

DOI: 10.24850/j-tyca-2021-06-02

Artículos

**Regionalización basada en variables geomorfológicas
como herramienta para el cálculo de crecidas.**

Aplicación a la zona centro sur de Chile

**Regionalization based on geomorphological variables
as a tool for calculating flood flow estimates.**

Application to the south-central zone of Chile

Daniela Cifuentes-Santibáñez¹

José Vargas-Baecheler²

¹Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Concepción, Chile,
dancifuentes@udec.cl

²Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Concepción, Chile,
jvargas@udec.cl

Autora para correspondencia: Daniela Cifuentes-Santibáñez,
dancifuentes@udec.cl

Resumen

El objetivo de la presente investigación es proponer una metodología rápida y efectiva para las estimaciones de caudales de crecida para diferentes periodos de retorno. La propuesta metodológica planteada está basada en el método de la regionalización hidrológica. Se verifica la existencia de tres índices que logran representar la respuesta de la cuenca frente a caudales de crecida, el índice de estacionalidad pluvial, índice de estacionalidad en periodo de estiaje y el índice de magnitud de la crecida, obtenidos a partir de registros fluviométricos. Se establece que las variables geomorfológicas que están relacionadas respectivamente con estos índices son el índice de compacidad de Gravelius, altura media y área de la cuenca. Se aplican diferentes técnicas estadísticas que logran determinar un agrupamiento adecuado de cinco grupos homogéneos en la zona centro sur de Chile, comprendida entre la latitud sur $34^{\circ} 50'$ hasta la latitud sur $39^{\circ} 35'$. Se exhibe un plano de clasificación para cuencas sin información hidrológica y ecuaciones regionales de estimación para cada uno de ellos. Por esto se espera que, con esta investigación, se dé un paso importante para lograr la automatización de las estimaciones a través de ecuaciones actualizadas, fáciles de aplicar y comprender en cualquier tipo de cuenca y, sobre todo, basadas en un análisis adecuado del comportamiento hidrológico de las cuencas.

Palabras clave: regionalización hidrológica, grupos homogéneos, variables geomorfológicas, índices de estacionalidad, cuencas sin información fluviométrica.

Abstract

Most of the time in engineering practice, flow estimates must be fast and accurate, seeking to optimize analysis time. From this problem arises the aim of this research, which consists of proposing a rapid and effective flood flow estimation methodology for different return periods. The methodological proposal is based on the hydrological regionalization method. The existence of three indices that manage to represent the response of the basin to flood flows is verified: the rain seasonality index, the seasonality index in the dry season and the flood magnitude index are verified, all being obtained from fluviometric records. It is established that the geomorphological variables Gravelius Compactness index, Average Height and Area of the basin are respectively related to these indices. The different statistical techniques applied are able to determine an adequate grouping of five homogeneous groups in the south-central zone of Chile (between south latitude $34^{\circ} 50'$ and south latitude $39^{\circ} 35'$). A classification plan for basins without hydrological information and regional estimation equations for each of them is displayed. With this research it is expected that an important step will be taken to achieve the automation of the flood flow estimates in any type of basin through updated, easy, and understandable equations based, above all, on an adequate analysis of the hydrological behavior of the basins.

Keywords: Hydrological regionalization, flow automation, geomorphological variables, seasonality indices, basins without fluviometric information.

Recibido: 02/07/2020

Aceptado: 03/11/2020

Introducción

La estimación de caudales en cuencas sin control fluviométrico ha sido un desafío constante en la ingeniería hidráulica. En la práctica ingenieril, la mayoría de las veces las estimaciones deben ser rápidas y precisas, buscando utilizar la menor cantidad de horas de trabajo. Es poco probable que se lleven a cabo modelos sofisticados que requieran una gran cantidad de tiempo para ser calibrados o que demanden datos inexistentes en la zona del proyecto.

En países como Chile, la mayoría de los proyectos de mediana envergadura son desarrollados utilizando estimaciones hidrológicas rápidas. Se utilizan con frecuencia los métodos de precipitación-esorrentía que sugiere el manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica desarrollado por la Dirección General de Aguas de Chile (Dirección General de Aguas, 1995). Corresponden a relaciones desarrolladas de forma empírica en una zona específica del país y con frecuencia contienen coeficientes de estimación

desactualizados que provienen de la estadística hidrológica recolectada en el pasado. Otras veces, cuando se dispone de estaciones fluviométricas cercanas, se utiliza el método de transposición de caudales, que en muchas ocasiones se utiliza con base en el criterio de que cuencas cercanas presentan caudales similares (Chow, 1994). Aplicar este método para las estimaciones de caudales en cuencas sin información, genera la incertidumbre de tener que seleccionar aquella cuenca donante que presente la mayor cercanía y calidad de medición, volviendo el proceso analíticamente lento.

La presente investigación propone un método rápido y efectivo para la estimación de caudales de crecida. El objetivo es generar grupos homogéneos de cuencas a partir de la similitud de sus parámetros geomorfológicos, desde los cuales se pueden transferir caudales de crecida para diferentes periodos de retorno a partir de ecuaciones de transferencia de información regional.

La propuesta metodológica está basada en la metodología de regionalización hidrológica, mezclando y complementando las técnicas estadísticas e hidrológicas que han desarrollado un gran número de investigadores desde mediados del siglo pasado (Blöschl, Sivapalan, Wagener, Viglione, & Savenije, 2013).

Antecedentes bibliográficos

El método de regionalización hidrológica

La regionalización hidrológica es una técnica de transferencia de información desde una o más cuencas donantes de información a otras cuencas que son las receptoras y que no poseen mediciones confiables (Blöschl & Sivapalan, 1995; Oudin, Kay, Andréassian, & Perrin, 2010). La transferencia de información se basa en que el grupo de cuencas consideradas para el traspaso, junto con la cuenca no instrumentada en la que se quiere hacer la estimación de caudales, pertenecen al mismo grupo hidrológicamente homogéneo (Blöschl, 2011). Las cuencas que se consideran hidrológicamente homogéneas presentan características similares que están relacionadas con la respuesta hidrológica de interés (Gutiérrez-López & Aparicio, 2020). Estas características pueden ser, por ejemplo, variables geomorfológicas o climáticas (Zucarelli, 2017).

El método de regionalización no presenta una metodología definida, sino que consta de al menos dos partes que pueden ser abordadas de diferente manera. El primer paso es determinar regiones hidrológicamente homogéneas y el segundo la obtención de un modelo regional para la predicción de caudales en cada una de las regiones homogéneas (Ouarda *et al.*, 2008). Así, en el caso de tener una cuenca

no controlada, se determina a qué grupo homogéneo pertenece, para estimar finalmente los caudales a través de la utilización del modelo regional.

Agrupamiento de cuencas en regiones homogéneas

Que una región sea hidrológicamente homogénea significa que las variables que llevan a una firma hidrológica de interés (como es el caso, por ejemplo, de los caudales de crecida) poseen una variación similar respecto a alguna medida de similitud. Es necesario identificar las variables o índices que describen el fenómeno a estimar (Gutiérrez-López & Aparicio, 2020). El beneficio de utilizar parámetros geomorfológicos de las cuencas como medida de similitud es que con la tecnología actual desarrollada por los sistemas de información geográfica (SIG) es posible determinar los parámetros geomorfológicos de cualquier cuenca (Blöschl *et al.*, 2013).

Una gran cantidad de técnicas estadísticas multivariadas se utilizan en la aplicación de la regionalización hidrológica. Las técnicas difieren de un lugar a otro, por lo cual es necesario detectar el conjunto específico que genera buenos resultados en la zona de estudio. El análisis de componentes principales (ACP) es una de ellas, pues las variables que

describen la hidrología de un lugar comprenden un gran conjunto de elementos altamente correlacionados. El ACP genera una simplificación de los datos existentes, conservando una porción adecuada de la cantidad de información disponible. Nathan y McMahon (1990); Álvarez -Olguín, Hotait-Salas y Sustaita-Rivera (2011); Zucarelli (2017), y Gao, Kamal, Xianfeng, Naresh y Khem (2019) son algunos de los autores que utilizaron esta técnica para visualizar de una manera sencilla la relación existente entre un gran número de variables. El análisis de conglomerados es otra técnica estadística multivariada que busca clasificar una muestra de individuos en grupos homogéneos (denominados también clústeres o racimos). El método consiste en agrupar observaciones minimizando la variabilidad interior de cada grupo, pero buscando la mayor diferencia entre ellos (Pérez, 2004). Para esto es necesario contar con medidas de similitud cuantificables entre las variables consideradas en el análisis. En otras palabras, se requieren técnicas para estimar la distancia entre individuos para poder clasificarlos. Burn (1989) utilizó el algoritmo de clúster para la estimación de regiones homogéneas con datos de caudales máximos anuales de ríos del sur de Canadá; concluyó que el método de clúster es una buena herramienta para tener una primera aproximación de la similitud entre observaciones, generando zonas homogéneas destinadas a ser utilizadas en una metodología de regionalización hidrológica. Luego de su trabajo, múltiples autores siguen confirmando el buen funcionamiento del análisis de conglomerados a la hora de clasificar las observaciones en grupos homogéneos (Álvarez-Olguín *et al.*, 2011;

Ssegane, Tollner, Mohamoud, Rasmussen, & Dowd, 2012; Salazar, 2016; Zucarelli, 2017).

Se debe tomar en cuenta que el análisis clúster no tiene bases estadísticas que relacionen una variable explicativa con otras causales, es un método basado en criterios geométricos y se utiliza fundamentalmente como una técnica exploratoria, descriptiva, pero no explicativa. Por esto es necesario un análisis intensivo de los grupos obtenidos, asegurando su homogeneidad a través de un análisis teórico de las similitudes entre grupos.

Obtención de curvas regionales de estimación de caudales

Hosking y Wallis (1997) proponen un procedimiento denominado índice de crecida para establecer ecuaciones regionales de estimación de crecidas, suponiendo que sus distribuciones de crecientes en todos los sitios dentro de una misma región homogénea son idénticas excepto por la escala o el índice de crecida. La técnica que proponen para estimar los parámetros que describen a una población es la de los L-momentos. Esta metodología tiene las ventajas teóricas sobre momentos convencionales de ser capaz de caracterizar una gama más amplia de distribuciones y

cuando estima a partir de una muestra de ser más robusto a la presencia de los valores atípicos en los datos.

Voguel, Thomas y McMahon (1993), en EUA, desarrollaron un trabajo donde su objetivo principal fue evaluar la idoneidad de utilizar varios modelos estadísticos para representar las muestras de datos de cada una de las cuencas en estudio, utilizando la metodología de los L-momentos. Para este fin recolectan los datos de crecida medidos en 383 cuencas del suroeste de EUA. Hasta ese entonces, pautas establecidas por el Consejo de Recursos Hídricos de EUA recomendaban el uso de la distribución Pearson tipo 3 para los análisis de frecuencia de datos de crecida en los Estados Unidos. Voguel *et al.* (1993) revelan que el procedimiento de inundación índice no se debe restringir a una sola distribución de ajuste, pues existen otras como las de Valores Extremos o Log Pearson 3 que presentan mejores ajustes para una muestra de datos. También establecen que el método de los diagramas de L-momentos presenta la ventaja de comparar el ajuste de varias distribuciones usando un solo instrumento gráfico. Estos se construyen a partir de relaciones adimensionales de los L momentos de una muestra de datos. Norbiato, Borga, Sangati y Zanon 2007), en Italia, se dedicaron a estudiar eventos extremos de precipitación en las cuencas del este de los Alpes italianos; su objetivo principal fue caracterizar la crecida repentina que se desarrolló el 29 de agosto de 2003 sobre el este de la cuenca del río Tagliamento. Para analizar la ocurrencia de la precipitación que generó la crecida, utilizaron el análisis regional de frecuencia basado en el método de la crecida índice y L-momentos. Para esto,

preliminariamente definieron grupos que consideraban homogéneos. Establecieron que el relieve montañoso de los Alpes orientales constituye la variable que representa en mayor medida la geomorfología del lugar de interés. Yang *et al.* (2010), en China, generaron un estudio realizado en la cuenca del río Pearl, segunda cuenca de drenaje más grande del país, aplicando el análisis regional de frecuencia; lograron agrupar 40 cuencas en seis grupos homogéneos, los cuales resultaron ser concordantes con la distribución de las precipitaciones y humedad. Por lo tanto, sugieren que el análisis regional de frecuencia es una herramienta potente para disminuir la incertidumbre en el ajuste de modelos estadísticos a una base de datos.

Recientemente, el método de regionalización hidrológica ha sido utilizado para complementar modelos hidrológicos. Pagliero, Bouraoui, Willems y McIntyre (2019), en Europa Oriental, investigaron técnicas de regionalización para el modelado hidrológico a gran escala; concluyeron que el resultado del rendimiento promedio de la calibración aumentó al utilizar subcuencas agrupadas por regiones homogéneas. Así, logran incrementar el R^2 de calibración de 0.46 a 0.63.

En América Latina también está en auge el uso del análisis regional de frecuencia para caracterizar eventos extremos. En 2010, a raíz del Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), se publica la *Guía metodológica para la aplicación del análisis regional de frecuencia de sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América*

Latina (Núñez, 2010). En esta guía se presenta un resumen de la metodología del análisis regional de frecuencia expuesta originalmente por Hosking y Wallis a finales de la década de 1990. La finalidad de la guía es presentar al lector la experiencia de sus autores y colaboradores en la aplicación de una metodología alternativa al análisis de frecuencia y al estudio de la recurrencia de eventos de sequía en áreas piloto de América Latina, con el objetivo de demostrar que una metodología tan usada puede emplearse sin problemas en este sector del planeta.

Al respecto, Vera y Mora (2013) proponen un método para el análisis de frecuencia regional de lluvias diarias máximas para cuencas existentes en los Andes bolivianos. Campos (2013) genera un análisis regional relativo a la frecuencia de crecidas en una región hidrológica mexicana; utiliza índices de estacionalidad, demostrando la gran utilidad que presentan para representar el comportamiento de las cuencas. Zucarelli (2017) utilizó cuencas pertenecientes a Perú y Uruguay, donde a partir de una gran cantidad de técnicas multivariadas logró generar un agrupamiento homogéneo de cuencas. Recientemente, Da-Silva *et al.* (2020) evaluaron metodologías de regionalización hidrológica aplicadas en el pasado para la cuenca alta del río Jaguari en Brasil.

La gran cantidad de estudios existentes que utilizan la metodología del análisis regional de frecuencia no hacen más que verificar su utilidad y precisión en las estimaciones de valores extremos para diferentes periodos de retorno. Si bien este proceso posee dos pasos bien definidos, siendo el primero de ellos estimar las regiones homogéneas y, segundo, establecer las ecuaciones regionales de estimación de caudales, la forma

de aplicarlas cambia dependiendo de la característica de la zona a estudiar. En consecuencia, se puede encontrar una gran combinación de técnicas estadísticas que ayudan a obtener grupos homogéneos y curvas de estimación regional.

Así, usando como base el método de regionalización hidrológica, el desafío de la presente investigación es detectar una metodología basada fuertemente en el comportamiento de las cuencas de la zona centro sur de Chile. El lugar de estudio se escogió por ser una de las zonas que presenta la mayor concentración de población en Chile, propensa de manera constante a sufrir eventos extremos de precipitación; además, la región presenta una densidad adecuada de estaciones fluviométricas para iniciar un proceso de regionalización en el país, con información hidrológica confiable para llevar a cabo las pruebas de homogeneidad y heterogeneidad necesarias.

El presente trabajo utiliza la regionalización hidrológica basada en la similitud de parámetros geomorfológicos para identificar regiones hidrológicamente homogéneas desde las cuales se pueda generar un traspaso de información de caudales de crecidas para diferentes periodos de retorno a partir de ecuaciones de transferencia regional. Para este fin se utilizan diversas técnicas multivariadas, como el análisis de clúster para decidir las variables geomorfológicas capaces de captar el comportamiento hidrológico de la cuenca, el método de clúster para realizar una agrupación preliminar de cuencas homogéneas, índices de discordancia y heterogeneidad obtenidos a partir de los registros fluviométricos de las cuencas de un mismo grupo homogéneo y,

finalmente, el análisis regional de frecuencias basado en el Método de Avenida Índice para obtener ecuaciones de transferencia de información regional. A continuación, se presenta la definición del área de estudio, y posteriormente los materiales y métodos utilizados en esta investigación.

Área de estudio

El área de estudio se ubica en el continente sudamericano, en la zona centro sur de Chile. Está comprendida entre la latitud sur 34° 50' hasta la latitud sur 39° 35', específicamente entre las regiones administrativas chilenas de Maule y Araucanía. En este sector se encuentran cuatro cuencas: Itata, Biobío, Imperial y Toltén, desde las cuales este estudio analizará 26 subcuencas que presentan información continua y confiable, las que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Cuencas Donantes de información.

Mataquito (5)	Maule (3)
1. Río Colorado en Junta con Palos	6. Río Ancoa en el Morro

2. Estero Upeo en Upeo	7. Río Claro en Camarico
3. Río Palos en Junta con Colorado	8. Río Lircay en Puente las Rastras
4. Río Teno después de Junta con Claro	
5. Río Claro en los Queñes	
Biobío (3)	Itata (6)
9. Río Lirquén en Cerro el Padre	12. Río Cato en Puente Cato
10. Río Malleco en Collipulli	13. Río Diguillín en Longitudinal
11. Río Mininco en Longitudinal	14. Río Itata en General Cruz
	15. Río Itata en Trilaleo
	16. Río Ñuble en la Punilla
	17. Río Sauces antes Junta con Ñuble
Imperial (5)	Toltén (4)
18. Río Dumo en Santa Ana	23. Río Donguil en Gorbea
19. Río Huichahue en Faja	24. Río Licura en Licura
20. Río Muco en Puente Muco	25. Río Mahuidanche en Santa Ana
21. Río Quino en Longitudinal	26. Río Peyuhue en Quitate
22. Río Traiguén en Victoria	

La zona centro sur de Chile presenta ríos de alta pendiente y corto recorrido, pero que en general llegan hasta el mar. Su clima es de alta montaña en la cordillera y más templado en la costa, por el efecto regulador de las masas de agua del Pacífico. En el valle longitudinal es más seco en el norte y más templado en el sur. El periodo de lluvias líquidas se concentra en los meses de abril a septiembre, mientras que el periodo seco o de estiaje inicia por lo general en octubre y se extiende hasta finales de marzo.

Materiales y métodos

Como se ha señalado con anterioridad, el método de regionalización hidrológica, aplicado en el mundo para mejorar las estimaciones de valores extremos, se basa en el traspaso de información hidrológica entre cuencas que presentan características hidrológicas homogéneas. Dentro de las diferentes técnicas estadísticas utilizadas por lo común para su aplicación, se determinó que la metodología planteada en la Figura 1 se adecua a las condiciones de la zona centro sur de Chile.

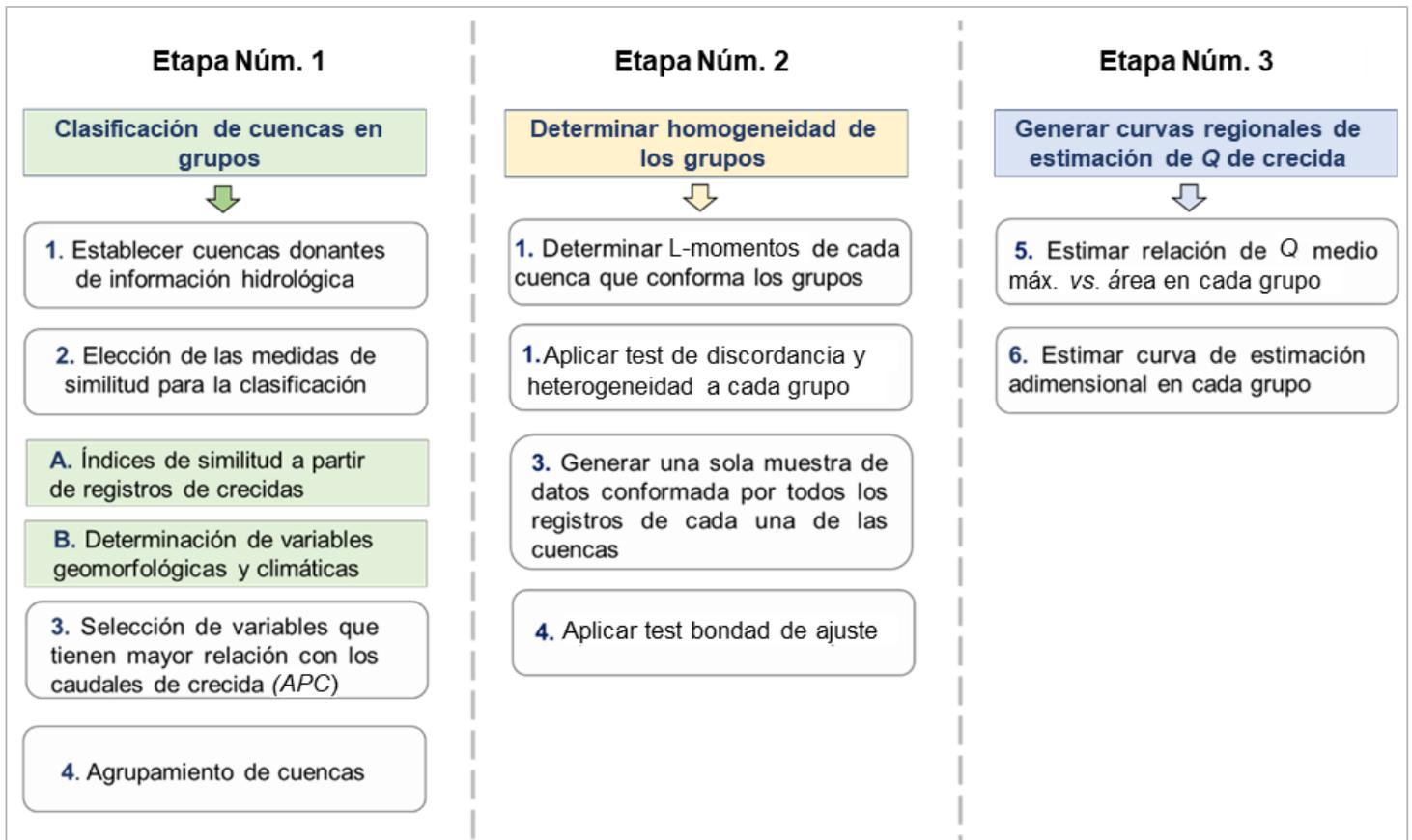


Figura 1. Resumen de la metodología utilizada.

La metodología planteada en la Figura 1 se utilizará para implementar la metodología de la regionalización hidrológica como herramienta para las estimaciones de caudales de crecida para diferentes periodos de retorno. Consiste en tres etapas: la primera es generar una clasificación de cuencas en grupos similares; posteriormente, en la segunda etapa, se determina la homogeneidad de los grupos obtenidos a partir de test estadísticos aplicados a los registros fluviométricos de las cuencas; finalmente, la etapa tres consiste en la generación de curvas

regionales de transferencia de información. A continuación, se presenta una descripción de cada una de ellas.

Etapas 1: clasificación de cuencas en grupos

Para lograr un adecuado traspaso de información se requiere que las cuencas donantes de los datos, que forman parte de la clasificación, se encuentren instrumentadas por la Dirección General de Aguas de Chile (DGA). Se escogen cuencas que presenten los datos más completos, con una longitud mínima de 30 años, a fin de que la información disponible en cada región sea confiable y traspasable a cuencas no controladas.

Se utilizarán índices estacionarios como variables dependientes, que cumplirán la función de representar la respuesta de las cuencas frente a caudales de crecida, obtenidos directamente de las fechas donde ocurren las crecidas registradas en cada estación fluviométrica (cuencas en estudio). Campos (2013) indica que la similitud en la distribución temporal y la regularidad de las crecidas de dos cuencas implican una semejanza en sus características fisiográficas y meteorológicas. Para establecer los índices estacionarios es necesario tener la fecha en que ocurren las crecidas máximas de cada periodo de análisis. Los 360 grados de una circunferencia unitaria se dividen en los 365 días del año. Es en la

circunferencia donde se comienzan a ubicar los días del año cada $360/365 = 0.98^\circ$. Los índices de estacionalidad utilizados como variable dependiente para representar la respuesta de la cuenca ante crecidas son el Índice del Día Medio Juliano (DMC) y el Índice Resultante Media de Estacionalidad (R). El DMC muestra la dirección media de las fechas en que ocurren las crecidas máximas de una cuenca en específico. Se espera que cuencas que presenten DMC semejante tengan similitud en otras características hidrológicas. El índice resultante media de estacionalidad (R) corresponde al cálculo de la variabilidad de las "n" fechas de ocurrencia de las crecidas; en relación con el DMC, es una medida adimensional de la dispersión de los datos que varía entre 0 y 1. Un valor unitario indica que todas las crecientes ocurren en la misma fecha, mientras que un valor cercano a cero implica gran variabilidad de ocurrencia a lo largo de los años.

Para obtener una mejor representación de la respuesta de la cuenca, en el presente estudio se recolectan las crecidas ocurridas en dos periodos en el año; cada cuenca en estudio presentará tres índices que buscan caracterizar su respuesta frente a crecidas: índices de estacionalidad pluvial (DMC y R pluvial); índices de estacionalidad de estiaje (DMC y R de estiaje), e índice de magnitud de la crecida (QMedioMáx). Estos índices se calcularon a partir de los registros fluviométricos de cada cuenca en estudio.

Las variables geomorfológicas, a su vez, serán utilizadas para clasificar cuencas sin información fluviométrica, cumpliendo la función de variables independientes; fue importante identificar las que tenían mayor

relación con los índices representativos de crecidas. Las variables geomorfológicas utilizadas en esta investigación son las especificadas en la Tabla 2, que son 17 en total, las que se obtienen a partir del procesamiento de modelos de elevación digital del terreno (MEDT).

Tabla 2. Ordenamiento de las variables geomorfológicas analizadas.

Clasificación	Núm.	Variable	Abreviación
Variabes relacionadas con el área y cauces de la cuenca	1.	Longitud de la cuenca	Lcuen
	2	Longitud al centroide	Lca
	3.	Longitud del cauce principal	Lprin
	4.	Longitud total de las corrientes	Lcoor
	5.	Área	A
	6.	Perímetro	P
Variabes relacionadas con el relieve y la precipitación	7.	Elevación media	Em
	8.	Elevación máxima	Emáx
	9.	Pendiente promedio del cauce	Sc
	10.	Pendiente promedio de la cuenca	S
	11.	Precipitación media anual	PPmed

	12.	Precipitación media máxima anual	PPmáx
	13.	Precipitación media mínima anual	PPmín
Índices y variables relacionadas con la forma	14.	Coeficiente de compacidad	Rk
	15.	Relación de elongación	Re
	16.	Relación de circularidad	Rc
	17.	Densidad de drenaje	Dd

Fuente: basado en Blöschl *et al.* (2013).

Definidas estas variables se realiza un análisis de componentes principales (ACP), donde los índices de crecidas se relacionan junto a 17 variables geomorfológicas obtenidas de las cuencas en estudio, seleccionando un pequeño grupo de variables geomorfológicas que sean capaces de describir de manera generalizada la respuesta de la cuenca ante crecidas. Su uso en hidrología se muestra en estudios desarrollados por Nathan y McMahon (1990); Álvarez-Olguín *et al.* (2011); Blöschl *et al.*, 2013; Zucarelli (2017), y Gao *et al.* (2019). Dentro de los resultados que entrega el ACP se encuentra un mapa denominado "Círculo de correlaciones". Muestra una proyección de las variables iniciales en las dos componentes principales que capturan la mayor cantidad de información que entregan las variables. En el gráfico, cuando dos variables están lejos del centro, tenemos varias posibilidades: si quedan

próximas una a la otra están positivamente correlacionadas; si son ortogonales, no están correlacionadas; si quedan en lados opuestos con respecto al centro están negativamente correlacionadas. Analizando este gráfico se seleccionarán las variables independientes que mayor relación tienen con la respuesta de la cuenca ante crecidas.

Para la clasificación de cuencas se asume preliminarmente que cuencas que presenten las variables geomorfológicas similares (ya nombradas) presentan una respuesta hidrológica similar ante crecidas. El agrupamiento se lleva a cabo mediante la aplicación de algoritmos de clúster jerárquico utilizando el criterio de agrupamiento de Ward. La identificación de regiones homogéneas mediante este método se basa en las recomendaciones de Nathan y McMahon (1990); Hosking y Wallis (1997); Zhang y Hall (2004), y Apolinario, Pitágoras, Lujano y Tapia (2017), método jerárquico que no requiere del conocimiento anticipado de un grupo homogéneo.

Etapas 2: determinar la homogeneidad de los grupos

La Etapa 2 consiste en determinar si las regiones previamente obtenidas en la Etapa 1 son realmente homogéneas. Para cumplir este objetivo y el de la Etapa 3, que consiste en generar ecuaciones regionales de

transferencia de información, se aplicará un análisis regional de frecuencia utilizando el método de los L-momentos (ARF- LM) en cada una de las regiones determinadas. Una de las mayores ventajas que ofrece el análisis regional de frecuencias es la posibilidad de agregar la información proveniente de varias muestras en una sola, asumiéndola como una región homogénea, es decir, como una región que presenta una distribución de frecuencias idéntica excepto por un factor de escala específico para la zona de estudio. Este método tiene como principal sustento estadístico para los cálculos de las probabilidades la teoría de los L-momentos. El *software Linear Regional Analysis of Precipitation (L-RAP)* desarrollado por MGS (2008), en el marco del "Proyecto Atlas de Sequía para áreas piloto de América Latina", ha sido utilizado como herramienta básica para la aplicación de la metodología de análisis regional de frecuencia planteada por Hosking y Wallis (1997). Esta herramienta ayuda a disminuir la dificultad de ecuaciones matemáticas a resolver, que tiende a ser un problema a la hora de aplicar la metodología planteada. En la presente investigación se utiliza el *software L-RAP* desde el desarrollo de la Etapa 2, para realizar el cálculo de los L-momentos de los registros de cada una de las cuencas en estudios y en la aplicación de los test que aseguran la homogeneidad de los grupos.

Para determinar la homogeneidad de los grupos, la metodología propuesta por Hosking y Wallis (1997) indica la realización del test de discordancia y heterogeneidad. El primero indica que una cuenca puede ser discordante del resto del grupo si sus L-momentos se alejan de forma significativa del promedio de los L-momentos regionales. Los valores

críticos del indicador de discordancia (D_i) sugeridos para considerar una estación como discordante se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores críticos del valor de discordancia D_i .

Número de cuencas en la región	Valor crítico D_i	Número de cuencas en la región	Valor crítico D_i
5	1.33	10	2.49
6	1.65	11	2.63
7	1.92	12	2.76
8	2.14	13	2.87
9	2.33	14	2.97

Fuente: Hosking y Wallis (1997).

Por otro lado, el test de heterogeneidad es una medida del grado de homogeneidad o heterogeneidad de los registros de caudales que presentan las cuencas que conforman cada grupo. La medida de heterogeneidad, denominada estadístico H_1 , ha sido desarrollada por Hosking y Wallis (1997) como un indicador del grado de heterogeneidad en los L-momentos ratios para un grupo de cuencas, midiendo la variabilidad relativa del coeficiente de variación (L-CV) de las muestras de datos de un grupo. Los valores críticos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores críticos del test de heterogeneidad H_1 .

Heterogeneidad	Hosking y Wallis (1997)	Wallis <i>et al.</i> (2007)
Homogénea	$H_1 < 1$	$H_1 < 2$
Posiblemente Heterogénea	$1 < H_1 < 2$	$2 < H_1 < 3$
Heterogénea	$H_1 > 2$	$H_1 > 3$

Fuente: Hosking y Wallis (1997), y Wallis (2007).

Los límites propuestos originalmente por Hosking y Wallis (1997) sólo tenían en cuenta la variabilidad estadística. Sin embargo, las mediciones de precipitación o caudales por lo regular contienen otras fuentes de variación, como el traslado físico de estaciones durante sus años de funcionamiento, cambio de operadores, datos faltantes surgidos de reportes inconsistentes, falta de atención para medir la precisión y condiciones específicas del sitio, o hasta el crecimiento de árboles alrededor de la estación. Estos factores, que incrementan en algún grado la heterogeneidad natural de las regiones, fueron considerados por Wallis *et al.* (2007).

Una vez determinada la homogeneidad de cada uno de los grupos, se seleccionó la distribución regional de frecuencia que mejor se adecuaba a la forma y distribución de los datos regionales. Para el ajuste de funciones de distribución con base en los L-momentos se utilizaron la

distribución logística generalizada (GLO), generalizada de valores extremos (GEV), normal generalizada (GNO), Pearson tipo III (PE3) y Pareto generalizado (GPA), todas ellas recomendadas por Hosking y Wallis (1997). Para determinar cuál de las distribuciones anteriores se ajustaba mejor a los datos regionales, se utilizaron los criterios de bondad de ajuste Test Z y también un método gráfico denominado "Diagrama de L-momentos ratios" que permite visualizar la semejanza entre los valores L-asimetría y L-curtosis tanto de las cuencas en estudio como de las distribuciones comúnmente utilizadas en el ARF.

En la metodología planteada se mostrarán dos ecuaciones por cada grupo homogéneo. La primera en la relación de Q medio máximo vs. alguna variable geomorfológica; la segunda corresponde a una curva adimensional de estimación de caudales de crecida, generada a partir de la función de distribución que mejor se adecua a los datos regionales según las pruebas de bondad de ajuste aplicadas en la etapa anterior. Se usa la muestra normalizada por el caudal medio máximo, obteniendo diferentes valores de Q normalizado para diferentes valores de no excedencia.

Se genera también un plano de clasificación de cuencas, que ayudará a clasificar cuencas sin información hidrológica de manera sencilla. Se presentará igual dimensión que número de variables geomorfológicas utilizada para la clasificación. Luego, se debe obtener el vector de las variables para cada una de las cuencas de la muestra en estudio, ubicándolas en el plano de clasificación. Como es de esperar, los puntos cercanos corresponden a cuencas que presentan valores similares

de estas variables. También es posible ubicar el centro de cada grupo. En este caso, si se desea clasificar una cuenca sin información, se obtiene la variable geomorfológica de área y relieve a partir de algún sistema de información geográfica y se ubica en el mapa de clasificación. Luego se mide a través de la distancia euclidiana a qué centro de los grupos está más cercana, siendo el grupo al que pertenece.

Para validar los resultados y probar que es un método posible de utilizar en cuencas chilenas, se analizaron los criterios de regionalización propuestos en el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas de Chile (versión 2019), donde indica en el punto 3.702.8 la existencia de un procedimiento desarrollado por el US Geological Survey (Dalrymple, 1960) que plantea un test para verificar la homogeneidad hidrológica de una región.

Resultados

Con las 17 variables geomorfológicas e índices de estacionalidad seleccionados, se realizó un primer ACP, donde se verifica la existencia de tres índices que logran describir la respuesta de la cuenca frente a caudales de crecida:

- a) El índice de estacionalidad pluvial, determinado a partir de la fecha en que ocurren las crecidas máximas en el tiempo de lluvias, que en la zona centro sur de Chile corresponde al periodo comprendido entre abril y septiembre.
- b) El índice de estacionalidad en periodo de estiaje se calcula con la fecha de ocurrencia de los registros de caudales de crecidas ocurridos en los meses de menor precipitación; en esta zona de Chile abarca desde octubre hasta finales de marzo.
- c) Índice de magnitud de la crecida; corresponde al caudal medio máximo de una cuenca.

Obteniendo los tres índices anteriores es posible caracterizar la respuesta de una cuenca frente a crecidas ocurridas en un periodo de fuertes lluvias y crecidas ocurridas en épocas de deshielo o caudales bajos. Sumado a esto se obtiene un orden de magnitud de las crecidas que se presentan. Posteriormente, se realiza un segundo ACP, considerando sólo las variables que presentan cercanía a los índices de estacionalidad que describen la respuesta de las cuencas frente a crecidas. La Figura 2 muestra el resultado obtenido.

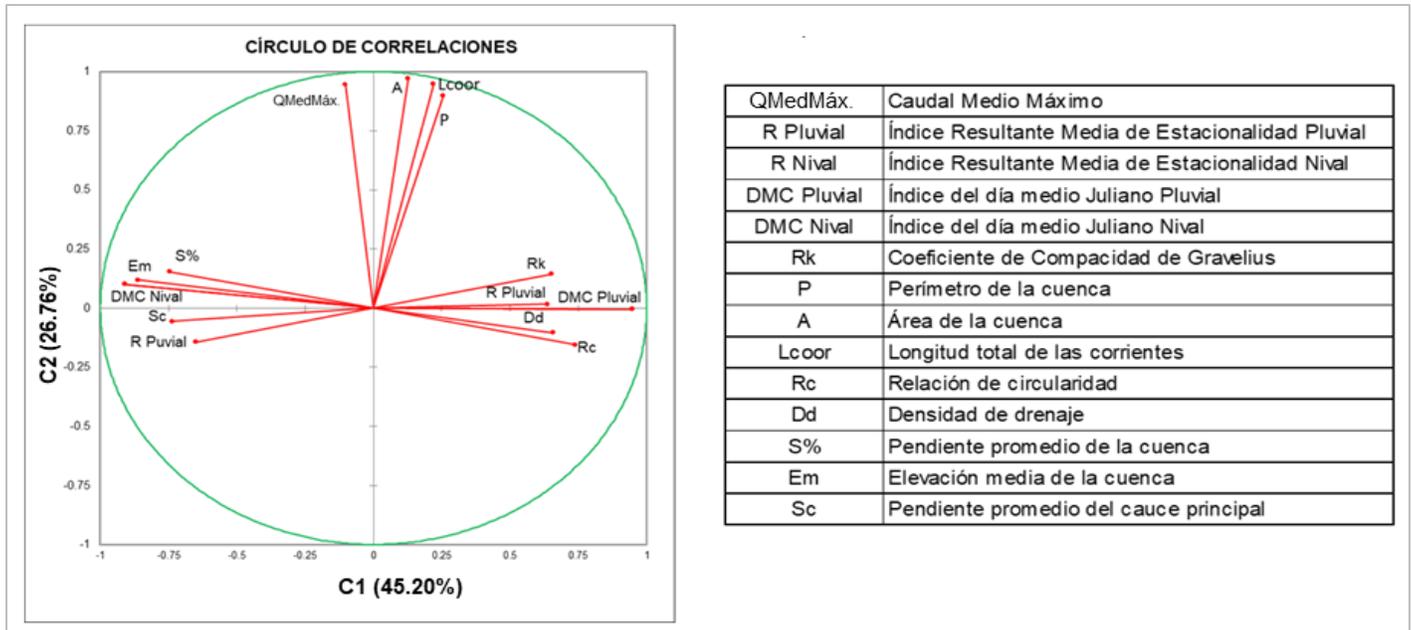


Figura 2. Círculo de correlaciones (ACP).

El círculo de correlaciones (Figura 2) muestra una proyección de las variables iniciales en el espacio de las primeras dos componentes principales, que para este caso rescatan el 72 % del total de información que poseen los datos. Cada variable está representada en el gráfico por un radio, existiendo varias posibilidades de correlación dependiendo de su posición: si están próximas una a la otra están positivamente correlacionadas; si son ortogonales no están correlacionadas; mientras que si están en lados opuestos con respecto al centro están inversamente correlacionadas.

En los resultados se apreció una clara tendencia agrupar las variables en tres zonas. Partiendo desde la posición +0 y en sentido

antihorario, se encuentra la primera zona caracterizada por el índice de estacionalidad R Y DMC pluvial. Estos índices, obtenidos a partir de registros pluviométricos en periodo de lluvias, representan la respuesta de las cuencas frente a precipitaciones líquidas. Cercana a los índices R y DMC Pluvial se encuentran ubicadas variables geomorfológicas de forma, como el índice de compacidad (Rk), índice de circularidad (Rc) y densidad de drenaje (Dd). Todas ellas indican una medida de la forma de la cuenca o qué tan cercana está a ser circular. Analizando esta situación y buscando alguna explicación sobre qué variables de forma están relacionadas con la respuesta de la cuenca frente a caudales producidas en periodos lluvias, se piensa de inmediato en el tiempo de concentración de la cuenca. El tiempo de concentración de una cuenca se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Si dos cuencas presentan la misma área, pero una es de forma alargada y la otra redondeada, presentarán tiempos de concentración diferentes. La alargada presenta un mayor tiempo de concentración, lo que se traduce que, frente a una misma precipitación, su respuesta será más lenta, produciendo hidrograma de crecidas aplanado. En cambio, una cuenca redondeada de igual área y bajo la misma precipitación, tendrá un tiempo de concentración más bajo, lo que se traduce en una rápida respuesta de la cuenca, generando caudales máximos elevados; es así como se relaciona la forma de la cuenca con su respuesta ante crecidas.

La segunda zona en sentido antihorario se caracteriza por el índice de magnitud de la crecida o, en otras palabras, el “caudal medio máximo” de la cuenca. Las variables que están cercanas a ellas son todas aquellas que tienen relación conceptual justamente con la magnitud de la cuenca, como el área, perímetro y largo de todas las corrientes. Esto se debe a que cuencas que presentan un mayor tamaño captan una mayor cantidad de agua frente a precipitaciones generando caudales elevados.

Por último, la tercera zona está caracterizada por el índice de estacionalidad R Y DMC nival. Estos índices, obtenidos a partir de registros fluviométricos en periodos secos, representan la respuesta de las cuencas principalmente a deshielos o precipitaciones bajas. Cercana a los índices R y DMC nival se encuentran ubicadas variables geomorfológicas como altura media de la cuenca, pendiente media de la cuenca o pendiente del cauce principal, todas ellas relacionadas con el relieve y la altimetría de la cuenca. Esta correlación se justifica por la isoterma cero, que define la cota que diferencia la precipitación entre pluvial y que por lo general depende, dentro de otras variables, del relieve de la cuenca; si presenta una altura considerable, la precipitación del periodo pluvial se acumula como nieve; en cotas superiores a la isoterma cero, promedios de la cuenca, en presencia de las altas temperaturas de los periodos secos se derrite causando aumento en los caudales máximos. Si la altura no es considerable, el hidrograma de la cuenca es más aplanado; así queda caracterizada la respuesta de la cuenca en periodos secos.

Por último, se observa que la respuesta de la cuenca en periodo pluvial no tiene relación con su magnitud, pues está ubicada en forma

perpendicular en el círculo de correlaciones (Figura 4). Lo mismo ocurre con la respuesta nival y la magnitud de la cuenca. Por otro lado, el círculo de correlaciones muestra que la respuesta de la cuenca en periodo pluvial y nival está negativamente correlacionada, pues se ubica en lados opuestos. Esto es esperable debido a los regímenes que presentan las cuencas: las pluviales tienen una respuesta alta en periodo de lluvias y baja en periodos secos; en cambio, cuencas nivales acumulan la precipitación en invierno generando bajos caudales y en verano por el derretimiento provocan caudales máximos mayores. En pocas palabras, la respuesta de la cuenca en invierno y verano están inversamente correlacionadas. Así, finalmente se pueden concluir las relaciones que se muestran en la Figura 3.

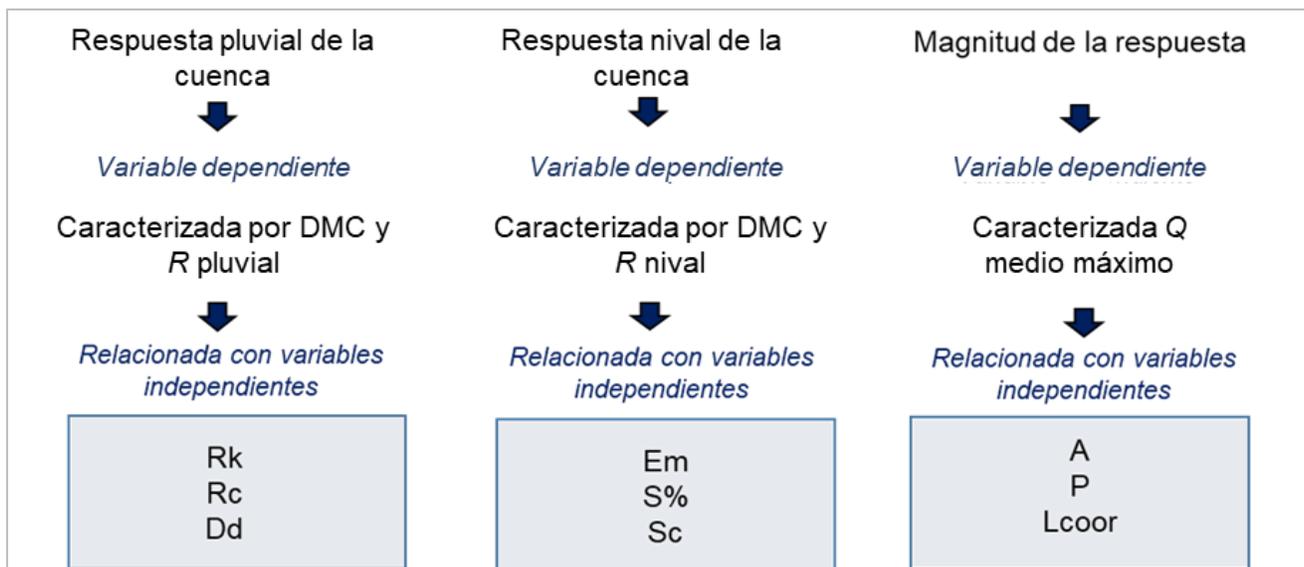


Figura 3. Relación de la respuesta de la cuenca y variables geomorfológicas.

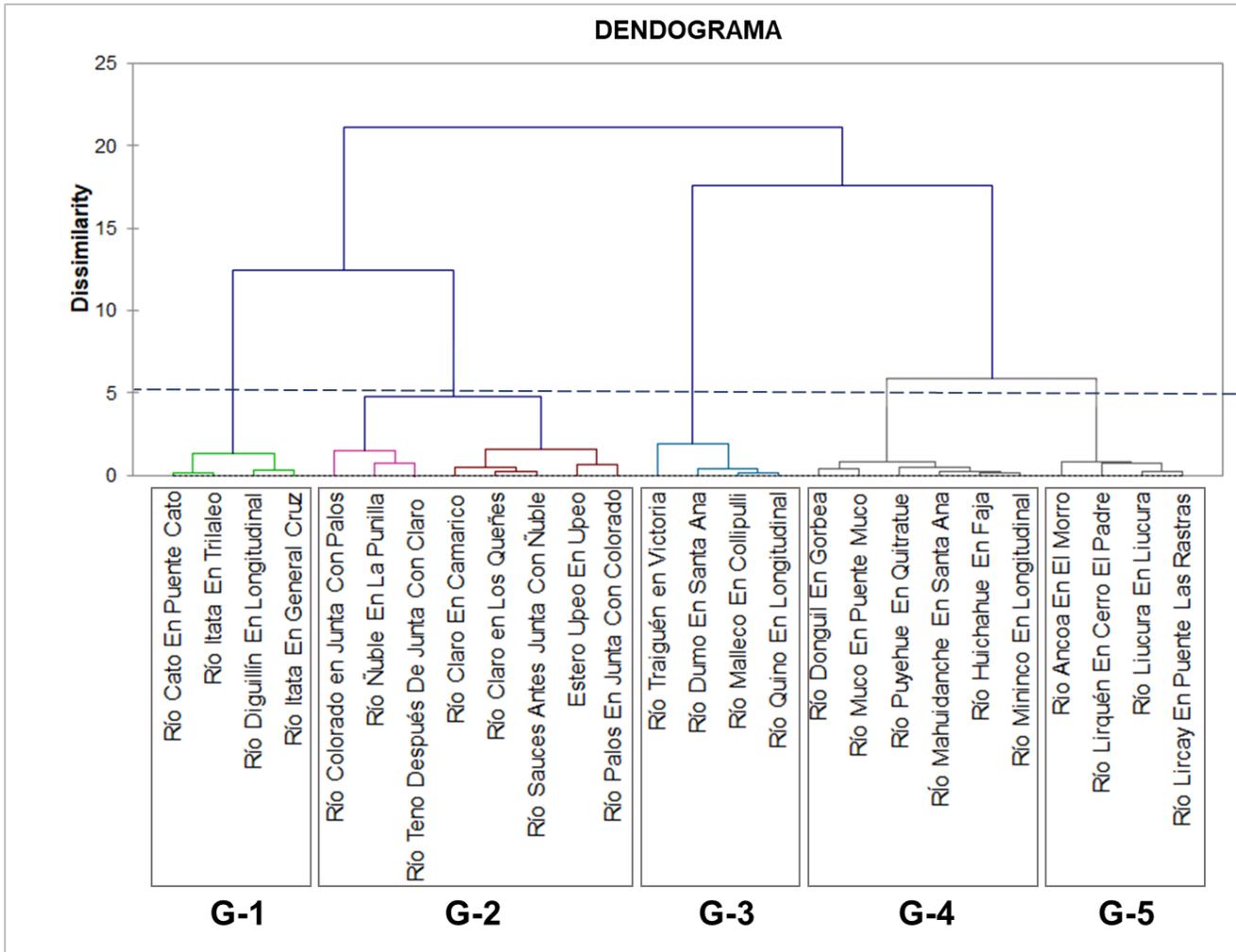


Figura 4. Clasificación preliminar de cuencas donantes de información.

De esta clasificación de variables es necesario elegir aquellas independientes que se utilizarán para la clasificación de cuencas donantes de información. Como la idea es lograr una clasificación basada en variables fácilmente obtenibles desde cualquier tipo de cuenca, esté

instrumentada o no, se elegirán tres variables geomorfológicas de fácil obtención, que se describen a continuación, considerando que reflejan la misma información.

Para describir la respuesta pluvial se escogió el índice de compacidad de Gravelius, que señala la mayor o menor compacidad de la cuenca a través de la relación entre su perímetro y la circunferencia del círculo que tenga la misma superficie que la cuenca. Para producirlo basta obtener el perímetro de la cuenca y su área, siendo de muy fácil obtención. Para describir la respuesta nival se escogió la altura media de la cuenca. Esta medida, de fácil obtención, es un indicador representativo de la isoterma 0 de la cuenca, estando teóricamente ligada con su comportamiento durante periodos secos. Para describir la magnitud de la respuesta se utilizará el área, la que sin lugar a dudas es una medida representativa y fácil de obtener.

Una vez definidas las variables a utilizar para el agrupamiento de las cuencas donantes de información se lleva a cabo el agrupamiento mediante el método de clúster. Se probaron diferentes metodologías de clúster, como el K-medias y el jerárquico. Al final se decidió que la clasificación más consistente fue la entregada por el método jerárquico, mostrando la clasificación preliminar obtenida en la Figura 4.

De modo preliminar, la clasificación jerárquica arrojó cinco grupos. Es posible y altamente probable que esta distribución original cambie después de aplicar las pruebas de heterogeneidad y discordancia. Se deben privilegiar estos por sobre la clasificación preliminar. Así, es posible reubicar los grupos, desarmarlos y formarlos de nuevo, a fin de maximizar

la homogeneidad de sus registros. Si esto sucede, es necesario recalcular el centro del grupo y visualizar en tres dimensiones su cercanía, como se muestra más adelante. Se aplicó el análisis regional de frecuencia, partiendo por la obtención de los L-momentos de cada cuenca en estudio. Se determinó que los datos presentan estacionariedad e independencia. Además, se aplicaron las pruebas de discordancia y heterogeneidad, concluyendo que los grupos son homogéneos en la distribución de sus registros fluviométricos.

Posteriormente utilizando el test Z y el método gráfico de ajuste que puede ser observado en la Figura 5, se escoge la distribución de frecuencia de mejor ajuste a la totalidad de los registros fluviométricos de cada grupo.

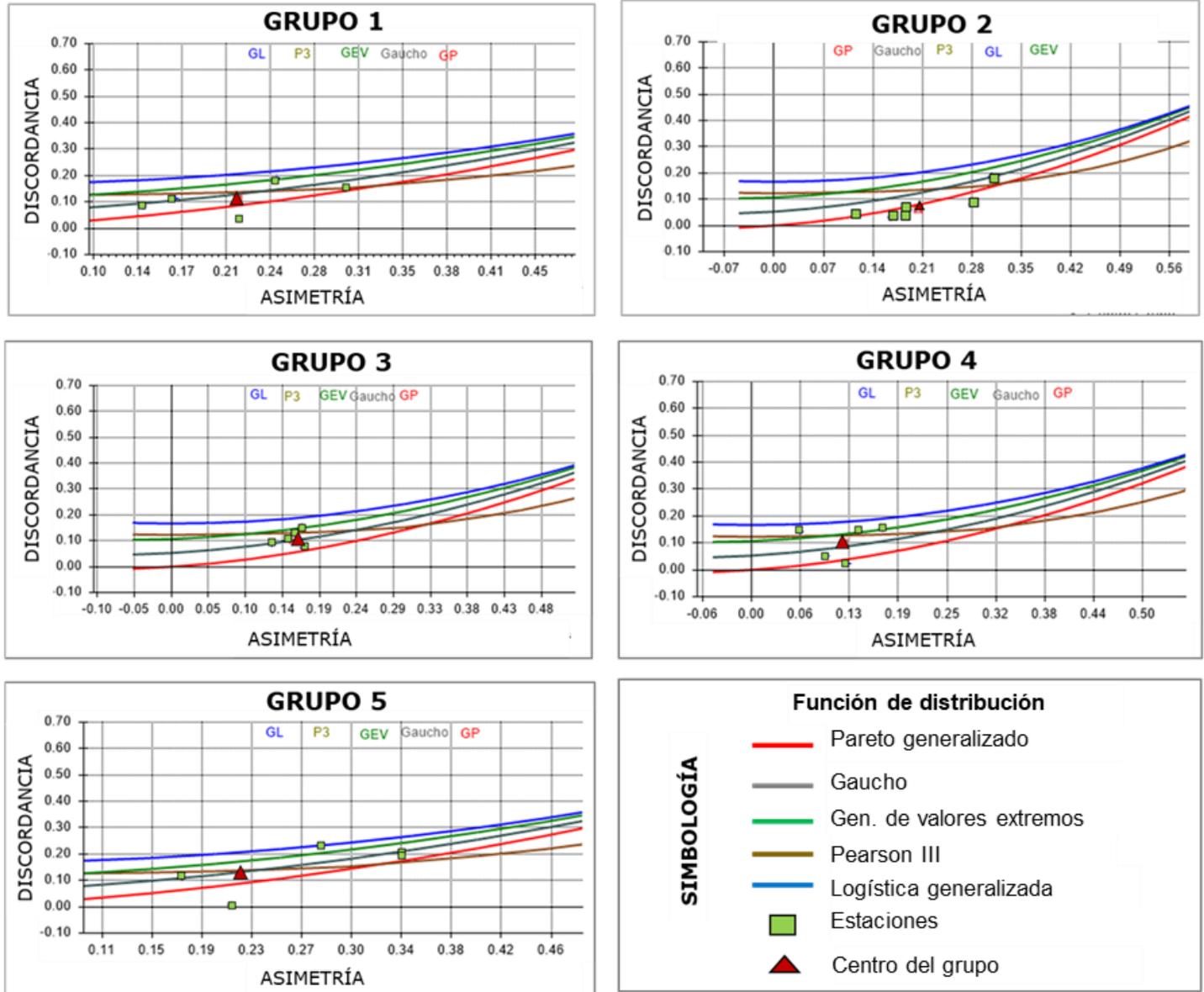


Figura 5. Método gráfico para determinar mejor ajuste de distribuciones de probabilidad a la muestra de los cinco grupos obtenidos.

Por último, se obtienen ecuaciones regionales que se pueden observar en la Figura 6 y Figura 7, respectivamente, que corresponden a la relación del caudal medio máximo *versus* el área de la cuenca y las ecuaciones adimensionales de estimación de caudales.

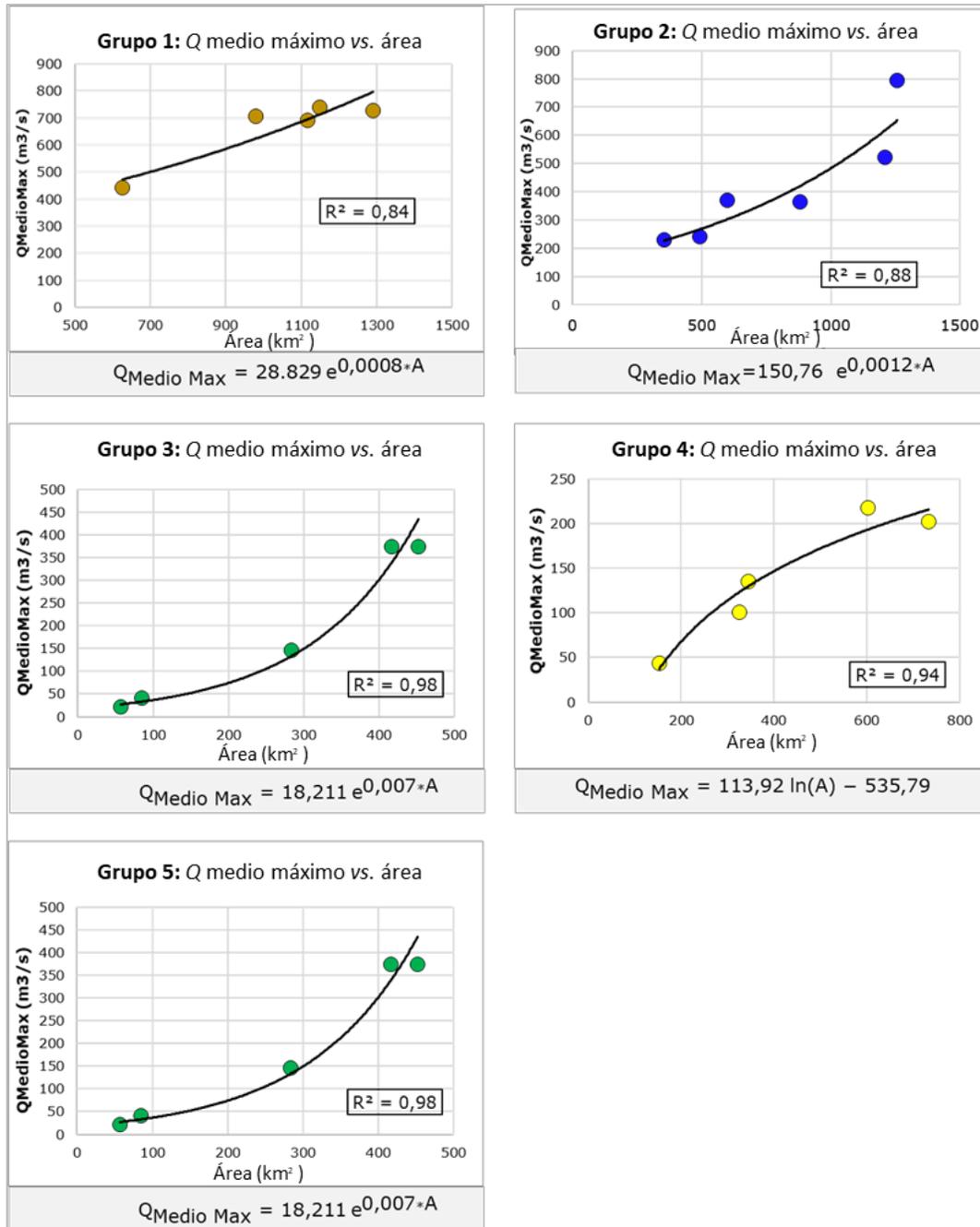


Figura 6. Ecuaciones regionales de caudal medio máximo vs. área.

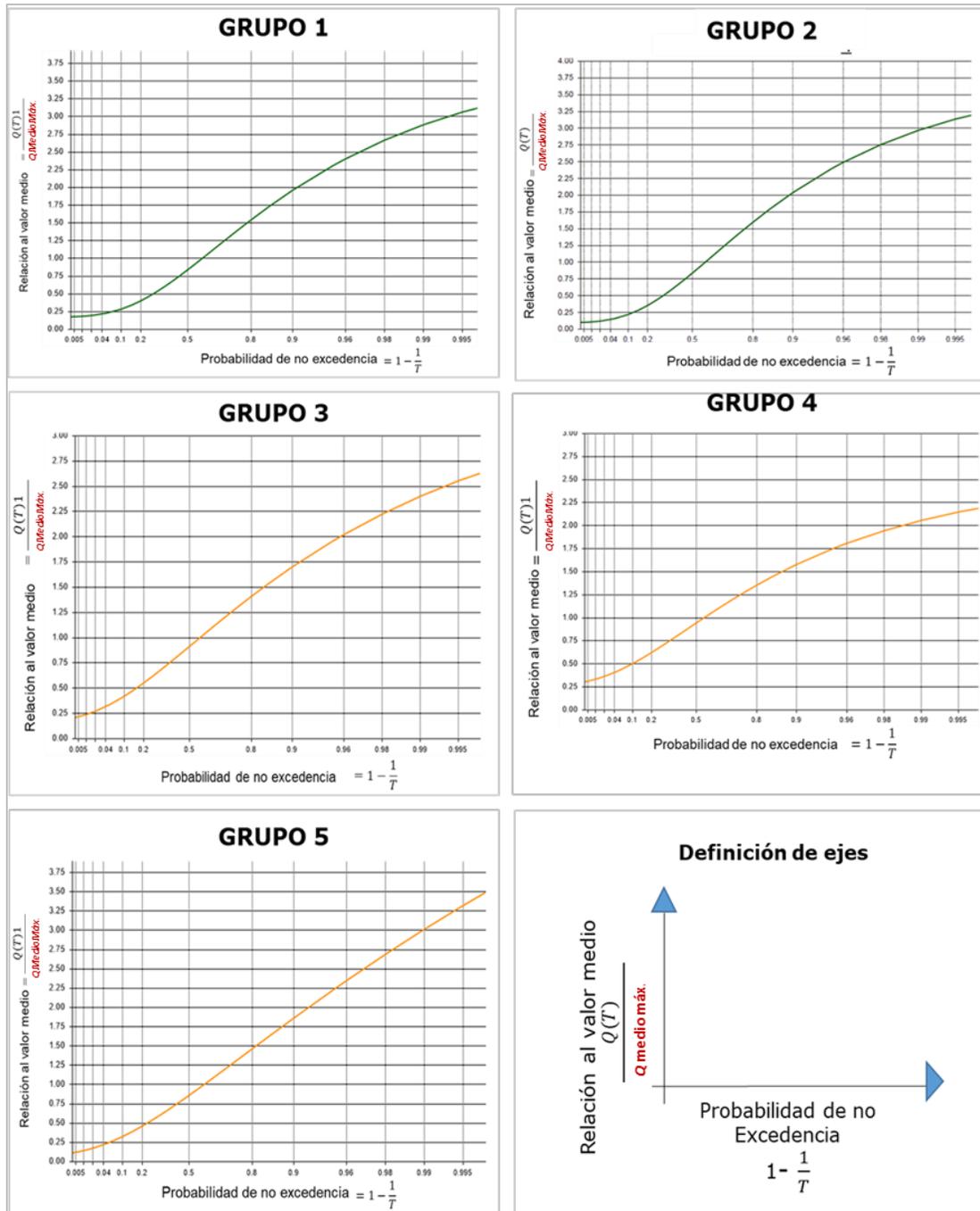


Figura 7. Ecuaciones regionales adimensional de estimación de caudales.

Para la validación de la homogeneidad de los grupos se aplicó la metodología propuesta por el US Geological Survey y recomendada por el Manual de Carreteras Chileno (Dirección General de Obras Públicas, 2019) En la Figura 8 se muestra la ubicación geográfica de cada uno de los grupos obtenidos, diferenciándolos con colores. Los números que se indican en cada una de las subcuencas aluden a los definidos en la Tabla 1.

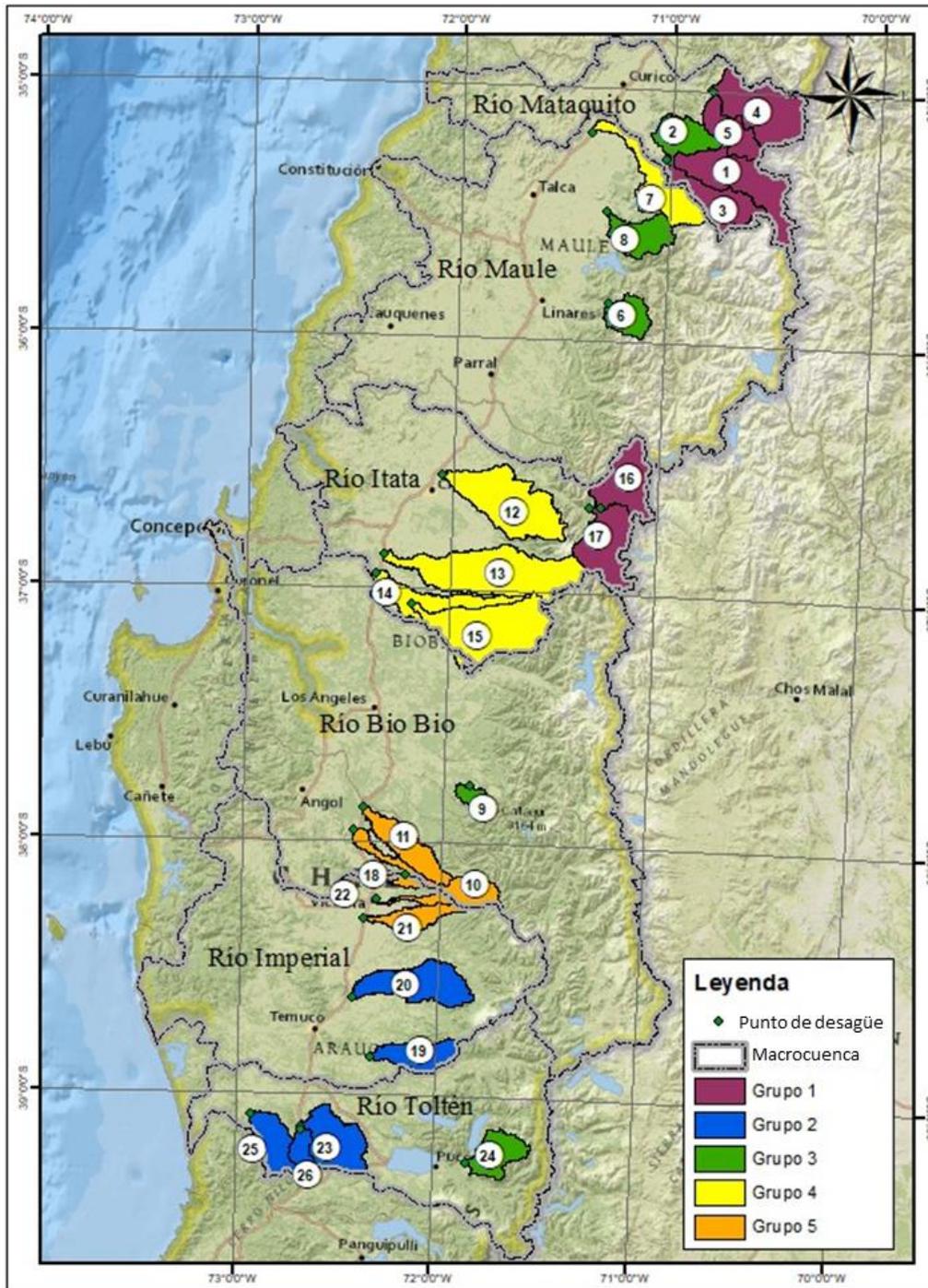


Figura 8. Ubicación geográfica de los grupos obtenidos.

En la Figura 8 se pueden identificar las características geomorfológicas de cada uno de los grupos:

- Se observa que el grupo 1 corresponde a cuencas cordilleranas, generalmente redondeadas, que presentan alturas elevadas, forma redondeada y áreas medianas. Este grupo se caracteriza por la rápida respuesta de la cuenca y la presencia de caudales líquidos disminuidos por la acumulación de nieve en periodos de invierno, mientras que en verano tiende a generar un aumento significativo de sus caudales debido al deshielo.
- El grupo 2 alude a cuencas planas de baja altura ubicadas en la planicie intermedia, que corresponden a cuencas de tamaño regular, con una forma que tiende a ser ovalada y de tamaño constante en su longitud. El grupo presenta un comportamiento similar, caracterizado por su forma ancha y alargada, que genera un aumento en el tiempo de concentración de la cuenca. Esta característica genera un retardo de la respuesta fluviométrica de las cuencas que conforman el grupo, lo que genera un achatamiento de los hidrogramas de crecidas. Sin embargo, a diferencia del grupo 1, concentran caudales elevados en época de lluvia. Esto se produce debido a su bajo desnivel altimétrico, donde la isoterma cero no tiene gran influencia en su respuesta nival.
- El grupo 3 corresponde a cuencas precordilleranas de mediana altura y forma redondeada. Este grupo presenta una rápida respuesta frente a precipitaciones, siendo menos propenso a acumular nieve en invierno. A pesar de presentar un tiempo de concentración menor en

comparación con los demás grupos, la magnitud de caudales que genera es baja debido a las pequeñas áreas que posee.

- El grupo 4 está compuesto de cuencas alargadas y delgadas, ubicadas en la depresión intermedia, con baja densidad de drenaje y respuesta lenta frente a precipitaciones. Debido a su alto tiempo de concentración, la magnitud de los caudales que genera es baja; los caudales son constantes en periodos de altas lluvias sin acumulación de nieve en invierno.
- Por último, el grupo 5 está compuesto por cuencas de gran tamaño, ubicadas en territorios de bajo desnivel considerados como planicie intermedia, las cuales presentan una gran densidad de drenaje que se observa por una gran cantidad de área acumulada en la cabecera de la cuenca. Una alta densidad de drenaje y su forma ovalada trae consigo que sean las cuencas que presentan una mayor captación de agua.

Se puede observar una clara tendencia a agrupar cuencas que presentan similitud en sus áreas, altura media y forma, por lo que se espera que su respuesta frente a caudales de crecida sea similar. La Figura 9 muestra el mapa de clasificación de cuencas. Se utiliza para determinar a cuál grupo es más probable que pertenezca una cuenca sin registros fluviométricos. Sumado a esto, en la Tabla 5 se presentan las coordenadas de los centros de los grupos homogéneos conformados.

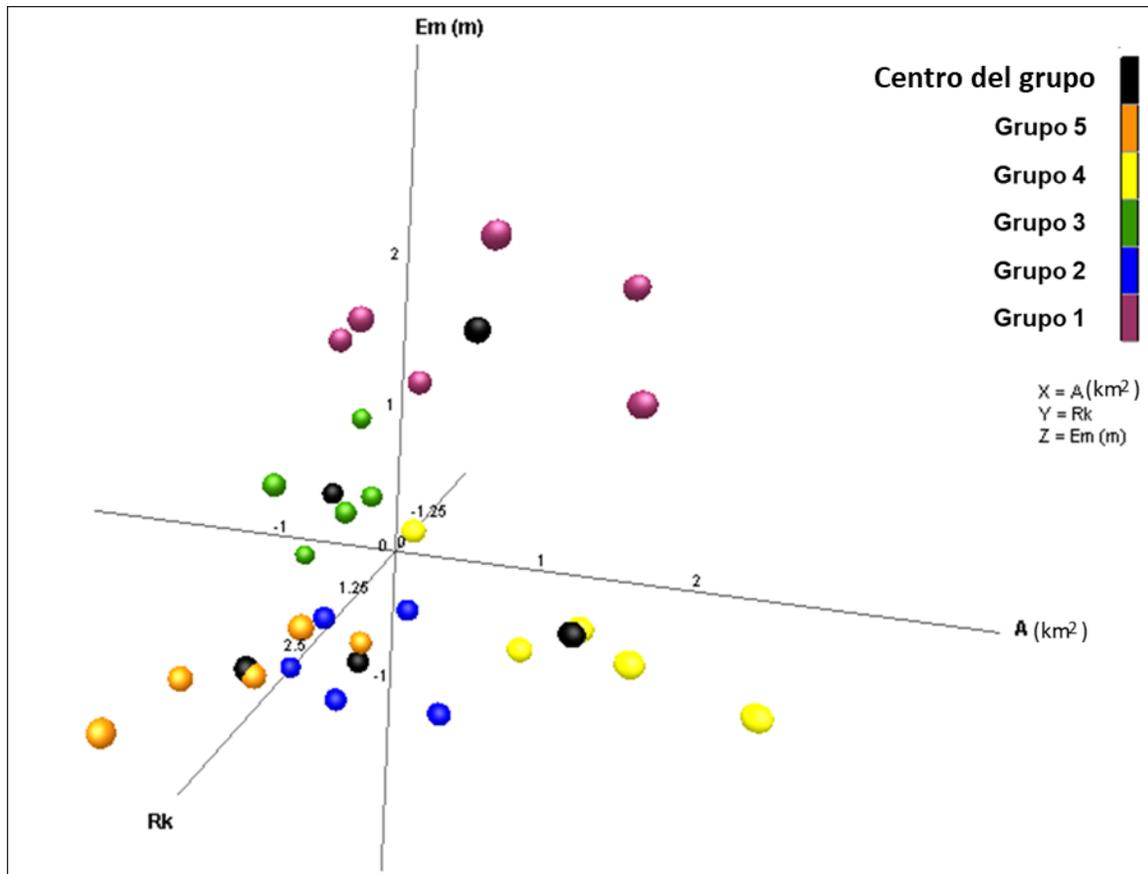


Figura 9. Propuesta de Mapa de clasificación de cuencas sin información hidrológica.

Tabla 5. Coordenadas de los centros de cada grupo homogéneos.

Grupo	A (km ²)	Rk	Em (m)
Grupo 1	799	2.36	1 931
Grupo 2	436	2.11	355
Grupo 3	263	1.78	1 078

Grupo 4	1 131	2.45	765
Grupo 5	258	3.07	598

Así, si se desea clasificar una cuenca sin información fluviométrica, se procede a obtener las variables geomorfológicas: área, altura media y relación de compacidad a partir de un modelo digital de elevación (disponible gratuitamente en la web). Con estas medidas, la cuenca se puede ubicar en el mapa de clasificación. Posteriormente, utilizando la medida distancia euclidiana se obtiene la distancia a cada uno de los centros de los grupos homogéneos donantes de información. El centro más cercano a la cuenca sin información indicará el grupo al que es más probable que pertenezca. A continuación, se utilizan las ecuaciones regionales para estimar los caudales para diferentes periodos de retorno. Primero, con el área se obtiene el caudal medio máximo de la cuenca; después se ingresa a la curva adimensional de estimación de caudales para obtener el caudal con cualquier periodo de retorno. Se deduce así una metodología que logra una automatización de las estimaciones de caudales de crecidas en cuencas sin instrumentación para cualquier periodo de retorno.

Discusión y conclusiones

La determinación de regiones homogéneas para el intercambio adecuado de información hidrológica es un tema de importancia en Chile y Latinoamérica. Existen estudios importantes que buscan determinar una manera adecuada para determinarlas. El “Manual de crecidas para cuencas sin información fluviométrico”, propuesto por la Dirección General de Aguas (1995), establece zonas homogéneas a partir de su cercanía geográfica, dejando de lado la forma en que se comportan y responden las cuencas frente a determinados eventos de precipitación. Posteriormente, otros estudios logran determinar la homogeneidad de cuencas a partir de su comportamiento hidrológico. Fierro y Vargas (2018) establecen variables que son capaces de determinar el comportamiento homogéneo entre cuencas ubicadas en la región del Biobío (zona centro sur de Chile). Variables como índice de aridez, tipo de suelo, geología, orientación, elevación media de la cuenca, temperatura máxima y mínima son adecuados para determinar cuencas hidrológicamente similares en sus caudales medios mensuales. Rubio-Álvarez y McPhee (2010) enfocaron su trabajo en la disponibilidad del recurso hídrico, buscando generar zonas homogéneas en caudales medios anuales. Para la clasificación utilizan datos de caudales medidos, siendo su enfoque principal contribuir a la comprensión general de los patrones climáticos que se presentan en la zona. Para este fin se utilizan datos de caudales anuales comprendidos entre 1966 y 1990. Reconociendo el

aporte significativo que generan los estudios nombrados, esta investigación propone una clasificación simple, capaz de clasificar cuencas que no presentaron instrumentación a partir de sólo tres variables geomorfológicas. Para este fin se propone un mapa de clasificación y ecuaciones de transferencia de información para caudales de crecida. A pesar de que antes este estudio es desarrollado con una baja cantidad de cuencas, lo que no permite un adecuado método de validación de las ecuaciones y solo considera cuencas con áreas mayores de 200 km, es un paso importante para aplicar la metodología propuesta en otras zonas del país, aumentando las cuencas en estudio.

La revisión de la literatura especializada determinó la validación del método de la regionalización hidrológica para la estimación de caudales de crecida en cuencas sin información hidrológica. A pesar de que en mundo el desarrollo de técnicas de regionalización presenta un gran avance, en Chile aún no se divulgan estudios consistentes que generen una clasificación de cuencas a partir exclusivamente de variables geomorfológicas de las cuencas, con la finalidad de que pueda ser clasificada cualquier tipo de cuenca esté instrumentada o no. La literatura evidencia que la metodología de la regionalización hidrológica se aplica por lo común para comprender el comportamiento de las cuencas y por ende posee una visión más teórica y analítica, lo cual, en la práctica, tiene la desventaja de ser poco aplicable por un usuario ajeno a la investigación. Así, los estudios por lo regular no enfocan las técnicas estadísticas disponibles en clasificar cuencas sin información hidrológica

de manera rápida y automatizada, o asumiendo que las cuencas cercanas pertenecen al mismo grupo homogéneo (similitud por proximidad).

En el estudio presentado en este artículo se propone una metodología para generar una automatización de las estimaciones de caudales de crecidas en cuencas sin información fluviométrica con base en el procedimiento de regionalización hidrológica. Adaptar este método a las condiciones que presenta la zona centro sur de Chile es un aporte significativo a la comprensión de su comportamiento frente a crecidas. A partir de esta hipótesis se generó una clasificación preliminar de cinco grupos homogéneos de cuencas donantes de información. Esto implica que cada grupo presenta similitud en la distribución de sus registros de caudales de crecida, por lo cual es posible proponer relaciones matemáticas tanto para las estimaciones de caudales para diferentes periodos de retorno como para la clasificación de cuencas sin información hidrológica, presentando un fundamento hidrológico potente.

Se verifica la existencia de tres índices que logran describir la respuesta de la cuenca frente a caudales de crecida: el índice de estacionalidad pluvial, el índice de estacionalidad en periodo de estiaje y el índice de magnitud de la crecida. Se establece que las variables geomorfológicas que permiten un adecuado agrupamiento de cuencas homogéneas en respuesta frente a caudales de crecida son las siguientes: 1) el área de la cuenca, que es representativo de la magnitud de las crecidas que ocurren en ella; (2) altura media de la cuenca, relacionada con la respuesta de la cuenca en periodos de estiaje; y (3) relación de compacidad Gravelius que está vinculada directamente con la forma de la

cuenca y su respuesta frente a caudales de crecida que se producen en periodos pluviales. Se aplicaron diferentes técnicas estadísticas que lograron determinar un agrupamiento adecuado; se concluye que el análisis regional de frecuencia entrega herramientas estadísticas que permiten generar estimaciones robustas.

Emplear la medida de similitud para clasificar cuencas geomorfológicamente variables es útil en países como Chile, donde a pesar de contar con una red hidrométrica que permite tener el control del desagüe de las cuencas en algunos de los lugares de su territorio presenta puntos donde no existe información clara o de una longitud temporal apropiada para el desarrollo de estudios hidrológicos. Además, el método propuesto para la zona centro sur de Chile está fuertemente ligado con la forma del país. Chile es un territorio que presenta la característica de ser una zona variada en geografía, pues en cortas distancias se pueden observar grandes variaciones de clima y geomorfología. Es una larga y estrecha franja de tierra, que distancia en un poco más de 200 km el mar de la cordillera de los Andes.

Una vez determinadas las regiones homogéneas en la zona centro sur de Chile se comprobó su homogeneidad siguiendo la metodología del análisis regional de frecuencia. Por último, se obtuvieron las ecuaciones regionales de estimación de caudales de crecida para cada uno de los cinco grupos determinados. Al término de esta investigación se aplicó un test propuesto en el MDC del Ministerio de Obras Públicas de Chile, que con sus resultados reafirma la homogeneidad de los cinco grupos establecidos en la zona centro sur de Chile. La finalidad de esto es

detectar un método que entrega resultados confiables y aplicables en la zona de estudio.

Con lo anterior se logra proponer una metodología que tiende a la automatización del cálculo de los caudales de crecida, dando un enfoque más aplicado en la práctica del análisis regional de crecidas. Se espera que con esta investigación se dé un paso importante para lograr la automatización de las estimaciones a través de ecuaciones actualizadas, fáciles de aplicar y comprender en cualquier tipo de cuenca y, sobre todo, basadas en un análisis adecuado de su comportamiento hidrológico.

Referencias

- Álvarez-Olguín, G., Hotait-Salas, N., & Sustaita-Rivera, F. (2011). Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 12(3), 277-284.
- Apolinario, L., Pitágoras, J., Lujano, E., & Tapia, B. (2017). Regionalización de caudales mensuales en la región hidrográfica del Titicaca, Perú. *Journal of High Andean Research*, 19(2), 219-230.
- Burn, D. (1989). Cluster analysis as applied to regional flood frequency. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 115(5), 567-582.
- Blöschl, G. (2011). Scaling and regionalization in hydrology. *Journal Treatise on Water Science*, 2(5), 519-535.

- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., & Savenije, H. (2013). *Runoff prediction in ungauged basins*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Blöschl, G., & Sivapalan, C. (1995). Scale issues in hydrological modelling: A review. *Journal Hydrological Processes*, 9(3-4), 251-290.
- Campos, D. (2013). Análisis regional de frecuencia de crecientes en la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), México: índices de estacionalidad y regiones de influencia. *Agrociencia*, 48, 147-158.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada* (1a. ed.). Bogotá: Mc Graw Hill.
- Dalrymple, T. (1960). Flood frequency analysis. *US Geological Survey Water Supply Paper*, 1543 (A).
- Da-Silva, L., García, J., Nascimento, S., Bicioni, A., Wainer, R., & Wolff, W. (2020). Assessment of hydrological regionalization methodologies for the upper Jaguari River Basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 97, 102-112.
- Dirección General de Aguas (1995). *Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica*. Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Dirección general de Obras Públicas (2019). *Manual de Carreteras*, Vol. Núm. 3, Dirección de Vialidad, Chile.
- Fierro, I., & Vargas, X. (2018). *Determinación de zonas homogéneas en la región del Biobío, Chile, para estimar caudales disponibles para*

- dilución en cuencas sin control fluviométrico* (memoria de título). Universidad de Chile, Chile.
- Gao, Y., Kamal, P., Xianfeng, H., Naresh, S., & Khem, P. (2019). Estimation of hydrologic alteration in Kaligandaki River using representative hydrologic indices. *Water*, 11, 688-703.
- Gutiérrez-López, A., & Aparicio, J. (2020). Las seis reglas de la regionalización en hidrología. *Aqua-LAC*, 12(1), 81-89.
- Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis: An approach based on L-moments*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Nathan, R., & McMahon, T. (1990). Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalization. *Journal of Hydrology*, 121, 217-238.
- Norbiato, D., Borga, M., Sangati, M., & Zanon, F. (2007). Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. *Journal of Hydrology*, 345, 149-166.
- Ouarda, T. B. M. J., Bâ, K. M., Diaz-Delgado, C., Cârsteanu, A., Chokmani, K., Gingras, H., Quentin, E., Trujillo, E., & Bobée, B. (2008). Intercomparison of regional flood frequency estimation methods at ungauged sites for a Mexican case study. *Journal of Hydrology*, 348(1-2), 40-58.

- Oudin, L., Kay, A., Andréassian, V., & Perrin, C. (2010). Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar. *Water Resources Research*, 46(11), W11558.
- Pagliero, L., Bouraoui, F., Willems, P., & McIntyre, N. (2019). Investigating regionalization techniques for large-scale hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 570, 220-235.
- Pérez, C. (2004). *Técnicas de análisis multivariante de datos*. Madrid, España: Pearson.
- Rubio-Álvarez, E., & McPhee, J. (2010). Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952-2003. *Water Resources Research*, 46(5), 1-16.
- Salazar, J. (2016). *Una metodología para la estimación de curvas de duración de caudales en cuencas no instrumentadas*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Ssegane, H., Tollner, E., Mohamoud, Y., Rasmussen, T., & Dowd, J. (2012). Advances in variable selection methods I: Causal selection methods versus stepwise regression and principal component analysis on data of known and unknown functional relationships. *Journal of Hydrology*, 438, 16-25.
- Vera, J., & Mora, R. (2013). Un método para el análisis de frecuencia regional de lluvias máximas diarias: aplicación en los Andes bolivianos. *Revista Chilena de Ingeniería*, 21, 111-124.

- Voguel, R., Thomas, W., & McMahon, T. (1993). Flood – flow frequency model, selection in Southwestern United States. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119, 353-366.
- Wallis, J., Shaefer, M., Barker, B., & Taylor, G. (2007). Regional precipitation- frequency analysis and spatial mapping for 24 hours and 2 hours durations for Washington State. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11, 415-442.
- Yang, T., Quanxi, S., Zhen-Chun, H., Xi, C., Zengxin, Z., & Chong-Yu, X. (2010). Regional frequency analysis and spatio-temporal pattern characterization of rainfall extremes in the Pearl River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 380, 386-405.
- Zhang, J., & Hall, M. (2004). Regional flood frequency analysis for the Gan-Ming River basin in China. *Journal of Hydrology*, 296, 98-117.
- Zucarelli, G. (2017). *Regionalización hidrológica con métodos estadísticos multivariados* (tesis doctoral). Universidade da Coruña, España.