



Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 50 • 2023 • ISSN 2422-5703 • <https://www.editoriasagai.org.ar/>
Skidelsky Spahn, D.F., Villaverde, Á.G., Mastaglia, M.I., Ramírez R., Sato, R., Giménez, V. y Margasin, A.
Regionalización de caudales máximos mediante técnicas estadísticas multivariadas en cuencas de la provincia de Entre Ríos
e002, <https://doi.org/10.59069/24225703e002>

Regionalización de caudales máximos mediante técnicas estadísticas multivariadas en cuencas de la provincia de Entre Ríos

Regionalization of peak flow through multivariate statistical techniques in basins of the province of Entre Ríos

Diana Fernanda Skidelsky Spahn ¹ ✉* - Ángel Gabriel Villaverde ¹ ✉ - María Inés Mastaglia ¹ ✉
 Roxana Ramírez ¹ ✉ - Rodolfo Sato ¹ ✉ - Vanesa Giménez ¹ ✉ - Andrea Margasin ¹ ✉

* Autor de contacto

Recibido: 23 de octubre de 2022 • Aceptado: 13 de marzo de 2023 • Publicado: 21 de junio de 2023

Resumen

La provincia de Entre Ríos tiene una gran cantidad de cuencas que alimentan la importante red hídrica que la caracteriza. La misma está integrada por diversos cauces que van desde pequeños arroyos hasta caudalosos ríos. Sin embargo, en la actualidad hay escasa información hidrométrica observada.

Para el proyecto de una obra hidráulica es imprescindible definir el caudal de diseño. En los cursos de agua donde no se dispone de estaciones de aforo, se debe recurrir a modelos hidrológicos para la estimación de caudales máximos, pero la precisión de sus resultados presentará incertidumbre si no se cuenta con datos de eventos observados para su calibración.

Una posibilidad para disminuir la incertidumbre en la estimación de caudales en cuencas no aforadas es recurrir a técnicas de regionalización. Dicho término se utiliza para denominar la transferencia de información de un sitio a otro dentro de un área de comportamiento hidrológico semejante (Tucci, 2002).

Este trabajo de regionalización de caudales máximos se basó en la aplicación de técnicas estadísticas de análisis multivariado que permitieron definir ecuaciones para determinar caudales en las distintas cuencas de la provincia de Entre Ríos. Para ello, se utilizó la información disponible de estaciones de aforo que contaban con registros de caudales medidos por más de veinte años. Además, se amplió la base de información incorporando caudales máximos de distintas subcuencas obtenidos mediante modelos hidrológicos calibrados pertenecientes a las cuencas del Arroyo Feliciano y del río Gualeguaychú.

A través de las técnicas mencionadas se determinaron, por un lado, regiones de cuencas y subcuencas hidrológicamente homogéneas y, por otro lado, los parámetros físicos e hidrológicos que mejor correlacionaron con el caudal. Finalmente,

se desarrollaron ecuaciones que permiten estimar los caudales para distintas recurrencias para cada una de las regiones en función de tales parámetros.

Palabras clave: red hídrica, áreas hidrológicamente homogéneas, regionalización, estimación de caudales máximos.

1. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Paraná (E.R.), Universidad Tecnológica Nacional, República Argentina.

Abstract

Entre Ríos province has many basins that nourish its characteristic water network. It is integrated by various channels from small streams to large flow rivers. However, at present, there is little observed hydrometric information.

For the design of a hydraulic structure, it is essential to define the design flow. In watercourses where gauging stations are not available, hydrological models must be used to estimate peak flows, but the accuracy of their results will be uncertain if there is no data on observed events for their calibration.

One possibility to reduce the uncertainty in flow estimation in ungauged basins is to resort to regionalization techniques. This term is used to describe the transfer of information from one site to another within an area of similar hydrological behavior. (Tucci, 2002).

This work of regionalization of peak flow was based on the application of statistical techniques of multivariate analysis that allow defining equations to determine flows in the different basins of the province of Entre Ríos. This work was based on the application of regionalization and multiple correlation techniques that allow defining equations to determine flows in the different courses of the province of Entre Ríos. For this purpose, the information available from gauging stations that had flow records measured for more than twenty years was used. In addition, the information base was expanded by incorporating maximum flows from different sub-basins obtained through calibrated hydrological models belonging to the Feliciano stream and Gualaguaychú river basins.

Using the aforementioned techniques, first, hydrologically homogeneous basin and sub-basin regions were determined, and then the physical and hydrological parameters that best correlated with flow. Finally, equations were developed to estimate flow rates for different recurrences for each of the regions as a function of these parameters.

Keywords: water network, hydrologically homogeneous areas, regionalization, estimation of peak flows.

Introducción

La provincia de Entre Ríos, como su nombre indica, se encuentra delimitada por ríos que dan forma a sus límites geográficos y políticos. Las fronteras se conforman al Norte por los ríos Guayquiraró y Mocoetá junto con los arroyos Basualdo y las Tunas, al Oeste y al Sur la rodea el río Paraná y al Este el río Uruguay. A su vez, los distintos ríos y arroyos extendidos a lo largo y ancho de la provincia conforman una vasta red hídrica.

El conocimiento del régimen de un curso de agua y sus caudales es fundamental para poder dimensionar obras en donde prime la seguridad, eficiencia y economía. En una provincia con una red de drenaje tan extensa, la medición de caudales en distintos puntos de interés mediante estaciones de aforo es una tarea muy compleja que supone una gran inversión en recursos y tiempo. En la actualidad la provincia cuenta con escasos puntos de aforo y, solo una parte de estas mediciones pueden ser utilizados como base de datos.

La problemática planteada motivó a realizar esta investigación, en la que se aplica la técnica de regionalización para determinar ecuaciones que permitan estimar valores de caudales máximos para distintas recurrencias en función de parámetros de fácil determinación. Para ello se utilizaron técnicas de estadística multivariada que permiten determinar las variables más significativas que tienen una mayor influencia en relación con los valores del caudal máximo.

Área de estudio

En la Figura 1 se presentan las cuencas principales de la provincia.

Para el abordaje de la investigación se estudiaron aquellas cuencas que poseen estaciones de aforo de caudal con registros de mediciones mayores a veinte años según la base de datos del Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH). En la Tabla 1 se presentan las seis cuencas que cumplían con el requisito.

Tabla 1. Cantidad de años con mediciones según la estación de aforo en cada cuenca

Cuenca	Estación	Ubicación	Años de medición
Gualeguay	3004	Rosario del Tala	28
Nogoyá	3037	RP N011	36
Yuquerí Grande	3061	Concordia	23
Feliciano	3003	Paso Medina	44
Guayquiraró	3808	Paso Junque	37
Gualeguaychú	3030	RP N39	31

Como la cantidad de cuencas con estaciones de aforo resultaron insuficientes para la determinación de áreas homogéneas y la aplicación de los métodos estadísticos elegidos para este estudio, se decidió adicionar datos de dieciséis sub-cuencas del arroyo Feliciano y dieciocho del río Gualeguaychú, analizadas a través de modelos hidrológicos calibrados presentado en los proyectos finales de grado *Bidegorry et al. (2021)* y de *Grilli et al. (2021)*.

Caracterización de las cuencas y subcuencas

La técnica de regionalización de caudales requiere dos aspectos fundamentales para poder ser aplicada: cantidad y calidad de los datos. En este estudio se necesitó obtener de cada cuenca y subcuenca sus parámetros físicos e hidrológicos, los cuales formaron parte de las variables analizadas con las técnicas estadísticas.

Los parámetros físicos son aquellos que se corresponden con la morfología de la cuenca, en cambio, los parámetros hidrológicos son aquellos que responden a los procesos hidrológicos que se producen en la cuenca.

Para la determinación de los parámetros físicos de la Tabla 2 se trabajó con un sistema de información geográfica a partir del software QGIS (*QGIS Development Team, 2019*).

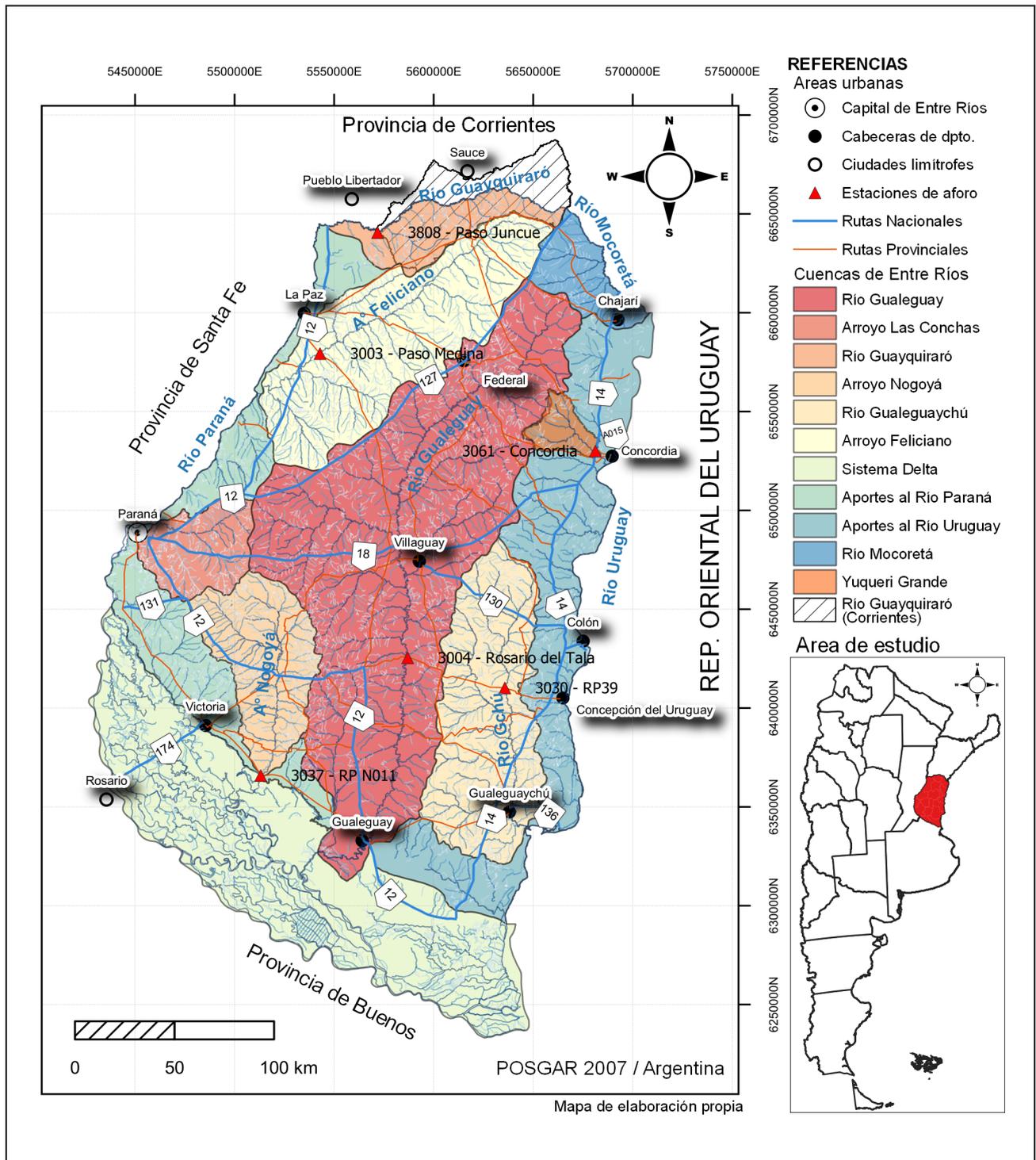


Figura 1. Mapa de la ubicación del área de estudio con puntos de observaciones de campo y muestreos.

Para ello, se utilizaron los Modelos Digitales de Elevación (MDE) disponibles en el Instituto Geográfico Nacional (IGN) con un tamaño de grilla de 30 metros, a partir de los cuales se delimitaron cuencas y se obtuvieron los parámetros físicos de la Tabla 3. Los parámetros físicos de las subcuencas del estudio se tomaron de los proyectos mencionados anteriormente.

Se consideraron el caudal máximo y la precipitación media areal como parámetros hidrológicos para analizar el comportamiento de las cuencas en estudio.

Con relación al primer parámetro hidrológico mencionado, se generó una serie de caudales máximos anuales para cada cuenca aforada. Para ello, se analizaron los datos de Caudal Instantáneo Máximo y Caudal Máximo Medio Diario proporcionados por el registro de mediciones del Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH), para el año hidrológico septiembre-agosto. A modo de ejemplo, la Tabla 4 presenta la serie de caudales máximos anuales del arroyo Nogoyá, con estación de aforo en la ruta provincial N° 11 (Estación 3037 del SNIH).

Tabla 2. Parámetros físicos de la cuenca

Variable	Descripción	Unidad	Método de obtención
A	Área de la cuenca	km ²	Software QGis
P	Perímetro de la cuenca	km	Software QGis
Kc	Coficiente de compacidad	-	Fórmula de Gravelius (1914)
Lc	Longitud del curso principal	km	Software QGis
i	Pendiente media del curso principal	m/m	Software QGis
Tc	Tiempo de Concentración	h	Fórmula de Graf (1982)
R	Coficiente de almacenamiento	h	Fórmula de Graf (1982)
Lambda	Coficiente Lambda	-	Relación de parámetros del hidrograma unitario de Clark

Tabla 3. Parámetros físicos obtenidos para las cuencas aforadas

	Gualeguay	Nogoyá	Yuquerí Grande	Feliciano	Guayquiraró	Gualeguaychú
A [km ²]	16.038,1	3.873,2	677,3	5.572,7	3.073,8	2.028,7
P [km]	1.350,4	523,5	214,4	732,0	557,6	420,0
Kc	3,01	2,36	2,32	2,75	2,84	2,63
Lc [km]	495,7	137,0	50,7	151,5	129,5	113,5
i [m/m]	0,00009	0,00052	0,00117	0,00024	0,00036	0,00042
Tc [h]	266,2	62,6	22,6	78,4	63,6	55,2
R [h]	213,2	33,6	12,6	63,4	43,9	37,3
Lamda	0,44	0,35	0,36	0,45	0,41	0,40

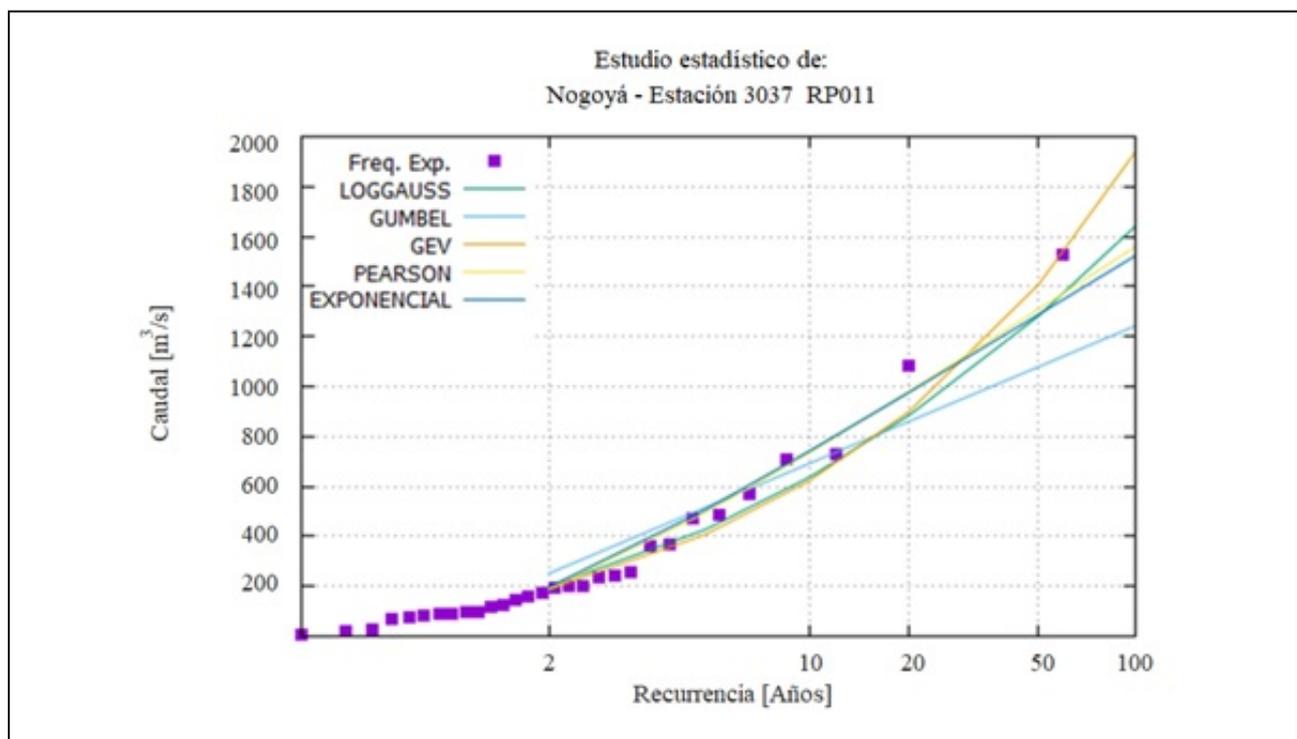


Figura 2. Gráfico de frecuencias experimentales.

Tabla 4. Serie de caudales máximos anuales del arroyo Nogoyá - Estación 3037

Año Hidrológico	Caudal máximo anual (m ³ /s)
1984	75,71
1985	25,35
1986	100,01
1987	19,9
1988	10,6
1989	256,3
1990	369
1991	Sin datos
1992	93,4
1993	731,65
1994	72,53
1995	98,7
1996	Sin datos
1997	Sin datos
1998	115,9
1999	1080,2
2000	708
2001	201,5
2002	157,4
2003	242,1
2004	194,2
2005	172
2006	Sin datos
2007	91,4
2008	236,8
2009	Sin datos
2010	144,5
2011	200,7
2012	572,6
2013	360,8
2014	471,1
2015	Sin datos
2016	1524,9
2017	122,8
2018	489,8
2019	81,4

Los caudales máximos de las subcuencas no aforadas pertenecientes al arroyo Feliciano y río Gualeguaychú se obtuvieron de los resultados de los modelos hidrológicos desarrollados y calibrados en el sistema de modelación HEC HMS presentados en los proyectos nombrados.

Sobre las series de caudales máximos conformadas se realizaron análisis de frecuencia aplicando el software AFMulti (*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la UNL, 2017*), el cual permitió estimar los valores de caudales máximos para las recurrencias de interés aplicando funciones de distribución de frecuencias adoptadas a partir de un análisis de bondad de ajuste y ajuste visual. Las recurrencias analizadas fueron 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Se utilizaron estos valores por ser las recurrencias adoptadas frecuentemente en el diseño y verificación de obras hidráulicas.

Las funciones de distribución analizadas fueron: Loggauss, Gev, Pearson, Gumbel y Exponencial. El software devuelve resultados numéricos y gráficos donde se observa las aproximaciones de las funciones para la variable estudiada y la bondad de ajuste, según el cálculo de errores que realiza. A modo de ejemplo, en la Figura 2 y Tabla 5, se presentan los resultados del software AfMulti para la cuenca del arroyo Nogoyá y se somborean los resultados para la función de distribución adoptada.

Con respecto a la metodología para obtener los valores de precipitación media areal se utilizó la Ecuación (1) para las diferentes cuencas y subcuencas.

$$PMA [mm] = I \left[\frac{mm}{h} \right] * d[h] \quad \text{Ecuación (1)}$$

Siendo: PMA: Precipitación Media Areal; I: intensidad de la tormenta; d: duración de la tormenta adoptada.

El valor de intensidad de la tormenta se calculó utilizando las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF) presentadas en *López et al. (2020)*. Para la determinación de la duración de la tormenta (d) se contrastaron los caudales obtenidos por modelación para precipitaciones de distintas duraciones con los caudales resultantes del análisis de frecuencia de valores observados. Se determinó que el mejor ajuste se obtenía para precipitaciones con una duración de dos a tres veces el tiempo de concentración.

Análisis de correlación de las variables

El análisis se realizó con el software RStudio (*RStudio Team, 2020*) aplicando distintos métodos de valoración estadística para determinar aquellas variables que tenían mayor correlación e incidencia en el comportamiento del caudal máximo. Se ingresaron al software los valores estandarizados o normalizados de las variables físicas e hidrológicas determinadas anteriormente para una recurrencia de 5 años.

Para evaluar la correlación entre las variables se utilizó la Matriz de Correlación con el método de Pearson (Figura 3) el cual devuelve una matriz con valores que varían desde -1 a 1, indicando para un valor de cero una correlación nula y para un valor cercano a la unidad, una excelente correlación; pudiendo ser positiva o negativa.

Se tomó como referencia que los valores superiores al valor absoluto 0,70 indicaban las mejores correlaciones, lo cual significaba un efecto grande entre variables (*Cohen, 1988*). Se verificó en el software que el nivel de significancia p obtenido del análisis sea menor a 0,05 para un nivel de confianza del 95%.

Tabla 5. Caudales máximos para distintas recurrencias. Arroyo Nogoyá - Estación 3037 Ruta Provincial N° 11.

RECORRENCIA [Años]	CAUDAL [m³/s]					
	LOGGAUSS	GUMBEL	GEV	PEARSON	EXPONENC.	
100	1.640,20	1.242,00	1.242,00	1.936,30	1.558,10	1.522,40
50	1.281,40	1.078,60	1.078,60	1.407,00	1.308,20	1.287,50
20	884,9	860,6	860,6	900,5	980,5	977
10	636,9	692,2	692,2	622,6	735,5	742,1
5	427,6	516,6	516,6	408,5	494,5	507,2
2	199,6	251,4	251,4	187,9	188,5	196,7

A partir de este método se pudo determinar que las variables que mejor correlacionaron con el caudal máximo fueron: el área (A), la longitud del cauce (Lc), la pendiente (i), el tiempo de concentración (Tc), el coeficiente de almacenamiento (R) y la Precipitación Media Areal (PMA), lo cual puede observarse en el diagrama de correlación de variables presentado en la Figura 3.

El análisis se complementó con el método de componentes principales (PCA), el cual permite plantear la combinación entre las variables logrando reducir la dimensión de problema para una mejor interpretación de los resultados obtenidos.

Este método grafica las variables en un par de ejes "X" e "Y" en forma de vectores, en donde se logra explicar la variabilidad total del modelo. En la Figura 4 se observa la interacción entre las variables que se representan con vectores que identifican a cada variable en estudio. En este gráfico se representa a la variable Caudal máximo para 5 años de recurrencia Q5.

A través de este método se analizaron las características del conjunto de variables en estudio, pudiendo visualizar la

información más importante. Por ejemplo, las variables similares al caudal máximo para 5 años de recurrencia (Q5), las cuales son: la PMA, el área (A), el perímetro (P), la longitud del cauce (Lc), el tiempo de concentración (Tc) y el coeficiente de almacenamiento (R).

El tercer método de análisis aplicado fue el Análisis Cluster, a partir del cual se identificaron los grupos más significativos, es decir aquellos que comparten características similares. La forma gráfica de presentar este método es mediante un diagrama de árbol o Dendrograma (Figura 5), donde las variables se agrupan en función de la similitud que existe entre ellas.

En la Figura 5 se puede observar cuatro grupos bien definidos, en donde el caudal máximo para 5 años de recurrencia (Q5) se asemejaba en mayor medida con la PMA, el perímetro (P), el coeficiente de almacenamiento (R), el área (A), la longitud del cauce (Lc) y el tiempo de concentración (Tc). Además, se observa que las variables atípicas dentro del conjunto de datos, que carecen de significatividad en este modelo son el coeficiente Lambda, la pendiente (i) y el coeficiente de compacidad (Kc).

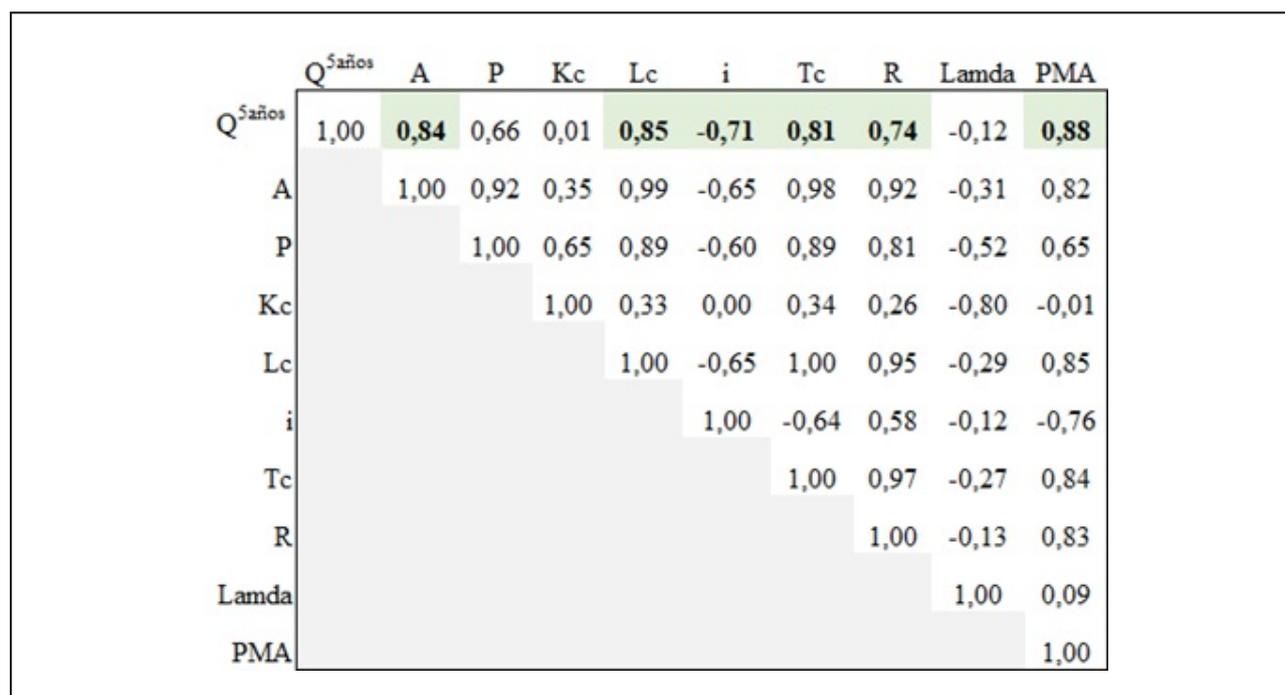


Figura 3. Diagrama de correlación de variables aplicado para 5 años de recurrencia.

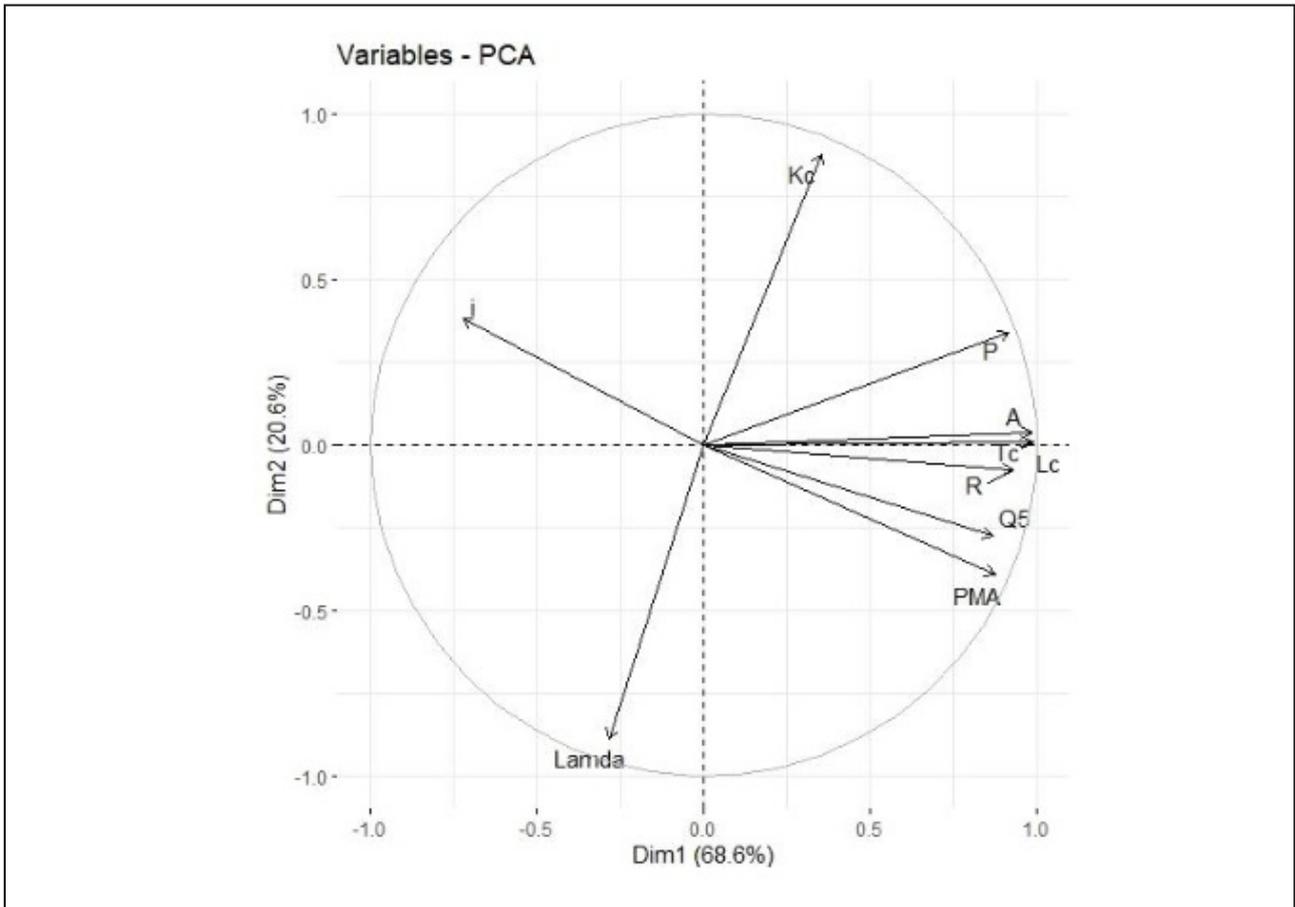


Figura 4. Método de componentes principales aplicado para 5 años de recurrencia.

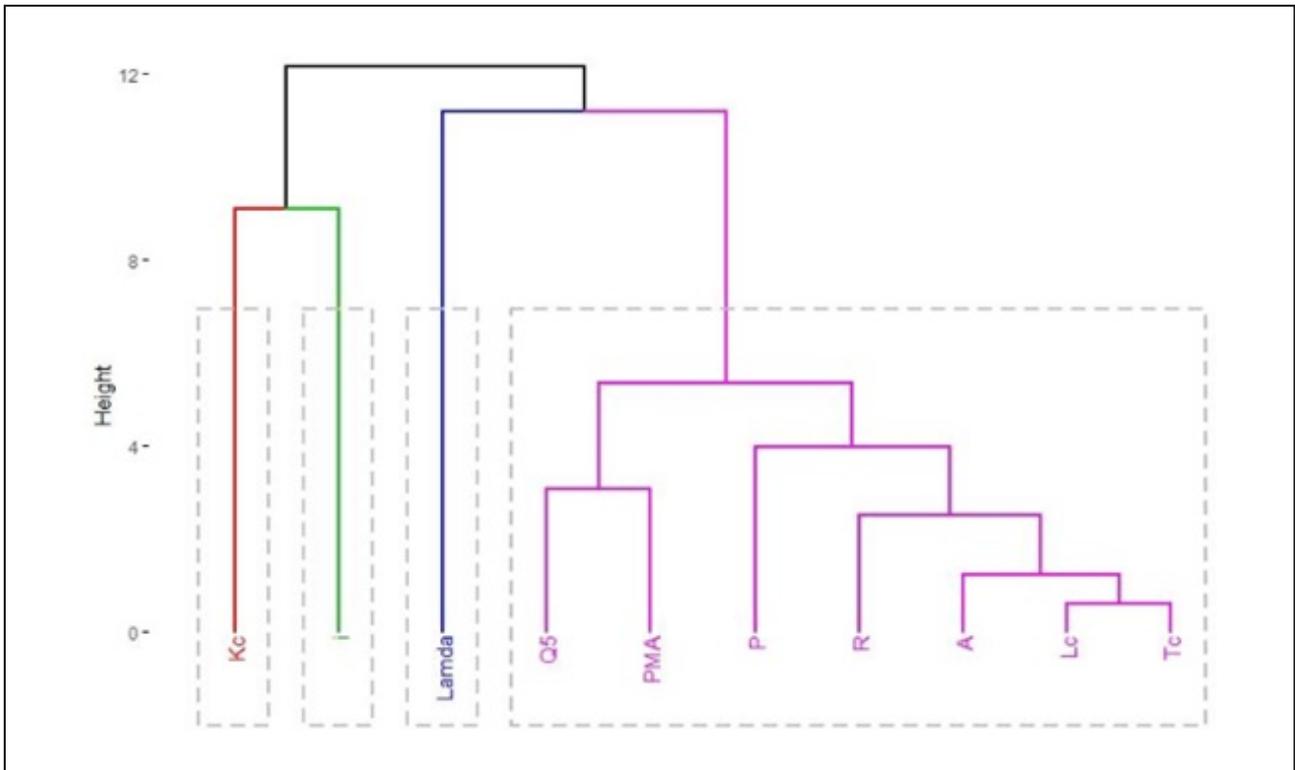


Figura 5. Dendrograma de variables aplicado para 5 años de recurrencia..

A partir de los resultados obtenidos de este estudio, se seleccionaron las variables que mejor se relacionan con el caudal máximo; para lo cual se tuvo en cuenta el análisis de los coeficientes de correlación de la matriz homónima del caudal máximo con las demás variables.

En virtud de seleccionar las variables que permiten conformar las ecuaciones de interés, se optó por un criterio primordial, el cual se basó en que las variables adoptadas puedan determinarse de manera directa. Finalmente, las variables seleccionadas ordenadas en función de su mayor correlación con el caudal máximo fueron:

- Precipitación Media Areal
- Área
- Pendiente media del curso principal

Regionalización de cuencas y subcuencas hidrológicamente homogéneas

Con las tres variables y los valores de caudal máximo para 5 años de recurrencia se procedió a realizar el agrupamiento de las cuencas y subcuencas en regiones homogéneas mediante un análisis de clúster de las variables, realizado con RStudio y se contrastaron los resultados obtenidos, con los gráficos de las Curvas de Andrews (Andrews, 1972).

Con el análisis de clúster se obtuvo el gráfico en el cual a través de la representación en un Dendrograma se observó la formación de cinco grupos de cuencas y subcuencas que presentaban características hidrológicamente homogéneas (Figura 6).

La cantidad de cuencas de cada grupo fue variable en función de las características de las cuencas y subcuencas estudiadas. El Grupo 1 tenía únicamente la cuenca del Gualaguay, el Grupo 2 se conformó de 9 subcuencas y 1 cuenca, el Grupo 3 fue el más grande con 3 cuencas y 17 subcuencas, el Grupo 4 se conformaba de 3 subcuencas y finalmente el Grupo 5 se conformó con una cuenca y 7 subcuencas.

Posteriormente, a modo de verificar los resultados obtenidos con el análisis de Clúster se calcularon y graficaron las Curvas de Andrews en función de la agrupación ilustrada en los Dendrogramas. El método de las Curvas de Andrews es útil para representar gráficamente datos multidimensionales en sólo dos dimensiones. Cada punto dimensional es representado por una función como la expresada en la Ecuación (2):

$$f_x(t) = \frac{X_1}{\sqrt{2}} + X_2 \sin(t) + X_3 \cos(t) + X_4 \sin(2t) + X_5 \cos(2t) + \dots$$

Ecuación (2)

siendo X_1, X_2, \dots, X_n , las variables cuantificadas en donde el intervalo varía entre $-\pi$ y π .

Para aplicar la función se reescribe la Ecuación (2) expresándola como una sumatoria presentada en la Ecuación (3):

$$f_x(t) = \frac{X_1}{\sqrt{2}} + \sum_{i=1}^{m1} X_{2i} \sin(it) + \sum_{i=1}^{m1} X_{2i+1} \cos(it)$$

Ecuación (3)

donde:

el valor de $m1$ es $\frac{n-1}{2} = m2$, si n es impar. Y de la misma manera el valor de $m1$ es igual a $\frac{n}{2}$ y $m2 = \frac{n}{2} - 1$, si n es par.

La magnitud de cada variable de un individuo perteneciente a una población en estudio (en este caso las cuencas y subcuencas) afecta la frecuencia, la amplitud y la periodicidad de la función, dando una representación única para cada sujeto,

pero brinda una posibilidad especial de analizar el comportamiento hidrológico en conjunto con otros individuos. Graficando estas curvas se evidenció que efectivamente existía un patrón entre las cuencas pertenecientes a cada grupo en cuanto a amplitud, período y forma en general. A modo de ejemplo se presenta en la Figura 7 las Curvas de Andrews del grupo 2.

A cada grupo se le aplicó el método de regresión lineal para obtener las ecuaciones de estimación de caudal máximo. Este método requiere que la cantidad de individuos sean igual a la cantidad de variables más uno.

En este estudio, las variables eran cuatro: el caudal máximo, la PMA, el área y la pendiente, y los individuos se conformaban con las cuencas y subcuencas, por lo tanto, fue necesario que cada grupo esté integrado por al menos 5 cuencas y subcuencas. Es por ello, que a través de las Curvas de Andrews y analizando los parámetros físicos e hidrológicos de las cuencas se reagruparon algunas de las regiones obtenidas con el Clúster para poder aplicar la regresión lineal.

En la Figura 8 se presenta a modo de ejemplo, un grupo resultante de la separación mediante Dendrogramas y verificado mediante el método de las Curvas de Andrews (Figura 7).

Procedimiento para la determinación de ecuaciones de regionalización de caudales

Las ecuaciones de regionalización se definieron para cada grupo homogéneo permitiendo obtener los valores de caudal máximo para una determinada cuenca en función de las variables definidas y para la recurrencia que se adopte.

El desarrollo de las ecuaciones se realizó mediante un análisis de regresión lineal utilizando el Software RStudio. Para linealizar la ecuación de caudal se utilizaron las propiedades de los logaritmos adquiriendo la forma de la ecuación (4). Los coeficientes X, Y, W, Z determinados en RStudio se reemplazaron en la Ecuación 4 para las distintas regiones.

$$\ln(Q_{x_{años}}) = Z + X * \ln(A) + Y * \ln(P) + W * \ln(PMA_{x_{años}})$$

Ecuación (4)

siendo Q : caudal máximo, A : área, P : perímetro, PMA : Precipitación Media Areal.

Para verificar los resultados de caudal máximo obtenidos con las expresiones de regionalización se contrastaron con los valores de caudal aforados o modelados. Se consideraron válidas aquellas ecuaciones donde la diferencia entre caudal estimado y caudal conocido resultó inferior al 20%.

En los casos en que se superó el 20%, se procedió a eliminar la subcuenca que no verificaba y se recalcularon los coeficientes hasta obtener la ecuación que satisfizo para todas las cuencas y subcuencas del grupo.

Análisis de los resultados obtenidos

Se obtuvieron ecuaciones para estimar caudales en función del grupo hidrológicamente homogéneo y la recurrencia deseada. A modo de ejemplo, se presentan en la Tabla 6 las ecuaciones para los grupos hidrológicamente homogéneos para 5 años de recurrencia y sus correspondientes valores de ajuste (Adjusted R-squared).

Obtenidas las ecuaciones de caudal para cada grupo de cuencas y subcuencas en función de la recurrencia, se procedió a determinar las características que definieron cada grupo, para ello se analizaron el área y pendiente de las cuencas y subcuencas que conformaban cada uno y se obtuvieron los resultados descriptos a continuación.

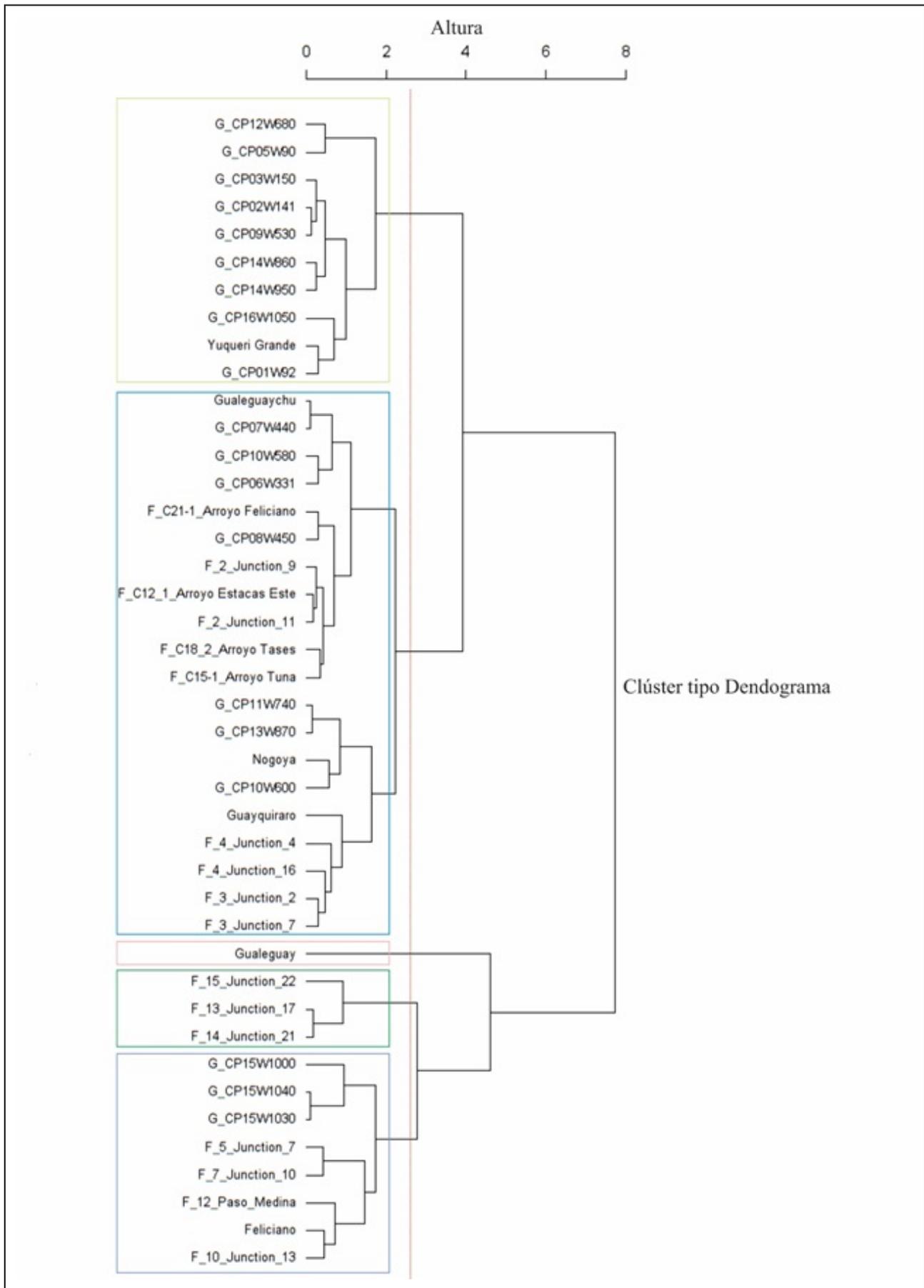


Figura 6. Dendrograma de grupos de cuencas y subcuencas.

Tabla 6. Ecuaciones regionales para 5 años de recurrencia

Grupo	Ecuaciones	Adjusted R-squared
1	$LN(Q5años)=29,733+0,841*LN(A)-0,104*LN(i)-5,491*LN(PMA)$	98,01%
2	$LN(Q5años)=7,699+1,160*LN(A)+0,487*LN(i)-1,340*LN(PMA)$	93,17%
3	$LN(Q5años)=0,030+0,568*LN(A)+0,713*LN(i)+1,378*LN(PMA)$	97,65%
4	$LN(Q5años)=13,584+0,138*LN(A)-1,148*LN(i)-3,296*LN(PMA)$	63,19%
5	$LN(Q5años)=-0,489+0,235*LN(A)+0,142*LN(i)+1,223*LN(PMA)$	98,88%

- **Grupo 1:** las características de la cuenca y subcuencas de este grupo son áreas grandes, entre 5.000 y 16.100 km² y bajas pendientes, entre 0,00021 y 0,00024 m/m.
- **Grupo 2:** las características de la cuenca y subcuencas de este grupo son áreas pequeñas, entre 160 y 710 km² y pendientes altas, entre 0,00092 y 0,0016 m/m.
- **Grupo 3:** las características de las cuencas y subcuencas de este grupo eran áreas menores a medias, entre 70 y 2300 km² y altas pendientes, entre 0,00042 y 0,00069.
- **Grupo 4:** las características de las cuencas y subcuencas de este grupo son áreas grandes, entre 740 y 5.100 km² y bajas pendientes, entre 0,00036 y 0,00052 m/m.
- **Grupo 5:** las características de las cuencas y subcuencas de este grupo son áreas grandes, aunque menores a las del Grupo 1, entre 2.400 y 7.000 km² y bajas pendientes, entre 0,00022 y 0,00038.

La caracterización de cada grupo desarrollada anteriormente se basó en la superficie y pendiente de sus cuencas componentes. Sin embargo, los grupos no resultaron fácilmente clasificables debido a que las características físicas e hidrológicas de las cuencas utilizadas para definirlos resultaron muy dispares para conformar grupos homogéneos y a la escasez de datos de entrada para el estudio debido a la falta de aforo en las cuencas de la provincia.

En la Figura 9 se graficó la segregación de cuencas y subcuencas en función de sus características físicas de área y pendiente. Se puede observar que los grupos obtenidos y descriptos anteriormente se mezclan en algunos casos ya que las cuencas pertenecientes a diferentes grupos comparten alguna de las características, como el Grupo 1 con el Grupo 5. Sin embargo, algunos grupos están bien definidos como el Grupo 2.

Conclusiones

Inicialmente la investigación incluía únicamente cuencas que cuentan con estación de aforo dentro de la provincia de Entre Ríos, pero, debido a la escasez de información necesaria para aplicar las técnicas estadísticas y matemáticas, se incluyeron datos de subcuencas modeladas pertenecientes a las cuencas del arroyo Feliciano y el río Gualeguaychú para poder realizar el trabajo.

En función de esto se definieron, a través de metodologías estadísticas de análisis multivariado, cinco regiones de cuencas y subcuencas hidrológicamente homogéneas como se presentan en la Figura 10. Estas regiones no resultaron fácilmente clasificables respecto a sus características físicas e hidrológicas debido a la variabilidad de los datos y a la escasez de mediciones existentes para utilizar como información de entrada.

Se desarrollaron ecuaciones regionales de caudales máximos para cada recurrencia planteada, para cada una de las cinco regiones analizadas.

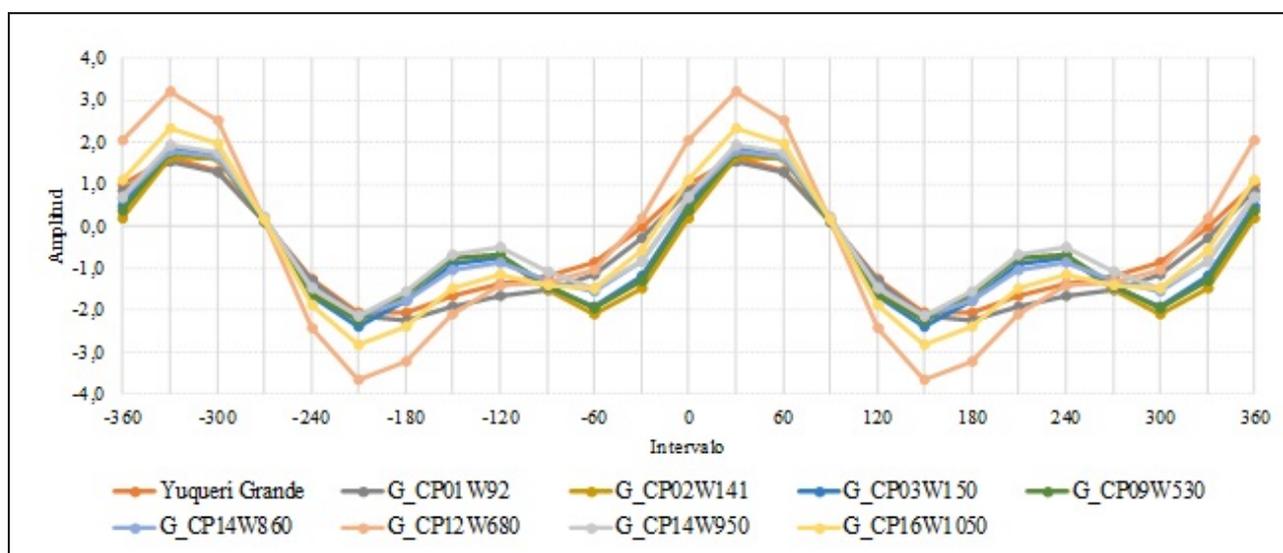


Figura 7. Curva de Andrews correspondiente al Grupo 2.

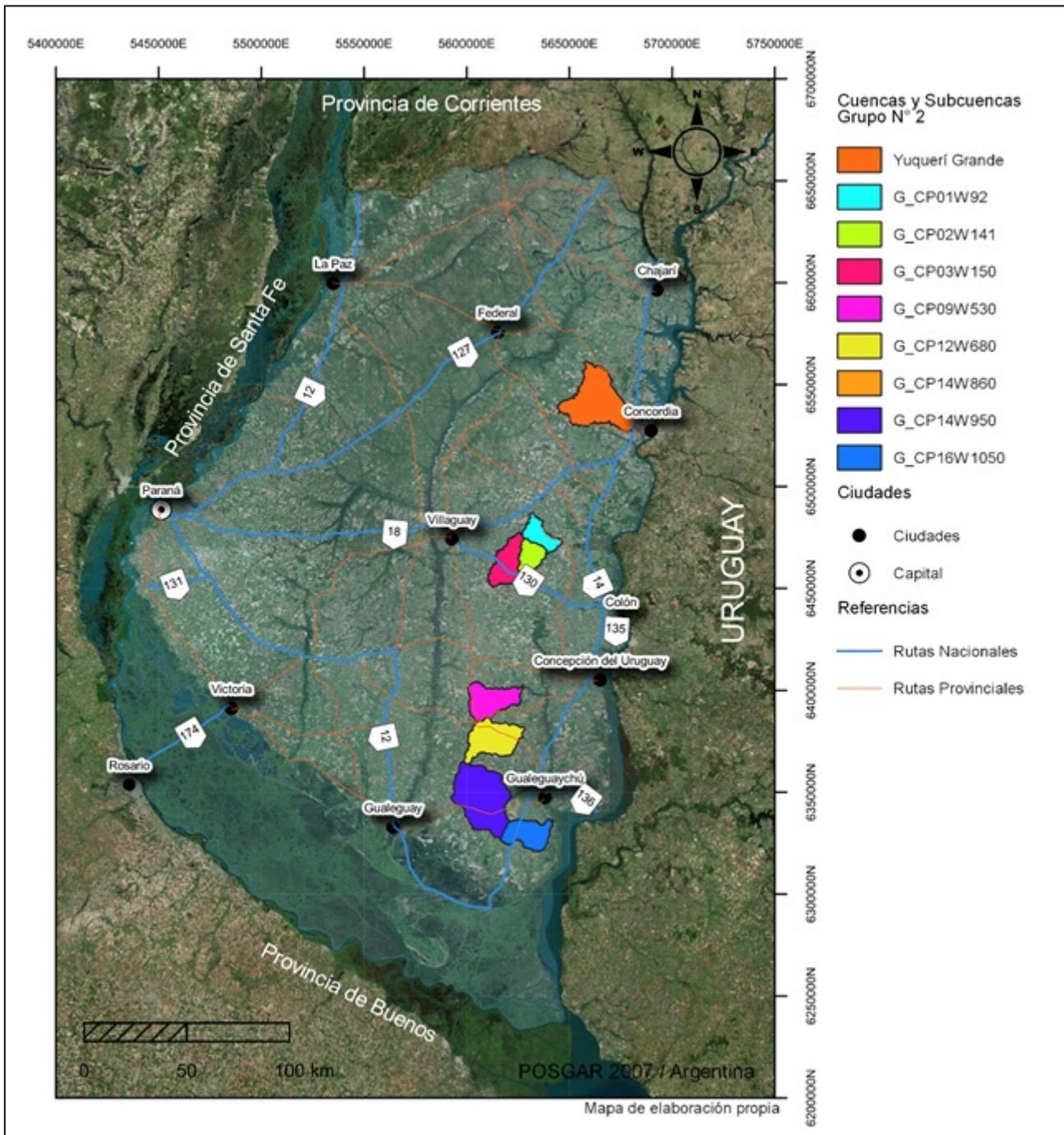


Figura 8. Grupo 2 cuencas y subcuencas hidrológicamente homogéneas.

Del conjunto de parámetros físicos e hidrológicos que definen el comportamiento de las cuencas, se adoptaron a través del análisis de correlación múltiple las variables de mayor incidencia sobre el caudal. Estas variables en orden de mayor a menor correlación con el caudal máximo fueron: la precipitación media areal, el área y la pendiente. La primera formó parte de la información hidrometeorológica utilizada para el estudio y las últimas dos fueron parte de los parámetros físicos que definen a las cuencas.

La investigación realizada constató la falta de registro de mediciones que proporcionen información sobre el com-

portamiento de la gran red hídrica que conforma la provincia de Entre Ríos. Esto resulta una gran problemática, al momento de resolver una situación donde intervienen aspectos hídricos en el diseño de una obra hidráulica o vial.

En este sentido, este estudio brinda ecuaciones prácticas que serán de utilidad para estimación de caudales máximos en forma aproximada. Las mismas no pretenden reemplazar la aplicación de modelos hidrológicos, sino que por el contrario pueden brindar resultados que convaliden a los obtenidos con modelos implementados en cuencas no aforadas que carecen de datos para su calibración.

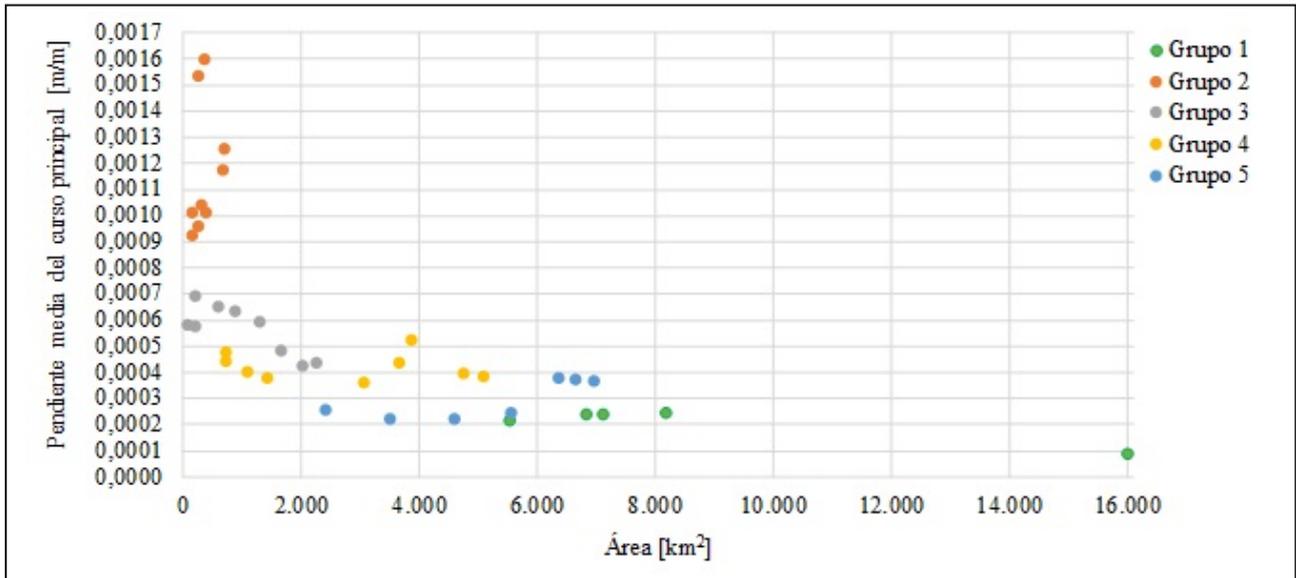


Figura 9. Segregación de grupos hidrológicamente homogéneos.

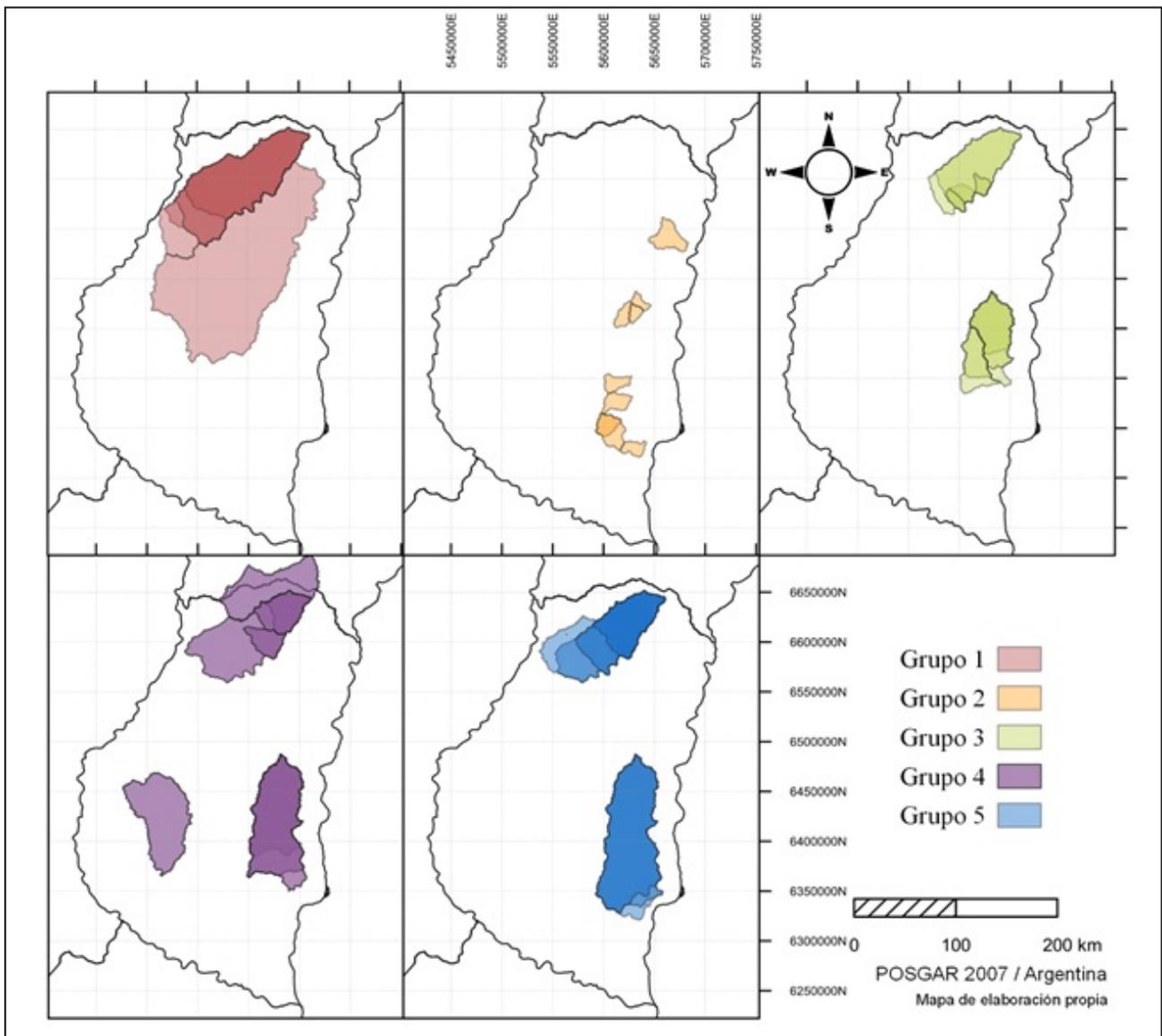


Figura 10. Regiones de cuencas hidrológicamente homogéneas.

Contribución de autoría

Todos los autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación y el análisis de datos fueron realizados por Skidelsky Spahn, Diana; Villaverde, Á. Gabriel; Mastaglia, María Inés; Ramírez Roxana; Sato, Rodolfo Giménez, Vanesa y Margasin, Andrea.

El primer borrador del manuscrito fue escrito por Skidelsky Spahn, Diana; Villaverde, Á. Gabriel; Mastaglia, María Inés;

Ramírez Roxana y Sato, Rodolfo y todos los autores comentaron las versiones anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

Declaración de conflictos de intereses

Los Autores declaran que no existe algún conflicto de interés

Referencias Bibliográficas

- Andrews, D. F. (1972). Plots of high-dimensional data. *Biometrics*, 28(1), 125–136. <https://doi.org/10.2307/2528964>
- Bellman, R. (1957). Functional equations in the Theory of Dynamic Programming--VI, a direct convergence proof. *Annals of Mathematics*, 65(2), 215–223. <https://doi.org/10.2307/1969958>
- Bidegorry, M., Kohan, T. y Russian, F. (2021). *Regionalización de cuencas del arroyo Feliciano para estimación de caudales máximos*. Proyecto final de grado. Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional. <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/5839>
- Bonomi, R., Collante Wojcicki, M., Gimenez, V. y Margheim, J. (2017). *Estudio de tormentas de diseño en las cuencas del arroyo Feliciano y río Gualeguaychú de la provincia de Entre Ríos*. Proyecto final de grado. Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. (2a ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Devore, J. L. (2010). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. (7a ed.). Cengage Learning Editores.
- Grilli, R., Kessler, D. y Sturtz, E. (2021). *Regionalización de caudales máximos en la cuenca del río Gualeguaychú*. Proyecto final de grado. Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional.
- López, P. V., Sato, R., Mastaglia, M. I., Cattaneo, N., Masola, R., Giménez, V., Collante Wojcicki, M. D., Bruno, S. M., Margasin, A. D., Morley, S. A., Erbetta, A., Graziadio, V. y Villanueva, G. (2020). *Estudio de tormentas de diseño en cuencas extensas de la provincia de Entre Ríos*. (1a ed.). edUTecNe. <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/4479?show=full>
- Meneses, J. (2019). *Introducción al análisis multivariante*. Fundación para la Universitat Oberta de Catalunya. <https://femrecerca.cat/meneses/publication/introduccion-analisis-multivariante/>
- Pisani, R. y Purves, R. (2007). *Statistics*. (4a ed.). W. W. Norton & Company.
- Sato, R. A. (2016). *Modificaciones en el riesgo de inundación fluvial debido al desarrollo urbano junto a ríos de llanura. Estudio de caso: la ciudad de Gualeguaychú*. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. <http://hdl.handle.net/11185/834>
- Silva, C. (2013). Representación gráfica de información multivariante: aplicación al sistema de salud de Chile (2010). *Revista Chilena de Salud Pública*, 17(2), 117. <https://doi.org/10.5354/0719-5281.2013.27126>
- Tucci, C. E. M. (2002). *Regionalização de Vazões*. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - IPH – UFRGS.
- Zucarelli, G. (2017). *Regionalización hidrológica con métodos estadísticos multivariados*. Tesis doctoral. Programa Oficial de Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental, Universidade da Coruña. <http://hdl.handle.net/2183/19463>