

RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE, DURAÇÃO E FREQUÊNCIA DE CHUVAS EM MOCOCA, SP¹

DIRCEU BRASIL VIEIRA², FRANCISCO LOMBARDI NETO³ e RONALDO P. DOS SANTOS⁴

RESUMO - O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise estatística das chuvas ocorridas em Mococa, Estado de São Paulo, de 1970 a 1990, incluindo a relação entre intensidade, duração e frequência. Os dados analisados foram registrados com pluviôgrafo instalado na estação experimental do Instituto Agrônomo, em Mococa. Foram estudados os seguintes intervalos de duração: 5, 10, 15, 25, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos. Para o estudo da frequência de distribuição das chuvas intensas nos tempos de recorrência de 5, 10, 25, 50 e 100 anos, utilizou-se o método de Chow-Gumbel. Aplicou-se também o método dos mínimos quadrados para obter equação da mesma relação. Os resultados finais mostraram boa correlação entre os dois métodos, assim como os valores de intensidade máxima de chuva obtidos em cada duração, resultando nos coeficientes de regressão linear 0,9990 e 0,9920, respectivamente. Os resultados mostraram que a equação pode ser utilizada nos casos em que as intensidades máximas de chuva são necessárias.

Termos de indexação: precipitação pluvial, intensidade de chuva, tempo de recorrência, drenagem de águas pluviais.

RELATION AMONG INTENSITY, DURATION AND FREQUENCY OF RAINFALL IN MOCOCA, STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL

ABSTRACT - The objective of this work was to perform a statistical analysis of rainfall data gathered in Mococa, State of São Paulo, from 1970 to 1990, including the relationship between intensity, duration and frequency. The studied data were registered with a rain gauge located at the Experimental Station of the Instituto Agrônomo, in Mococa, São Paulo State, Brazil. The relationship were studied for the following duration intervals: 5, 10, 15, 25, 30, 45, 60, 90, and 120 minutes. The Chow-Gumbel method was applied for the study of frequency distribution of intense precipitation for recurrence times of 5, 10, 25, 50, and 100 years. Also, the method of minimum squares was applied to obtain an equation for the same relationship. Final results showed good correlation between both methods, as well as with the maximum rainfall values obtained for each duration, resulting in linear regression coefficients of 0.9990 and 0.9920, respectively. Results indicated that the equation can be utilized for cases where values of maximum rainfall intensities are needed.

Index terms: rainfall, rainfall intensity, recurrence time, rainwater drainage.

¹ Aceito para publicação em 23 de julho de 1998.

² Eng. Agr., Prof. Titular, DRH-FEC-UNICAMP, Caixa Postal 6021, CEP 13083-970 Campinas, SP. E-mail: dbv@fec.unicamp.br

³ Eng. Agr., SCS/IAC, Caixa Postal 28, CEP 13001-970 Campinas, SP.

⁴ Aluno do curso de Engenharia Civil, FEC-UNICAMP.

INTRODUÇÃO

As chuvas intensas são responsáveis pela erosão dos solos e pela concentração de águas pluviais em vales e zonas ribeirinhas. Assim, o conhecimento das relações entre intensidade, duração e frequência dessas chuvas é de enorme importância para o projeto de obras de controle de erosão e de estruturas hidráulicas de fluxo para águas pluviais, como galerias, bueiros, extravasores de barragens, vãos de pontes, etc. Eltz et al. (1992) afirmam que a análise de frequência é uma técnica estatística importante no estudo das chuvas, em razão da grande variabilidade temporal e espacial das precipitações pluviais, as quais não podem ser previstas em bases puramente determinísticas.

A região de Mococa, no Estado de São Paulo, caracteriza-se por intensa atividade agrícola, sendo freqüente a construção de barragens de terra, bem como obras hidráulicas de captação e condução de águas fluviais no perímetro urbano e na zona rural. No dimensionamento dessas obras há necessidade de considerar a análise da frequência e da duração das chuvas de grande intensidade, para que os riscos normalmente assumidos nesse tipo de dimensionamento sejam minimizados.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar os dados referentes a um período de 21 anos, coletados e registrados no pluviógrafo localizado na Estação Experimental de Mococa, a fim de obter uma equação de intensidade-duração-frequência que permitisse ao projetista prever eventos intensos em diferentes períodos de recorrência.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados de intensidade de chuva foram calculados mediante a leitura dos pluviogramas registrados no pluviógrafo da Seção de Conservação do Solo (SCS) do Instituto Agrônômico, instalado na Estação Experimental de Mococa. Os pluviogramas analisados referem-se ao período de 1970 a 1990. A Estação Experimental de Mococa localiza-se nas coordenadas geográficas de 21°28'S e 47°1'W. A precipitação média anual é de 1.584 mm, e a temperatura média anual é de 21,8° C. O tipo climático é Aw, de acordo com a classificação de Köppen, definido como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno.

Todos os pluviogramas diários registrados de 1970 a 1990 foram lidos e analisados, sendo calculadas as maiores chuvas de cada ano nas durações de: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos, (Tabela 1). Com esses valores foram calculadas as intensidades pluviais correspondentes, listadas na Tabela 2, onde constam também valores de intensidade média e do desvio padrão da série histórica.

A análise de frequência desses dados foi feita pelo método de Chow-Gumbel, descrito por Garcez (1967). A distribuição tipo I de Fisher-Tippet, também conhecida por distribuição de Gumbel, é dada por:

$$P = 1 - e^{-e^{-y}} \quad (1)$$

onde:

P = probabilidade de um valor extremo da série ser maior ou igual a X;

e = base dos logaritmos neperianos; e

y = variável reduzida.

$$y = (X - X_f) (\sigma_n / \sigma_x) \quad (2)$$

onde:

X = valor individual da série de valores extremos;

X_f = moda dos valores extremos.

$$X_f = \bar{X} - \sigma_x (\bar{y}_n / \sigma_n) \quad (3)$$

onde:

\bar{X} = média da variável X;

σ_x = desvio padrão da variável X;

\bar{y}_n e σ_n = média e desvio padrão da variável reduzida.

A frequência (F) de um elemento da série ser igualado ou ultrapassado é calculada pela fórmula:

$$F = m/(n+1) \quad (4)$$

onde:

m = número de ordem do valor extremo considerado;

n = número de elementos extremos da série.

TABELA 1. Intensidade pluvial máxima em Mococa, SP, de 1970 a 1990, em mm, com diferentes durações de chuva.

| Ano | Duração (minutos) | | | | | | | | | |
|------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 |
| 1970 | 9,0 | 13,6 | 18,8 | 22,8 | 28,0 | 31,4 | 35,8 | 39,2 | 42,0 | 42,6 |
| 1971 | 10,3 | 15,0 | 25,0 | 27,9 | 33,1 | 38,1 | 40,9 | 42,4 | 43,1 | 44,0 |
| 1972 | 10,7 | 17,7 | 22,9 | 26,3 | 31,6 | 32,7 | 40,9 | 45,0 | 48,7 | 53,0 |
| 1973 | 12,4 | 19,6 | 21,7 | 24,0 | 24,8 | 25,4 | 26,4 | 29,0 | 42,7 | 43,0 |
| 1974 | 13,0 | 25,6 | 31,9 | 36,1 | 43,4 | 53,0 | 63,5 | 69,3 | 70,9 | 71,0 |
| 1975 | 14,4 | 21,2 | 29,9 | 33,3 | 36,8 | 43,1 | 44,3 | 44,5 | 44,6 | 44,6 |
| 1976 | 12,9 | 18,0 | 22,9 | 28,0 | 30,0 | 32,0 | 36,8 | 37,0 | 41,0 | 41,2 |
| 1977 | 12,0 | 20,0 | 23,3 | 26,8 | 29,8 | 33,2 | 42,4 | 47,0 | 71,9 | 75,8 |
| 1978 | 8,2 | 12,2 | 17,7 | 21,7 | 24,8 | 26,7 | 29,6 | 30,3 | 31,7 | 33,3 |
| 1979 | 10,4 | 15,5 | 20,8 | 23,2 | 25,9 | 30,1 | 35,8 | 37,8 | 39,8 | 43,3 |
| 1980 | 13,6 | 22,6 | 32,6 | 35,6 | 37,0 | 37,5 | 38,0 | 39,0 | 48,4 | 53,4 |
| 1981 | 10,9 | 20,9 | 23,4 | 23,5 | 23,8 | 23,8 | 24,2 | 26,7 | 30,2 | 33,2 |
| 1982 | 10,3 | 13,2 | 15,6 | 19,9 | 19,9 | 23,3 | 28,0 | 36,6 | 39,8 | 49,0 |
| 1983 | 7,3 | 12,5 | 17,0 | 19,5 | 23,0 | 24,1 | 31,3 | 31,8 | 42,0 | 47,8 |
| 1984 | 6,5 | 9,7 | 13,4 | 19,5 | 23,0 | 25,5 | 33,2 | 44,1 | 47,1 | 51,0 |
| 1985 | 9,0 | 14,2 | 19,4 | 25,1 | 29,3 | 32,4 | 34,3 | 34,9 | 36,0 | 36,0 |
| 1986 | 9,2 | 16,2 | 24,0 | 29,0 | 35,0 | 38,9 | 42,7 | 43,5 | 44,7 | 46,6 |
| 1987 | 13,1 | 17,1 | 25,1 | 33,8 | 36,7 | 42,8 | 44,0 | 44,0 | 44,0 | 52,6 |
| 1988 | 10,2 | 16,3 | 21,5 | 24,4 | 27,4 | 26,8 | 33,9 | 36,3 | 43,0 | 46,0 |
| 1989 | 9,3 | 16,6 | 21,7 | 26,0 | 29,5 | 32,5 | 42,0 | 43,3 | 44,8 | 45,1 |
| 1990 | 10,3 | 19,5 | 28,0 | 32,8 | 32,8 | 33,0 | 36,8 | 38,6 | 41,4 | 49,1 |

Em hidrologia é mais comum o emprego do termo tempo de recorrência (T_r) do que frequência, o qual pode ser expresso por:

$$T_r = 1/F. \quad (5)$$

A substituição de F por P na equação (5) permite proceder estimativas para períodos maiores, portanto:

$$T_r = 1/P. \quad (6)$$

Sendo a probabilidade P, obtida pela equação (1), Chow (1953) apresentou uma simplificação ao método de Gumbel, que é traduzida pela equação:

$$X_{T_r} = \bar{X} + K \times \sigma_x \quad (7)$$

onde:

X_{T_r} = valor procurado da variável em estudo para o (T_r) desejado;

\bar{X} = média aritmética das variáveis da série;

K = fator de frequência, função do T_r e do número de valores da série.

Esse fator foi tabulado por Reid com base na equação de Gumbel, sendo encontrado nos compêndios de hidrologia. No presente trabalho, como a série contém 21 anos de dados, utilizaram-se os valores de K de 0,912; 1,613; 2,504; 3,160 e 3,810, correspondentes a T_r de 5; 10; 25; 50 e 100 anos, respectivamente.

Com esses valores do coeficiente K, e com os dados de intensidade de chuva média e desvio padrão da Tabela 2, foram calculadas as máximas intensidades de chuva prováveis dos tempos de recorrência e durações estudadas. Tais valores, bem como a intensidade máxima observada entre 1970 e 1990, estão na Tabela 3.

Segundo alguns autores (Occhipint & Santos, 1965; Garcez, 1967; Vieira et al., 1994), as relações intensidade-duração podem ser expressas com fórmulas do tipo:

$$I = C/(t+b)^n \quad (8)$$

onde:

I = intensidade pluvial máxima para duração t, mm/h;

t = intervalo de duração da chuva, minutos;

C, b, e n = parâmetros locais.

Para correlacionar com o T_r , normalmente faz-se:

$$C = K \times T_r^m \quad (9)$$

TABELA 2. Intensidade pluvial máxima anual de chuva em Mococa, SP, em mm/h, com diferentes durações.

| Ano | Duração (minutos) | | | | | | | | | |
|------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 |
| 1970 | 108,0 | 81,6 | 75,2 | 68,4 | 67,2 | 62,8 | 47,7 | 39,2 | 28,0 | 21,3 |
| 1971 | 123,6 | 90,0 | 100,0 | 83,7 | 79,4 | 68,2 | 54,5 | 42,4 | 28,7 | 22,0 |
| 1972 | 128,4 | 106,2 | 91,6 | 78,9 | 75,8 | 66,2 | 54,5 | 46,0 | 32,6 | 26,5 |
| 1973 | 148,8 | 117,6 | 86,8 | 72,0 | 59,5 | 50,8 | 35,2 | 29,0 | 28,5 | 21,5 |
| 1974 | 158,0 | 153,8 | 127,6 | 108,3 | 104,2 | 106,0 | 81,7 | 69,3 | 47,3 | 35,5 |
| 1975 | 172,8 | 127,2 | 119,6 | 99,2 | 88,2 | 86,2 | 59,1 | 44,5 | 29,7 | 22,1 |
| 1976 | 154,8 | 108,0 | 91,6 | 84,0 | 72,0 | 64,0 | 49,1 | 37,0 | 27,3 | 20,6 |
| 1977 | 144,0 | 120,0 | 93,2 | 80,4 | 71,5 | 66,4 | 56,5 | 47,0 | 47,9 | 37,9 |
| 1978 | 98,4 | 73,2 | 70,8 | 65,1 | 59,5 | 63,4 | 39,5 | 30,3 | 21,1 | 16,7 |
| 1979 | 124,8 | 93,0 | 83,2 | 69,6 | 62,2 | 60,2 | 47,7 | 37,8 | 26,5 | 21,7 |
| 1980 | 163,2 | 135,6 | 130,4 | 106,8 | 88,8 | 75,0 | 50,7 | 39,0 | 32,3 | 26,7 |
| 1981 | 130,8 | 125,4 | 93,6 | 70,5 | 57,1 | 47,6 | 32,3 | 26,7 | 20,1 | 16,6 |
| 1982 | 123,6 | 79,2 | 62,4 | 59,7 | 47,8 | 46,6 | 37,3 | 36,6 | 26,5 | 24,5 |
| 1983 | 87,6 | 75,0 | 68,0 | 58,5 | 55,2 | 48,2 | 41,7 | 31,8 | 28,0 | 23,9 |
| 1984 | 78,0 | 58,2 | 53,6 | 58,5 | 55,2 | 51,0 | 44,3 | 44,1 | 31,4 | 25,5 |
| 1985 | 108,0 | 85,2 | 77,6 | 75,3 | 70,3 | 64,8 | 45,7 | 34,9 | 24,0 | 18,0 |
| 1986 | 110,4 | 97,2 | 96,0 | 87,0 | 84,0 | 77,8 | 56,9 | 43,5 | 28,8 | 23,3 |
| 1987 | 157,2 | 102,6 | 100,4 | 101,4 | 88,1 | 85,6 | 68,7 | 44,0 | 29,3 | 26,3 |
| 1988 | 122,4 | 97,8 | 86,0 | 73,2 | 65,8 | 57,6 | 46,2 | 38,6 | 28,7 | 23,0 |
| 1989 | 111,6 | 99,6 | 88,6 | 78,0 | 70,8 | 65,0 | 56,0 | 43,3 | 29,9 | 22,6 |
| 1990 | 123,6 | 117,0 | 112,0 | 98,4 | 78,7 | 66,0 | 49,1 | 38,6 | 27,6 | 24,6 |
| \bar{X} | 127,4 | 102,1 | 90,8 | 79,9 | 71,5 | 65,5 | 49,8 | 40,1 | 29,8 | 23,8 |
| σ_x | 24,7 | 22,7 | 19,8 | 15,1 | 13,7 | 14,6 | 10,9 | 8,5 | 6,5 | 5,0 |

Lançando-se na ordenada de um papel di-log as intensidades pluviais calculadas pelo método Chow-Gumbel, apresentadas na Tabela 3, e no eixo da abcissa as durações correspondentes, obteve-se o gráfico da Fig. 1. Pela sua análise, verifica-se que as curvas obtidas em cada T_r tem concavidade para baixo. Por anamorfose, isto é, substituindo t por $t + b$, onde b é uma constante convenientemente escolhida, consegue-se transformar as curvas intensidade-duração em retas. Nesse caso, o valor de b obtido foi 20. Dessa forma, as curvas intensidade-duração foram transformadas em retas, cuja equação geral é do tipo:

$$\log I = \log C - n \times \log (t + b) \quad (10)$$

sendo:

n = parâmetro angular;

C = parâmetro linear.

A determinação desses parâmetros foi feita pelo método dos mínimos quadrados com o auxílio das equações:

$$\sum \log I = 10 \log C - \log (t + b) \quad (11)$$

$$\sum \log I \times \log (t + b) = \log C \times \sum \log (t + b) - n \times \log^2 (t + b) \quad (12)$$

Como a série de dados é de 21 anos, aplicou-se o método nos tempos de recorrência de 5, 10 e 25 anos, obtendo-se os valores da Tabela. 4. Reaplicando-se o método dos mínimos quadrados aos dados da Tabela 4, e com base na equação (9), tem-se:

$$\sum \log C = 3 \times \log K + m \times \log T_r \quad (13)$$

$$\sum \log C = 3 \times \log K + m \times \log^2 T_r \quad (14)$$

Assim, obteve-se:

$m = 0,1366$ e $K = 2667$.

TABELA 3. Intensidade pluvial máxima em Mococa, SP, em mm/h, calculada pelo método de Chow-Gumbel e observada no período de 1970 a 1990.

| Duração (minutos) | Tempo de recorrência (anos) | | | | | Max. obs. (mm/h) |
|----------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | |
| 5 | 149,9 | 167,2 | 189,2 | 205,4 | 221,5 | 172,8 |
| 10 | 122,8 | 138,7 | 158,9 | 173,8 | 188,6 | 153,6 |
| 15 | 108,7 | 122,4 | 139,8 | 152,7 | 165,5 | 130,4 |
| 20 | 93,7 | 104,3 | 117,7 | 127,6 | 123,7 | 108,3 |
| 25 | 84,0 | 93,6 | 105,8 | 114,8 | 123,7 | 104,2 |
| 30 | 78,8 | 89,0 | 102,0 | 111,6 | 121,1 | 106,0 |
| 45 | 59,7 | 67,4 | 77,1 | 84,2 | 91,3 | 81,7 |
| 60 | 47,8 | 53,8 | 61,4 | 66,9 | 72,5 | 69,3 |
| 90 | 35,7 | 40,3 | 46,1 | 50,3 | 54,6 | 47,9 |
| 120 | 28,4 | 31,9 | 36,3 | 39,6 | 42,9 | 37,9 |

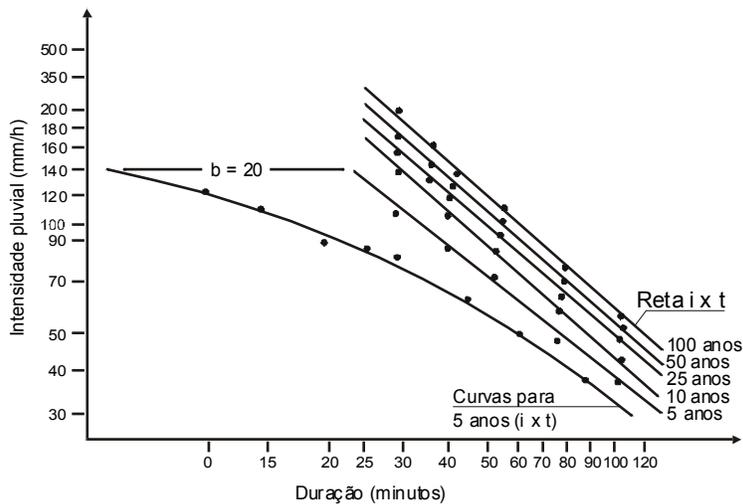


FIG. 1. Transformação das curvas “i x t” em retas por anamorfose utilizando “t + 20”.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando-se os valores de m e K em (9) e o valor de C em (8), obtém-se a equação intensidade-duração-freqüência ou equação da chuva crítica para Mococa, SP:

$$I = 2667 \times t / (t + 20)^{0,96} \quad (15)$$

onde:

I = intensidade pluviométrica máxima provável para duração t, mm/h;

t = duração da chuva, em minutos;

T_r = tempo de recorrência, em anos.

Com o auxílio da equação (15) calcularam-se valores de intensidade máxima de chuva nas durações e tempos de recorrência estudados neste trabalho (Tabela 5). Tais valores foram comparados com os obtidos pelo método Chow-Gumbel, listados na Tabela 3, procedendo-se a análise de regressão linear, por meio do programa computacional para ajuste de dados desenvolvido por Zullo Junior & Arruda (1986). Na Tabela 3 são apresentados os valores de intensidade pluviométrica calculados pelo método de Chow-Gumbel, bem como aqueles registrados nos pluviogramas do período de 1970-1990, que comparados com os calculados com a equação de chuva crítica de Mococa, SP, para período de recorrência de 20 anos, verifica-se que são próximos. Entre os valores obtidos pela equação de Mococa, apresentados na tabela 5, e os constantes da Tabela 3 aplicou-se o método da análise de regressão linear de acordo com Zullo Junior & Arruda (1986). Obteve-se o coeficiente de regressão médio de 0,9920 e 0,9990 (Tabela 6), indicando que não ocorreu diferença significativa entre os valores, o que mostra que a equação obtida representa adequadamente as relações intensidade-duração e frequência de chuvas intensas para Mococa, no estado de São Paulo.

TABELA 4. Valores dos parâmetros C e n.

| Parâmetros | Tempo de recorrência (anos) | | |
|------------|-----------------------------|---------|---------|
| | 5 | 10 | 25 |
| C | 3315,09 | 3669,54 | 4133,35 |
| n | 0,9637 | 0,9600 | 0,9572 |

TABELA 5. Intensidade de chuva em mm/h calculadas com a equação 15.

| Duração (minutos) | Tempo de recorrência (anos) | | | | |
|-------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| 5 | 151,2 | 166,2 | 188,3 | 207,1 | 227,6 |
| 10 | 126,9 | 139,5 | 158,1 | 173,8 | 191,1 |
| 15 | 109,4 | 120,3 | 136,4 | 149,9 | 164,8 |
| 20 | 96,3 | 105,8 | 120,0 | 131,9 | 145,0 |
| 25 | 86,0 | 94,5 | 107,1 | 117,8 | 129,5 |
| 30 | 77,7 | 85,4 | 96,8 | 106,4 | 117,0 |
| 45 | 60,4 | 66,4 | 75,3 | 82,7 | 91,0 |
| 60 | 49,5 | 54,4 | 61,7 | 67,8 | 74,5 |
| 90 | 36,5 | 40,1 | 45,4 | 49,9 | 54,9 |
| 120 | 28,9 | 31,8 | 36,0 | 39,6 | 43,5 |

TABELA 6. Dados da análise de regressão linear.

| T_r | r | F | Significância |
|----------|---------|---------|---------------|
| 15 anos | 0,99990 | 7585,44 | n.s. |
| 10 anos | 0,99990 | 6372,39 | n.s. |
| 25 anos | 0,99990 | 4193,37 | n.s. |
| 50 anos | 0,99990 | 3145,65 | n.s. |
| 100 anos | 0,99980 | 2551,57 | n.s. |

CONCLUSÃO

A equação obtida permite o cálculo da intensidade máxima de chuvas com diferentes durações e períodos de recorrência, com a aproximação adequada a projetos de engenharia.

AGRADECIMENTOS

À Seção de Conservação do Solo do Instituto Agrônomo, pela cessão dos pluviogramas, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro ao projeto.

REFERÊNCIAS

- CHOW, V.T. Frequency of hydrologic data with special application to rainfall intensities. **University of Illinois Bulletin**, p.50-81, 1953.
- ELTZ, F.L.; REICHERT, J.M.; CASSOL, E.A. Período de retorno de chuvas em Santa Maria, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p.265-269, 1992.
- GARCEZ, L.N. **Hidrologia**. São Paulo: Edgard Blücher/Universidade de São Paulo, 1967. 249p.
- OCCHIPINTI, A.G.; SANTOS, P.M. **Análise intensidade-duração-frequência de chuva na cidade de São Paulo**. São Paulo: USP-Instituto Astronômico e Geofísico, 1965. 40p.
- VIEIRA, D.B.; LOMBARDI NETO, F.; SANTOS, R.P. Análise das máximas intensidades de chuva em Pindorama, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, p.255-260, 1994.
- ZULLO JUNIOR, J.; ARRUDA, F.B. **Programa computacional para ajuste de equações em dados experimentais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986. 23p. (IAC. Boletim técnico, n.113).