, 1994). Esta é uma condição importante para o ajustamento e aplicação do gerador de clima.

Dos geradores de clima desenvolvidos, o CLIGEN (Nicks *et al.*, 1995) é dos mais recentes e evoluídos, produzindo dados climáticos que podem ser usados para diferentes fins e em diferentes modelos, hidrossedimentológicos (e.g., o WEPP, EPIC, SWRRB, AGNPS e CREAMS).

Engenheiro de Recursos Hídricos (UE); Pós-Graduado em Hidráulica e Recursos Hídricos (IST); Pós-Graduado em Gestão e Políticas Ambientais (UE) e Doutorando em Ciências de Engenharia (IST). Instituto Superior Técnico. CMRP. Av. Rovisco Pais, 1. 1049-001 Lisboa
TELEF.: +351 965858121, E-MAIL: helima@ist.utl.pt

Artículo recibido el 7de enero de 2004, recibido en forma revisada el 26 de marzo de 2004 y aceptado para su publicación el 14 de diciembre de 2004 . Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

A partir de registos de dados climáticos existentes aplicou-se o CLIGEN para gerar precipitação com base nos registos da estação climatológica de VALE FORMOSO.

2. METODOLOGIA

2.1. Aspectos Gerais

O CLIGEN é um modelo, baseado em princípios estocásticos, que gera valores diários de variáveis como a precipitação (quantidade, intensidade, tempo para atingir a intensidade máxima e duração), temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, velocidade e direcção do vento, e radiação solar - para uma dada estação - com base nos valores médios diários para cada mês do ano, tais como, a média, desvio padrão e o coeficiente de assimetria - referentes a um longo período de registo. Cada uma das variáveis supracitadas é estimada de modo independente das outras.

Os métodos de geração do clima usados no CLIGEN (parte integrante do modelo WEPP) estão baseados nos geradores usados nos modelos EPIC e SWRRB (Nicks *et al.*, 1995). Os métodos usados nos modelos precedentes foram modificados de modo a incluir os requisitos adicionais para a distribuição da intensidade de precipitação.

O CLIGEN é um gerador de clima de grande versatilidade visto que foi desenvolvido e testado para imensas regiões dos Estados Unidos de América (EUA), tendo produzido bons resultados. Os EUA, dada a sua grande extensão geográfica, apresentam diferentes tipos de climas (variando de climas húmidos a semiáridos ou mesmo áridos). Por esta razão, existem regiões de características climáticas muito semelhantes (e.g., Estado da Califórnia) àquelas que se verificam em Portugal. Esta foi uma das razões que motivaram a adopção, neste trabalho, da metodologia do CLIGEN.

Neste capítulo faz-se uma breve referência à metodologia ou os procedimentos envolvidos na construção dum gerador de clima com base no CLIGEN (Nicks *et al.*, 1995).

2.2. Breve Descrição do Modelo CLIGEN

Ocorrência e quantidade diária da precipitação

Geralmente a precipitação diária é gerada de forma independente e a geração das outras variáveis é condicionada aos acontecimentos da precipitação - i.e., se um dia é chuvoso ou não (Nicks & Harp, 1980; Richardson, 1981; Rajagopalan *et al.*, 1997).

No CLIGEN cada variável é assumida como sendo uma variável independente normal (Gaussiana) para cada mês, com os parâmetros dependentes do estágio de transição da precipitação (e.g., dia chuvoso a chuvoso, dia chuvoso a seco). Esta aproximação não considera a dependência entre as variáveis. O método usado para a geração do número de acontecimentos de precipitação e a sua distribuição é a cadeia de Markov de dois estados (Bailey, 1964). Este método envolve o cálculo de duas probabilidades condicionais: probabilidade de ocorrência de um dia chuvoso a seguir a um dia seco e a probabilidade de ocorrência de um dia seco a seguir a um dia chuvoso.

A ocorrência de precipitação é definida com base numa distribuição combinada de probabilidade de ocorrência de um dia chuvoso, dado que choveu ou não no dia anterior, i.e., o CLIGEN usa a probabilidade de chover dado que não choveu no dia anterior, $P(C/S)$, e probabilidade de chover dado que choveu no dia anterior, $P(C/C)$. As probabilidades referidas são calculadas para cada mês do ano. A quantidade de precipitação diária é estimada com base na equação de Pearson tipo-III (Viessman *et al.*, 1977) e o coeficiente de assimetria mensal, sendo expressa da seguinte forma:

$$z_i = \frac{6}{g_j} \left[\left(\frac{g_j \left(\frac{X_i - u_j}{s_j} \right)}{2} + 1 \right)^{1/3} - 1 \right] + \frac{g_j}{6} \quad (1)$$

onde: z_i é a variável reduzida para o dia i [-], X_i a precipitação diária [mm], u_j a precipitação média no mês j [mm], s_j o desvio padrão da precipitação diária [mm] e g_j o coeficiente de assimetria da precipitação diária [-].

A informação sobre o modo como o CLIGEN determina a ocorrência de neve consta de Savabi *et al.* (1995). Não é referida neste trabalho visto não corresponder à situação da região estudada.

Duração da precipitação

O método usado para estimar a duração de acontecimentos de precipitação gerados é igual àquele que é usado no modelo SWRRB (Arnold *et al.*, 1990). Assume-se que existe uma relação exponencial entre a duração do acontecimento de precipitação e a duração média mensal dos acontecimentos, sendo expressa por,

$$\hat{D} = \frac{9.210}{-2 \ln(1-r1)} \quad (2)$$

onde: \hat{D} é a duração do acontecimento de precipitação (valor simulado) [h] e $r1$ é um número aleatório que varia entre [0, 1). É, fisicamente, interpretado como a razão entre a máxima precipitação de 30 minutos e a precipitação total referente ao somatório de acontecimentos singulares ocorridos num dia. É, pois, um parâmetro adimensional extraído de uma distribuição gamma com base no usualmente conhecido como “*rejection method*” para geração de números aleatórios. Para melhor compreensão deste processo recomenda-se a consulta de obras como Atkinson & Pearce (1976); Dagpunar (1988) e Law & Kelton (1991).

O cálculo da duração da precipitação está relacionado com a intensidade da mesma. Assume-se que a intensidade de precipitação cresce exponencialmente até ao *time to peak* (i.e., o tempo que vai desde o início da precipitação até ao ponto onde ela atinge a intensidade máxima), decrescendo exponencialmente a partir deste ponto.

Intensidade máxima da precipitação

A intensidade máxima de precipitação é estimada pelo método proposto por Arnold & Williams (1989), expressa por

$$r_p = -2 P \ln(1-r1) \quad (3)$$

onde: r_p - intensidade máxima da precipitação [mm h^{-1}] e P - quantidade total da precipitação correspondente ao acontecimento chuvoso [mm].

O tempo desde o início da precipitação até a máxima intensidade (*peak intensity*) é estimado através do cálculo da distribuição anual acumulada de tempo necessário para atingir a máxima intensidade (*time to peak*) a partir de registo de dados de 15 minutos da estação do CEEFV. Mais informações sobre a metodologia de cálculo da distribuição acumulada de t_p pode ser consultada em Nicks *et al.* (1995).

O tempo necessário para atingir o máximo de cada acontecimento de precipitação é calculado a partir do início do primeiro intervalo de precipitação ao ponto médio de intervalo de 15 minutos que contém a máxima intensidade. O tempo necessário para atingir a máxima intensidade é atribuído a um dos doze intervalos de classes da duração do acontecimento chuvoso no intervalo 0.0 a 1.0,

dado por

$$k = \frac{D_p}{0.08333D_e} \quad (4)$$

onde: k é o intervalo de classe, D_p o tempo necessário para atingir a máxima intensidade [min], e D_e a duração efectiva da precipitação [min].

Este trabalho não pretende ser exaustivo na descrição do modelo CLIGEN. Portanto, detalhes sobre o modo como são simuladas as variáveis como a temperatura do ar, radiação solar, direcção e velocidade do vento podem ser consultados em Nicks & Harp (1980) e Nicks *et al.* (1995).

2.2. Procedimento de modelação

Procedeu-se, em primeiro lugar, à análise e tratamento estatístico de dados climáticos da estação do CEEFV de modo a definir os *inputs* do modelo CLIGEN.

A avaliação estatística dos resultados baseou-se na análise da diferença entre o registo da precipitação observada P_{obs} e simulada P_{sim} (vulgarmente designada por erro relativo percentual):

$$E_r = \left| \frac{P_{sim} - P_{obs}}{P_{obs}} \right| * 100 \quad (5)$$

tendo o cálculo da eficiência (EF) baseado no critério de Nash & Sutcliffe, 1970:

$$EF = 1 - \frac{\sum_t (P_{obs,t} - P_{sim,t})^2}{\sum_t (P_{obs,t} - \bar{P}_{obs})^2} \quad (6)$$

onde t é intervalo de cálculo considerado (eg., t = dia, mês, ..., ano).

3. DADOS USADOS

3.1. Aspectos gerais

A região de VALE FORMOSO, a que se refere este trabalho, trata-se numa região de clima mediterrâneo caracterizado por inverno moderadamente chuvoso e verão quente e seco. Ribeiro (1986) define o clima mediterrâneo como “clima extra-tropical caracterizado por uma diminuição e mínimo anual da precipitação no verão e em que pelo menos dois dos meses após o solstício do verão são meses secos. A precipitação média anual não é muito elevada (varia entre 275 e 900 mm)

caindo pelo menos dois terços no inverno. O verão é quente (a temperatura média varia entre 20 e 25 °C) e o inverno é fresco (< 15 °C), sendo as geadas raras”.

Os dados meteorológicos necessários à aplicação do CLIGEN na região de VALE FORMOSO correspondem a séries de registos da estação do CEEVF cujas coordenadas são as seguintes (INMG, 1990): latitude (N) de 37° 45'; longitude (W) de 7° 33' e altitude de 190 m. A estação do CEEVF possui registos de precipitação referentes a um período de 30 anos (1963/92), publicados por Tomás & Coutinho (1994) com a precisão necessária para a determinação de um dos parâmetros importantes do CLIGEN, que é o tempo para atingir a intensidade máxima (*time to peak*), t_p .

Os dados necessários para a geração dos parâmetros do CLIGEN são os que se apresentam a seguir: i) registos de precipitação diária e com o intervalo máximo de 15 minutos; ii) registos diários da temperatura máxima e mínima do ar; iii) estimacão diária da temperatura do ponto de orvalho; iv) radiação solar diária; e, v) velocidade e direcção do vento.

A figura 1 ilustra a localizacão geográfica da estação do Centro Experimental de Erosão de Vale Formoso (CEEVF) em Portugal.

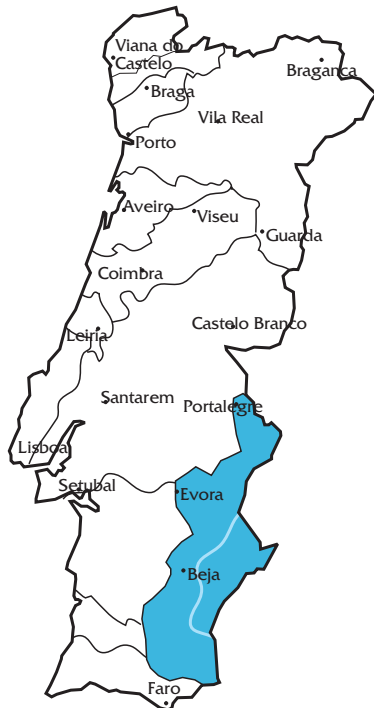


Figura 1-Mapa ilustrativo da localizacão do CEEVF em Portugal (Fonte: INAG)

3.2. Normais climatológicas

O erro na estimacão dos parâmetros ou variáveis de clima (precipitacão, temperatura, radiação solar, entre outras) decresce à medida que se incrementa o período ou intervalo de tempo correspondente ao registo de dados disponíveis. A título de exemplo, “em Lisboa - Geofísico, o erro padrão quando se estima a quantidade de precipitacão anual média, com base nos dados de apenas 1 ano é de 25 %, com 30 anos o erro é de cerca de 5 %; quando se usa um conjunto de 100 anos esse erro baixa para 2,5 %” (IM, 2002).

Como se sabe, a Organizacão Meteorológica Mundial (WMO) aprovou uma norma que recomenda a adopção de conjuntos de 30 anos consecutivos começando por primeiro ano de cada década (e.g., 1931-1960; 1941-1970, etc.) com o intento de garantir a congruência (i.e, a compatibilidade e comparabilidade) de dados climáticos. Sendo os apuramentos estatísticos referentes a estes períodos geralmente designados por *normais climatológicas* (WMO, 1989) e os valores respectivos por *valores normais*.

Pese embora a preconizacão, pela WMO, de um conjunto de 30 anos de registos consecutivos, convém realçar que “a preparacão de sumários de dados climáticos para períodos recentes e relativamente curtos, talvez de 10 anos, deve ser encorajada” (WMO, 1995). Porém, sempre que a realidade o permitir, deve ter-se em atencão o facto de que “o tradicional intervalo de 30 anos determinado pela WMO para definir o clima a partir de valores médios é ainda um conceito útil” (Peixoto & Abraham, 1991).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Consideracões introdutórias

Neste parágrafo, apresentam-se os resultados do tratamento estatístico de conjuntos de dados disponíveis (30 anos de dados) e os da simulacão da precipitacão.

É feita uma análise comparativa entre os resultados medidos e simulados para três conjuntos de anos de registo de precipitacão considerados (10, 20, e 30 anos) com a finalidade de avaliar a sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada.

Os resultados são apresentados preferencialmente sob a forma de quadros e gráficos com vista a permitir uma compreensão bem mais fácil do que os textos descritivos.

4.2. Parâmetros resultantes do tratamento estatístico

Neste parágrafo apresentam-se os parâmetros de entrada do CLIGEN (*vide* figura 2 e quadros 1 a 3), calculados com base nos registos de dados observados e no parágrafo seguinte apresentam-se os resultados observados *versus* simulados.

Na figura 2, PMA é a precipitação média mensal para um dado período (10, 20, ou 30 anos) e é expressa por:

$$PMA = \frac{\sum_{i=1}^N MEP}{N} \quad (7)$$

onde: MEP é a precipitação média mensal, e N é o número de meses do ano (N = 12). É possível constatar na figura 2 que não há variação muito

significativa no valor dos parâmetros apurados para os diferentes períodos ou cenários considerados.

Os 12 valores apresentados no quadro 3 representam a distribuição acumulada dos valores de t_p calculados com base no registo da precipitação com intervalo de 15 minutos. Os 12 valores, dispostos em colunas, representam a fracção de valores de t_p calculados entre os intervalos descritos no quadro 3. Para calcular os valores de t_p a partir dos registos de precipitação, deve remover-se previamente todos os períodos internos de precipitação nula (o modo como é calculada a distribuição de t_p está amplamente explicado em Nicks *et al.*, 1995). O intervalo de classe correspondente a um determinado valor de t_p é dado pela equação (4). Não houve necessidade de distinguir os valores de t_p obtidos para os períodos (ou cenários) considerados visto não haver uma variação sensível entre os mesmos.

Quadro 1 - Probabilidades de ocorrência da precipitação

| Período | Probabilidade | Out | Nov | Dez | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Anual |
|---------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 10 anos | P(C) | 0.22 | 0.23 | 0.23 | 0.29 | 0.29 | 0.23 | 0.18 | 0.18 | 0.11 | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.17 |
| | P(C/C) | 0.54 | 0.41 | 0.53 | 0.52 | 0.56 | 0.39 | 0.52 | 0.48 | 0.32 | 0.00 | 0.10 | 0.29 | 0.39 |
| | P(C/S) | 0.13 | 0.18 | 0.14 | 0.19 | 0.17 | 0.18 | 0.11 | 0.11 | 0.08 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.11 |
| 20 anos | P(C) | 0.21 | 0.18 | 0.25 | 0.24 | 0.26 | 0.21 | 0.21 | 0.14 | 0.09 | 0.01 | 0.03 | 0.06 | 0.16 |
| | P(C/C) | 0.48 | 0.45 | 0.51 | 0.48 | 0.52 | 0.44 | 0.45 | 0.47 | 0.26 | 0.00 | 0.05 | 0.23 | 0.36 |
| | P(C/S) | 0.11 | 0.12 | 0.16 | 0.16 | 0.17 | 0.15 | 0.14 | 0.09 | 0.08 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.11 |
| 30 anos | P(C) | 0.19 | 0.20 | 0.25 | 0.23 | 0.25 | 0.20 | 0.22 | 0.15 | 0.09 | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.16 |
| | P(C/C) | 0.49 | 0.51 | 0.53 | 0.46 | 0.48 | 0.42 | 0.47 | 0.45 | 0.33 | 0.09 | 0.11 | 0.22 | 0.38 |
| | P(C/S) | 0.12 | 0.12 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.13 | 0.14 | 0.09 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.10 |

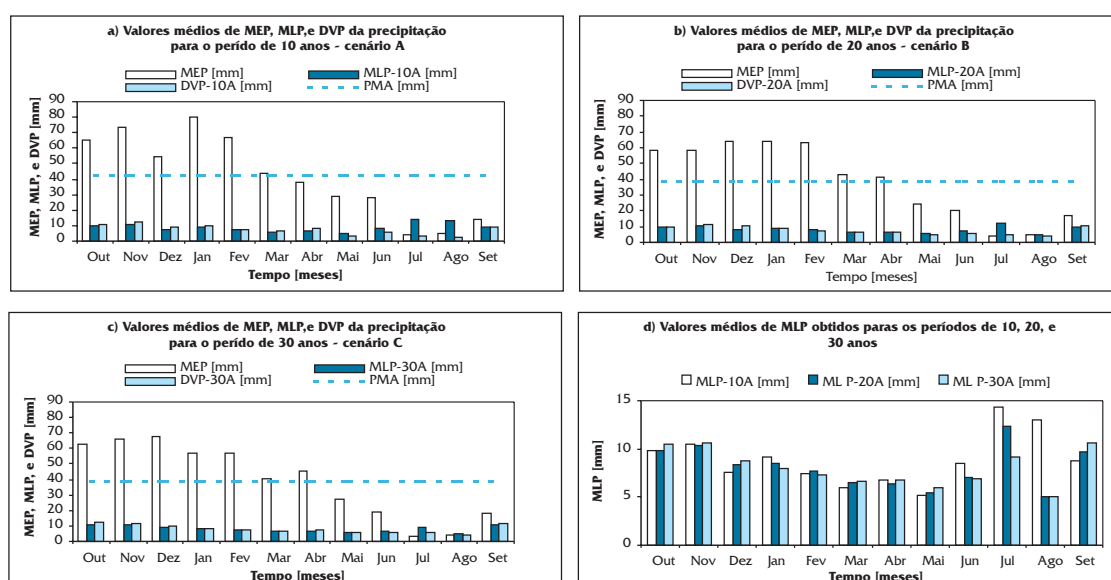


Figura 2 - Parâmetros de precipitação apurados para os três cenários

Legenda: MEP é valor médio da precipitação para um dado mês; MLP é o valor médio da precipitação por dia de chuva para um dado mês (é a razão entre o MEP e o número de dias de chuva); o DVP e g são respectivamente o desvio padrão e o coeficiente de assimetria da precipitação diária.

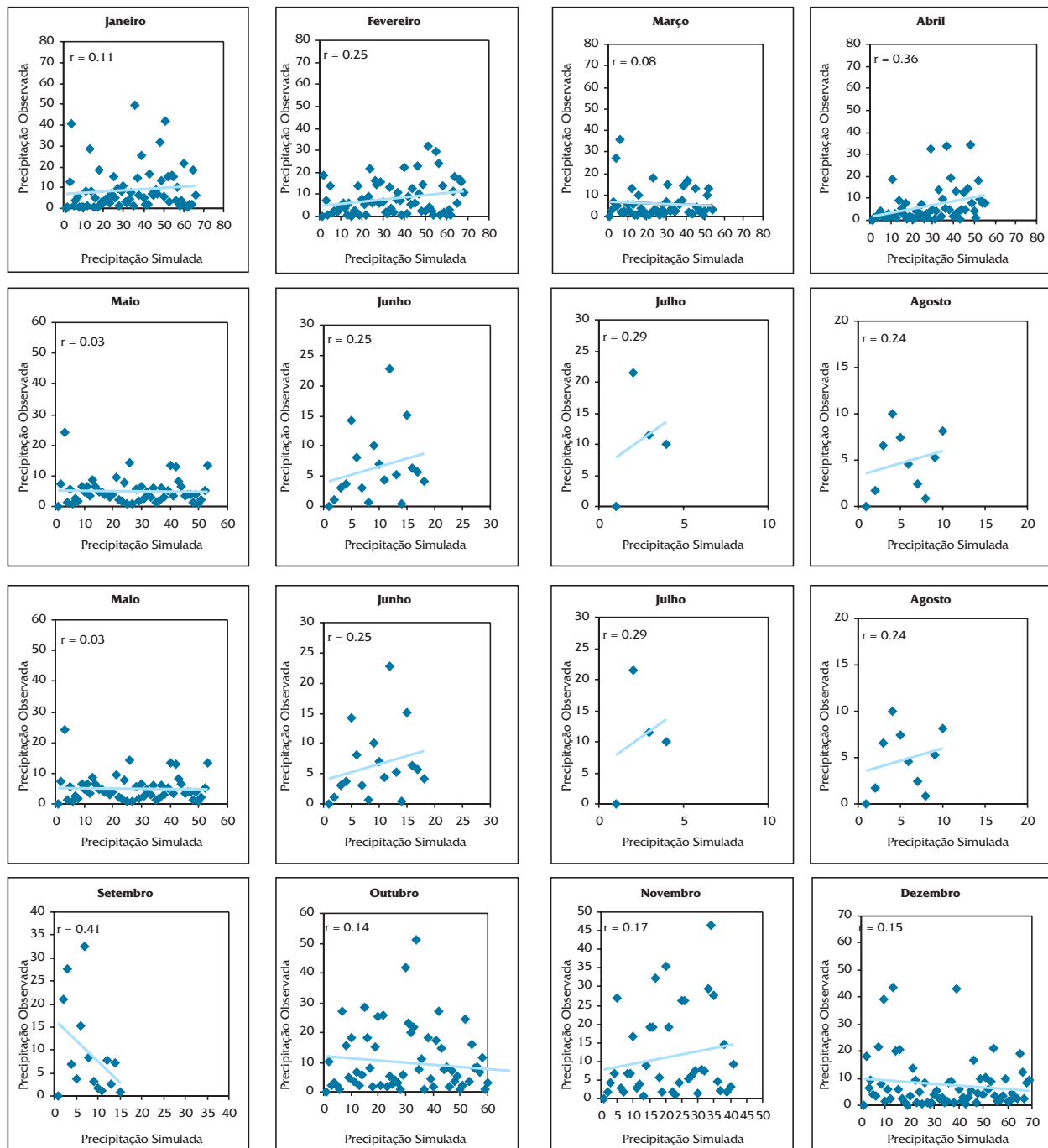
Quadro 2 - Máxima precipitação de 30 minutos [mm]

| | Out | Nov | Dez | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set |
|----------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|------|-----|------|
| P_{30} | 18.2 | 6.6 | 4.9 | 5.4 | 11.5 | 7.6 | 9.5 | 7.1 | 14.5 | 15.5 | 4.7 | 29.6 |

Quadro 3 - Tempo para atingir a intensidade máxima (t_p), normalizado [-]

| Intervalo de classe | [0.0 - 0.08333] | [0.08333 - 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] | [0.9167 - 1.0] |
|---------------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------|----------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|----------------|
| t_p | 0.751 | 0.858 | 0.885 | 0.893 | 0.900 | 0.905 | 0.912 | 0.923 | 0.933 | 0.943 | 0.962 | 1.000 |

Figura 3 – Correlações obtidas para a precipitação diária observada versus simulada pelo CLIGEN.



4.3. Validação e análise de sensibilidade do modelo

Apresenta-se, de seguida, os resultados da análise comparativa entre os valores observados e simulados da precipitação diária, para cada mês do ano, referente a um período de 30 anos (*vide* figura 3).

Os resultados demonstram que a distribuição da precipitação diária para um dado mês exibe fraca correlação (correlação não significativa) quando se comparam os valores diários observados com os simulados. Esta situação é compreensível dado que o CLIGEN simula os parâmetros de precipitação de modo independente relativamente à outros parâmetros climáticos (e.g., temperatura, radiação solar).

No entanto, conserva-se o padrão da precipitação diária como ilustra o quadro 4 que resume os estatísticos da precipitação diária observada e simulada correspondente ao período de 30 anos.

Os resultados são mais consistentes quando analisados numa base mensal, sazonal e anual (*vide* figura 4 e quadros 5 e 6). Esta é uma condição suficiente para a utilização do CLIGEN como o suporte para o fornecimento de *inputs* de precipitação aos modelos hidrossedimentológicos ou de erosão hídrica.

A figura 4 e o quadro 4 apresentam uma breve análise de valores médios mensais cuja importância se justifica pelo facto da erosão ser frequentemente expressa como acontecimento médio (e.g., erosão média anual).

Não será demais repetir que os três cenários (A, B, e C) considerados no âmbito deste estudo visam exortar para a necessidade de se proceder a uma determinação tão rigorosa quanto possível dos parâmetros de entrada do modelo, testando-se simultaneamente a sensibilidade do modelo aos tais parâmetros (*vide* figura 2). O quadro 5 resume os valores de precipitação observados e simulados bem como os respectivos erros relativos percentuais (equação 5).

A discrepância entre os resultados obtidos com base no *cenário* A relativamente aos outros dois (*cenários* B e C) evidenciam a importância do recurso a normal climatológica recomendada pela Organização Meteorológica Mundial. No presente caso, a consideração de dados sumários, para períodos curtos, não conduziu a resultados congruentes com a realidade observada.

Os *cenários* B e C conduziram a resultados de precipitação anual satisfatórios com erro relativo inferior a 5 %. Porém, a precipitação mensal envolve erros com alguma flutuação na amplitude (nos meses habitualmente secos, Junho a Agosto), assumindo por vezes importância significativa (em termos relativos), facto que também foi constatado por Johnson *et al.* (1996). Não obstante este facto, pode considerar-se os resultados, dum modo geral, satisfatórios visto serem válidos em ordem de grandeza. Importa ainda ressaltar que estas flutuações mensais do erro relativo verificados nos meses designados por secos (Junho a Setembro) não influenciam negativamente os resultados dos

Quadro 4 – Sumário dos estatísticos básicos para a precipitação diária observada e simulada, referente ao período de 30 anos

| | Outubro | | Novembro | | Dezembro | | Janeiro | | Fevereiro | | Março | | Abril | | Maio | | Junho | | Julho | | Agosto | | Setembro | |
|-------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | observada | simulada | observada | simulada | observada | simulada | observada | simulada | observada | simulada | observada | simulada | observada | simulada | observada | simulada | observada | simulada | observada | simulada | observada | simulada | observada | simulada |
| Precipitação [mm] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Máxima | 100.9 | 69.7 | 43.5 | 38.7 | 65.8 | 55.1 | 49.5 | 50.6 | 37.0 | 26.0 | 35.6 | 29.6 | 63.7 | 26.1 | 24.2 | 36.7 | 29.2 | 13.1 | 21.6 | 15.7 | 16.4 | 16.6 | 49.6 | 65.9 |
| Mínima | 0.5 | 0.9 | 0.6 | 0.7 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.3 | 0.6 | 0.3 | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.9 | 0.4 | 0.3 | 0.5 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.9 | 0.5 | 0.5 | 0.6 |
| Média | 10.5 | 8.7 | 10.7 | 8.8 | 8.7 | 8.9 | 5.2 | 7.6 | 7.2 | 8.5 | 6.6 | 8.8 | 6.7 | 6.2 | 5.9 | 6.7 | 6.9 | 4.0 | 9.2 | 12.9 | 5.0 | 5.5 | 10.6 | 17.7 |
| DVP | 12.1 | 10.6 | 11.4 | 11.7 | 10.2 | 10.5 | 8.5 | 8.9 | 7.1 | 6.5 | 6.2 | 8.2 | 7.6 | 6.0 | 5.6 | 6.9 | 6.1 | 3.9 | 6.3 | 2.8 | 3.9 | 5.4 | 11.5 | 18.7 |
| g [-] | 3.30 | 2.82 | 1.73 | 0.61 | 2.59 | 2.66 | 2.08 | 2.40 | 1.43 | 0.89 | 1.73 | 0.83 | 3.27 | 1.82 | 1.72 | 2.10 | 1.30 | 0.88 | 0.42 | 0.16 | 1.44 | 1.15 | 1.65 | 1.86 |

Legenda: o DVP e o g significam o desvio padrão e o coeficiente de assimetria da precipitação diária, respectivamente.

modelos hidrossedimentológicos visto corresponderem a valores de precipitação extremamente baixos (basta uma diferença de 2 mm para que o erro relativo seja da ordem dos 50%, ver quadro 5), pelo que os resultados do CLIGEN denotam um rigor adequado para serem usados nos modelos de erosão hídrica.

Apesar de não haver diferença muito significativa entre os parâmetros de precipitação (vide figura 2 e quadro 1) apurados para os diferentes cenários, o modelo evidenciou uma grande sensibilidade face à ligeira alteração de tais parâmetros {MLP, DVP, g, P(C/C) e P(C/S)}.

Pelo exposto, a existência de séries longas (pelo menos 30 anos) de dados climáticos, conforme recomenda a WMO (1989), é factor determinante da eficiência do modelo CLIGEN (vide figura 4 e quadro 5) – a dispersão que se mantém na regressão diminui com o crescimento do período do registo tendo-se obtido uma eficiência (equação 6) percentual de 64.18, 95.59 e 96.13 para séries de registo de 10, 20 e 30 anos, respectivamente.

Por conseguinte, a determinação tão rigorosa quanto possível dos parâmetros referentes à precipitação é uma condição *sine qua non* para a robustez dos resultados.

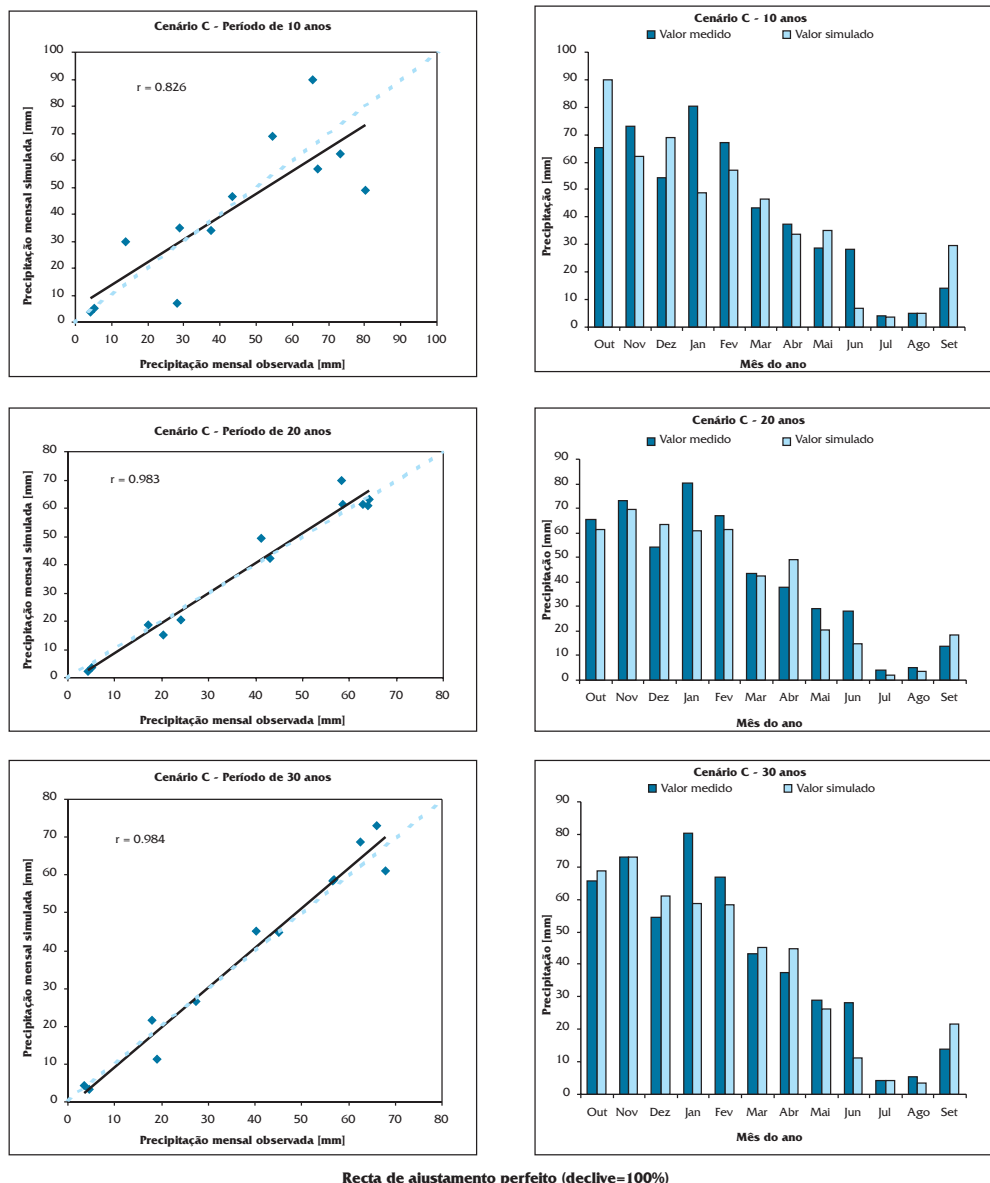


Figura 4 - Resultados do CLIGEN vs valores observados. Os gráficos revelam que a eficiência do modelo é tanto maior quanto maior for o período de dados analisados (10, 20, e 30 anos)

APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SIMULADOR ESTOCÁSTICO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS. O CASO DA PRECIPITAÇÃO

Quadro 5 - Resultados da precipitação média para cada mês.

| | Cenário A | | | Cenário B | | | Cenário C | | | |
|-------|--------------------|------------------|---------------------------|--------------------|------------------|-----------|--------------------|------------------|-----------|-----------|
| | Observada [mm] | Simulada [mm] | Erro relativo (ER) [%] | Observada [mm] | Simulada [mm] | ER [%] | Observada [mm] | Simulada [mm] | ER [%] | ER [%] |
| | Período de 10 anos | | | Período de 10 anos | | | Período de 10 anos | | | |
| Jan | 80.23 | 78.74 | 1.9 | 80.23 | 68.33 | 14.8 | 80.23 | 49.02 | 38.9 | 64.18 |
| Fev | 66.96 | 53.34 | 20.3 | 66.96 | 63.50 | 5.2 | 66.96 | 56.90 | 15.0 | |
| Mar | 43.37 | 51.05 | 17.7 | 43.37 | 47.50 | 9.5 | 43.37 | 46.74 | 7.8 | |
| Abr | 37.64 | 34.04 | 9.6 | 37.64 | 25.65 | 31.8 | 37.64 | 33.78 | 10.2 | |
| Mai | 28.97 | 38.61 | 33.3 | 28.97 | 32.77 | 13.1 | 28.97 | 35.05 | 21.0 | |
| Jun | 28.11 | 18.54 | 34.0 | 28.11 | 22.35 | 20.5 | 28.11 | 6.86 | 75.6 | |
| Jul | 4.30 | 3.05 | 29.1 | 4.3 | 3.30 | 23.2 | 4.3 | 3.81 | 11.4 | |
| Ago | 5.22 | 0.00 | - | 5.22 | 4.06 | 22.1 | 5.22 | 5.08 | 2.7 | |
| Set | 13.99 | 0.51 | 96.4 | 13.99 | 25.65 | 83.4 | 13.99 | 29.72 | 112.4 | |
| Out | 65.52 | 2.54 | 96.1 | 65.52 | 71.88 | 9.7 | 65.52 | 89.92 | 37.2 | |
| Nov | 73.15 | 16.00 | 78.1 | 73.15 | 56.64 | 22.6 | 73.15 | 62.23 | 14.9 | |
| Dez | 54.43 | 1.78 | 96.7 | 54.43 | 78.23 | 43.7 | 54.43 | 68.83 | 26.5 | |
| Anual | 501.89 | 298.20 | 40.6 | 501.89 | 499.87 | 0.4 | 501.89 | 487.93 | 2.8 | |
| | Período de 20 anos | | | Período de 20 anos | | | Período de 20 anos | | | |
| Jan | 64.06 | 80.52 | 25.7 | 64.06 | 67.31 | 5.1 | 64.06 | 60.96 | 4.8 | 95.59 |
| Fev | 62.84 | 71.63 | 14.0 | 62.84 | 66.29 | 5.5 | 62.84 | 61.21 | 2.6 | |
| Mar | 43.16 | 47.50 | 10.1 | 43.16 | 43.69 | 1.2 | 43.16 | 42.42 | 1.7 | |
| Abr | 41.17 | 45.21 | 9.8 | 41.17 | 41.66 | 1.2 | 41.17 | 49.28 | 19.7 | |
| Mai | 24.13 | 23.37 | 3.2 | 24.13 | 20.83 | 13.7 | 24.13 | 20.57 | 14.7 | |
| Jun | 20.44 | 25.91 | 26.8 | 20.44 | 13.46 | 34.1 | 20.44 | 14.99 | 26.7 | |
| Jul | 4.33 | 3.30 | 23.7 | 4.33 | 3.30 | 23.7 | 4.33 | 2.29 | 47.2 | |
| Ago | 5.08 | 0.00 | - | 5.08 | 3.56 | 30.0 | 5.08 | 3.56 | 30.0 | |
| Set | 17.05 | 0.51 | 97.0 | 17.05 | 15.75 | 7.6 | 17.05 | 18.54 | 8.8 | |
| Out | 58.59 | 1.78 | 97.0 | 58.59 | 65.79 | 12.3 | 58.59 | 61.47 | 4.9 | |
| Nov | 58.35 | 17.02 | 70.8 | 58.35 | 67.31 | 15.4 | 58.35 | 69.60 | 19.3 | |
| Dez | 64.18 | 1.78 | 97.2 | 64.18 | 72.64 | 13.2 | 64.18 | 63.25 | 1.5 | |
| Anual | 463.38 | 318.52 | 31.3 | 463.38 | 481.58 | 3.9 | 463.38 | 468.12 | 1.0 | |
| | Período de 30 anos | | | Período de 30 anos | | | Período de 30 anos | | | |
| Jan | 57.01 | 93.98 | 64.8 | 57.01 | 67.31 | 18.1 | 57.01 | 58.67 | 2.9 | 96.13 |
| Fev | 56.77 | 61.98 | 9.2 | 56.77 | 65.53 | 15.4 | 56.77 | 58.42 | 2.9 | |
| Mar | 40.39 | 47.24 | 17.0 | 40.39 | 42.93 | 6.3 | 40.39 | 45.21 | 11.9 | |
| Abr | 45.21 | 35.56 | 21.3 | 45.21 | 37.34 | 17.4 | 45.21 | 44.70 | 1.1 | |
| Mai | 27.39 | 29.21 | 6.6 | 27.39 | 24.13 | 11.9 | 27.39 | 26.42 | 3.6 | |
| Jun | 19.11 | 38.35 | 100.7 | 19.11 | 16.76 | 12.3 | 19.11 | 11.18 | 41.5 | |
| Jul | 3.37 | 1.52 | 54.8 | 3.37 | 4.83 | 43.2 | 3.37 | 4.32 | 28.1 | |
| Ago | 4.5 | 0.00 | - | 4.5 | 3.81 | 15.3 | 4.5 | 3.30 | 26.6 | |
| Set | 18.09 | 0.51 | 97.2 | 18.09 | 18.54 | 2.5 | 18.09 | 21.59 | 19.3 | |
| Out | 62.58 | 1.52 | 97.6 | 62.58 | 65.02 | 3.9 | 62.58 | 68.58 | 9.6 | |
| Nov | 66.1 | 18.29 | 72.3 | 66.1 | 67.82 | 2.6 | 66.1 | 73.15 | 10.7 | |
| Dez | 67.91 | 1.52 | 97.8 | 67.91 | 73.91 | 8.8 | 67.91 | 60.96 | 10.2 | |
| Anual | 468.43 | 329.69 | 29.6 | 468.43 | 487.93 | 4.2 | 468.43 | 476.50 | 1.7 | |

4.3.1. Análise da distribuição da precipitação intra-anual

Os resultados apresentados no quadro 5 (cenário C) permitem também analisar a distribuição

da precipitação ao longo do ano para o período chuvoso (Outubro a Abril) e o período seco (Junho a Setembro). Esta análise permitiu concluir que, tanto para os valores medidos ou observados como para os simulados, mais de 84 % da precipitação se

concentra no período chuvoso e apenas cerca de 8 a 10 % se concentra no período seco - conforme se apresenta no quadro 6.

Quadro 6 - Distribuição da precipitação referente ao período chuvoso e seco.

| | | | Precipitação | | | | Er |
|--------------------|-------------|---------|--------------------|-----|-------------------|-----|----|
| | | | Valores observados | | Valores simulados | | |
| | | | [mm] | [%] | [mm] | [%] | |
| Período chuvoso | Out a Abr. | 10 anos | 421.30 | 84% | 407.42 | 83% | 3 |
| | | 20 anos | 392.35 | 85% | 408.18 | 87% | 4 |
| | | 30 anos | 395.97 | 85% | 409.70 | 86% | 3 |
| Período seco | Jun. a Set. | 10 anos | 51.62 | 10% | 45.47 | 9% | 12 |
| | | 20 anos | 46.90 | 10% | 39.37 | 8% | 16 |
| | | 30 anos | 45.07 | 10% | 40.39 | 8% | 10 |

Estes resultados evidenciam que o modelo CLIGEN fornece resultados muito congruentes com os medidos, simulando muito bem as condições mediterrâneas da região cuja distribuição da precipitação *intra-anual* corresponde àquela apresentada no quadro 6.

4.3.2. Análise de sensibilidade ao parâmetro t_p - tempo para atingir a intensidade máxima

No intuito de verificar a influência do t_p nos resultados do modelo substituiu-se a distribuição acumulada de t_p obtida com os dados do CEEVF por valores correspondentes a quatro regiões Americanas circunscritas pelos Estados da Califórnia, CA, e Indiana, IN. Esta análise de sensibilidade do CLIGEN ao parâmetro t_p (*time to peak*) considerando os valores de t_p obtidos para o CEEVF e os de outras regiões (VALE FORMOSO, FRESNO, ASH MOUNTAIN, EUREKA WBU e GRENSBURG) comprovou que a distribuição de t_p não exerce influência no resultado da simulação da precipitação diária.

A distribuição acumulada de t_p exerce apenas uma influência ligeira nos valores diários de t_p simulados com base nas diferentes situações testadas. Espera-se, por conseguinte, que a distribuição de t_p possa conduzir a alterações não muito significativas nos valores de erosão.

A fraca sensibilidade exibida pelo modelo, relativamente à distribuição do t_p , pode ser encarada como um forte indício de que os valores de t_p obtidos para VALE FORMOSO possam ser extrapolados para outras estações climatológicas. No entanto, este deve ser reforçado, no futuro, com estudos de incidência noutras estações climatológicas.

O modelo é sensível aos parâmetros de precipitação, designadamente: i) MLP - precipitação média por dia de chuva; ii) DVP - desvio padrão da precipitação diária; iii) g - coeficiente de assimetria da precipitação diária; iv) probabilidades condicionadas; e v) P_{30} - máxima precipitação de 30 minutos.

5. SÍNTESE FINAL

A aplicação do CLIGEN e a análise dos resultados permitiram extrair as seguintes conclusões:

- o CLIGEN é um modelo indicado para gerar variáveis climáticas quando se pretende utilizar modelos hidrossedimentológicos que não carecem de dados com precisão diária. Contudo quando o modelo a ser usado é sensível às interações diárias de duas ou mais variáveis geradas e/ou a sua distribuição diária, não se recomenda a utilização do CLIGEN na produção de dados a serem usados nestes tipos de modelos, exceptuando os casos em que os resultados revelem grande coerência neste sentido. Isto deve-se ao facto de, por exemplo, para um determinado dia, a radiação solar, e as temperaturas máxima e mínima serem geradas completamente independentes da precipitação;-

finalmente, refere-se que os resultados patenteados que o CLIGEN conduz a valores condicentes com os observados para diferentes períodos analisados (e.g., mensal, sazonal e anual) (*vide* figura 4 e os quadros 5 e 6).

Obeve-se uma eficiência mensal de 95.59 e 96.13 % para a simulação com 20 e 30 anos de registo, respectivamente. Isto evidencia a sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada (*vide* figura 2). O modelo revelou fraca sensibilidade, relativamente à distribuição do t_p , que pode ser encarada como um forte indício de que os valores de t_p obtidos para VALE FORMOSO possam ser extrapolados para outras estações climatológicas. Este indício deve ser analisado através da aplicação do modelo a outras estações climatológicas de Portugal. Porém, a extrema carência de dados inviabiliza a sua implementação nos próximos tempos. Espera-se que os planos de bacias, já concluídos, venham a produzir resultados positivos que permitam ultrapassar a escassez actual de informação hidroclimatológica.

APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SIMULADOR ESTOCÁSTICO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS. O CASO DA PRECIPITAÇÃO

Portanto, considera-se que o ajustamento/adaptação do CLIGEN à estação do CEEVF, conduziu a resultados satisfatórios. A utilização de períodos de registos de dados relativamente curtos produziu resultados pouco consistentes, como se pode constatar através de resultados obtidos para a série de 10 anos de registos observados. Pese embora este facto, não se deve excluir por completo a utilização de séries de 10 anos de registos, pois, existem casos em que conduziram a bons resultados (e.g., nos EUA).

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a Eng^a Cristina Raminhos todas as sugestões e críticas referentes a este trabalho. Ao Miguel Azevedo Coutinho cumpre agradecer o fornecimento dos dados do Centro Experimental de Erosão de Vale Formoso (CEEVF).

ABREVIACÕES

AGNPS: Agricultural Nonpoint Source Pollution Model

CEEVF: Centro Experimental de Erosão de Vale Formoso

CLIGEN: Gerador Climático usado no WEPP

CREAM: Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System

EPIC: Erosion/Productivity Impact Calculator

IM: Instituto de Meteorologia

INAG: Instituto Nacional da Água

SWRRB: Simulator for Water Resources in Rural Basins

WMO: World Meteorological Organization

REFERÊNCIAS

- Arnold, J.G. & Williams, J.R. (1989). Stochastic Generation of Internal Storm Structure. *Trans. ASAE*, Vol. 32, Nº 1, pp. 161-166.
- Arnold, J.G., Williams, J.R., Nicks, A.D. & Sammons, N.D. (1990). *SWRRB, A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management*. Texas A&M University Press. 236p.
- Atkinson, A.C. & Pearce, M.C. (1976). The Computer Generation of Bet, Gamma, and Normal Random Variables, *J. Roy. Statist. Soc.*, A139, pp. 431-448.
- Bailey, N.T.J. (1964). *The Elements of Stochastic Processes*, John Wiley, New York.
- Dagpunar, J. (1988). *Principles of Random Variate Generation*, Clarendon Press, Oxford.
- IM (2002). Informação Climática. Instituto de Meteorologia (IM). <http://www.meteo.pt/>. Acedida no dia 06/03/2002.

INMG (1990). O Clima de Portugal. Fascículo XL, Volume 4 - 4ª Região. Normais Climatológicas da Região de «Alentejo e Algarve», correspondentes a 1941 - 1970, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INMG), Lisboa.

Jhonson *et al.* (1996). Stochastic Weather Simulation: Overview and Analysis of Two Commonly Used Models, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.35, October.

Law, A.M. & Kelton, W.D. (1991). *Simulation Modeling and Analysis*, 2nd edition, McGraw-Hill, New York. 759p.

Nash, I.E. & Sutcliffe, I.V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models, I. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.

Nicks, A.D. & Harp, J.F. (1980). Stochastic Generation of Temperature and Solar Radiation Data, *Journal of Hydrology*, Vol. 48, pp. 1-7.

Nicks, A.D., Lane, L.J., Gander, G.A. (1995). "Weather Generator". In Flanagan, D.C. e Nearing, M.A. (eds), *USDA - Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation*. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory: West Lafayette, Indiana (USA).

Peixoto, J.P. & Abraham H. Oort (1991). *Physics of Climate*, American Institute of Physics, New York, 520 pp.

Rajagopalan, B., Lall, U., Tarboton, D.G. & Bowles, D.S. (1997). Multivariate Nonparametric Resampling Scheme for Generation of Daily Weather Variables, *Stochastic Hydrology and Hydraulic*, Vol. 11, No. 1, pp. 523-547.

Ribeiro, O. (1986). *Portugal, o Mediterrâneo e o Atlântico*, 4ª ed., Coleção Nova Universidade, Livraria Sá da Costa Editora, Lisboa, 175p.

Richardson, C.W. (1981). Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation, *Water Resource Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 182-190.

Savabi, M.R.; Young, R.A.; Benoit, G.R.; Witte, J.M.; & Flanagan, D.C. (1995). "Winter Hydrology". In Flanagan, D.C. e Nearing, M.A. (eds), *USDA - Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation*. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory: West Lafayette, Indiana (USA).

Tomás, P.P. & Coutinho, M.A. (1994). *Compêndio dos Dados Recolhidos no Centro Experimental de Erosão de Vale Formoso, de 1963/64 a 1992/63*. Publicação nº 4/94, CEHIDRO - Centro de Estudos de Hidrossistemas, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Viessman, W.Jr.; Knapp, J.W.; Lewis, G.L.; & Harbough, T.E. (1977). *Introduction to Hydrology*, Dun - Donnelly, New York.

World Meteorological Organization, WMO (1989). Calculation of Monthly and Annual 30-Year Standard Normals, WCDP-Nº. 10, WMO-TD/Nº 341, Geneva: World Meteorological Organization.

World Meteorological Organization, WMO (1995). *Climatic Change*, Technical Note Nº 79, WMO - Nº 195.TP100, 79 pp.

