

Regionalization of Arroyo Feliciano Watersheds for Peak Flows Prediction

Bidegorry, Matías Alejo; Kohan, Tomas; Russian, Floriana Milagros; Mastaglia, María Inés; Sato, Rodolfo Alejandro; Ramírez, Roxana Guadalupe; Giménez, Vanesa Estefanía; Margasín, Andrea Desiré

Matías Alejo Bidegorry matias.b912@gmail.com
Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Facultad Regional Paraná (FRP), Argentina

Tomas Kohan tomaskohan@hotmail.com
Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Facultad Regional Paraná (FRP), Argentina

Floriana Milagros Russian
floriana.russian@hotmail.com
Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Facultad Regional Paraná (FRP), Argentina

María Inés Mastaglia mmastaglia@frp.utn.edu.ar
Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Facultad Regional Paraná (FRP), Argentina

Rodolfo Alejandro Sato sato.rodolfo@gmail.com
Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Facultad Regional Paraná (FRP), Argentina

Roxana Guadalupe Ramírez
roxanaguadaluperamirez@yahoo.com.ar
Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Facultad Regional Paraná (FRP), Argentina

Vanesa Estefanía Giménez
vanesagimenez291@gmail.com
Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Facultad Regional Paraná (FRP), Argentina

Andrea Desiré Margasín
andreamargasin@gmail.com
Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Facultad Regional Paraná (FRP), Argentina

Tecnología y Ciencia
Universidad Técnologica Nacional, Argentina
ISSN: 1666-6917
ISSN-e: 1666-6933
Periodicidad: Cuatrimestral
núm. 44, 2022
nsalvi1981@gmail.com

Recepción: 19 Octubre 2021
Aprobación: 18 Abril 2022

URL: <http://portal.amelica.org/amelia/journal/748/7483819001/>

Resumen: El trabajo consiste en el estudio y regionalización de caudales máximos de las subcuencas del Arroyo Feliciano, considerando que este curso de agua posee una sola estación de aforo.

A partir de un modelo hidrológico calibrado, se analizaron distintas distribuciones temporales de tormenta para determinar aquella para la cual los caudales simulados se aproximan a los observados, asumiendo un margen de error considerado como aceptable.

Se modelaron las subcuencas para tormentas de distintas recurrencias, distribuidas temporalmente según un patrón adoptado, y se determinaron distintos parámetros físicos para cada una de ellas.

Con esta información, se realizó un análisis estadístico multivariado que permitió definir regiones hidrológicamente homogéneas y seleccionar los parámetros y variables de mayor incidencia en los valores de caudales máximos.

Como resultados se obtuvieron fórmulas prácticas que permiten alcanzar una estimación preliminar de caudales, en base a las características fisiográficas de las subcuencas, y la precipitación máxima media areal, para una recurrencia de 2 años. Además, se definieron ecuaciones regionales de frecuencia para calcular un índice de creciente, el cual permite estimar el caudal para cualquier recurrencia de interés, entre 2 y 100 años, a partir de los caudales de 2 años determinados por la ecuación de regionalización.

Palabras clave: Cuenca Hidrográfica, Modelo Hidrológico, Regionalización, Estimación de Caudales Máximos.

Abstract: The paper consists of the study of the Feliciano Stream basin, which has a single gauging. On the basis of a calibrated model, it was sought to use a storm distribution compatible with the observed flow information, so that its error would be considered acceptable.

The sub-basins were modeled for storms of different recurrences distributed in time according to the adopted pattern and different physical parameters were determined for each one of them.

With the information generated, a multivariate statistical analysis was carried out that will define hydrologically homogeneous regions and select the parameters and variables with the highest incidence in the maximum flow values



With the results of maximum flows obtained in the hydrological model for the different sub-basins and preset recurrences, a list of their most important variables and parameters was carried out. Afterwards, a multivariate statistical analysis was performed in order to define hydrologically homogeneous regions and establish which variables had a greater incidence in the flow values.

As a result, practical formulas were obtained that allow a preliminary estimate of flows to be obtained based on the physiographic characteristics of the sub-basins and the maximum mean areal precipitation for a recurrence of 2 years. In addition, regional frequency equations were defined, enabling the calculation of a flood index, which translates the estimated flow for any adopted recurrence between 2 and 100 years.

Keywords: Watersheds, Hydrological Model, Regionalization , Maximum Flow Prediction.

INTRODUCCIÓN

El dimensionamiento adecuado de estructuras hidráulicas requiere el conocimiento de los caudales máximos que debe soportar la estructura (Cashalo et al, 2017). En la estimación de caudales de diseño, cuando no se dispone de una estación de aforos en el lugar de análisis donde debe diseñarse una obra, suelen utilizarse modelos de transformación de lluvia–caudal, a los efectos de obtener los caudales picos de diseño, en base a una determinada tormenta de diseño (Danill et al., 2005). La precisión de los resultados de los modelos depende de la calibración y la validación.

Uno de los principales problemas que se presentan en el diseño de las obras hidráulicas, en la provincia Entre Ríos, es la falta de información para realizar una correcta estimación del caudal de diseño. En muchos casos es difícil ejecutar la calibración de un modelo hidrológico debido a la escasez de estaciones de aforo, esto trae como consecuencia errores en la precisión de los caudales de diseño. Muchas obras hidráulicas ejecutadas correctamente pueden fallar por la ocurrencia de caudales que superan los estimados, generando inundaciones o roturas, con las consecuentes pérdidas económicas. Por el contrario, en otros casos se puede llegar a un sobredimensionamiento de las obras debido a una sobreestimación de los caudales de diseño.

Una posibilidad para disminuir la incertidumbre en los caudales máximos estimados en cuencas no aforadas es recurrir a técnicas de regionalización.

El término regionalización se utiliza en Hidrología para denominar la transferencia de información de un sitio a otro dentro de un área de comportamiento hidrológico semejante (Tucci, 2007). Así, se emplea la regionalización para obtener información hidrológica en sitios sin datos o con poca información (Sabahattin y Vijay, 2008).

En cada región homogénea se analiza qué variables afectan en mayor medida al caudal, para integrarlas en ecuaciones que permitan calcular, con un margen de error aceptable, el caudal de descarga para diferentes recurrencias (Paris y Zucarelli, 2004).

En este trabajo de investigación, se analizó la cuenca del Arroyo Feliciano que posee una sección de control en su cauce principal: la estación “Paso Medina”, operada por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH).

El objetivo del trabajo fue obtener fórmulas de estimación de caudales, para cada una de las regiones definidas como hidrológicamente homogéneas, que permitan calcular el valor de caudal máximo, a partir de variables de fácil determinación, pertenecientes a cada subcuenca. Estas fórmulas pueden ser utilizadas como referencia para estimar valores de caudales máximos para distintas recurrencias en cuencas que presenten características similares a las regiones para las cuales fueron definidas. Estos resultados no pretenden reemplazar a la modelación hidrológica en el cálculo de caudales, sino dar valores de referencia en cuencas no aforadas.

DESARROLLO

Descripción del área de estudio

La cuenca del arroyo Feliciano se encuentra ubicada en el noroeste de la provincia de Entre Ríos (*Figura 1*). Este arroyo es afluente del río Paraná. Pertenece a la Cuenca del Plata y su cuenca tiene un área de 8.203 Km².

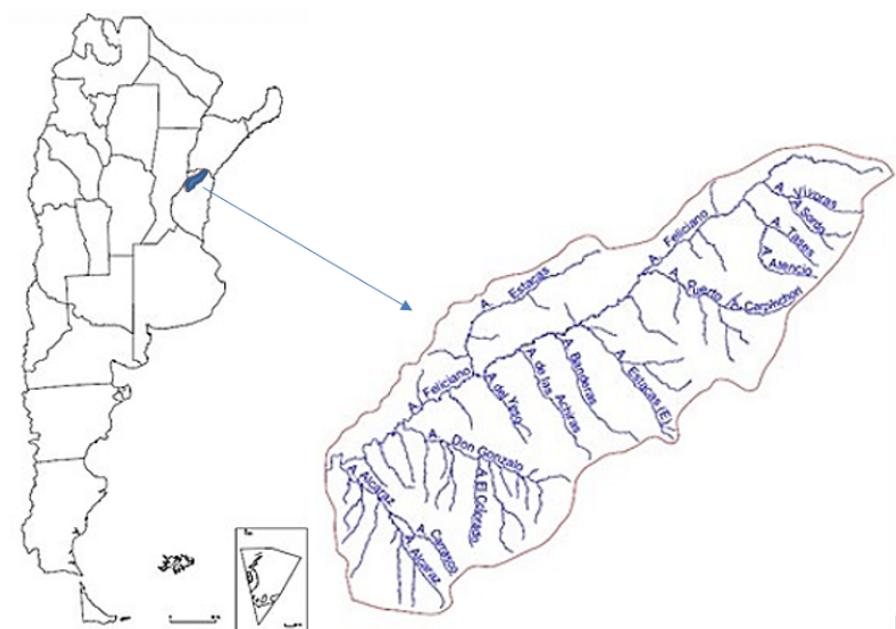


Figura 1
Cuenca del Arroyo Feliciano – Ubicación y superficie

El arroyo Feliciano, curso principal de la cuenca, nace en la Cuchilla Grande, en el noreste de la provincia, fluye del oeste al sudoeste atravesando la provincia y se extiende por tres departamentos entrerrianos: Federal, Feliciano y La Paz. Sus afluentes más importantes son los arroyos Estacas, Don Gonzalo, Alcaraz, Puerto, de las Achiras y Banderas. La longitud del curso principal es de 265 Km siendo su elevación máxima de 80 m y la mínima de 20 m.

Análisis de frecuencia de caudales

Se utilizaron datos hidrométricos obtenidos a partir de la estación de aforo Paso Medina, operada por la SSRH, la cual registra valores de caudales desde el año 1975.

Se seleccionaron los valores máximos registrados en cada año hidrológico y se realizó un análisis de frecuencia aplicando el programa AFmulti, desarrollado por la Facultad de Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral (Cacik y Paoli, 1996). Este programa permite evaluar diferentes funciones de distribución y analizar gráficamente su ajuste.

En la *Figura 2* se grafican las frecuencias experimentales y las distintas funciones de distribución analizadas. Mediante el cálculo de los errores cuadráticos medios de frecuencia (ECMF) y variable (ECMV) (Figura 3) y el análisis visual de la figura 2, se seleccionó la función de Pearson como la de mejor ajuste.

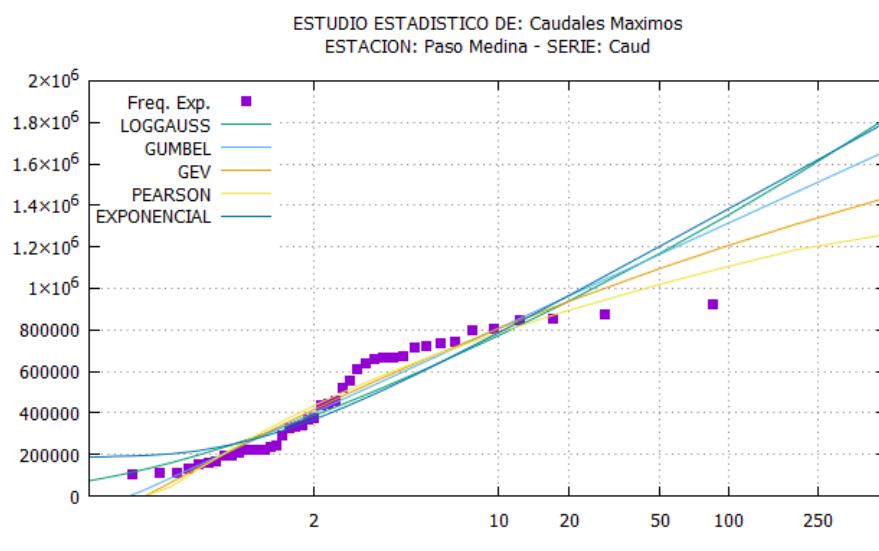


Figura 2
Análisis de Frecuencia – Serie de Caudales Máximos en [m³/s]

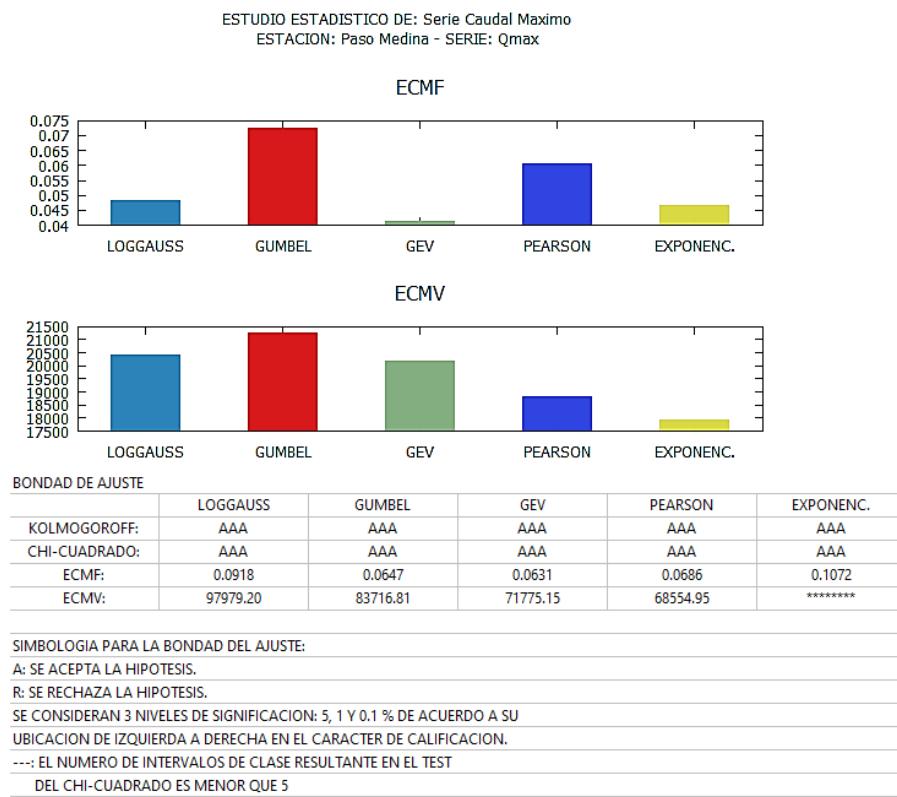


Figura 3
Errores ECMF y ECMV

La función de distribución de *Pearson* se desarrolló en base a la función de distribución gamma y cuenta con tres parámetros: λ , β y $\#$ que se obtienen en función de la desviación estándar, la media y el coeficiente de asimetría (Chow et al., 2000). La expresión de la función es la siguiente:

$$f(x) = \frac{\lambda^\beta (x - \epsilon)^{\beta-1} e^{-\lambda(x-\epsilon)}}{\Gamma(\beta)} \quad (1)$$

dónde:

X: variable aleatoria.

λ , β , #: parámetros del método.

$\Gamma(\beta)$: función gamma (Abramowitz y Stegun, 1965).

Análisis de la distribución temporal adecuada para las precipitaciones de diseño

La precipitación de diseño o proyecto es una variable que se puede caracterizar a través de la intensidad, la duración y la recurrencia. Por ello se utilizaron las curvas Intensidad-Duración-Recurrencia (IDF) (*Figura 4*), desarrolladas en el proyecto de investigación “Estudio de Tormentas de diseño en cuencas extensas de la Provincia de Entre Ríos” (López et al., 2020), publicación del grupo de investigación en Hidrología de la Facultad Regional Paraná UTN. Se calcularon las intensidades a partir de las precipitaciones medias areales de la cuenca, para

duraciones de 4, 6, 8, 10 y 12 días y para las recurrencias de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

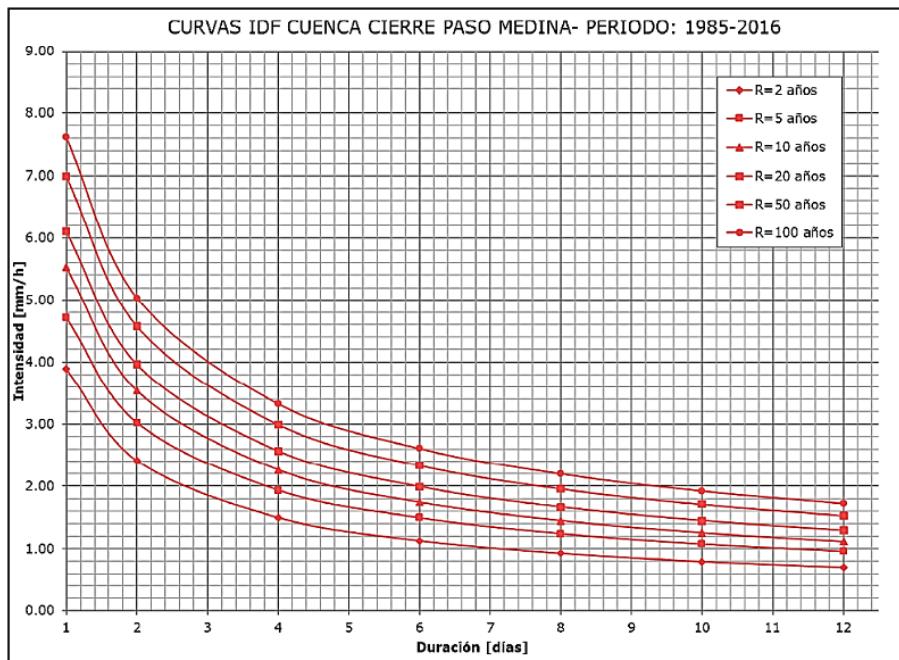


Figura 4

Curvas IDF – Cuenca del Arroyo Feliciano con cierre en Paso Medina (Fuente: “Estudio de Tormentas de diseño en cuencas extensas de la Provincia de Entre Ríos”. López et al., 2020)

Las intensidades obtenidas de las IDF permiten el cálculo de la precipitación para la duración y recurrencia de interés. La distribución temporal de la precipitación se realizó a través de dos métodos: el método de patrones temporales y el de bloques alternos.

1. Patrones temporales

El método de patrones temporales se basa en utilizar porcentajes de precipitación para distintos intervalos de tiempo, los que se obtienen del análisis estadístico al que se llega observando la intensidad de las tormentas locales y dividiéndola en cuantiles. En este caso, se utilizó el patrón de la *Figura 5*, obtenido como un promedio de los resultados del estudio “Procedimientos para la Estimación de Tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos” (Zamanillo, 2008) de la UTN Concordia.

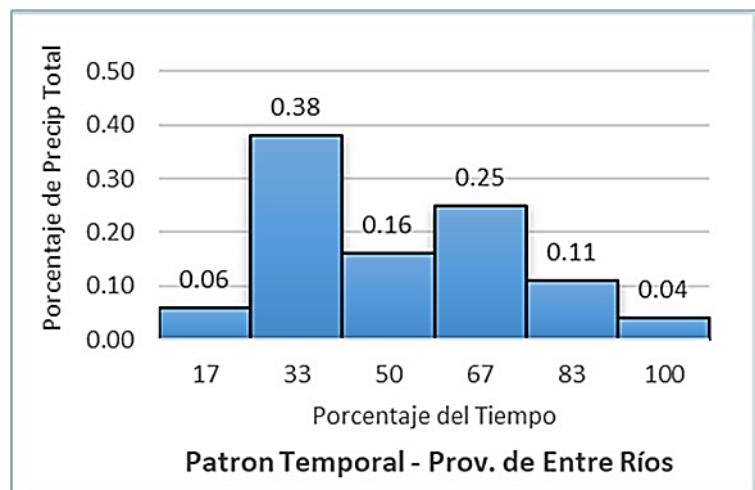


Figura 5
Promedio de Patrones Temporales

2. Bloques alternos

El método de bloques alternos consiste en ordenar los valores de precipitación, obtenidos de las curvas IDF para los distintos intervalos, ubicando el mayor valor en el centro de la duración de la tormenta y alternando los demás bloques en orden descendiente a un lado y al otro del máximo, como se indica en *Figura 6*.

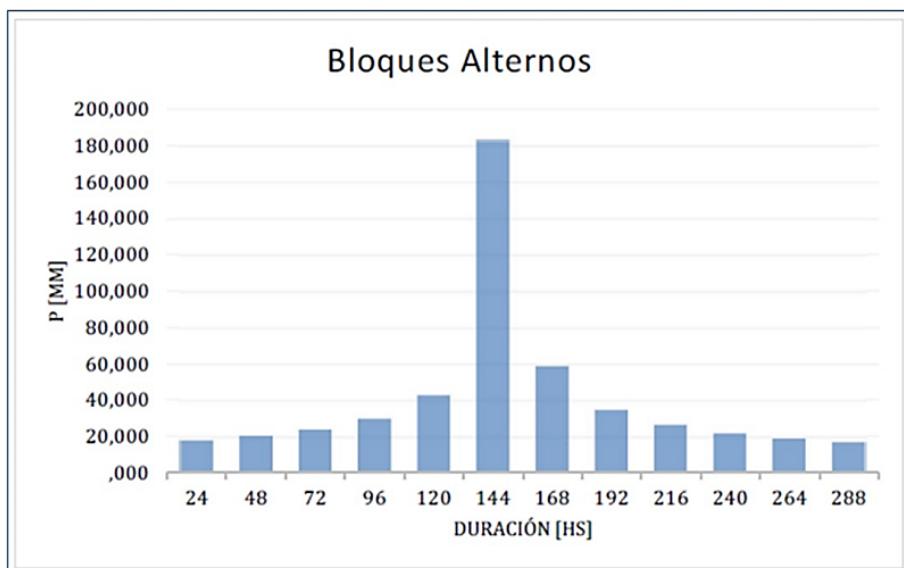
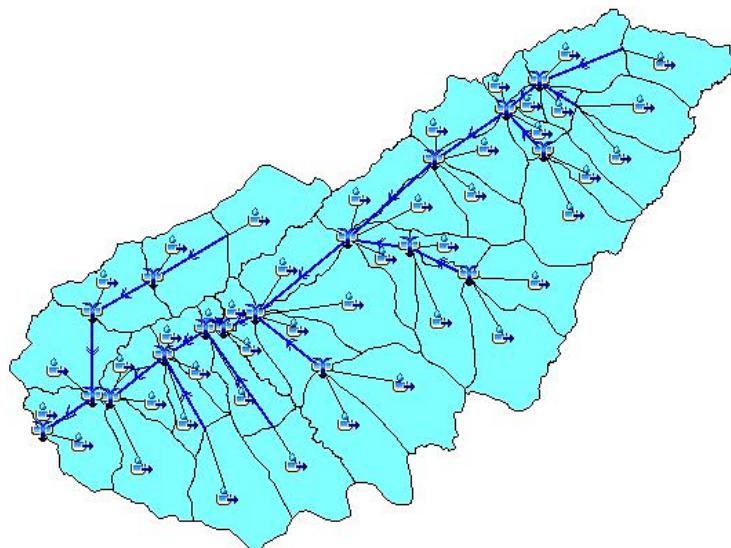


Figura 6
Distribución por Bloques Alternos

Explotación del modelo hidrológico

Para simular el proceso de transformación de lluvia en caudal, se dispuso de un modelo calibrado con cierre en Paso Medina (*Figura 7*). El modelo hidrológico utilizado, implementado con el programa HEC HMS (Feldman, 2000), fue calibrado en el cierre con la información de caudales de la estación Paso Medina, en un estudio previo al presente trabajo (Puente de RP N° 5 sobre el Arroyo Feliciano, Justo Domé y Asociados S.R.L, 2019).

Paso medina

**Figura 7**

Modelo Hidrológico del Arroyo Feliciano con cierre en
Paso Medina (Fuente: Justo Domé y Asoc. SRL. 2019)

Se realizó la explotación del modelo para las distintas duraciones de tormenta, las recurrencias y las dos distribuciones temporales, obteniendo valores de caudales.

Los caudales máximos obtenidos en la simulación se constataron con los determinados por análisis estadístico de caudales máximos observados en la Estación Paso Medina. Mediante la *ecuación (2)* Se calcularon el Error Cuadrático Medio (ECM) (Tabla 1) entre los resultados de caudales simulados y los determinados por análisis estadístico para cada distribución de probabilidades analizada en el punto “Análisis de Frecuencia de caudales”. En los caudales simulados, se consideraron los resultados obtenidos para precipitaciones distribuidas según el método de Bloques Alternos y por Patrones Temporales.

$$\text{ECM}(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{pi})^2 \quad (2)$$

dónde:

n: cantidad de datos evaluados.

Q_p: caudal estimado a partir de función de probabilidad.

Q_o: Caudal observado.

Del análisis se concluyó, tanto gráfica (Figura 8) como analíticamente (Tabla 1), que la distribución temporal de tormentas de mejor ajuste era la de patrones temporales.

También se definió que las duraciones de tormentas, que generan los caudales de mayor precisión, eran las de 8 y 10 días (Figura 8).

Estas conclusiones se utilizaron posteriormente en el cálculo de hietogramas, para el resto de las subcuenca.

Tabla 1
Errores Cuadráticos Medios

Menores Errores Cuadráticos Medios (ECM)		
Distribución	Patrones Temporales	Bloques Alternos
Log Gauss	164,0	198,2
Pearson	63,8	89,5
Wakeby	182,1	209,3

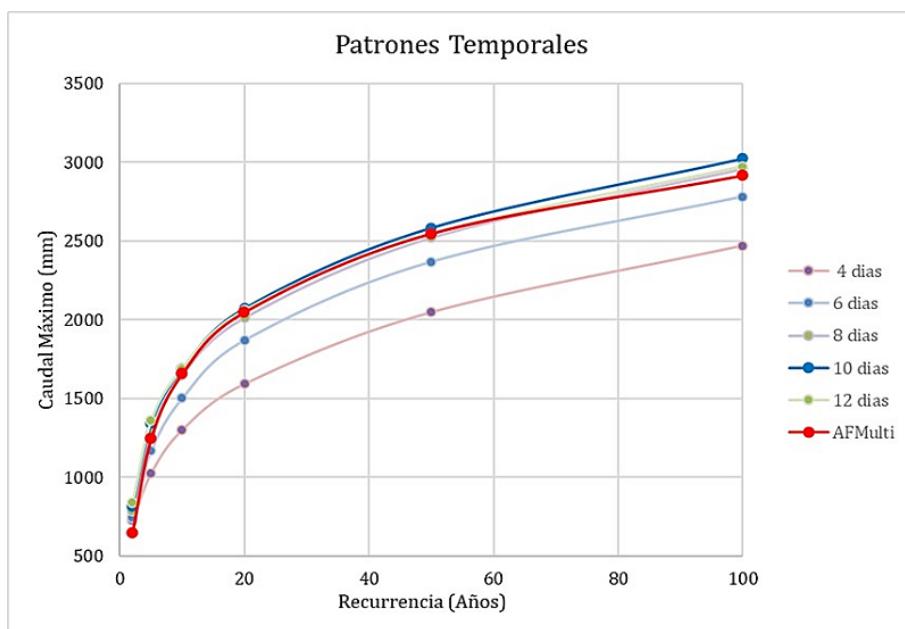


Figura 8
Comparación Pearson – Modelo Hidrológico por Patrones Temporales

Categorización de subcuenca

Se realizó la clasificación de las subcuenca, categorizándolas en distintos órdenes, en función de la cantidad de tramos recorridos por el cauce principal dentro de una subcuenca hasta su cierre.

En la *Figura 9* se grafica el modelo de categorización utilizado. Se asignó un orden de 1 a todas las subcuenca que no tienen tramos de tránsito, es decir, donde no se realiza el proceso de traslado de hidrogramas a través de cursos, en este caso los cursos principales se denominan cursos de primer orden. La clasificación del drenaje aumenta si los cursos confluyen. Al avanzar aguas abajo, cuando dos corrientes de orden diferente se encuentran, el canal aguas abajo aumenta su orden. De acuerdo con el orden de los tramos, se clasificaron las subcuenca en números de órdenes crecientes. Llegando así a tener un total de 15 órdenes de jerarquización.

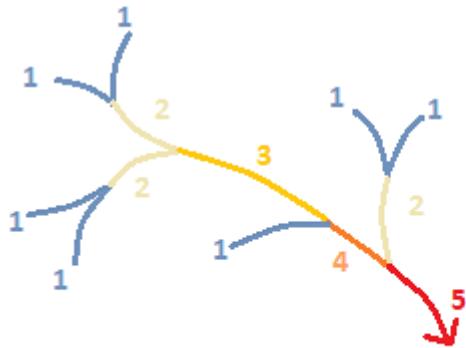


Figura 9
Método de Categorización de Subcuencas

La delimitación de cuencas y la determinación de los parámetros fisiográficos se realizaron a partir del análisis del modelo digital de elevación del terreno, con el programa QGIS (QGIS.org, 2022). Además, el mismo posibilitó visualizar la cuenca completa con sus cauces (*Figura 10*) y generar mapas para cada orden de subcuencas, como el de la *Figura 11* donde se puede visualizar el orden 2 de la categorización.

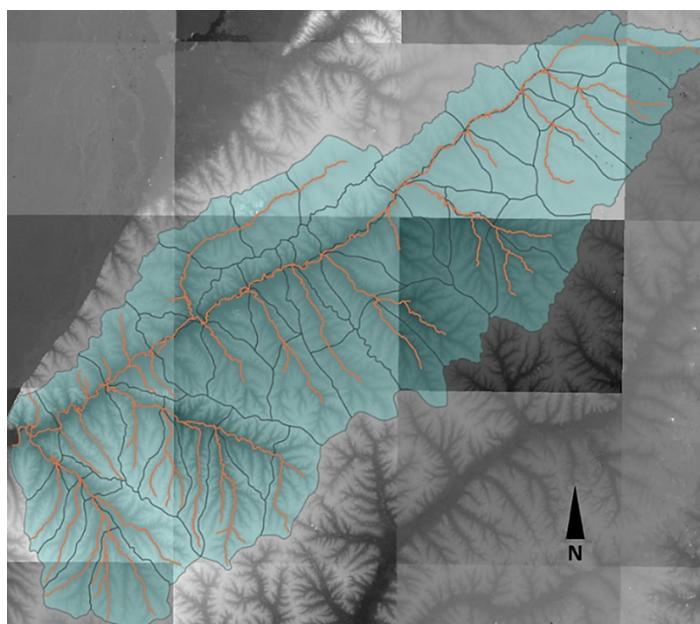


Figura 10
Cuenca Completa del Arroyo Feliciano y Cursos de Agua

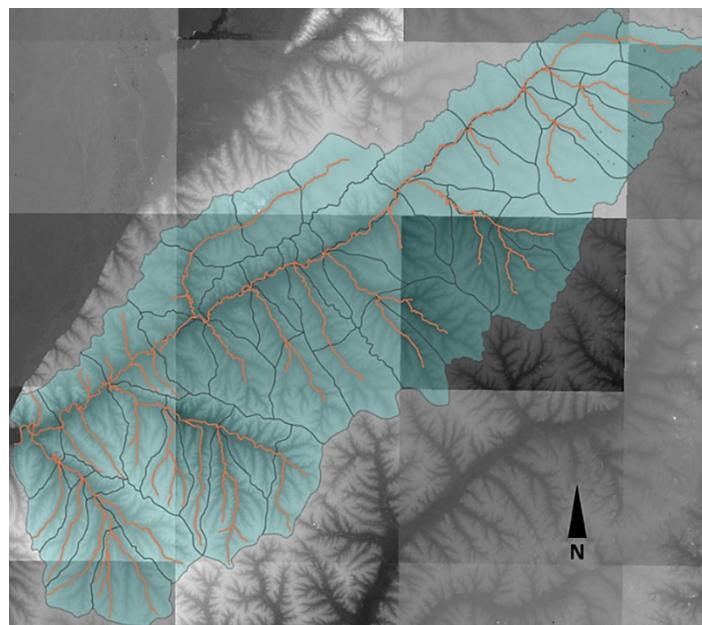


Figura 11
Orden de Categorización 2. Cuenca del Arroyo Feliciano

El modelo de cuenca se extendió hasta la desembocadura del Arroyo Feliciano en el río Paraná, obteniéndose con el programa QGIS los datos que permitieron extender el modelo hidrológico disponible hasta la desembocadura del arroyo. Para esto, se agregaron las subcuenca que se encuentran aguas abajo de la estación de aforos de Paso Medina.

Cálculo de hietogramas de subcuenca

La construcción de los hietogramas se realizó a partir de las curvas IDF disponibles (López et al., 2020), donde se definieron curvas IDF para subcuenca con cierres en secciones de control de interés (*Figura 12*).

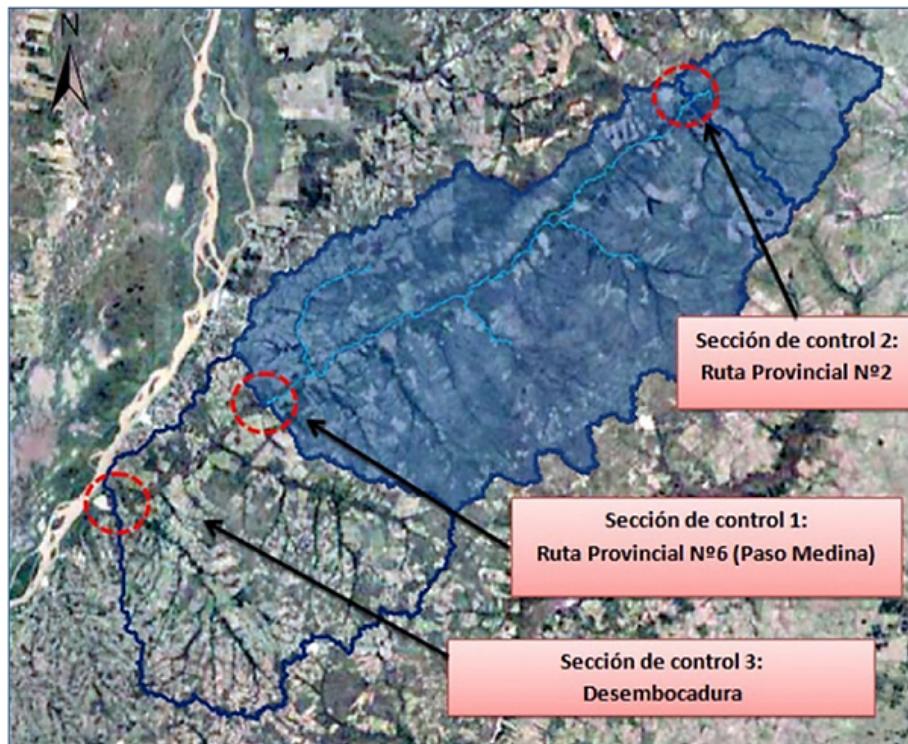


Figura 12

Delimitación de Subcuencas para Curvas IDF (Fuente: “Estudio de Tormentas de diseño en cuencas extensas de la Provincia de Entre Ríos”. López et al., 2020)

La selección adecuada de la curva IDF se realizó en función del promedio del área de las subcuencas pertenecientes a cada orden, adoptándose la correspondiente a la sección de control con área de aporte más cercana, afectada luego por la relación entre coeficientes de decaimiento areal del área media considerada y la correspondiente a la IDF, como se explica más adelante.

La determinación de la duración de las tormentas se realizó en función del tiempo de concentración (T_c) de las subcuencas. Para obtener este parámetro, se utilizó la fórmula empírica brindada por Kirpich, *ecuación (3)*

$$T_c = 0.87 * \left(\frac{L_{cp}^5}{D_h} \right)^{0.385} \quad (3)$$

dónde:

L_{cp} : Longitud de cauce principal en km.

D_h : Diferencia de altura entre la cota superior e inferior

Según el análisis de errores mencionado anteriormente, la mayor aproximación de los caudales modelados con los observados en Paso Medina se presentó para tormentas de duraciones de 8 y 10 días, lo cual representa entre 2 y 3 veces el T_c en la estación de aforos, adoptándose esta relación para la determinación de la duración de tormenta en las distintas subcuencas (*Tabla 2*).

Tabla 2
Tiempos de Concentración Promedio y Duraciones de Tormenta Adoptadas

Orden	Tiempo de Concentración Promedio (hs)	Duración de Tormenta Adoptada (días)
1°	14,04	1 día y 1,5 días
2°	22,65	2 días
3°	30,60	3 días
4°	37,25	4 días
5°	51,10	6 días
6°	65,07	8 días
7°	74,26	8 días
8°	76,66	8 días
9°	83,43	10 días
10°	90,42	10 días
11°	90,75	10 días
12°	99,83	12 días
13°	108,04	12 días
14°	117,74	12 días

La distribución areal de las precipitaciones se consideró mediante la aplicación de un coeficiente de decaimiento areal obtenido a partir de ecuaciones definidas en “Estudio de Tormentas de diseño en cuencas extensas de la Provincia de Entre Ríos” (López et al., 2020), en función de las áreas de las subcuenca consideradas, la duración y la recurrencia de la tormenta.

Con la *ecuación (4)* se calcularon las precipitaciones medias areales (PMA) para cada una de las 15 agrupaciones de las subcuenca, para las 6 recurrencias definidas anteriormente.

$$PMA(X) = PMA(ER) \times \frac{CDA(X)}{CDA(ER)} \quad (4)$$

PMA (X) = Precipitación Media Areal de la cuenca estudiada

PMA (ER) = Precipitación Media Areal de la Estación de Referencia

CDA (X) = Coeficiente de Decaimiento Areal de la cuenca estudiada, (se ingresa con el área de la cuenca).

CDA (ER) = Coeficiente de Decaimiento Areal Estación de la Estación de referencia, (se ingresa con el área de la estación de la referencia).

Las PMA resultantes se distribuyeron temporalmente, mediante el método de patrones temporales, obteniendo los hietogramas para cada subcuenca.

Estimación de caudales mediante modelación

A partir del modelo hidrológico inicial, se realizaron 15 modelos diferentes, uno para cada orden definido en la categorización y se realizó la explotación para los hietogramas de las distintas recurrencias, obteniendo así los valores de caudales máximos correspondiente a cada subcuenca y recurrencia.

Parámetros y variables seleccionados

La regionalización de caudales involucró la elección y cuantificación de aquellas variables consideradas relevantes para su estudio y la determinación de cuencas hidrológicamente homogéneas. Previamente, se seleccionaron 12 variables, para evaluar su incidencia en la respuesta hidrológica de las subcuencas, a saber:

1. 1. Área
2. Raíz Cuadrada del Área
3. Perímetro
4. Índice de Compacidad

$$Tc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (5)$$

dónde:

P: perímetro de la subcuenca.

A: Área de la subcuenca.

1. 5. Longitud del Cauce Principal
6. Pendiente del Cauce

$$S = \frac{Lcp}{Dh} \quad (6)$$

dónde:

Lcp: longitud del cauce principal en m.

Dh: desnivel entre cota superior y cota inferior en m.

1. 7. Tiempo de Concentración (3)
8. Coeficiente de Almacenamiento de Clark

$$Tc = 16.4 * L^{0.342} * S^{-0.790} \quad (7)$$

dónde:

L: longitud del cauce principal.

S: pendiente del cauce medido en pie/milla.

1. 9. Coeficiente Lambda

$$\lambda = \frac{R}{Tc+R} \quad (8)$$

dónde:

R: Coeficiente de almacenamiento de Clark.

Tc: Tiempo de concentración.



- 1.
10. Curva Número del Servicio de Conservación de Suelo de los Estados Unidos
11. Precipitación Media Areal (4)

Análisis Estadístico Multivariado

Los métodos estadísticos adquieren gran importancia en el manejo de datos hidrológicos debido fundamentalmente a su capacidad de optimización y síntesis en la generación de información. Además, al considerar numerosas variables, el problema en estudio presenta una múltiple referenciación y se conforman bases de datos de gran tamaño. Esta situación conlleva la necesidad de adoptar un enfoque multivariado para el procesamiento y el análisis de las variables ya que, de lo contrario, sólo se realizaría la interpretación circunscripta e independiente de cada una de ellas (Paris y Zucarelli, 2010).

Para poder realizar este análisis, con variables de distinto dimensionamiento, se optó por la normalización estadística. Esta consiste en la transformación de la escala de la distribución de una variable, con el objetivo de poder hacer comparaciones respecto de conjuntos de elementos, mediante la eliminación de los efectos de influencias. En otras palabras: todas las variables deben tener una media 0 y una desviación estándar de 1. Si antes de calcular los componentes no se estandarizan las mismas, aquellas cuya escala sea mayor dominarán al resto.

Se analizaron las variables mediante 3 métodos de análisis estadístico multivariado, utilizando el software RStudio (RStudio Team, 2015). Estos se describen a continuación:

Coeficientes de correlación

Tiene por finalidad visualizar si existe alguna relación entre dos o más variables, es decir, si los cambios en una o varias de ellas influyen en los valores de la variable dependiente. Si ocurre esto, indicará que las variables están correlacionadas o bien que hay correlación entre ellas.

El resultado del análisis se representa a través del Coeficiente de Correlación de Pearson, cuyo valor puede variar desde menos uno hasta uno. Cuanto más cercano a uno sea, en cualquier dirección, más fuerte será la asociación lineal entre las dos variables.

En la *Figura 13* se muestra el resultado del análisis para la recurrencia de 2 años.



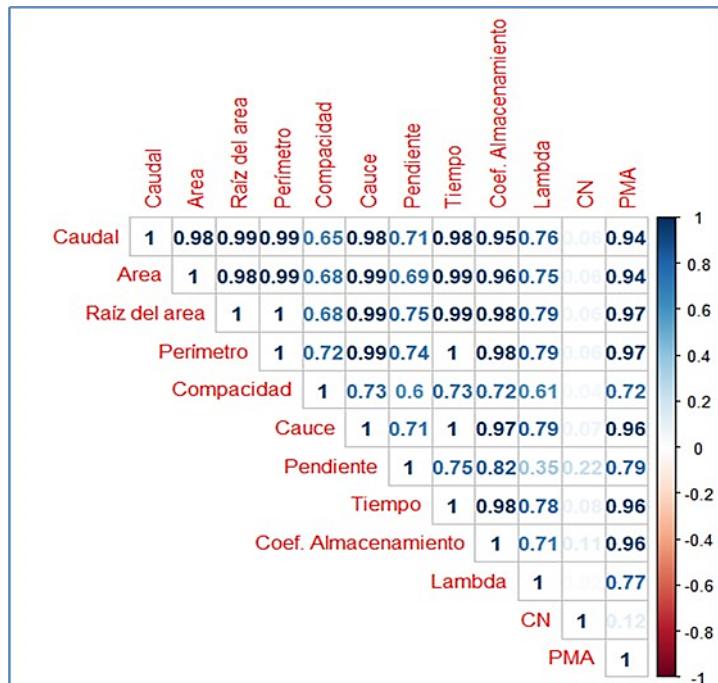


Figura 13
Coeficientes de Correlación entre Variables – Recurrencia 2 Años

Análisis de Componentes Principales

Este método estadístico permite graficar los dos componentes principales de cada una de las variables, en un par de ejes de coordenadas en las direcciones X-Y. En este tipo de gráfico, pueden observarse las relaciones entre las variables según coincidan, o no, la magnitud y la dirección de los vectores.

En la *Figura 14* se muestra el resultado del análisis para la recurrencia de 2 años.

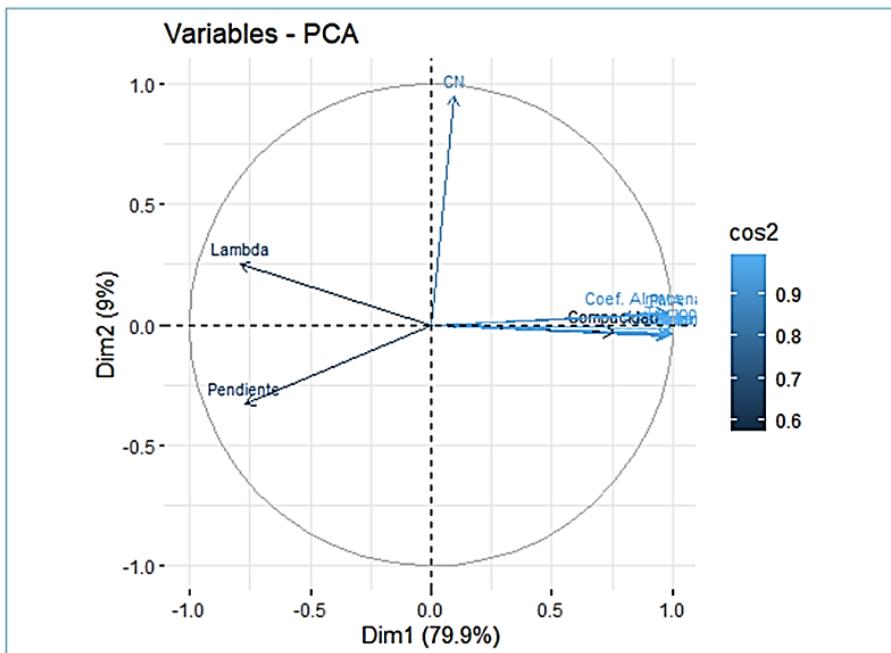


Figura 14
Análisis de Componentes Principales – Recurrencia 2 Años

Agrupamiento de Conglomerados - Clúster

El Análisis de Conglomerados es una técnica estadística multivariante que busca agrupar individuos o variables, a través de diferentes métodos o algoritmos, tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos, arrojando un gráfico llamado dendrograma como resultado.

A partir de una matriz de individuos-variables, en este caso de 36 subcuenca con 12 variables en cada una, sitúa las variables o los individuos en grupos homogéneos, conglomerados o clústeres, no conocidos de antemano, pero sugeridos por la propia esencia de los datos, de manera que individuos que puedan ser considerados similares sean asignados a un mismo clúster, mientras que individuos diferentes se localicen en clústeres distintos.

En la *Figura 15* se muestra el resultado del análisis para la recurrencia de 2 años.

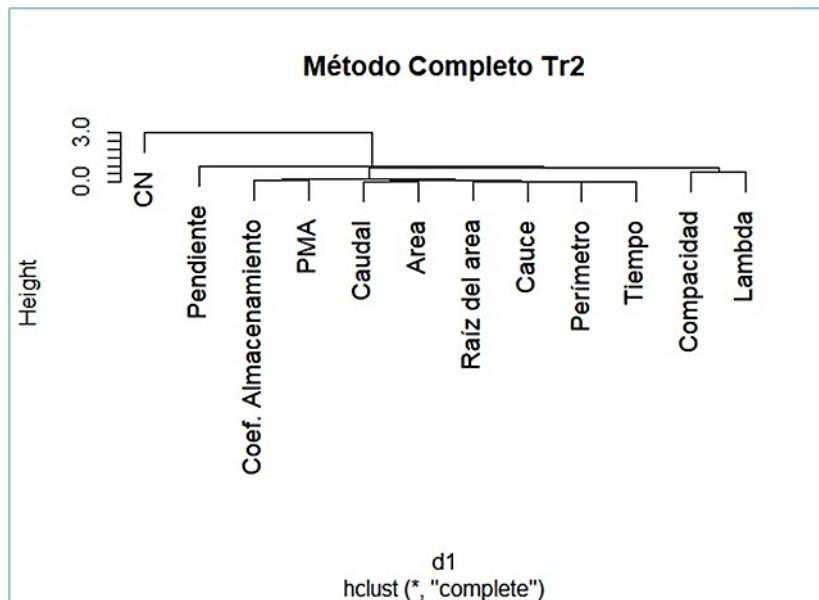


Figura 15
Método Completo o de distancias máximas – Recurrencia 2 Años

Resultados del análisis multivariado. Selección de Variables

Del análisis anterior puede notarse que algunas variables están estrechamente relacionadas entre sí. Por ejemplo, el área y la raíz cuadrada del área, debido a que surgen a partir de un mismo dato alterado por una operación aritmética, por lo que en estos casos se decidió eliminar una de ellas, a fin de que las variables seleccionadas sean independientes.

Análogamente, sucede con el tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento de Clark, los cuales dependen de la longitud de cauce y la pendiente. A su vez, el índice de compacidad se obtiene a partir del perímetro y del área.

Con el objetivo de corroborar la dependencia del tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento con la longitud de cauce, se calcularon mediante el software RStudio los coeficientes de correlación entre estas variables en particular (*Figura 16*).



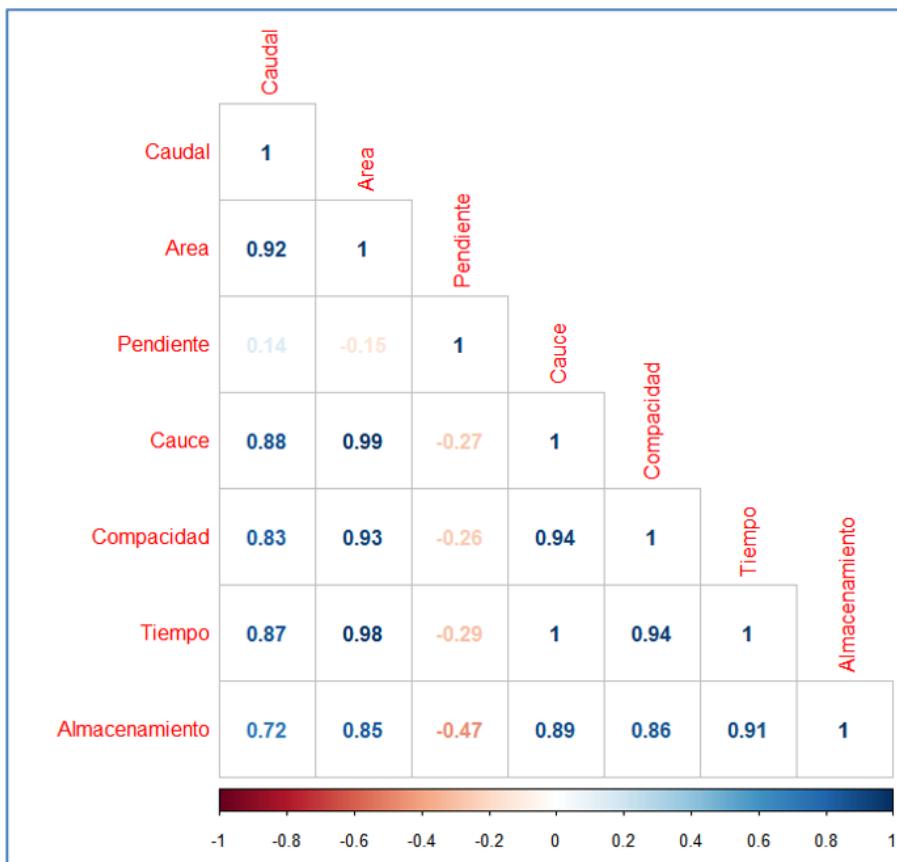


Figura 16
Correlación de Variables mayormente relacionadas con el Caudal

A partir de los coeficientes de correlación calculados, se pudo confirmar cuantitativamente que el coeficiente de almacenamiento posee una dependencia de la longitud de cauce y del tiempo de concentración. A su vez, el tiempo de concentración posee un 100% de dependencia de la longitud de cauce, por lo que el coeficiente de almacenamiento y el tiempo de concentración no fueron seleccionados como variables independientes para calcular caudales máximos.

Según los resultados extraídos, se destacaron como variables independientes con mayor correlación con el caudal: el área, la longitud de cauce y la pendiente. Además, se consideraron de importancia dos variables más que se relacionan directamente con el caudal, éstas son: precipitación media areal e índice o coeficiente de compacidad. La precipitación media areal depende de la duración y la recurrencia de la precipitación, afectada por un coeficiente de abatimiento que depende del área de la subcuenca. Adicionalmente, el índice o coeficiente de compacidad, a pesar de tener una correspondencia directa con el área, agrega la variable independiente del perímetro que caracteriza la forma de la cuenca.

Por lo mencionado anteriormente, las 5 variables elegidas fueron:

1. Área
2. Longitud de Cauce Principal
3. Precipitación Media Areal
4. Pendiente
5. Índice de compacidad

Regionalización en función de las características físicas

La agrupación de subcuenca, en regiones hidrológicamente homogéneas, se realizó mediante el software estadístico Rstudio, ejecutando un comando que utiliza un algoritmo de optimización llamado K-Means, lo que permitió determinar un número estimativo de regiones óptimas mediante la generación de dendogramas (*Figura 17*), en donde cada número representa una subcuenca.

Para corroborar este resultado se realizó un estudio por curvas de Andrews (Andrews, 1972) (*Figura 18*). Este consiste en una representación gráfica del comportamiento hidrológico de cada subcuenca, a través de funciones sinusoidales (Ecuación 9).

$$f(x) = \frac{x_1}{\sqrt{2}} + x_2 \sin(t) + x_3 \cos(t) + x_4 \sin(2t) + x_5 \cos(2t) + \dots \quad (9)$$

dónde:

X1, X2,... Xn: son las variables fisiográficas de la subcuenca.

t: representa en el rango entre -2π y 2π

El resultado del análisis en conjunto del dendrograma y curvas de Andrews (*Figura 19 y 20*) permitió definir 4 regiones hidrológicamente homogéneas.

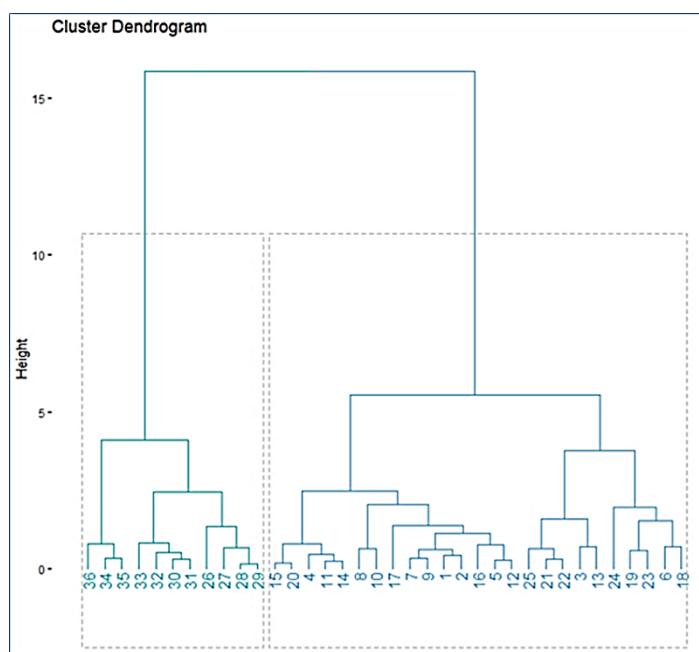


Figura 17
Dendrograma – Regionalización en 2 Grupos – Recurrencia 2 Años

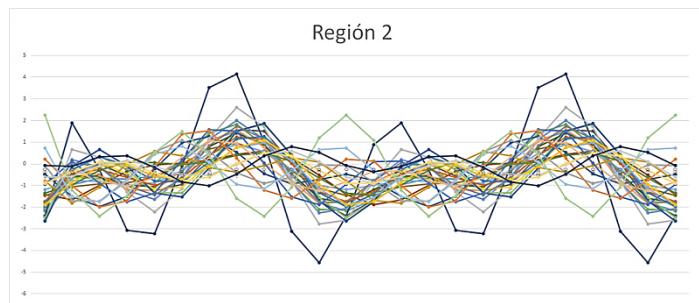


Figura 18
Curvas de Andrews – Regionalización en 2 Grupos – Región 2 Rec. 2 Años

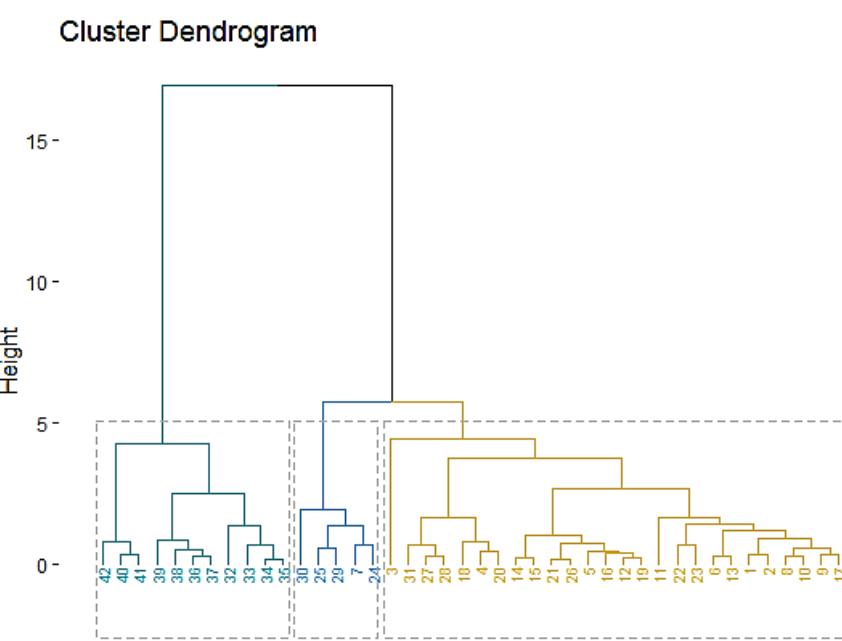


Figura 19
Curvas de Andrews – Regionalización 4 grupos – Recurrencia 2 Años

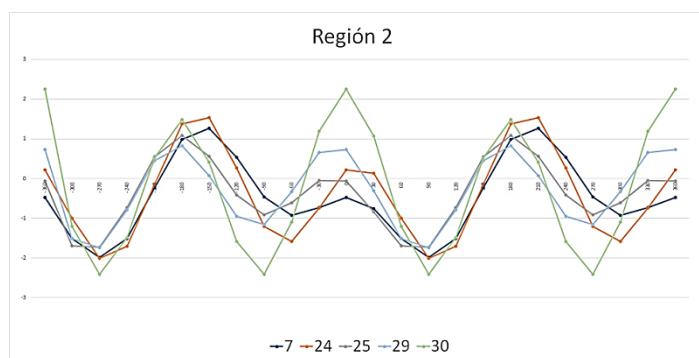


Figura 20
Curvas de Andrews – Regionalización 4 grupos – Región 2 – Recurrencia 2 Años

Se realizó un análisis para determinar un procedimiento que permita identificar para cualquier subcuenca del Arroyo Feliciano a qué región hidrológica corresponde. Para ello se determinaron las variables características en

cada una de las regiones y se establecieron los valores límites, a partir de lo cual se construyó un diagrama de árbol de decisiones (*Figura 21*).

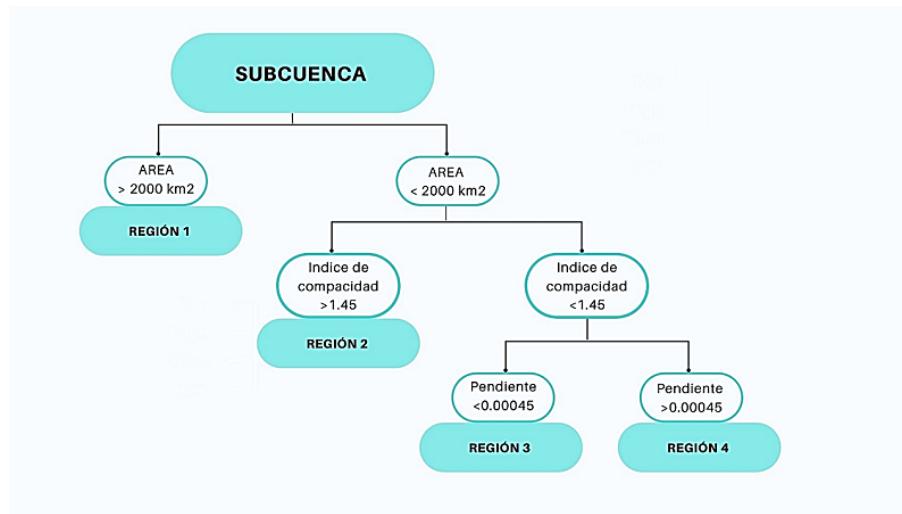


Figura 21
Diagrama de Árbol de Decisiones

Ecuación de regionalización de caudales máximos

Para el cálculo de la ecuación regional de caudales máximos, se utilizó el método de regresión lineal múltiple, el cual permite generar un modelo lineal en el que el valor de la variable dependiente (Y) o respuesta se determina a partir de un conjunto de variables independientes llamadas predictores (X₁, X₂, X₃...). Los modelos lineales múltiples siguen la ecuación 10:

$$Y_i = (\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni}) + e_i \quad (10)$$

Donde β . es la ordenada al origen, el valor de la variable dependiente cuando todos los predictores son cero. β . es el efecto promedio que tiene el incremento en una unidad de la variable predictora X_i, manteniéndose constantes el resto de las variables, los mismos se conocen como coeficientes parciales de regresión. Y e . es el residuo o error, la diferencia entre el valor observado y el estimado por el modelo de regresión.

Para la conformación de la ecuación regional de caudales, se seleccionaron las 3 variables de mayor correlación con el caudal que son: el Área (A), la Pendiente (P) y la Precipitación Media Areal (PMA). Considerando que el caudal no guarda una relación lineal con las variables definidas, las ecuaciones se expresaron en función del logaritmo natural. Adoptando la forma de la ecuación 11:

$$\text{LogQ}_{2\text{años}} = X_0 + X_1 \times \ln(A) + X_2 \times \ln(P) - X_3 \times \ln(\text{PMA}) \quad (11)$$

El caudal máximo se determina con el antilogaritmo de la ecuación 11 como se indica en ecuación 12.

$$Q_{2\text{años}} = e^{(X_0 + X_1 \ln(A) + X_2 \ln(P) + X_3 \ln(PMA))} \quad (12)$$

La ecuación se definió para una recurrencia de 2 años. Para las otras recurrencias se determinó el índice de creciente (IC) que relaciona el caudal de 2 años con los caudales para otras recurrencias. El IC se calculó a partir de los caudales modelados para las distintas subcuencas de cada región homogénea. De esta forma, multiplicando el resultado obtenido de la ecuación de regionalización para 2 años ($Q_{2\text{años}}$) por el IC (*ecuación 13*) de la recurrencia de interés, se determina el caudal para esta recurrencia.

$$Q(\text{recurrencia } x) = Q_{2\text{años}} \times IC \quad (13)$$

RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados para cada región:

1. 1. Región 1

Ecuación regional de caudal:

$$\text{Log}Q_{2\text{años}} = 11.719 + 0,622 \times \ln(A) + 1,144 \times \ln(P) - 0,127 \times \ln(PMA) \quad (14)$$

Índice de creciente:

$$I_c(R1) = 0,638 \ln(\text{Tr}) + 0,495 \quad (15)$$

1. 2. Región 2

Ecuación regional de caudal:

$$\text{Log}Q_{2\text{años}} = -0,701 + 0,666 \times \ln(A) - 0,054 \times \ln(P) + 0,251 \times \ln(PMA) \quad (16)$$

Índice de creciente:

$$I_c(R2) = 0,627 \ln(\text{Tr}) + 0,263 \quad (17)$$

1. 3. Región 3

Ecuación regional de caudal:

$$\text{Log}Q_{2\text{años}} = 5,622 + 0,827 \times \ln(A) - 0,758 \times \ln(P) - 2,32 \times \ln(PMA)$$

Índice de creciente

$$I_c(R3) = 0,651 \ln(Tr) + 0,324 \quad (19)$$

1. 4. Región 4

Ecuación regional de caudal:

$$\text{Log}Q_{2\text{años}} = 2,487 + 0,768 \times \ln(A) - 0,135 \times \ln(P) - 0,584 \times \ln(PMA) \quad (20)$$

Índice de creciente

$$I_c(R4) = 0,762 \ln(Tr) + 0,153 \quad (21)$$

donde:

$Q_{2\text{años}}$: caudal para una recurrencia de 2 años en [m³/s].

A: área de la cuenca en [km²].

P: pendiente media del cauce en [m/m].

PMA: precipitación media areal en la cuenca para 2 años de recurrencia y una duración de tormenta de dos a tres veces el tiempo de concentración de las subcuenca en [mm]. Se considera una duración de entre 8 y 12 días para la Región 1, de entre 1.5 y 4 días para las Región 2 y Región 3 y, entre 1 y dos días para la Región 4. Los valores adoptados para cada región se encuentran en “Tabla 2 - Tiempos de Concentración Promedio y Duraciones de Tormenta Adoptadas”.

Ic: índice de creciente.

Tr: recurrencia en años.

CONCLUSIONES

A través de este estudio, se ha logrado elaborar un procedimiento para la estimación de caudales máximos en las subcuenca del Arroyo Feliciano, a partir de fórmulas simples y de variables de fácil obtención, como son el área, la precipitación máxima media areal y la pendiente del cauce principal.

Los errores, entre los caudales estimados con las ecuaciones de regionalización y lo modelados, resultaron inferiores al 20%. Esto constituye un aporte significativo en el estudio de caudales máximos, dentro de las cuencas extensas de la provincia de Entre Ríos, ya que se logra reducir la incertidumbre en el diseño de obras hidráulicas, al poder contrastar estos resultados con los resultados de la modelación hidrológica de cuencas no aforadas de características similares.

Además, se elaboró un árbol de decisiones, el cual facilita el uso de las ecuaciones.



REFERENCIAS

- Abramowitz M. and I. A. Stegun (1965). "Handbook of Mathematical Functions". Dover, New York.
- Andrews, F. (1972). Plots of High-dimensional data. Biometrics, pp. 125-136.
- Cashalo Felício, Beskow Samuel, Martins Vargas Marcelle, Martim de Moura Maíra, Fernandes Ávila Leo, Rogério de Mello Carlos (2017). "Hydrological regionalization of maximum stream flows using an approach based on L-moments". Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, Brasil.
- Cacik, P. y Paoli, C. (1996). Modelo de Análisis de Frecuencia Múltiples AFMULTI. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral.
- Chow Ven Te, Maidment David R., Mays Larry W (2000). "Hidrología aplicada", Cap. 5,7 y 8, pp 150-159, 207-273. Ed. McGraw Hill Interamericana S.A. Bogotá, Colombia.
- Danill E.I.; S.N. Michas y L.S. Lazardis (2005). "Hydrologic modeling considerations for flood management in ungaged basins", en la 9th International Conference on Environmental Science and Technology, isla de Rodas, Grecia.
- Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos. (2003). Sistema de información geográfica de los recursos hídricos de Entre Ríos. Características físicas de las cuencas. Disponible en: <http://www.hidraulica.gob.ar/cuencas.php>
- Feldman, A.D. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. (Report CPD-74). Davis. CA: US Army Corps of Engineers.
- López Patricia V., Sato Rodolfo, Mastaglia María Inés, Cattaneo Natalia, Masola Roberto, Bruno Sabina M., Margasin Andrea D, Giménez Vanesa, Collante Wojcicki Mayra D., Morley Sofia A., Erbetta Agustina, Graziadio Victor, Villanueva Gonzalo (2020). 1a ed. Estudio de tormentas de diseño en Cuencas Extensas de la provincia de Entre Ríos. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: edUTecNe.
- Justo Domé y Asociados S.R.L. (2019). Modelo Hidrológico, Cuenca del Arroyo Feliciano, puente en Ruta Provincial N°5. Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- Paris, M.; Zucarelli, G. (2004). "Regionalización de caudales. Propuesta metodológica para la identificación de regiones homogéneas". Revista Ingeniería Hidráulica de México, Volumen XIX, Número 4, pp. 1-21. ISSN 0186-4076.
- QGIS.org. (2022). QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- RStudio Team. (2015). RStudio: Integrated Development Environment for R. Boston, MA. Retrieved from <http://www.rstudio.com/>
- Sabahattin, I. y Vijay P. S. (2008). "Hydrologic Regionalization of Watersheds in Turkey". Journal of Hydrologic Engineering.
- Tucci Morelli, Carlos E. (2007). Hidrologia, Ciéncia e Aplicaçâo. Cuarta Edición. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Zamanillo, E. A.; Larenze, G. R.; Tito, M. J.; Pérez, M. M. y Garat, M. E. (2008). "Procedimientos para la Estimación de Tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos". Hypatia. Universidad Tecnológica Nacional; Facultad Regional Concordia.