

CLASSIFICAÇÃO DE PRECIPITAÇÕES ASSOCIADAS A ALUVIÕES NA REGIÃO DO FUNCHAL, ILHA DA MADEIRA, COM RECURSO A CADEIAS DE MARKOV

Ana Ramalheira

Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos (DECivil), I.S.T.
a.c.ramalheira@gmail.com

Maria Manuela Portela

Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos (DECivil), I.S.T.
maria.manuela.portela@ist.utl.pt

António Betâmio de Almeida

Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos (DECivil), I.S.T.
aba@ist.utl.pt

RESUMO

As ocorrências de eventos extremos de precipitação na Ilha da Madeira sugerem que a excepcionalidade desses eventos, quando exclusivamente considerada *per se*, possa não explicar a gravidade das consequências de alguns dos mesmos. Com efeito, admite-se que precipitações intensas com magnitudes próximas possam ter consequências distintas (inclusive, gerando ou não aluviões), presumivelmente em função das precipitações que as antecederam. Com o objectivo de averiguar a possibilidade de estabelecer critérios de dimensionamento que reconheçam situações de risco, descreve-se a abordagem desenvolvida para classificar eventos extraordinários de precipitação a qual faz intervir precipitações superiores a limiares de excepcionalidade pré-definidos acumuladas em diferentes períodos sub-diários, ao longo de uma janela temporal à qual, nas aplicações efectuadas, se atribuiu a duração fixa de 4 dias. Para o efeito, recorreu-se à metodologia associada às cadeias de Markov, no pressuposto de as ocorrências de dias secos ou chuvosos serem condicionalmente dependentes da sequência antecedente daqueles dias. A abordagem foi aplicada à classificação de precipitações associadas a aluviões históricas na região do Funchal.

Palavras-chave: aluvião, cadeias de Markov, Funchal, precipitações excepcionais.

Introdução

As precipitações de Fevereiro de 2010 na região do Funchal, de que resultaram 47 mortes e elevados prejuízos materiais, sugerem que, para entender as consequências de alguns dos acontecimentos pluviosos intensos na Ilha da Madeira, possa ser necessário avaliar, para além das precipitações verificadas nas datas das suas ocorrências, as *condições antecedentes de precipitação*, designadamente no que respeita a precipitações acumuladas em dias anteriores a esses eventos.

Para equacionar a anterior expectativa ensaiou-se uma classificação dos acontecimentos pluviosos associados à ocorrência de aluviões na região do Funchal, de entre as identificadas por Quintal, 1999, e Abreu, 2013. Para o efeito utilizou-se a série de precipitações horárias no posto udográfico do Funchal, no período entre as 09:00 h de 1 de Outubro de 1980 e as 18:00 h de 06 de Julho de 2010, obtida no âmbito de SRES, 2010. Importa mencionar que os registos apresentavam falhas muito pontuais e em períodos habitualmente de baixo quantitativo de precipitação, que foram preenchidas atendendo aos registos diários nos períodos com falhas horárias. A classificação incidiu sobre precipitações acumuladas com diferentes durações sub diárias, embora perfazendo sempre o período total de acumulação da precipitação de 4 dias.

As datas com registo de ocorrência de aluviões na zona do Funchal e para as quais se precedeu à classificação de precipitações acumuladas foram as seguintes: 01.03.1984, 02.03.1984,

27.09.1989, 18.09.1990, 24.10.1991, 29.10.1991, 29.10.1993, 19.10.1997, 20.10.1997, 01.02.1998, 05.03.2001, 06.03.2001, 18.11.2007, 19.11.2007, 29.11.2007, 07.04.2008, 08.04.2008, 09.04.2008 e 22.12.2009. Dada a excepcionalidade da aluvião registada dias 20 e 21 de Fevereiro de 2010, e uma vez que se dispõe dos dados referentes a esse período, tais datas foram incluídas no conjunto das analisadas (num total de 21 datas).

Dado que a informação de que se dispõe sobre as aluviões históricas apenas especifica dias de ocorrência, houve que estabelecer o critério de cálculo de precipitações acumuladas antecedendo essas aluviões. Para o efeito, atendendo a que cada registo horário de precipitação é atribuído à hora que se segue à sua ocorrência, admitiu-se que as 24 h relativas a uma dada aluvião poderiam decorrer entre a 01:00 e as 24:00 h do dia especificado para a aluvião, ou seja, entre a 01:00 h desse dia e as 0:00 h do dia seguinte, como se exemplifica na Figura 1 para a aluvião histórica de dia 29.10.1993. Cada uma dessas 24 h foi designada por data de referência, tendo-se especificado para a mesma as precipitações acumuladas em diferentes períodos sub-diários nos 4 dias (96 h) antecedentes, finalizando nessa data, como se esquematiza mais adiante, na Figura 2. A data de referência foi, portanto, considerada móvel ao longo da janela de 24 h antes especificada (entre 01:00 h do dia da aluvião e as 0:00 h do dia seguinte).

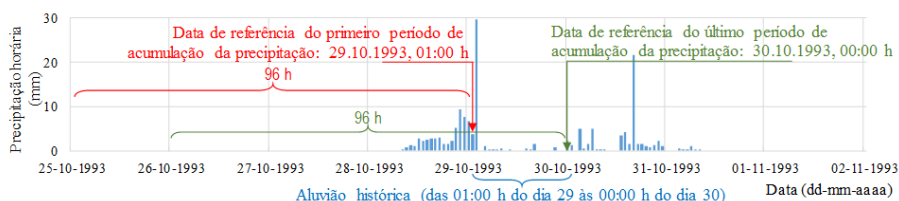


Figura 1 - Representação gráfica das datas de referência extremas associadas à aluvião histórica de dia 29.10.1993 (registos de precipitações horárias entre 25.10.1993, 00:00 h, e 03.11.1993, 00:00 h).

Cadeias de Markov

A utilização de matrizes de frequência de cadeias de Markov baseia-se na hipótese de as ocorrências de dias secos ou chuvosos serem condicionalmente dependentes da sequência dos dias secos ou chuvosos antecedentes (Andrade *et al.*, 2009). Na aplicação de tais cadeias à classificação das precipitações associadas a uma dada aluvião na zona do Funchal especificou-se, para cada uma das correspondentes 24 datas de referência, a precipitação acumulada nas 96 h finalizando nessa data, para o que as 96 h foram descritas por sucessivos sub períodos com duração de k de 1, 3, 4, 6, 8, 12 e 24 h. Deste modo, o número de estados a classificar, n , correspondentes aos anteriores valores de k é de 96, 32, 24, 16, 12, 8 e 4, respectivamente. Esses estados foram classificados através de cadeias de zeros (estados não excepcionais) e de uns (estados excepcionais). A precipitação acumulada num qualquer intervalo de d h foi considerada excepcional quando superior ao quantil empírico para a probabilidade de

não-excedência de 75%, $P_{\frac{d}{2}}^d$ %, obtido por mera ordenação das precipitações máximas anuais com a duração de d h no período de 29 anos hidrológicos (de 1980/81 a 2008/09) em que por acumulação de precipitações horárias foi possível constituir as amostras de máximos anuais. O Quadro I exemplifica algumas das precipitações excepcionais assim obtidas e o Quadro II, a

utilização das cadeias de Markov. Nas cadeias de três dígitos o dígito mais à esquerda classifica a precipitação no intervalo de tempo de k h que finaliza na data de referência (intervalo de tempo mais recente).

Quadro I - Posto udográfico do Funchal. Precipitações excepcionais, $P_{75\%}^d$ (mm).

	$d=1$ h	$d=2$ h	$d=3$ h	$d=4$ h	...	$d=93$ h	$d=94$ h	$d=95$ h	$d=96$ h
75%	28.7	40.8	47.1	53.2	124.6	126.8	126.9	131.5

Quadro II - Exemplo de obtenção das cadeias de Markov de segunda ordem.

x_2 (estado da precipitação acumulada com (t-1) e (t-2) (duração total de 3k h)	x_1 (estado da precipitação acumulada com (t-1) (duração total de 2k h)	x_0 (estado da precipitação em t (duração total de k h)	
		$x_0 \leq P_{75\%}^{1k} \Rightarrow 0$	$x_0 > P_{75\%}^{1k} \Rightarrow 1$
$x_2 \leq P_{75\%}^{3k} \wedge x_1 \leq P_{75\%}^{2k} \Rightarrow 00$		00	01
$x_2 \leq P_{75\%}^{3k} \wedge x_1 > P_{75\%}^{2k} \Rightarrow 01$		01	01
$x_2 > P_{75\%}^{3k} \wedge x_1 \leq P_{75\%}^{2k} \Rightarrow 10$		10	10
$x_2 > P_{75\%}^{3k} \wedge x_1 > P_{75\%}^{2k} \Rightarrow 11$		11	11

De forma generalizada ter-se-á:

$$X_n = \begin{cases} 0, & \text{se } x_n \leq P_{75\%}^{(n+1)k} \\ 1, & \text{se } x_n > P_{75\%}^{(n+1)k} \end{cases}$$

em que n representa o número de estados a classificar, X_n , o estado da precipitação acumulada nos instantes t a $t-k$ (ou seja, em nk horas) e x_n , o valor dessa precipitação. A Figura 2 exemplifica para as aluviões históricas de 08.04.2008 e de 20.02.2010 o procedimento de constituição de uma das 24 seqüências de precipitações acumuladas, para os valores de k de 1, 6 e 24 (números de estados, n , de 96, 16 e 4, respectivamente, conforme representado na figura). Para essas mesmas duas aluviões, especifica-se no Quadro III a composição das cadeias de Markov para $k=1$.

CAPÍTULO 1: TEORIA, MODELOS CONCEPTUAIS E COMUNICAÇÃO DO RISCO

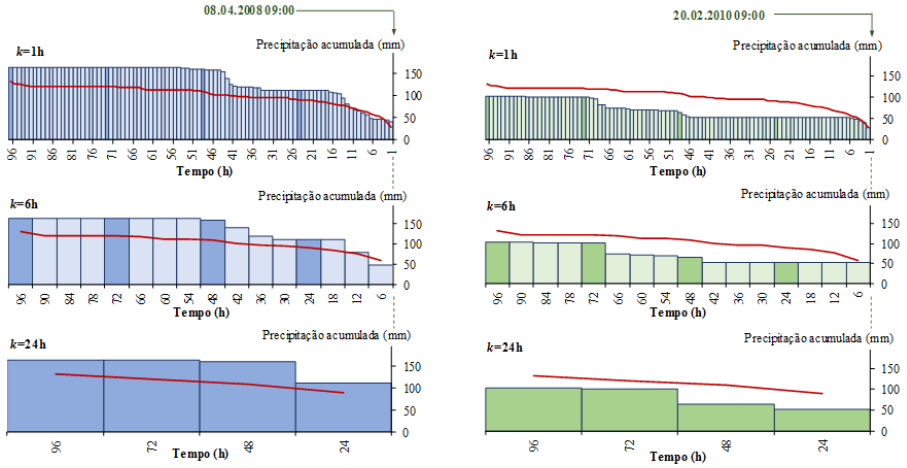


Figura 2 - Precipitações acumuladas nas 96 h, para k igual a 1, 6 e 24, para as datas de referência de 08.04.2008, às 09:00, e 20.02.2010, às 09:00 (a curva vermelha de cada gráfico representa o limiar de excepcionalidade, $P_5^d\%$, para durações d até 96 h, discretizadas de k em k h).

Quadro III - Precipitações acumuladas nas datas de referência associadas às aluviões históricas de 08.04.2008 e 20.02.2010 e correspondentes cadeias de Markov para $k=1$.

Aluvião	Data de referência	Precipitações acumuladas em d' h				Cadeia de Markov para $k=1$ (número de estados, $n=96$)			
		d=96	d=95	d=94	...				
08.04.2008	08.04.2008 01:00	104.0	104.0	104.0	...	12.2	8.4	6.0	00000000000000000000000000 00000000000000000000 001110001111100000000000 00000000000000000000
	08.04.2008 02:00	107.6	107.6	107.6	...	12.0	9.6	3.6	00000000000000000000000000 00000000000000000000 001111111111100000000000 00000000000000000000
	08.04.2008 03:00	115.8	115.8	115.8	...	17.8	11.8	8.2	00000000000000000000000000 00000000000000000000 00000000111111111111 111111111111000000000000
	08.04.2008 04:00	116.4	116.4	116.4	...	12.4	8.8	0.6	00000000000000000000000000 0000000000111111111111 111111111111000000000000 00000000000000000000
	08.04.2008 05:00	116.5	116.5	116.5	...	8.9	0.7	0.1	00000000000000000000000000 0000000000111111111111 111111111111000000000000 00000000000000000000
	08.04.2008 06:00	117.3	117.3	117.3	...	1.5	0.9	0.8	00000000000000000000000000 0000000000111111111111 111111111111000000000000 00000000000000000000
	08.04.2008 07:00	117.8	117.8	117.8	...	1.4	1.3	0.5	00000000000000000000000000 0000000000111111111111 111111111111000000000000 00000000000000000000
	08.04.2008 08:00	122.0	122.0	122.0	...	5.5	4.7	4.2	000001111111111111111111 11111111111111111111 111111111111000000000000 00000000000000000000
	08.04.2008 09:00	163.4	163.4	163.4	...	46.1	45.6	41.4	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 1111111111110000000011
	08.04.2008 10:00	164.9	164.9	164.9	...	47.1	42.9	1.5	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 11111111111110000000010
	08.04.2008 11:00	164.9	164.9	164.9	...	42.9	1.5	0.0	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 111111111111100000000000
	08.04.2008 12:00	164.9	164.9	164.9	...	1.5	0.0	0.0	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 111111111111100000000000
	08.04.2008 13:00	164.9	164.9	164.9	...	0.0	0.0	0.0	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 111111111111100000000000
	08.04.2008 14:00	165.4	165.4	165.4	...	0.5	0.5	0.5	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 11111111111110000000000000
	08.04.2008 15:00	188.1	188.1	188.1	...	23.2	23.2	22.7	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 111111111111100111100000
	08.04.2008 16:00	189.9	189.9	189.9	...	25.0	24.5	1.8	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 111111111111100111100000
	08.04.2008 17:00	189.9	189.9	189.9	...	24.5	1.8	0.0	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 1111111111111000011000000
	08.04.2008 18:00	189.9	189.9	189.9	...	1.8	0.0	0.0	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 111111111111100000000000
	08.04.2008 19:00	190.5	190.5	190.5	...	0.6	0.6	0.6	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 11111111111110000000000000
	08.04.2008 20:00	192.7	192.7	192.7	...	2.8	2.8	2.2	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 111111100000000000000000
08.04.2008 21:00	193.4	193.4	193.4	...	3.5	2.9	0.7	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 1111100000000000000000	
08.04.2008 22:00	193.4	193.4	193.4	...	2.9	0.7	0.0	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 1111000000000000000000	
08.04.2008 23:00	193.4	193.4	193.4	...	0.7	0.0	0.0	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 1110000000000000000000	
08.04.2008 00:00	193.4	193.4	193.4	...	0.0	0.0	0.0	111111111111111111111111 11111111111111111111 11111111111111111111 10000000000000000000	
20.02.2010	20.02.2010 01:00	52.5	51.4	51.4	...	0.0	0.0	0.0	000000000000000000000000 00000000000000000000 000000000000000000 0000000000000000000000
	20.02.2010 02:00	51.4	51.4	51.3	...	0.0	0.0	0.0	000000000000000000000000 00000000000000000000 000000000000000000 0000000000000000000000
	20.02.2010 03:00	51.6	51.5	51.4	...	0.2	0.2	0.2	000000000000000000000000 00000000000000000000 000000000000000000 0000000000000000000000
	20.02.2010 04:00	52.8	52.7	52.7	...	1.5	1.5	1.9	000000000000000000000000 00000000000000000000 000000000000000000 0000000000000000000000
	20.02.2010 05:00	55.4	55.4	55.4	...	4.2	4.0	2.7	000000000000000000000000 00000000000000000000 000000000000000000 0000000000000000000000
	20.02.2010 06:00	57.9	57.9	57.9	...	6.5	5.2	2.5	000000000000000000000000 00000000000000000000 000000000000000000 0000000000000000000000

Conclusões

O Quadro IV evidencia que as aluviões de 18.09.1990, 29.10.1991 e 01.02.1998 só apresentam excepcionalidade de precipitação acumulada em curtos períodos de tempo próximos dos dias da sua ocorrência, os quais foram precedidos por períodos de vários dias sem precipitação excepcional. Das restantes aluviões, as de Abril de 2008 e Fevereiro de 2010 foram nitidamente precedidas de precipitações consistentemente excepcionais que, contudo, ao aproximarem-se da data de referência poderão ter perdido alguma da sua excepcionalidade. Embora com manutenção de condições gravosas por um menor intervalo de tempo, é também esta a situação da aluvião de Outubro de 1989. A aluvião de Outubro de 1993 regista períodos com precipitações acumuladas acima do limiar de excepcionalidade com outros abaixo desses limiares.

A principal conclusão do estudo sumariamente apresentado prende-se com a constatação de que não é possível associar à generalidade das aluviões registadas na região do Funchal precipitações excepcionais, seja quer pelas precipitações que geraram aquelas aluviões não serem de facto excepcionais, quer por os registos referentes ao posto udográfico do Funchal não descreverem as precipitações que localmente poderão ter desencadeado essas aluviões. No extremo oposto, foram reconhecidas aluviões em períodos com pluviosidade consistentemente muito excepcional. Deve, contudo, mencionar-se que um estudo paralelo indicou outros períodos com precipitações igualmente excepcionais mas que, aparentemente, não terão ocasionado aluviões. Globalmente conclui-se que, para eficazmente associar precipitações a fenómenos de aluvião, será necessário por um lado, catalogar todas as ocorrências dessas aluviões e, por outro lado, dispor de uma rede de monitorização da precipitação sub diária que permita detalhar a variabilidade espacial desse hidrometeoro.

Bibliografia

- Abreu, T. (2013). Riscos Naturais na Região Autónoma da Madeira. Análise dos Riscos Naturais de Maior Incidência. Lisboa: Faculdade de Ciências Sociais e Humanas.
- Andrade, A., Freitas, J., Brito, J., Guerra, H., & Xavier, J. (2009). Aplicação da Probabilidade Condicional e do Processo de Cadeia de Markov na Análise da Ocorrência de Períodos Secos e Chuvosos para o Município de Garanhuns, Pernambuco, Brasil. *Revista Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v4 n.1. doi:10.4136/ambi-agua.81
- Quintal, R. (1999). Aluviões da Madeira. Séculos XIX e XX. *Territorium* 6, p. 31-48.
- SRES, Secretaria Regional do Equipamento Social da Região Autónoma da Madeira (2010). Estudo de Avaliação do Risco de Aluviões da Ilha da Madeira - Estudo de avaliação do risco de aluviões na Ilha da Madeira. Anexo A - Caracterização de precipitações intensas. Instituto Superior Técnico (IST), Universidade da Madeira (UM), Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC).