



Cartas de máxima lluvia en 24 horas en Uruguay, para diferentes períodos de retorno

Koolhaas Michel¹ 

¹ Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas. Universidad de la República. Avenida General Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay. Email: michelkoo@yahoo.com.ar

Recibido: 23/11/2016

Aceptado: 10/12/2018

Resumen

El objetivo del presente trabajo es actualizar la información pluviométrica con el fin de posteriormente adaptar el modelo WinTR55 a Uruguay. Para ello se analizaron datos de lluvia máxima en 24 horas por año, de 56 estaciones pluviométricas, correspondientes a las series anuales de 1970 a 2010. La información obtenida permitiría utilizar de manera confiable el modelo hidrológico para el cálculo de crecientes máximas, hidrogramas de diseño y tránsito de hidrogramas a través de diferentes estructuras hidráulicas agrícolas. Para esto, se utilizó un programa de reconocida validez adaptado a la versión moderna. El resultado es un diseño más confiable, rápido, eficaz y fácil de usar.

Palabras clave: caudales máximos, hidrogramas de diseño, modelo de escurrimiento TR55, tránsito de crecientes

Charts of Maximum Rain in 24 Hours in Uruguay, for Different Periods of Return

Summary

The purpose of this study is to update the pluviometric information so as to adapt WinTR55 Model to Uruguay. For this, daily maximum rainfall data from 56 pluviometric stations were analyzed, taking into account the annual series from 1970 to 2010. The information gathered will enable to reliably use the hydrological model in order to calculate the maximum discharges, design hydrographs, and flood routing hydrographs through different agricultural hydraulic structures. A well-known upgraded software was used, which resulted in a more accurate, fast, use-friendly and effective design.

Keywords: peak rate of discharge, design hydrographs, runoff software TR55, flood routing

Introducción

Cuando un ingeniero agrícola estudia una obra hidráulica desde una alcantarilla, un canal de drenaje (como una terraza agrícola) o desde el vertedero de un tajarar o una represa, debe realizar una aproximación de la realidad de una cuenca a través del análisis de las relaciones lluvia-escurrimiento (en base a modelos) y, con el análisis de frecuencias de precipitaciones, convertir la lluvia de diseño en un caudal de diseño. Cualquier modelo o método de determinación de máximos caudales de escorrentía de una cuenca determinada requiere de la determinación del tiempo de concentración de la cuenca. El tiempo de concentración de la cuenca es el tiempo que demora en llegar el agua de escurrimiento que se genera en la parte más alejada de la cuenca hasta el punto de salida en consideración o punto de interés en la cuenca analizada. Los modelos de caudales de escorrentía más corrientes en la ingeniería agrícola son la ecuación racional⁽¹⁾ y el modelo TR-55⁽²⁾.

El modelo TR-55 es un modelo hidrológico que transforma la precipitación (P) máxima en 24 horas caída en una cuenca, con sus diferentes suelos, usos y manejo de los mismos, en un caudal (Q) de salida en un punto de la vía de drenaje principal de la cuenca. El modelo está basado en el concepto del número de curva (CN) y la clasificación hidrológica de los suelos de la cuenca, para determinar el valor de escorrentía que se genera en ocasión de lluvias. Como el modelo es importante para la determinación de caudales extremos que ocurren en ocasión de lluvias extremas, tiene como función clave introducir el valor más correcto de P (mm) en 24 horas para que, conjuntamente con el tiempo de concentración de la cuenca (tc) y el CN, sea posible generar el dato de escorrentía Q en altura (mm) y también el máximo caudal Q (m³/s). Además de la determinación del caudal máximo, el modelo permite transitar la creciente de diseño, a través de la estructura hidráulica, determinando el efecto de la misma en la cuenca. El tránsito del hidrograma de la creciente a través del lugar donde se construirá la estructura, permite analizar cuantitativamente el efecto de dicha estructura en los caudales resultantes aguas abajo de la misma.

Los datos hidrológicos como la precipitación (P) pueden ser tratados como variables estadísticas, y especialmente la precipitación puede ser considerada como una variable aleatoria independiente, por ejemplo, en este caso, de máximos anuales en 24 horas, por lo cual podemos ajustar funciones de densidad de probabilidad como

la de valores extremos u otra. Es decir, existen varias funciones de densidad de probabilidades, que se pueden utilizar eficazmente para determinar la probabilidad de ocurrencia o el período de retorno (T) de lluvias extremas⁽³⁾.

El período de retorno T es un término común en la ingeniería agrícola y en hidrología para expresar la rareza de un evento de precipitación; cuanto mayor es el período de retorno estamos manejando eventos más extremos y menos probables, ya que el período de retorno es el inverso de la probabilidad de ocurrencia $T = 1/P$.

El período de retorno T es el número de años en que un evento determinado puede ser igualado o excedido por lo menos una vez⁽⁴⁾. Quiere decir que una precipitación de 145 mm en 24 horas con un T = 20 años, significa que la magnitud puede ser igualada o superada 20 veces en 100 años o, en otros términos, la probabilidad de ocurrencia de la misma ($P \leq 1/5$) es igual o menor a 0,20.

Por tanto, se define período de retorno como el número de años⁽³⁾ para que un evento (caudal Q o precipitación P) de cierta magnitud sea igualado o excedido. Esto no implica una periodicidad. Así, un T = 10 años para una lluvia de 120 mm/24 horas, significa que la magnitud será igualada o excedida 10 veces en 100 años, pero no quiere decir que ocurriría a intervalos regulares de 10 años.

La distribución de valores extremos Tipo I⁽⁵⁾, también conocida como método de Gumbel, ha sido ampliamente utilizada en los EEUU⁽⁶⁾ y otras partes del mundo⁽⁷⁾, para determinar períodos de retorno de valores extremos de precipitación y de caudales.

La teoría de los valores extremos fue investigada originalmente por Fisher y Tippett⁽⁵⁾ y aplicada a datos hidrológicos por Gumbel⁽⁸⁾. Dicha teoría establece que una serie de n valores anuales máximos se aproxima o sigue una función de densidad de probabilidad cuando tenemos un número de observaciones grande. Esta teoría ha tenido aplicación inmediata siempre en los valores de caudales en ríos y arroyos, pero también en las precipitaciones, cuando estas pueden considerarse variables independientes, como es el caso de máximos anuales en 24 horas.

Chow⁽⁴⁾ ha demostrado que la mayoría de las funciones de densidad de probabilidad o de frecuencia de las variables de precipitación o de caudales extremos se pueden generalizar bajo una única y sencilla fórmula de gran utilidad práctica, tomando máximos anuales en 24 horas para una serie de años «n» de una estación pluviométrica:

$$y = y_{\text{MEDIA}} + K \sigma_y \quad (1)$$

donde y es el evento con una probabilidad determinada, y_{MEDIA} es el valor medio de la serie de datos, y σ_y es la desviación estándar de la serie de datos. Los valores y_n en nuestro caso son los máximos anuales.

El ajuste de la información de máximos anuales de caudales de un río o de precipitación en una estación meteorológica, puede ajustarse a diferentes funciones de densidad de probabilidad, Gumbel, log-normal, Pearson tipo III. Sin embargo la función más antigua, clásica y aceptada es la de Gumbel⁽⁸⁾, y esta es la que fue utilizada hace 40 años.

El método gráfico de verificación del ajuste de los datos a una determinada distribución de probabilidad es un método clásico práctico, donde los puntos de los valores registrados se grafican sobre un papel en escala semilogarítmica, donde las abscisas son el período de retorno T (escala logarítmica) y las ordenadas (escala aritmética) los valores de precipitación máxima en 24 horas. Los puntos ubicados en el correspondiente papel de acuerdo a un criterio de ploteo, por ejemplo Weibull, tras lo cual se traza la función de densidad y se determina a ojo el grado de ajuste de los datos a la función de probabilidad.

Para la comprobación de un buen ajuste de información pluviométrica máxima en 24 horas con diferentes probabilidades de ocurrencia, a una determinada función de densidad de probabilidades, es necesario en primer lugar clasificar los datos máximos anuales en orden decreciente y a cada uno asignarle un número de orden m , donde el total de datos es el número n . La frecuencia con la cual sería igualado o excedido un evento de orden m es de acuerdo con Weibull⁽⁶⁾:

$$F = m / (n + 1) \quad (\text{Método de Weibull})$$

Hay otros métodos más precisos como la comprobación del ajuste por el método de los mínimos cuadrados, que se analizarán con vistas a investigar el probable efecto de cambio climático.

Actualmente se ha desarrollado el modelo WinTR55⁽⁹⁾, que es un modelo simplificado de procedimientos para estimar escurrimientos y máximas descargas en pequeñas cuencas (< 6.500 ha), con tiempos de concentración menores a 10 horas, así como hidrogramas en la salida de una cuenca con la posibilidad de hasta 10 subcuencas. El programa no sólo es un avance en el sistema, de pasar del DOS a Windows, sino que supone la introducción de un programa hidrológico más avanzado, el TR20⁽⁹⁾.

Por ello, con vistas a realizar una nueva adaptación del modelo TR-55, ahora en versión Windows, que ya hace varios años que está disponible libremente, y dado que también está disponible una clasificación hidrológica actualizada de los suelos del país⁽¹⁰⁾, el objetivo principal del presente trabajo es la actualización del modelo TR-55 en Uruguay a la versión Windows de la adaptación del WinTR55⁽⁹⁾, para resolver problemas hidrológicos e hidráulicos relacionados con obras de ingeniería agrícola. Para ello es fundamental manejar y procesar información pluviométrica máxima en 24 horas, de acuerdo con una metodología, y obtener valores fidedignos, para diferentes períodos de retorno. Este tipo de información ha sido realizado en EEUU confeccionando cartas para diferentes períodos de retorno de las precipitaciones máximas desde 30 minutos hasta en 24 horas⁽¹¹⁾, un estudio clásico de referencia. Este trabajo es una actualización de un trabajo presentado por Koolhaas⁽¹²⁾, donde fue realizado idéntico estudio pero para el período 1940 a 1970 en 81 estaciones pluviométricas de la Red Básica del Servicio Pluviométrico de la Dirección de Meteorología de Uruguay

Materiales y métodos

En este estudio se solicitaron a Inumet (Instituto Uruguayo de Meteorología) los datos de lluvia máxima en 24 horas por año para una serie comprendida entre 1970 y 2010, para las mismas estaciones pluviométricas del estudio previo⁽¹²⁾. Sin embargo, el número de estaciones ha disminuido a 56 por razones presupuestales de disminución de personal afectado a la observación meteorológica, incluso en algunos casos sólo fue posible obtener 20 años de información en lugar de 40 años. En efecto, este es el caso para Pan de Azúcar, donde la información proviene de 20 años salteados y Chuy, $n = 24$ años, entre 1981 y 1996; para el resto, oscila entre 30 y 40 años. La densidad de estaciones tomada determina que en promedio cada estación representa 3.340 km² del Uruguay y, por tanto, considerando áreas circulares, existe una determinación pluviométrica cada 65 km, aproximadamente. La información fue proporcionada en Excel, y el procesamiento de la información fue realizado en el mismo archivo. Para cada una de las estaciones se procedió a obtener la media aritmética, el desvío estándar y el coeficiente de variación, para aplicar la fórmula general de Chow⁽⁴⁾ para el método de Gumbel⁽¹³⁾ o función de densidad de probabilidad para valores extremos.

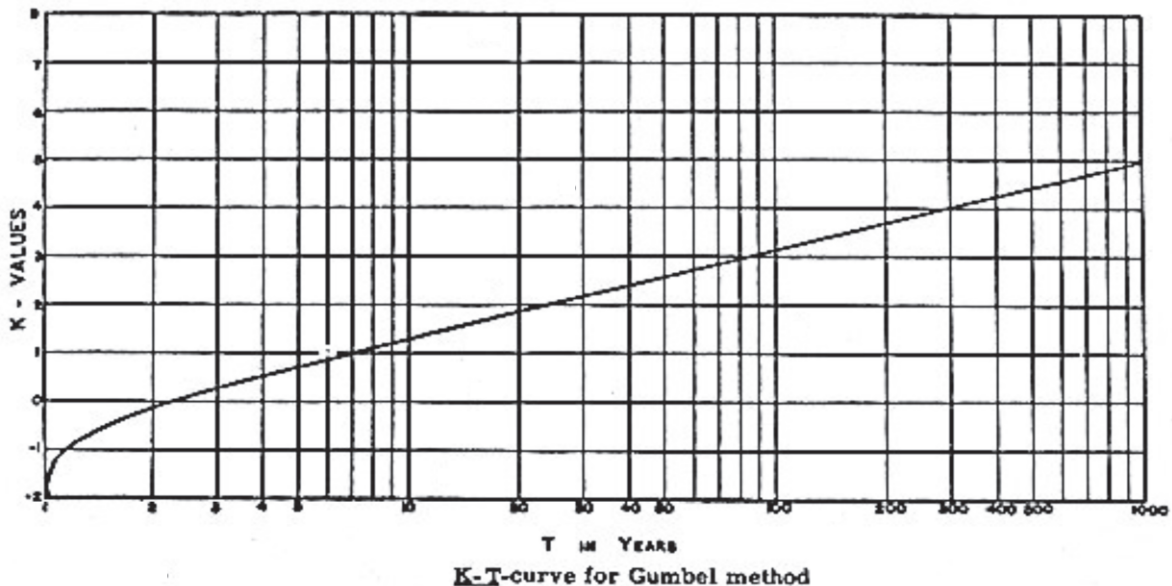


Figura 1. Factor de frecuencia K para el método de Gumbel, utilizando la fórmula general de Chow⁽⁴⁾.

En la fórmula (1) los valores de K, o factor de frecuencia, son función del período de retorno, la Figura 1 muestra una representación del factor de frecuencia en función del período de retorno T.

Una vez procesada la información en las planillas Excel⁽¹⁴⁾, se preparó una cartilla con las diferentes estaciones y los diferentes períodos de retorno. Estos datos son los que se cargaran en archivos de texto para el software WinTR55, los cuales estarán todos dentro de una carpeta nominada Uruguay.

Las cartas se obtienen cargando las coordenadas planas en formato Gauss-Kruger con el valor de P_{24} máxima para cada uno de los períodos de retorno, generándose un archivo de texto con las 51 estaciones pluviométricas georreferenciables a través de coordenadas planas con su valor de precipitación. De esta manera, ese archivo de texto se manejó en el software de generación de curvas de nivel LI Contour⁽¹⁵⁾ para generar las diferentes cartas adjuntas en un CAD⁽¹⁶⁾.

Resultados

Los resultados de este trabajo son las diferentes cartas que se muestran a continuación, donde aparecen arregladas sobre programa CAD las curvas o isolíneas de igual $P_{24\text{horas}}$ en una carta georreferenciada de Uruguay, en coordenadas planas en el sistema ROU-USAMS (Gauss-

Kruger), el mismo sistema cartográfico del Servicio Geográfico Militar del Uruguay utilizado en todas las cartas existentes e impresas del país (Figuras 2 a 7).

Discusión

En este trabajo se asume el ajuste a la distribución Gumbel de los datos, porque la información recabada, serie anual, conforma la hipótesis de la función Gumbel⁽¹¹⁾, y el objetivo principal está orientado a la práctica profesional de ingeniería agrícola.

Sin embargo, fueron analizadas las cartas nuevas con las anteriores⁽¹⁷⁾, detectándose para una frecuencia o período de retorno de T = 5 años que hay incrementos en los valores hacia el Litoral Norte en el orden de +20 mm. En las otras cartas de mayores períodos de retorno la diferencia se incrementa hacia +40 mm y también en la zona central del país (Figura 8). Por lo tanto, en principio podría afirmarse, al considerar diferentes períodos de retorno, que al igual que las precipitaciones anuales, las diferentes estaciones pluviométricas del país muestran un incremento del orden del 10 % en períodos de 20-30 años. Estudios de precipitaciones y su variabilidad han sido realizados por distintos autores en Sudamérica que confirman la tendencia creciente y variabilidad mayor⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾. Esto también se verifica con los máximos anuales en 24 horas. No hay concordancia en el padrón de las curvas representadas

Figura 2. Máxima cantidad de lluvia en 24 horas para un T = 2 años. Serie de datos Inumet (Uruguay). Coordenadas Gauss-Kruger (ROU-USAM) en kilómetros.

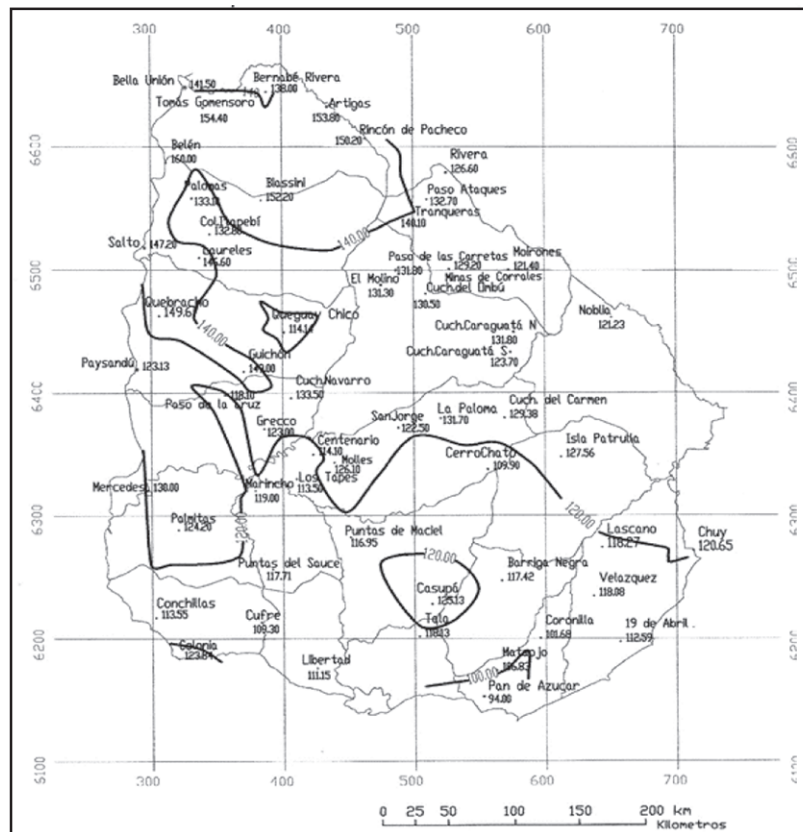
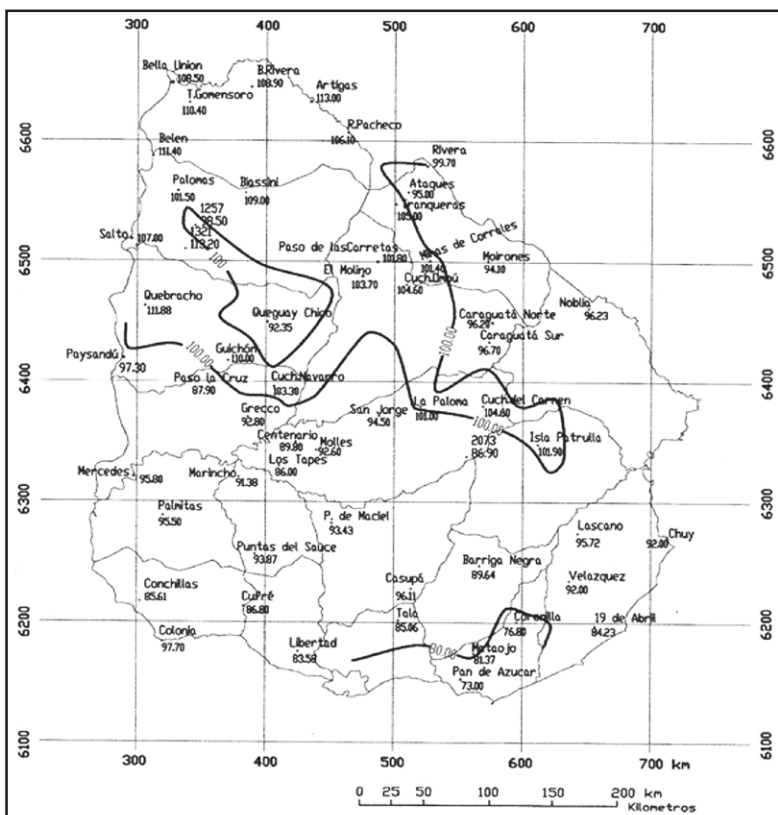


Figura 3. Máxima cantidad de lluvia en 24 horas para un T = 5 años. Serie de datos Inumet (Uruguay). Coordenadas Gauss-Kruger (ROU-USAM) en kilómetros.

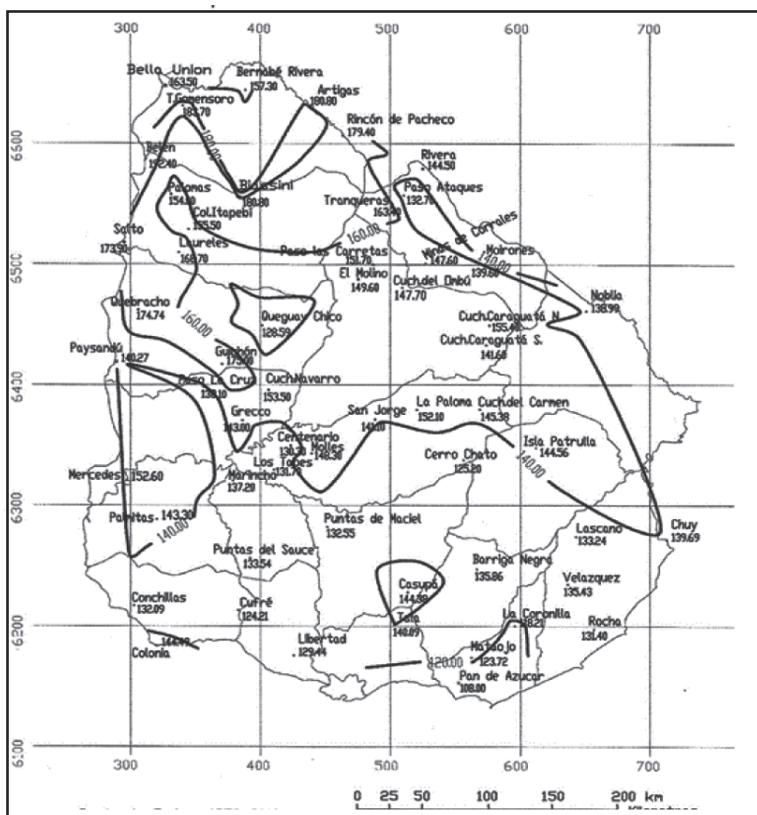


Figura 4. Máxima cantidad de lluvia en 24 horas para un T = 10 años. Serie de datos Inumet (Uruguay). Coordenadas Gauss-Kruger (ROU-USAM) en kilómetros.

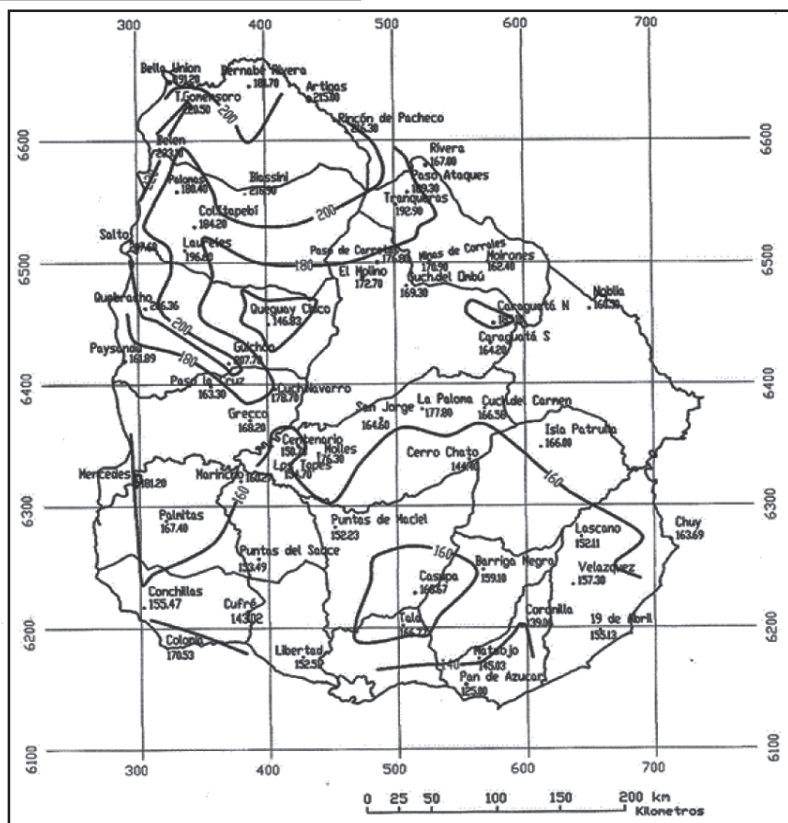


Figura 5. Máxima cantidad de lluvia en 24 horas para un T = 25 años. Serie de datos Inumet (Uruguay). Coordenadas Gauss-Kruger (ROU-USAM) en kilómetros.

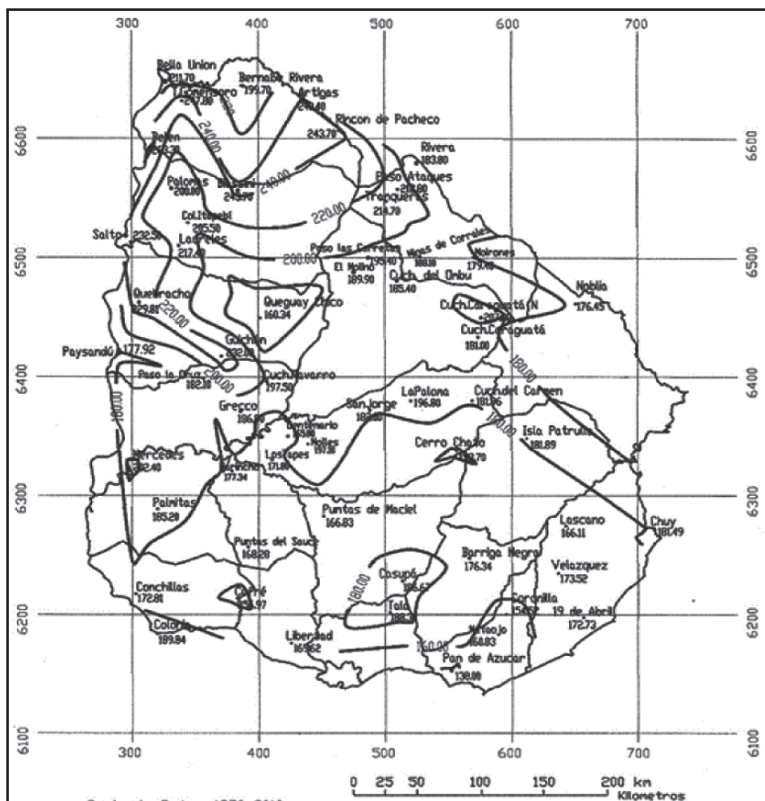


Figura 6. Máxima cantidad de lluvia en 24 horas para un T = 50 años. Serie de datos Inumet (Uruguay). Coordenadas Gauss-Kruger (ROU-USAM) en kilómetros.

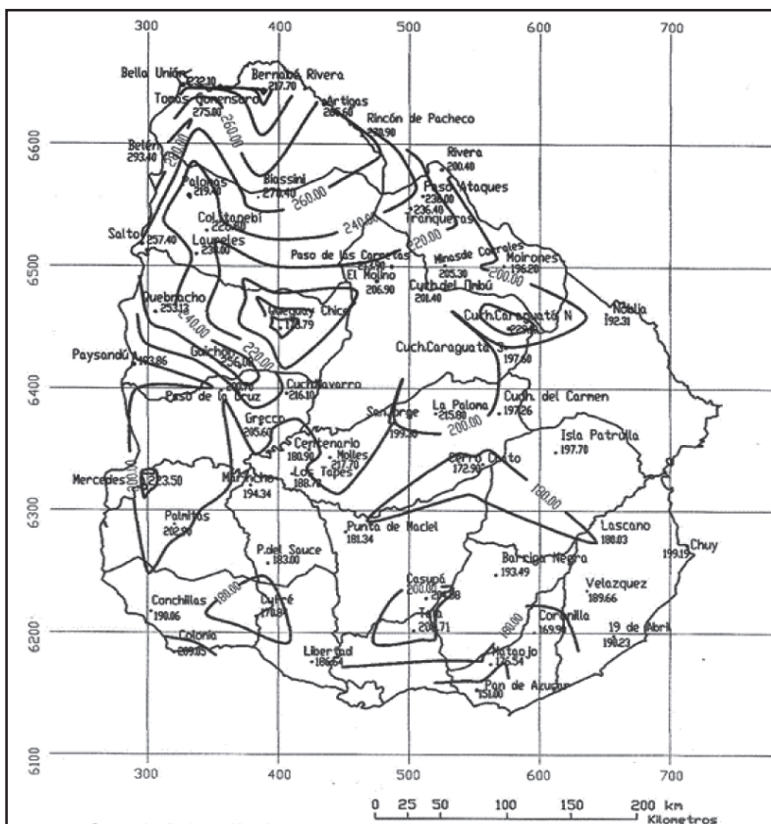


Figura 7. Máxima cantidad de lluvia en 24 horas para un T = 100 años. Serie de datos Inumet (Uruguay). Coordenadas Gauss-Kruger (ROU-USAM) en kilómetros.

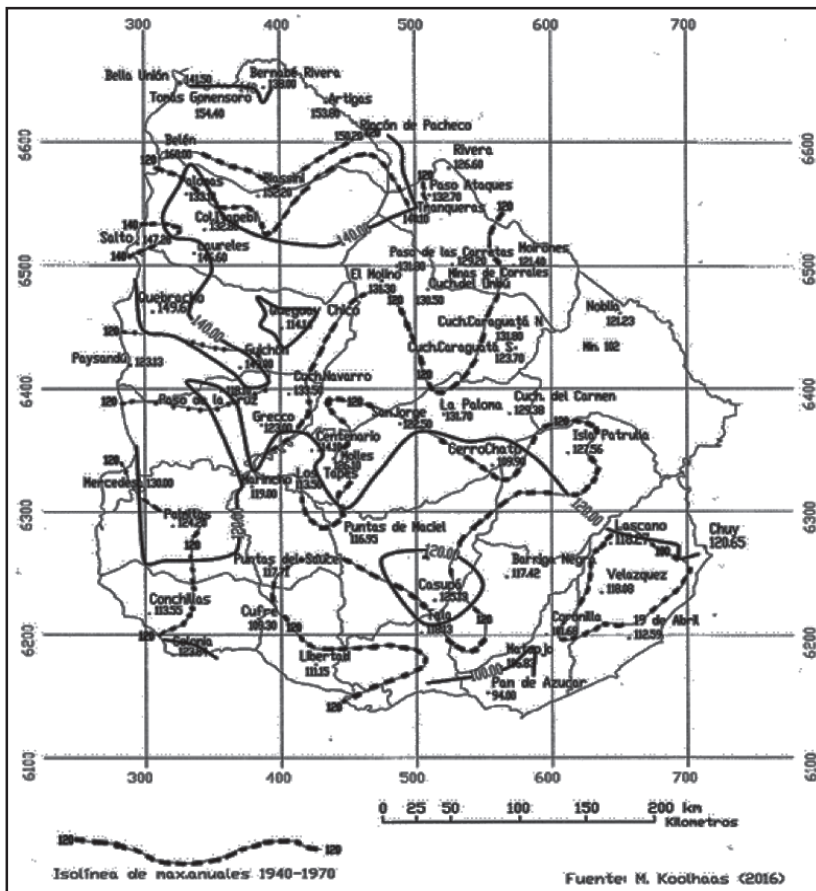


Figura 8. Comparación de máxima precipitación en 24 horas para un T = 5 años con serie 1940-1970.

en los dos estudios; no obstante, en la observación detallada de las cartas se puede apreciar un cambio en las precipitaciones máximas con una variante mayor en períodos de retorno mayores.

Disponibilidad de datos

El conjunto de datos que apoya los resultados de este estudio no está disponible públicamente.

Contribución del autor

El autor es responsable de toda la investigación.

Bibliografía

- 1) Dooge JC. Linear theory of hydrologic systems. Washington: USDA; 1973. 237 p. (Technical bulletin; 1468).
- 2) Cronshey R, McCuen RH, Miller N, Rawls W, Robbins S, Woodward D. Urban hydrology for small watersheds. 2nd ed. [Washington (DC)]: USDA; 1986. [86 p.] Accompanied by: computer program. (Technical release; 55).
- 3) Chow VT. Handbook of applied hydrology. McGraw-Hill: New York; 1964. 572 p.

- 4) Chow VT. A general formula for hydrologic frequency analysis. Trans Am Geophys Union. 1951;32(2):231-7.
- 5) Fisher RA, Tippett LHC. Limiting forms of the frequency distribution of the smallest and largest member of a sample. Math Proc Camb Philos Soc. 1928;24(2):180-90.
- 6) United State Department of Agriculture, National Resource Conservation Service. National engineering handbook: Section 4 Hydrology [Internet]. Washington (DC): USDA; 1965- [cited 2019 Feb 14]. Available from: <https://directives.sc.egov.usda.gov/viewerFS.aspx?hid=21422>.
- 7) VM. Engineering hydrology: Principles and practices. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall; 1989. 640 p.
- 8) Gumbel EJ. Statistical theory of extreme values and some practical applications. [Washington (DC)]: National Bureau Standards; 1954. 51 p. (Applied mathematics series; 33).
- 9) United State Department of Agriculture, Natural Resource Conservation Service. Small watershed hydrology: WinTR-55 user guide [Internet]. [Washington (DC)]: USDA; 2009 [cited 2019 Feb 11]. [about 140 p.] Available from: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1042897.pdf.
- 10) Durán A. Clasificación hidrológica de los suelos del Uruguay. Agrocienza Uruguay. 1997;1(1):15-29.
- 11) Hershfield DM. Rainfall frequency atlas of the United States for duration from 30 minutes to 24 hours and return periods from 1 to

- 100 Years. [Washington (DC)]: United State Weather Bureau; 1961. [115 p.] (Technical paper; 40).
- 12) Koolhaas M. Cartas de cantidad de lluvia en 24-horas para distintos períodos de retorno. In: 5a Reunión Técnica; 1982 Dec 2-3; Montevideo, Uruguay. Montevideo: Facultad de Agronomía; 1982. p. 4.
- 13) Gumbel EJ. Statistics of Extremes. New York: Columbia University Press; 1958. 396 p.
- 14) Microsoft Excel [CD-ROM]. Version 2013. Washington: Microsoft Corporation; 2013. 1 CD-ROM.
- 15) Li Contour: The Next Generation of Contouring Software! [CD-ROM]. Version 5.0. Lincoln: AB Consulting; 1995. 1 CD-ROM. Accompanied by: 1 guide
- 16) Bricsys nv. BricsCAD [Internet]. Version 18.2.14. Gent (BE) : Bricsys nv; c1999-2018 [cited 2019 Feb 14]. Available from: <https://www.bricsys.com/es-uy/>.
- 17) Koolhaas M. Embalses agrícolas: Diseño y construcción. Buenos Aires: Hemisferio Sur; 2003. 336 p.
- 18) Liebmann B, Vera CS, Carvalho LMV, Camilloni IA, Hoerling MP, Allured D, Barros VR, Báez J, Bidegain M. An observed trend in central South American precipitation. *J Clim*. 2004;17(22):4357-67.
- 19) Haylock MR, Peterson TC, Alves LM, Ambrizzi T, Anunciação YMT, Baez J, Barros VR, Berlato MA, Bidegain M, Coronel G, Corradi V, Garcia VJ, Grimm AM, Karoly D, Marengo JA, Marino MB, Moncunill DF, Nechet D, Quintana J, Rebello E, Rusticucci M, Santos JL, Trebejo I, Vincentu LA. Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. *J Clim*. 2006;19(8):1490-512.