



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería - Programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería con
Mención en Ingeniería Civil

**AUTOMATIZACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE CAUDALES DE CRECIDAS
PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO**

Aplicación en la zona centro sur de Chile



Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería con
Mención en Ingeniería Civil

POR: Daniela Cifuentes Santibáñez
Profesor Guía: Dr. José Vargas Baecheler

julio 2020
Concepción, Chile

RESUMEN

La estimación de caudales en cuencas sin control fluviométrico, ha sido un desafío constante en la ingeniería hidráulica. El objetivo de esta investigación, es proponer un método rápido y efectivo para la automatización de las estimaciones de caudales de crecida para diferentes periodos de retorno. La propuesta metodológica planteada está basada en la regionalización hidrológica, que consiste en el traspaso de información entre cuencas hidrológicamente homogéneas. Esta metodología se adapta a las características de la zona centro sur de Chile, proponiendo variables adecuadas para la clasificación de cuencas donantes de información.

Generalmente, la regionalización es aplicada para comprender el comportamiento de las cuencas, por ende, posee una visión teórica y analítica, lo que lleva a que en la práctica los resultados obtenidos son poco aplicables por un usuario ajeno a la investigación. Lo que se busca en este trabajo, es proponer una metodología fácil de aplicar para las estimaciones de caudales de crecida aplicando la teoría de la regionalización, entregando toda la información necesaria para que pueda ser aplicada a cuencas de la zona centro sur de Chile, esté instrumentada o no.

Se establece que las variables geomorfológicas que permiten un adecuado agrupamiento de cuencas homogéneas en la respuesta frente a caudales de crecida son: (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 relacionada 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 de 5 grupos homogéneos, concluyendo que el análisis regional de frecuencia entrega herramientas estadísticas que permiten generar estimaciones robustas.

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 por sobre todo basadas en un análisis adecuado del comportamiento hidrológico de las cuencas.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Metodología	2
1.4 Principales resultados y conclusiones.....	3
1.5 Estructura de la tesis.....	4
CAPÍTULO 2 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	5
2.1 Introducción	5
2.2 El método de regionalización hidrológica	5
2.3 Conclusiones	13
CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1 Introducción	14
3.2 Etapa 1: Clasificación de cuencas en grupos.....	15
3.3 Etapa 2: Determinar la homogeneidad de los grupos.....	21
3.4 Etapa 3: Generar curvas regionales de estimación de Q crecida	25
3.5 Validación del agrupamiento propuesto.....	27
3.6 Conclusiones	29
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	31
4.1 Introducción	31
4.2 Clasificación de cuencas en grupos	31
4.3 Aplicación del Análisis Regional de Frecuencias.....	40
4.4 Validación de la homogeneidad de los grupos obtenidos.....	52
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN	56
5.1 Discusión: Ubicación geográfica y mapa de clasificación de los grupos homogéneos.....	56
5.2 Conclusiones	59
REFERENCIAS	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Ordenamiento de las variables geomorfológicas analizadas.....	19
Tabla 3-2 Valores críticos del valor de discordancia D_i	23
Tabla 3-3 Valores críticos del test de heterogeneidad H_1	24
Tabla 3-4 Límites para Test de homogeneidad propuesto por US Geological Survey	29
Tabla 4-2 Variables independientes que no tienen relación con la respuesta de la cuenca frente a caudales de crecida.....	34
Tabla 4-3 Clasificación preliminar de cuencas donantes de información	39
Tabla 4-3 Prueba de Discordancia y Heterogeneidad Grupo N°1	41
Tabla 4-4 Prueba de Discordancia y Heterogeneidad Grupo N°2	43
Tabla 4-5 Prueba de Discordancia y Heterogeneidad Grupo N°3.....	46
Tabla 4-6 Prueba de Discordancia y Heterogeneidad Grupo N°4	48
Tabla 4-7 Prueba de Discordancia y Heterogeneidad Grupo N°5	50
Tabla 4-9 Estimación Local de los registros de cada cuenca.....	52
Tabla 4-10 Estimación de las cuencas utilizando relación grupal $Q(T=10)/Q(T=2.33)$	53
Tabla 4-11 Validación de homogeneidad Grupo 1 (MDC 2019).....	53
Tabla 4-12 Validación de homogeneidad Grupo 2 (MDC 2019).....	54
Tabla 4-13 Validación de homogeneidad Grupo 3 (MDC 2019).....	54
Tabla 4-14 Validación de homogeneidad Grupo 4 (MDC 2019).....	54
Tabla 4-15 Validación de homogeneidad Grupo 5 (MDC 2019).....	54
Tabla 5-1 Coordenadas de los centros de cada grupo homogéneos	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1 Resumen de Metodología utilizada	14
Figura 3-2 Distribución fecha de crecidas en cuencas mexicanas.....	17
Figura 3-3 Ejemplo de mapa de clasificación de cuencas sin control	27
Figura 4-1 Cuencas Donantes de información	33
Figura 4-2 Gráfico de Correlaciones Final.....	35
Figura 4-3 Relación de la respuesta de la cuenca y variables geomorfológicas ...	38
Figura 4-4 Método gráfico para determinar mejor ajuste muestra Grupo N°1.....	41
Figura 4-5 Curva regional Q medio Máximo Versus Área de Grupo N°1	42
Figura 4-6 Curvas Regionales Grupo N°1	43
Figura 4-7 Método gráfico para determinar mejor ajuste muestra Grupo N°2.....	44
Figura 4-8 Curva regional Q medio Máximo Versus Área de Grupo N°2	45
Figura 4-9 Curvas Regionales Grupo N°2.....	45
Figura 4-10 Método gráfico para determinar mejor ajuste muestra Grupo N°3.....	46
Figura 4-11 Curva regional Q medio Máximo Versus Área de Grupo N°3	47
Figura 4-12 Curvas Regionales Grupo N°3.....	47
Figura 4-13 Método gráfico para determinar mejor ajuste muestra Grupo N°4.....	48
Figura 4-14 Curva regional Q medio Máximo Versus Área de Grupo N°4	49
Figura 4-15 Curvas Regionales Grupo N°4.....	49
Figura 4-16 Método gráfico para determinar mejor ajuste muestra Grupo N°5.....	50
Figura 4-17 Curva regional Q medio Máximo Versus Área de Grupo N°5	51
Figura 4-18 Curvas Regionales Grupo N°5.....	52
Figura 5-1 Ubicación geográfica de los grupos obtenidos.....	57
Figura 5-2 Propuesta de Mapa de clasificación de cuencas sin información hidrológica.....	58

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La estimación de caudales en cuencas sin control fluviométrico ha sido un desafío constante en la ingeniería hidráulica. En la práctica ingenieril, la gran mayoría de las veces las estimaciones deben ser rápidas y precisas, buscando utilizar la menor cantidad de horas de trabajo y siendo poco probable que se lleven a cabo modelos sofisticados que requieran una gran cantidad de tiempo para ser calibrados o datos que no existen en la zona de proyecto.

Así, la mayoría de los proyectos son desarrollados utilizando estimaciones hidrológicas rápidas, como lo son los métodos de precipitación–escorrentía que corresponden a relaciones desarrolladas de forma empírica en una zona específica, que frecuentemente 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 frecuentemente es utilizado en base al criterio de que cuencas cercanas presentan caudales similares. 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, busca seleccionar un método rápido y efectivo para la estimación de caudales de crecida para diferentes períodos de retorno. 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. La finalidad última de esta investigación es la selección de una metodología que debe ser compatible con las condiciones de la zona de estudio. Por esto, se

realiza una adaptación de los métodos existentes en la literatura especializada para realizar estimaciones en todo tipo de cuenca, estén instrumentadas o no. Además, se apunta a la automatización del proceso, con la finalidad de que, con unos pocos datos, que puedan ser obtenidos desde cualquier tipo de cuenca, se obtengan estimaciones rápidas y confiables de caudales para diferentes periodos de retorno.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo general es proponer una metodología que permita la automatización de las estimaciones de caudales de crecida en la zona centro sur de Chile, basada en la regionalización hidrológica.



1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Clasificar las cuencas donantes de información en grupos semejantes teniendo en cuenta las restricciones y características de las cuencas del centro sur de Chile.
- b) Verificar la homogeneidad de los grupos mediante la metodología del análisis regional de frecuencia
- c) Definir ecuaciones regionales de estimación de caudales de crecidas para diferentes periodos de retorno en cada grupo homogéneo propuesto.

1.3 Metodología

La metodología de la regionalización hidrológica, es la base para dar cumplimiento a los objetivos de esta investigación, que consiste en transmitir información

hidrológica entre cuencas que pertenezcan a un mismo grupo hidrológicamente homogéneo. Esta metodología se adecúa para lograr la automatización de las estimaciones de caudales de crecida en la zona centro sur de Chile. Así, la metodología aplicada se dividió en tres etapas, asociadas a los objetivos específicos propuestos.

- La primera etapa consiste en la estimación preliminar de grupos conformados por cuencas donantes de información, donde se aplican técnicas estadísticas multivariadas como el análisis de componentes principales y método de clasificación jerárquico.
- La segunda etapa consiste en establecer, a partir de registros de caudales de crecidas, la homogeneidad. Desde esta etapa se comienza a aplicar la metodología del Análisis Regional de Frecuencias, aplicando pruebas de discordancia y heterogeneidad de los grupos.
- Finalmente, la tercera etapa consiste en la estimación de curvas regionales adimensionales de estimación de caudales de crecida en cada uno de los grupos definidos en las etapas previas. Se evalúa también bajo criterios estipulados en el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas chileno (2019), la homogeneidad de los grupos propuestos para demostrar que pueden ser utilizado en las estimaciones de la zona centro sur de Chile.

1.4 Principales resultados y conclusiones

Se detectó una serie de pasos que permiten generar una automatización de los caudales de crecida, a través de la transferencia de información entre grupos homogéneos. Para este propósito, se obtuvo una muestra de 26 cuencas bien instrumentadas, de las que se obtuvieron variables dependientes que permitían caracterizar la respuesta de la cuenca. También se calcularon un conjunto de variables independientes, correspondiendo a variables geomorfológicas que pueden ser obtenidas desde cualquier tipo de cuenca. La conclusiones principales

fueron: (1) Las variables geomorfológicas área (A) , coeficiente de compacidad de Gravelius (Rk) y Altura media (Em) se consideran que están relacionadas con la respuesta de la cuenca frente a caudales de crecida, por lo que sus valores permiten generar una clasificación de las 26 cuencas donantes de información en 5 grupos. (2) Las cuencas que conforman un grupo, presentan en sus registros independencia y no estacionariedad, además de presentar semejanza en la distribución de sus muestras de datos lo que es probado a partir de las pruebas de homogeneidad aplicadas, resultando ser homogéneos. (3) Finalmente, la homogeneidad en sus registros permite generar ecuaciones de transferencia de información en cada grupo, logrando con esto relaciones matemáticas que ayudan a la automatización de las estimaciones de crecidas en cuencas sin control fluviométrico.

Finalmente, es posible concluir que automatizar el proceso de estimación de caudales de crecida para diferentes periodos de retorno es posible para una zona de alta variabilidad geomorfológica como lo es la zona centro sur de Chile. Esto se debe, a que el territorio chileno es una larga y estrecha franja de tierra, que tiene como límite oeste al océano pacífico y como límite este a la Cordillera de los Andes, entre los cuales se presenta grandes variaciones de altura.

1.5 Estructura de la tesis

El Capítulo 1 presenta el problema general a investigar junto a los objetivos generales y específicos, así como un resumen de la metodología. El Capítulo 2 expone una revisión de las principales teorías y técnicas relacionadas con la estimación de caudales de crecida mediante el método de regionalización hidrológica. El Capítulo 3 describe los materiales y métodos, explicando los pasos detectados para lograr una automatización del cálculo de los caudales de crecida, considerando las condiciones y restricciones que presentan las cuencas de la zona centro sur de Chile. El Capítulo 4 exhibe los principales resultados de la investigación. Finalmente, el Capítulo 5 concluye con una discusión sobre los resultados obtenidos y las líneas futuras de investigación.

CAPÍTULO 2 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

Este capítulo presenta una revisión de la literatura especializada sobre las principales técnicas utilizados en la aplicación de la regionalización hidrológica como un método de estimación de caudales de crecida para diferentes periodos de retorno.

2.2 El método de regionalización hidrológica

La regionalización hidrológica es una técnica de transferencia de información desde una o más cuencas donantes que poseen información medida de sus caudales, a otras cuencas que son las receptoras de información y que no poseen mediciones confiables (Blöschl y Sivapalan, 1995; Oudín *et al.*, 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). Que cuencas sean hidrológicamente homogéneas se refiere a que ciertas características como pueden ser las geomorfológicas o climáticas, están relacionadas con la respuesta hidrológica de la región (Zucarelli, 2017).

El método de regionalización no tiene 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 que grupo homogéneo pertenece, para estimar finalmente los caudales a través de la utilización del modelo regional.

2.2.1 Agrupamiento de cuencas en regiones hidrológicamente homogéneas

Que una región sea hidrológicamente homogénea significa que las variables que llevan a una firma hidrológica de interés (como es el caso de los caudales medio anuales u otra) poseen una variación similar respecto a alguna medida de similitud. Lo primordial al momento de determinar grupos hidrológicamente homogéneos es determinar aquellas variables o índices que con sus valores ayuden a encontrar medidas de similitud entre las cuencas. Las medidas de similitud se clasifican principalmente en tres grupos:

- A. Aquellas que tienen relación con índices de escurrimiento (Sawicz *et al.*, 2011). Este tipo de medida de similitud solo se puede lograr con una muestra inicial de cuencas que presenten una buena instrumentación.
- B. La segunda medida es la proximidad, lo que quiere decir que cuencas que se encuentran próximas geográficamente, presentan características hidrológicas semejantes. El problema de esta clasificación es que variados estudios como el desarrollado por Hannah *et al.* (2005) ha evidenciado que esto no siempre es correcto. Por otro lado, Nathan *et al.* (1990), menciona que las regiones homogéneas hidrológicamente no siempre presentan cercanía geográfica.
- C. La tercera es la utilización de parámetros geomorfológicos de las cuencas. La ventaja de la utilización de esta 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. Las propiedades geomorfológicas de una cuenca hidrográfica proporcionan

medidas de similitud que permite realizar comparaciones entre distintos tipos de cuencas. Horton (1945), publica un artículo que trae consigo un cambio en el tratamiento de la geomorfología como se conocía hasta ese entonces. Antes de 1945, los geógrafos realizaban una caracterización cualitativa de la geografía, siendo complicado el tratamiento y análisis de sus observaciones en los estudios de ingeniería. El artículo marcó el comienzo de un período en la ingeniería hidrológica donde la geomorfología de las cuencas hidrográficas es tomada en cuenta (Chorley, 1995). Así los análisis evolucionaron desde una visión cualitativa a una cuantitativa, dando de forma cuantificada a la ingeniería, índices y parámetros precisos que potenciaron las investigaciones que relacionan la respuesta hidrológica de una cuenca con su geomorfología. Horton (1945), Schumm (1956) y Strahler (1957) son pioneros en la caracterización morfológica cuantitativa de cuencas de drenaje y a partir de sus trabajos se establecen parámetros e índices que permiten clasificar una cuenca hidrográfica. Estas ideas son reforzadas posteriormente en la publicación desarrollada por la *Association of Hydrological Sciences* (IAHS) en el año 2013, donde recapitulan la información de variados estudios desarrollados en base a estas premisas, considerando las variables geomorfológicas representativas de la respuesta de la cuenca frente a eventos de precipitación.

En Chile también se ha puesto atención en las características geomorfológicas de las cuencas con la finalidad de estimar grupos homogéneos para el traspaso de información fluviométrica. En un estudio realizado por el Ministerio de Obras Públicas (2011), se analizaron parámetros geomorfológicos para cuencas pluviales de la zona centro y sur de Chile, que fueron definidos a partir de una extensa revisión de la bibliografía nacional e internacional relacionada con el agrupamiento de cuencas. Con ellos se llevó a cabo una regresión lineal simple entre cada parámetro y el caudal con la finalidad de encontrar algún indicador de similitud entre cuencas de forma gráfica. Sin embargo, no fue posible encontrar una clara dependencia de alguna relación entre parámetros geomorfológicos y la similitud entre cuencas. Se

indica en sus conclusiones que se hace necesario realizar un análisis más profundo en el futuro, acerca de alguna relación que permita considerar otros elementos para establecer algún grado de similitud entre cuencas.

La literatura especializada indica comúnmente una gran cantidad de técnicas estadísticas multivariadas en la aplicación de la regionalización hidrológica. Las técnicas utilizadas difieren de un lugar a otro, siendo necesario detectar el conjunto específico de técnicas que genera buenos resultados en la zona de estudio. Una de ellas es el Análisis de componentes principales, especialmente debido a que las variables que describen la hidrología de un lugar muchas veces comprenden un gran conjunto de elementos altamente correlacionados. Esta útil técnica genera una simplificación de los datos disponibles, conservando una porción adecuada de la cantidad de información disponible. Nathan *et al.* (1990), Álvarez *et al.* (2011), Blöschl (2013), Zucarelli (2017), Gao (2019) son algunos de los autores que utilizaron esta metodología 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 a 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. Para esto es necesario contar con medidas de similitud cuantificables entre las variables consideradas en el análisis. En otras palabras, son necesarias técnicas para estimar la distancia entre individuos para poder clasificarlos. Burn (1989) utilizó el método de Clúster para la estimación de regiones homogéneas con datos de caudales máximos anuales de ríos del sur de Canadá concluyendo 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. Hay que tener 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 que su homogeneidad a través de un análisis teórico de las similitudes entre grupos. 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 *et al.*, 2011; Ssegane *et al.*, 2012; Salazar, 2016; Zucarrelli, 2017).

2.2.2 Obtención de curvas regionales de estimación de caudales de crecida

Hosking y Wallis (1997) proponen un procedimiento denominado índice de crecida para establecer ecuaciones regionales de estimación de crecidas, suponiendo 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 propone Hosking y Wallis (1997) 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. Los detalles sobre el enfoque de L-momentos se pueden encontrar en Hosking y Wallis (1997).

Voguel *et al* (1993) en Estados Unidos, desarrolló 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, Recolecta los datos de crecida medidos en 383 cuencas del suroeste de los Estados Unidos. Hasta ese entonces, pautas establecidas por el Consejo de Recursos Hídricos de los EEUU, recomendaban el uso de la distribución Pearson tipo 3 para los análisis de frecuencia de datos de crecida en los Estados Unidos. Voguel, revela 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 establece que el método de los diagramas de L momentos, presenta la ventaja de que uno pueda 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. Finalmente, el estudio sugiere que futuras investigaciones que pretendan desarrollar metodologías innovadoras de estimación de caudales de crecida para diferentes períodos de retorno, debe considerar en el análisis regional de frecuencias más de un posible modelo estadístico que se ajuste a los datos, como el modelo de valores extremos, Log Pearson 3 o Pearson 3, y posiblemente otros.

Daniel Norbiato (2007) en Italia, se dedicó 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 del 2003 sobre el este de la cuenca del río Tagliamento. Para analizar la ocurrencia de la precipitación que generó la crecida, utilizó el análisis regional de frecuencia basado en el método de la crecida índice y L-momentos. Para esto, preliminarmente define grupos que considera homogéneos. Establece que el relieve montañoso de los Alpes orientales constituyen la principal característica geomorfológica de la zona en análisis. En base a las diferencias de altura que se presentan, considera preliminarmente 3 zonas homogéneas donde establece que la altura promedio del territorio genera regímenes pluviométricos diferentes. Finalmente, aplica las pruebas de homogeneidad y discordancia basadas en el método de los L momentos a los grupos definidos y concluye que tanto los cambios en la elevación, el efecto de sombra como el aspecto se reflejan en diferentes respuestas climáticas, es decir, sus efectos se evidencian en diferentes regímenes de lluvia extrema.

Tao Yang *et al* (2010) en China, genera un estudio realizado en la cuenca del río Pearl, segunda cuenca de drenaje más grande del país. Aplicando el Análisis Regional de Frecuencia, logra agrupar 40 cuencas en 6 grupos homogéneos, los que resultaron concordantes con la distribución de las precipitaciones y humedad. En este estudio se indica que una correcta comprensión de la estructura estadística de los datos hidrológicos, con respecto a sus valores extremos y sus patrones espaciales es de suma importancia en la formulación de una estrategia para la gestión de los recursos hídricos regional de la cuenca. Sugiere 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, utilizándola para evaluarlos y calibrarlos. Liliana Pagliero (2019), en Europa Oriental, Investigó técnicas de regionalización para el modelado hidrológico a gran escala, mientras que Xue Yang (2020) en Noruega realizó una evaluación de la utilización del método de regionalización hidrológica para calibrar los parámetros de modelos de precipitación.

En América Latina también está en auge la utilización del análisis regional de frecuencia para caracterizar eventos extremos. En el año 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 (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 los 90. 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 alrededor del mundo puede emplearse sin problemas en este sector del planeta.

Vera (2013) en Bolivia propone un método para el análisis de frecuencia regional de lluvias diarias máximas para cuencas existentes en los Andes bolivianos. Campos (2014) 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 (2020) evaluó metodologías de regionalización hidrológica aplicadas en el pasado para la cuenca alta del río Jaguarí en Brasil. Cabe señalar que los estudios anteriores no presentaban como objetivo principal la evaluación de la metodología planteada.

La gran cantidad de estudios existentes, que utilizan la metodología del análisis regional de frecuencia, no hace más que verificar su utilidad y precisión en las estimaciones de valores extremos para diferentes periodos de retorno. A pesar de que es un proceso con dos pasos bien definidos siendo primero 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, y tal como lo expone Blöschl *et al.*, (2013) es posible contar con 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 buscando direccionar el método hacia una automatización del proceso de estimación de caudales de crecidas.

2.3 Conclusiones

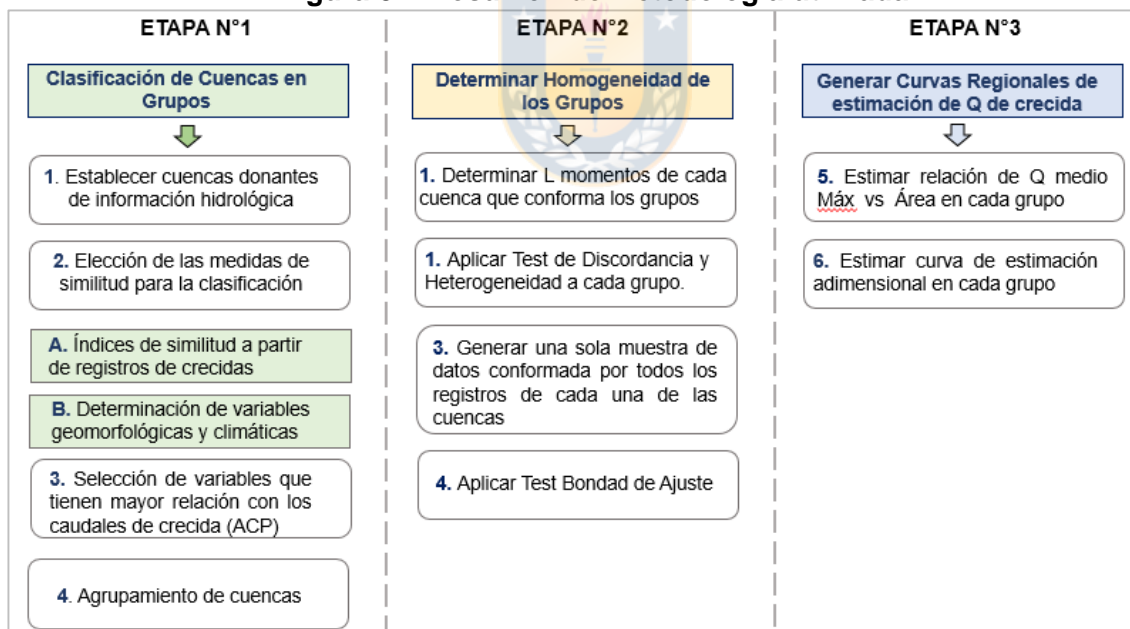
La revisión de la literatura especializada determinó la validación del método de la regionalización hidrológica para la estimación de caudales de crecida en cuencas sin información hidrológica. A pesar de que a nivel mundial el desarrollo de técnicas de regionalización presenta un gran avance, en Chile 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 es comúnmente aplicada para comprender el comportamiento de las cuencas, 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 comúnmente 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). Es el caso, por ejemplo, del estudio desarrollado por Naranjo (2010), donde se genera una clasificación de cuencas a partir de variables obtenidas directamente de registros meteorológicos, siendo difícil clasificar cuencas sin instrumentación.

CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Introducción

Como se ha señalado con anterioridad, el método de regionalización hidrológica, aplicado a nivel mundial 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 comúnmente para su aplicación, se detectó que la metodología planteada en la Figura 3.1, se adecua a las condiciones de la zona central de Chile.

Figura 3-1 Resumen de Metodología utilizada



La primera consiste en agrupar cuencas donantes de información a partir de variables que sean fácilmente identificables en cualquier tipo de cuenca, esté instrumentada o no. Una vez definidos los grupos, en una segunda etapa se establece, a partir de registros de caudales de crecidas, la homogeneidad de los

grupos obtenidos de una forma objetiva. Finalmente, la tercera etapa consiste en la estimación de curvas regionales adimensionales para la estimación de caudales de crecida en cada uno de los grupos definidos en las etapas previas. De esta manera, se logra abarcar la totalidad de objetivos específicos que se plantearon al inicio de la presente investigación.

3.2 Etapa 1: Clasificación de cuencas en grupos

En esta etapa se busca elaborar una clasificación de cuencas que permitirá en etapas posteriores, generar un traspaso de información hidrológica.

3.2.1 Establecer cuencas donantes de información hidrológica

Para lograr un adecuado traspaso de información, se requiere que las cuencas donantes de información que forman parte de la clasificación se encuentren instrumentadas por la Dirección General de Aguas (DGA). Desde su página web se puede acceder a las mediciones de caudales, junto con la ubicación geográfica de las estaciones que registran los datos. La información recolectada corresponde a todas las estaciones fluviométricas existentes entre la región del Maule a la Araucanía. Se escogen aquellas estaciones que presenten los datos más completos con la finalidad de que la información disponible en cada región sea confiable y traspasable a cuencas no controladas.

Para escoger las cuencas que efectivamente formarán parte de los grupos homogéneos donantes, se seleccionan solo aquellas que presentan mediciones diarias para capturar el caudal máximo de crecida que se genera en un año. Esta medida se utiliza para garantizar que la estación ha estado funcionando regularmente en los últimos años, realizando análisis con datos actualizados que sean representativas del periodo climático que está gobernando el comportamiento de las cuencas en estudio.

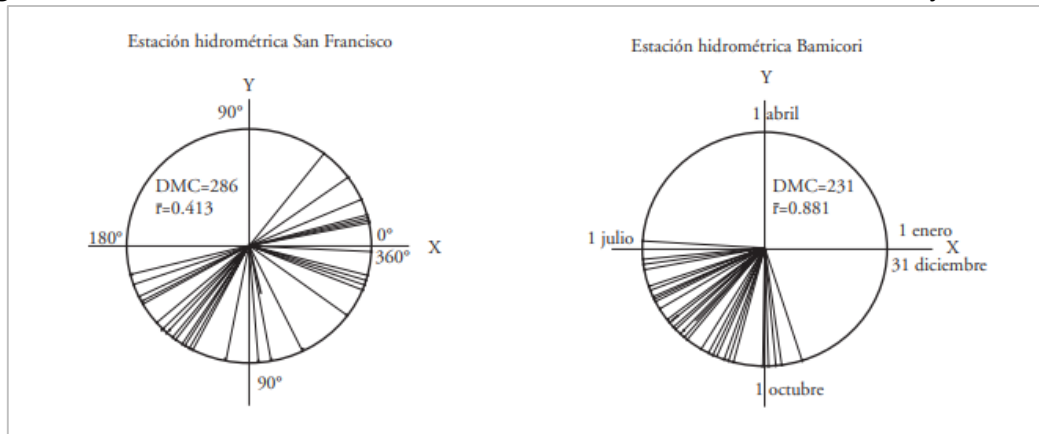
3.2.2 Variables seleccionadas para la clasificación: Variables dependientes y Variables independientes

Se utilizarán índices estacionarios como variables dependientes, que cumplirán la función de representar la respuesta de las cuencas frente a caudales de crecida, obteniéndose directamente de las fechas donde ocurren las crecidas registradas en cada estación fluviométrica (cuencas en estudio).

Las variables geomorfológicas en cambio, serán utilizadas para clasificar cuencas sin información fluviométrica, cumpliendo la función de variables independientes, siendo importante identificar las que tienen mayor relación con los índices representativos de crecidas.

A. índices representativos de crecidas

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 año en 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 $360/365 = 0,98^\circ$. En la Figura 3.2 se muestra un ejemplo extraído de Campos (2013), donde se muestra la distribución de crecidas en la estación hidrométrica de Bamicori, México, mostrando que las crecidas en esta estación ocurren principalmente entre julio y octubre.

Figura 3-2 Distribución fecha de crecidas en cuencas “San Francisco” y “Barmicori”

Fuente: Campos (2013).

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 al 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. Primero se obtienen los caudales de crecida del periodo comprendido entre los meses de abril a septiembre que corresponden a las crecidas que sucedieron principalmente por precipitaciones líquidas, y luego las crecidas ocurridas desde septiembre a marzo, las que regularmente son de menor magnitud debido a las bajas precipitaciones que se presentan en este periodo o por otro lado, ocurren por el derretimiento de hielos.

Aunque el límite exacto entre el periodo de estiaje y pluvial de la cuenca es imposible de determinar con exactitud, principalmente por la irregularidad y aleatoriedad de los caudales, se considera que la división de los registros en estos dos periodos es adecuada para capturar de manera numérica el comportamiento de la cuenca. De esta manera se busca captar la respuesta de la cuenca en dos periodos de análisis, donde su comportamiento tiende a ser diferente. Por último, se obtiene el caudal máximo medio de cada cuenca para determinar una medida de magnitud de las crecidas.

Finalmente, cada cuenca en estudio presentará 3 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 ($Q_{\text{MedioMáx}}$). Estos índices fueron calculados a partir de los registros pluviométricos de cada cuenca en estudio.

B. Determinación de variables Geomorfológicas y Climáticas

Las variables geomorfológicas utilizadas en esta investigación son las especificadas en la Tabla 3.1, siendo un total de 17. Es importante señalar que estas no son las únicas variables que están relacionadas con la respuesta hidrológica de una cuenca, existiendo una gran cantidad de ellas. La meta de este trabajo es crear una clasificación objetiva y replicable en cualquier cuenca que esté o no instrumentada, limitándose a estudiar la capacidad que tienen las variables seleccionadas de generar una clasificación en grupos de cuencas homogéneas.

Tabla 3-1 Ordenamiento de las variables geomorfológicas analizadas

Clasificación	N°	Variable	Abreviación
Variables 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
Variables relacionadas con el relieve y la precipitación	7.	Elevación media	Em
	8.	Elevación máxima	Emax
	9.	Pendiente promedio del cauce principal	Sc
	10.	Pendiente promedio de la cuenca	S
	11.	Precipitación media anual	PPmed
	12.	Precipitación media máxima anual	PPmax
Índices y variables relacionadas con la forma de la cuenca y sus cauces	13.	Precipitación media mínima anual	PPmin
	14.	Coefficiente de compacidad	Rk
	15.	Relación de elongación	Re
	16.	Relación de circularidad	Rc
	17.	Densidad de drenaje	Dd

Fuente: Elaboración Propia

Las variables geomorfológicas se obtienen a partir del procesamiento de modelos de elevación digital del terreno (MEDT), que son una representación en 3D de la topografía (altimetría y/o batimetría) de una zona terrestre, siendo procesado a través de la utilización de sistemas de información geográfica (SIG). Para el cálculo de las variables que están relacionadas con el drenaje de la cuenca, se utiliza la red hídrica de la DGA, obtenida desde su mapoteca digital.

3.2.3 Selección de variables que tienen mayor relación con los caudales de crecida

Se debe buscar alguna relación entre los índices de crecidas (variables dependientes) y las variables geomorfológicas (variables independientes) que son posibles de utilizar en la clasificación de las cuencas sin registro fluviométrico.

Con esta finalidad, 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.

El ACP, consiste en expresar un conjunto grande de variables en un conjunto de combinaciones lineales de las variables originales, las que se denominan componentes principales. Su uso en hidrología se muestra en estudios desarrollados por Nathan *et al.* (1990), Álvarez *et al.* (2011), Blöschl (2013), Zucarelli (2017), Gao (2019). Gracias a esto se realiza un reordenamiento de la información disponible, siendo posible visualizar la relación entre variables de una manera más sencilla. 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 están próximas una a la otra, están positivamente correlacionadas; si son ortogonales, no están correlacionadas; si están en lados opuestos con respecto al centro están negativamente correlacionadas. Analizando este gráfico es que se seleccionará las variables independientes que mayor relación tienen con la respuesta de la cuenca ante crecidas.

3.2.4 Agrupamiento de cuencas

Una vez seleccionado aquel grupo reducido de variables geomorfológicas que tiene relación con la respuesta de las cuencas frente a caudales de crecidas, se deben utilizar sus valores como una medida de similitud para generar una calificación preliminar de cuencas homogéneas. Se asume que cuencas que presenten las variables geomorfológicas anteriormente nombradas similares, 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

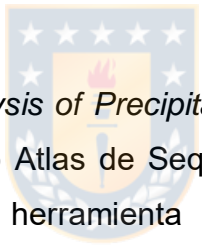
método se basa en las recomendaciones de Nathan *et al.* (1990), Hosking y Wallis (1997), Zhang y Hall (2004) y Apolinario (2017), método jerárquico que no requiere del conocimiento anticipado de un grupo homogéneo. Se debe considerar que el Análisis Clúster no tiene bases estadísticas que relacionen una variable explicativa con otras caudales, 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 los registros de crecidas.

3.3 Etapa 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. En palabras de Hosking y Wallis (1997), lo que el procedimiento viene a realizar es compensar la carencia de información en el tiempo, por su abundancia en el espacio. A ello se agrega otra ventaja: Los modelos de distribución utilizados por el ARF-LM no son los modelos convencionales utilizados en la hidrología probabilística, sino que modelos de distribución mucho más generales y flexibles, basados en 3 o más parámetros. 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 presentan 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.

Los L-momentos fueron introducidos por Hosking y Wallis (1997), constituyen un sistema alternativo para describir las formas de las funciones de distribución de

probabilidades, derivándose de los momentos ponderados probabilísticamente (MPP) de Greenwood *et al.* (1979). Los L-momentos de la muestra que son independientes de las unidades de medición, son llamados L-momentos ratios o cocientes. El L-Cv (L-cociente de variación) es una medida de la dispersión de la muestra. Por otro lado, el L-Cs (L-cociente de asimetría) es una medida de la asimetría de la muestra respecto al origen. Finalmente, L-Ck (L-cociente de curtosis) es un indicador de que tan aplanada es la muestra aleatoria de datos. Los L-momentos poseen diferentes ventajas sobre los momentos convencionales, ya que pueden caracterizar a una variedad más amplia de distribuciones y son más robustos frente a valores atípicos o anormales. Además, diferentes estudios que han comparado a los L-momentos con los momentos convencionales, han establecido que al utilizar los L-momentos se obtienen estimaciones más precisas, es decir, se obtienen estimaciones más cercanas a los valores observados (Hosking y Wallis, 1997).



El software *Linear Regional Analysis of Precipitation* (L-RAP) desarrolla 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 N°2, donde se utiliza 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.

3.3.1 Aplicación del Test de Discordancia y Heterogeneidad

A continuación, se presenta una descripción de la medida de discordancia y heterogeneidad, que permiten determinar si las regiones obtenidas son realmente homogéneas.

- **Medida de discordancia**

Dentro de un grupo homogéneo, se requiere que las cuencas que lo conforman no presenten propiedades que las hagan discordantes del grupo. Hosking y Wallis (1997) indican que una cuenca puede ser discordante del resto del grupo si sus L momentos se alejan significativamente del promedio de los L momentos regionales. Para representar gráficamente este alejamiento, proponen un plano donde el eje de las abscisas corresponde a L-CV (medida de escala) y el eje de las ordenadas al-L-CK (medida de asimetría). Cada cuenca está representada por un punto dentro de este plano. Cualquier punto que se ubique lejos del centro de gravedad del conjunto deberá ser considerado como discordante. Los valores críticos del indicador de discordancia D_i sugeridos para considerar una estación como discordante se muestran en la Tabla 3-2

Tabla 3-2 Valores críticos del valor de discordancia D_i

Nº de cuencas en la Región	Valor crítico D_i	Nº 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)

- **Medida de Heterogeneidad**

Es importante considerar 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. El fundamento teórico y procedimiento de cálculo de la medida de heterogeneidad H_1 está ampliamente descrita por Hosking y Wallis (1997). Sin embargo, el criterio de

heterogeneidad utilizada se basa en el estudio desarrollado por Wallis et al (2007) años más tarde, quienes sugieren los siguientes rangos de aceptación del Test.

Tabla 3-3 Valores críticos del test de heterogeneidad H_1

Heterogeneidad	Hosking y Wallis (1997)	Wallis et al (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); 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 habitualmente contienen otras fuentes de variación, tales como el traslado 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, por muy homogéneas que sean, son considerados en los estudios de Wallis *et al.* (2007)

3.3.2 Selección de la distribución regional de frecuencia

Una vez determinada la homogeneidad de cada uno de los grupos, es necesario seleccionar la distribución regional de frecuencia que mejor se adecue a la forma y distribución de los datos regionales. Para el ajuste de funciones de distribución en base a 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 ajusta mejor a los datos regionales, se utilizan los métodos 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 estudios como de las distribuciones comúnmente utilizadas en el ARF.

3.4 Etapa 3: Generar curvas regionales de estimación de Q crecida

Este paso consiste en la generación de las curvas regionales de estimación de caudales de crecida para diferentes periodos de retorno. Para la estimación de caudales de crecidas en cada grupo, es necesario construir dos curvas regionales, las que se describen a continuación.

3.4.1 Estimar relación de Q medio máximo vs alguna variable geomorfológica

La primera curva consiste en una relación entre el Q medio de las crecidas y las variables geomorfológicas usadas para la clasificación. Se busca la mejor forma de representar esta relación con la finalidad de estimar la crecida índice o “Q medio de las crecidas”. Este ajuste se buscará en primera instancia utilizando una regresión lineal múltiple en la que se relacionarán las variables geomorfológicas seleccionadas y el QmedMax. Si esta relación no funciona de manera correcta, se probará vincular la variable geomorfológica que mayor relación tenga con el QmedMax, ajustando una curva matemática que se adapte de la mejor manera a los datos utilizando el método de ajuste gráfico y la relación del R^2 . Los estudios hidrológicos presentan un alto grado de incertidumbre en las estimaciones, por lo que estudios similares consideran que aceptar un $R^2 > 0,80$ entre variables correlacionadas es adecuado.

3.4.2 Generar curva adimensional de estimación de caudales de crecidas para diferentes periodos de retorno en cada grupo homogéneo

La segunda ecuación regional corresponde a una curva adimensional de estimación de caudales de crecida, generada a partir de la función de distribución que mejor se

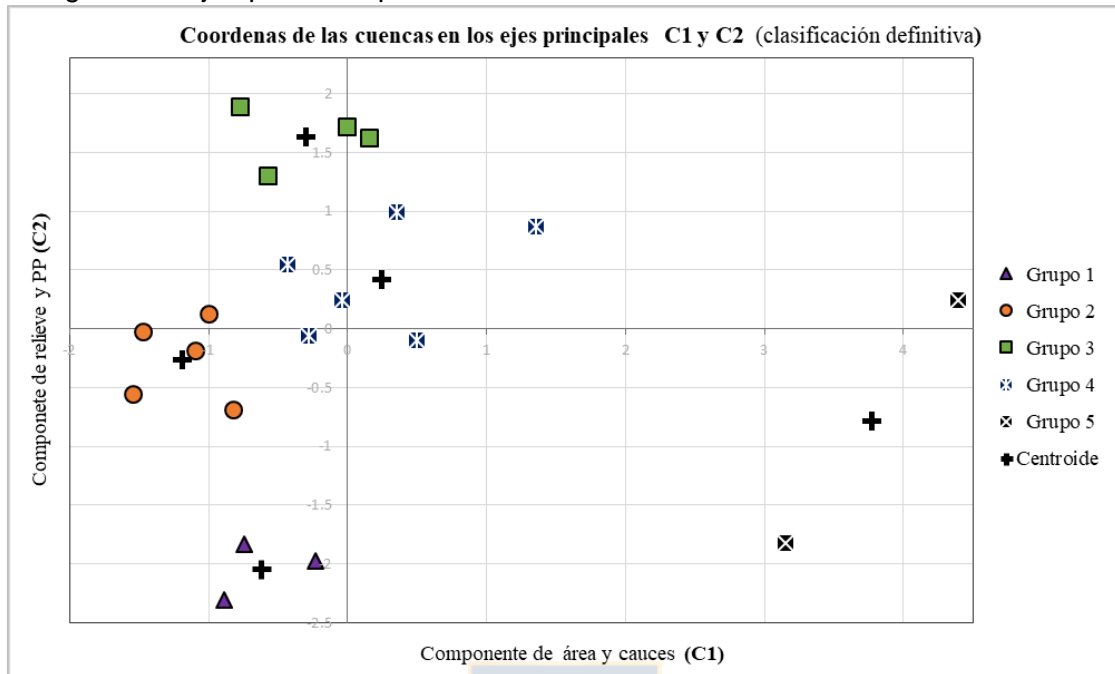
adecua a los datos regionales según las pruebas de bondad de ajuste aplicadas en la etapa anterior. Se usa la muestra normalizada por el caudal medio máximo, obteniendo diferentes valores de Q normalizado para diferentes valores de no excedencia. La metodología detallada para la obtención de esta curva se puede revisar en Hosking y Wallis (1997).

3.4.3 Plano de clasificación las cuencas para la clasificación futura de cuencas sin información:

En este paso, se genera un plano de clasificación de cuencas, el que ayudará a clasificar cuencas sin información hidrológica de manera sencilla. 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. Así es posible ver en el plano (en 2 o 3 dimensiones) como se conforman los grupos a partir de la similitud de las variables geomorfológicas. En la Figura 3.3 se presenta la clasificación en grupos homogéneos de la zona centro sur para la estimación de caudales medios anuales, desarrollada por Cifuentes y Vargas (2018). Esta fue elaborada en la etapa de prueba de la presente investigación. En esta oportunidad, se busca generar un mapa de clasificación similar, pero esta vez con cuencas agrupadas que presenten un comportamiento similar a caudales de crecida.

En el eje “X” se presenta la variable de área, mientras que en el eje “Y” las de relieve. Cada punto pertenece a una cuenca. Como es de esperar los puntos cercanos corresponden a cuencas que presentan estas variables similares.

Figura 3-3 Ejemplo de mapa de clasificación de cuencas sin control fluviométrico



También es posible ubicar el centro de cada grupo. En este caso, si se desea clasificar una cuenca sin información, obtengo 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 que centro de los grupos está más cercana, siendo este el grupo al que pertenece.

3.5 Validación del agrupamiento propuesto

Como se busca automatizar las estimaciones de caudales de crecida para las cuencas de la zona central de Chile, es necesario validar el agrupamiento homogéneo propuesto. Lamentablemente, debido al fuerte criterio de selección de cuencas utilizado para seleccionar las cuencas donantes de información, no es posible con los datos recolectados aplicar una validación cruzada de las ecuaciones regionales, siendo necesario desarrollarlas en próximas investigaciones relacionadas con el agrupamiento propuesto. Este paso de gran importancia no

estaba contemplado al inicio de la investigación, debido principalmente al tiempo que se requiere y en pro de acotar el tiempo de esta investigación, que de otra forma hubiese tardado mucho más tiempo en completarse. Sin ir más lejos, en la literatura especializada es común encontrar estudios como el presentado, dejando el proceso de validación de los grupos para etapas posteriores.

Sin embargo, para validar los resultados y probar que es un método posible de utilizar en cuencas chilenas, se analizarán 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 (Dalrympe, 1960) que plantea un test para verificar la homogeneidad hidrológica de una región.

Este Manual es comúnmente utilizado en Chile como una manera de uniformar procedimientos e instrucciones en las distintas áreas técnicas para cumplir su función de planificar, diseñar, construir, conservar y operar las carreteras y caminos que componen la red vial del país de su tuición; junto con velar por la seguridad vial y protección ambiental. Además, es utilizado en la práctica como una guía de las metodologías comúnmente usadas y aceptadas en el diseño de variadas obras civiles, siendo actualizado regularmente. El procedimiento desarrollado por US Geological Survey consiste en lo siguiente:

A) Obtención de relación $Q(T=10)/Q_{MedioMax}$ regional

- El procedimiento consiste en desarrollar un estudio de frecuencia de crecidas (local) para cada una de las cuencas pertenecientes a la región de interés utilizando la función de probabilidades de valores extremos (Gumbell), tal como lo propone la USGS y lo indica el MDC (2019).
- Se determina para cada cuenca la crecida media anual, que corresponde en la práctica, a la crecida con periodo de retorno 2,33 años. También se calcula la crecida para $T=10$ años.

- Posteriormente, se calcula para cada cuenca la relación entre la crecida para $T=10$ años y la crecida media anual. A continuación, se determina el promedio de estas relaciones considerándolo preliminarmente representativo para el grupo en cuestión.

B) Estimación de $Q(T=10)$ a partir solo de la relación promedio regional anterior

- A partir de la inversa de la distribución de frecuencia utilizada en cada cuenca, se busca el periodo de retorno de una crecida igual al producto de la razón promedio regional y la crecida media anual de lugar, es decir, de un caudal obtenido con una relación regional promediada con los registros de todas las cuencas que conforman el grupo.
- Finalmente, se verifica que el periodo de retorno obtenido se encuentre dentro del rango indicada en la Tabla 3.4. Si “T” está dentro del rango el lugar se considera homogéneo con el resto de las observaciones y, si todas las cuencas son homogéneas, el grupo lo es según lo expuesto en el MDC (2019).

Tabla 3-4 Límites para Test de homogeneidad propuesto por US Geological Survey

Longitud Registro	Límite Inferior	Límite Superior
10	1,8	70
20	2,8	40
30	3,5	30
40	4,0	25
50	4,4	24
60	4,8	22

Fuente: Manual de Carreteras, Vol. 3 Capítulo 3.702.8 (2019)

3.6 Conclusiones

En este capítulo se presentó la metodología a seguir para la automatización de los caudales de crecida, que consiste en 3 etapas que ayudan a dar respuesta a los objetivos específicos planteados al inicio del estudio. Primero se genera un agrupamiento preliminar de cuencas, utilizando para la clasificación las variables geomorfológicas que mayor relación tienen con la respuesta de la cuenca frente a

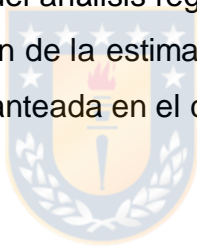
caudales de crecida. En la segunda etapa se asegura la homogeneidad de los grupos mediante la prueba de Discordancia y Heterogeneidad, además de seleccionar aquella curva de distribución de frecuencia que mejor se adecua al total de los datos. Finalmente se generan las curvas de estimación de caudales de crecida para cada grupo, un mapa de clasificación para cuencas sin información hidrológica y la validación del agrupamiento propuesto para demostrar que puede ser utilizado según lo expuesto en el MDC (2019) en la zona central de Chile.



CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos de la clasificación de cuencas en grupos hidrológicamente homogéneos en la zona centro sur de Chile, comprendida entre la latitud sur $34^{\circ}50'$ (donde se ubica el norte de la cuenca del Mataquito) hasta la latitud sur $39^{\circ}35'$ (donde termina la cuenca del río Toltén). Se pone énfasis en la selección de las variables y los métodos multivariados utilizados para generar un agrupamiento que maximice la homogeneidad de los grupos. Además, se muestran los resultados de las pruebas de heterogeneidad y discordancia aplicadas a los grupos, así como del análisis regional de frecuencias aplicado a los datos para lograr la automatización de la estimación de caudales de crecida. Todo esto, a partir de la metodología planteada en el capítulo anterior.



4.2 Clasificación de cuencas en grupos

Lo primero que se realizó fue la selección de las cuencas a estudiar. Inicialmente, se recolectan los datos de todas las cuencas controladas por la DGA entre la región del Maule y Biobío. Entre la región del Maule y Araucanía se encuentran cuatro grandes cuencas: Itata, Biobío, Imperial y Toltén. Se contabilizan un total de 139 Subcuencas que poseen instrumentación, dejando de lado las estaciones que median caudales en canales, pues no es una medición de interés. De ellas solo 46 presentan registros completos y continuos de los últimos 30 años, que será el periodo temporal de análisis. Como segundo filtro para la selección de cuencas que serán las donantes de información, se estableció un segundo análisis donde se ubicaron geográficamente en el plano para poder visualizar su forma y magnitud.

Se dejan fuera a aquellas que presentan características geométricas y de magnitud muy diferentes a la mayoría de las cuencas.

El último filtro para la selección, fue que las muestras de datos de caudales máximos cumplieran con los supuestos básicos para aplicar un Análisis Regional de Frecuencias. Dentro de los más importantes están los de independencia y estacionariedad. La prueba de estacionariedad que se aplica a los datos de caudales, es el método de regresión lineal, utilizada para evidenciar tendencias en los datos. Otro método utilizado en la inspección visual de los registros, pues en ocasiones inspeccionando los gráficos ya se puede comprobar si la serie presenta una tendencia o no. Por otro lado, para comprobar que las series de datos de las estaciones utilizadas en el análisis regional son independientes, se calcula un coeficiente de correlación para las series de datos de cada estación, luego se obtiene un coeficiente de correlación promedio ponderado global con las ponderaciones basadas en la longitud de registro para cada estación. Finalmente se examina si el coeficiente de correlación global es significativamente diferente de cero.

Así se obtuvo un total de 26 cuencas que cumplían todos los requisitos para generar un grupo donante de información. A pesar de ser un pequeño grupo de cuencas, se considera representativo, ya que captura la variabilidad de formas, ubicación y magnitud de cuencas de la zona. Estas cuencas presentan condiciones ideales para realizar un agrupamiento de cuencas donantes de información. Por sobre todo contienen información hidrológica de crecidas confiable y completa. En la Tabla 4.1 se indica el nombre de la

s cuencas seleccionadas.

Figura 4-1 Cuencas Donantes de información

MATAQUITO (5)	MAULE (3)
1. Río Colorado en Junta con Palos 2. Estero Upeo en Upeo 3. Río Palos en Junta con Colorado 4. Río Teno Después de Junta con Claro 5. Río Claro en los Queñes	6. Río Ancoa en el Morro 7. Río Claro en Camarico 8. Río Lircay en Puente las Rastras
BIOBÍO (3)	ITATA (6)
9. Río Lirquén en Cerro el Padre 10. Río Malleco en Collipulli 11. Río Mininco en Longitudinal	12. Río Cato en Puente Cato 13. Río Diguillín 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 19. Río Huichahue en Faja 20. Río Muco en Puente Muco 21. Río Quino en Longitudinal 22. Río Traiguén en Victoria	23. Río Donguil en Gorbea 24. Río Licura en Lcura 25. Río Mahuidanche en Santa Ana 26. Río Peyuhue en Quitate

Tal como lo indica la metodología planteada, el siguiente paso fue el cálculo de los índices de estacionalidad que ayudan a describir la respuesta de la cuenca frente a caudales de crecida. Para esto, en cada una de las 26 cuencas, se generaron tres muestras de caudales extremos obtenidos de los registros de la DGA:

- A. La primera con los caudales extremos instantáneos que se produjeron en los últimos 30 años en periodo de lluvias, es decir, entre los meses de abril a septiembre.
- B. La segunda, con los caudales extremos instantáneos que se produjeron en los últimos 30 años en periodo de estiaje, es decir, entre los meses de octubre a marzo.
- C. Una tercera muestra correspondiente a las máximas crecidas anuales, sin importar si estas se desarrollan en periodo estival o pluvial.

Con las dos primeras muestras se calculan los índices de estacionalidad planteados en la metodología que corresponde al DMC pluvial, DMC estiaje, R pluvial y R

estiaje. Para ello fue necesario considerar la fecha de ocurrencia de la crecida. En cambio, la tercera muestra, es la que se utilizará para generar las ecuaciones de transferencia de información, y será la base de datos que se traspasará. También se emplea esta muestra para obtener el índice de magnitud de crecida o crecida media máxima.

En la Tabla 3.1, presente en el capítulo anterior para un mejor análisis y comprensión de las variables, se decide dividir las variables geomorfológicas utilizadas en el estudio en tres grupos. El primero contiene todas aquellas variables relacionadas con el área de la cuenca y su delimitación, así como los cauces que la conforman. El segundo cuenta con las variables relacionadas con el relieve de la cuenca y sus precipitaciones. Finalmente, el tercero está conformado por índices relacionados con la forma y drenaje de las cuencas.

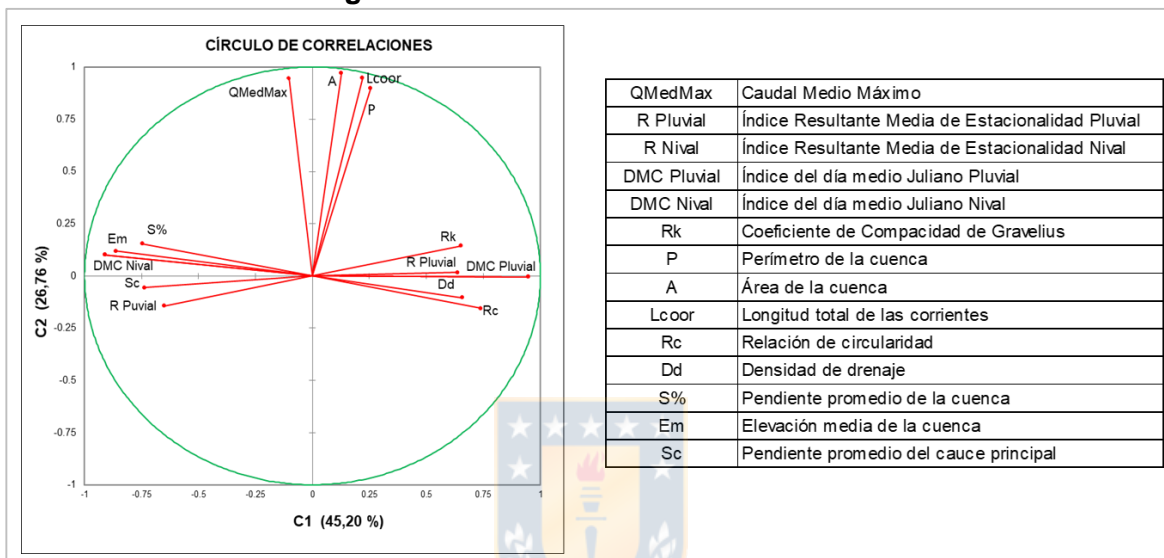
Luego, se realiza un primer ACP exploratorio con todos los datos y se observa el gráfico de círculo de correlaciones de las dos primeras componentes principales. Se evidencia una clara tendencia a formar 3 grupos de variables dentro del gráfico, curiosamente cada una de las zonas presenta representativamente uno de los índices de estacionalidad utilizados para describir la respuesta de las cuencas frente a crecidas. Cercano a ellos se observa variables geomorfológicas, lo que lleva a pensar que existe una relación. Se dejan fuera del análisis a aquellas variables geomorfológicas lejanas a estas 3 zonas dentro del gráfico. Las variables que quedan fuera del análisis son las que se muestran en la Tabla 4.2

Tabla 4-1 Variables independientes que no tienen relación con la respuesta de la cuenca frente a caudales de crecida

N°	Variables fuera del análisis
1	Longitud de a Cuenca
2	Longitud al Centroide
3	Longitud del Cauce Principal
4	Elevación Máxima
5	Precipitación Media Anual
6	Precipitación Media Máxima
7	Precipitación Media Mínima
8	Relación de Elongación

Posteriormente, se realiza un segundo ACP, considerando solo las variables que presentan cercanía a los índices de estacionalidad que describen la respuesta de las cuencas frente a crecidas. Así, se puede observar un gráfico de correlación como el siguiente:

Figura 4-2 Gráfico de Correlaciones Final



El gráfico que se muestra en la Figura 4.2 se denomina círculo de correlaciones. 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 3 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 lo son el índice de compacidad (R_k), índice de circularidad (R_c) y densidad de drenaje (D_d). Todas ellas indican una medida de la forma de la cuenca o que tan cercana está a ser circular. Analizando esta situación y buscando alguna explicación en que variables de forma estén relacionadas con la respuesta de la cuenca frente a caudales producidas en periodos lluvias, se piensa inmediatamente 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, presentaran tiempos de concentración diferentes. La alargada presenta un mayor tiempo de concentración, lo que se traduce en que frente a una misma precipitación su respuesta será más lenta, produciendo hidrograma de crecidas aplanados. 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 anti horario, está caracterizado 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.

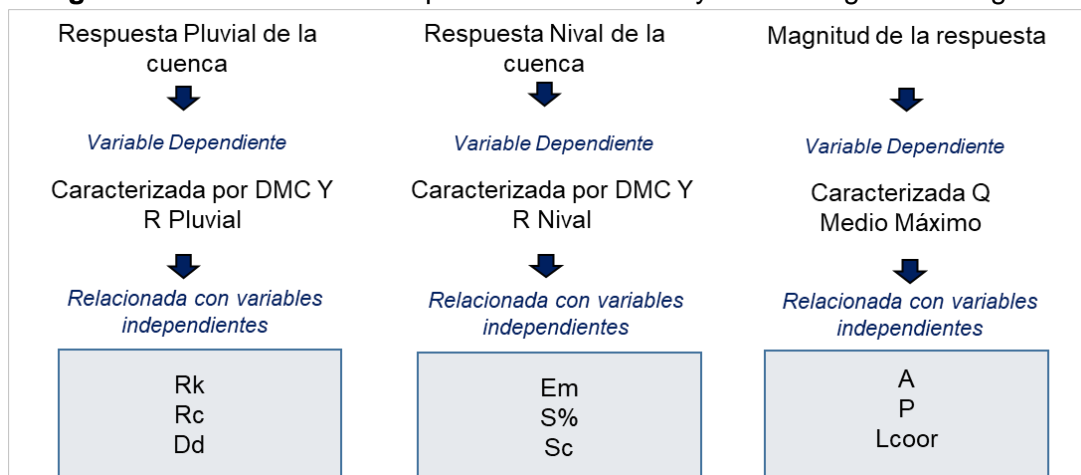
Finalmente, la tercera zona está caracterizada por el índice de estacionalidad R Y DMC Nival. Estos índices, obtenidos a partir de registros fluviométricos en periodos secos, representan la respuesta de las cuencas principalmente a deshielos o precipitaciones bajas. Cercana a los índices R y DMC Nival, 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 altimetría de la cuenca. Buscando una relación conceptual a esta correlación, no es difícil pensar en la isoterma cero de las cuencas, que corresponde a la altura desde la cual hacia arriba la precipitación es en forma de nieve y hacia abajo de ella en forma de lluvia. Generalmente esta depende, dentro de otras variables, del relieve de la cuenca. Si presentan una altura considerable, la precipitación del periodo pluvial se acumula como nieve una vez se supere la isoterma cero promedios de la cuenca, la que, en presencia de las altas temperaturas de los periodos secos, se derrite causando aumento en los caudales máximo. Si la altura no es considerable, la respuesta de la cuenca es más aplanada. Así la respuesta de la cuenca en periodos seco queda caracterizada.

Por último, se observa que la respuesta de la cuenca en periodo pluvial no tiene relación con su magnitud, pues estas están ubicadas en forma perpendicular en el círculo de correlaciones (Figura 4.2). 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 están negativamente correlacionadas, pues la muestra 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 generan caudales máximos mayores. En pocas palabras, la respuesta de la cuenca en invierno y verano están negativamente correlacionadas.

Así, finalmente se puede concluir las relaciones que se muestran en la Figura 4.4.

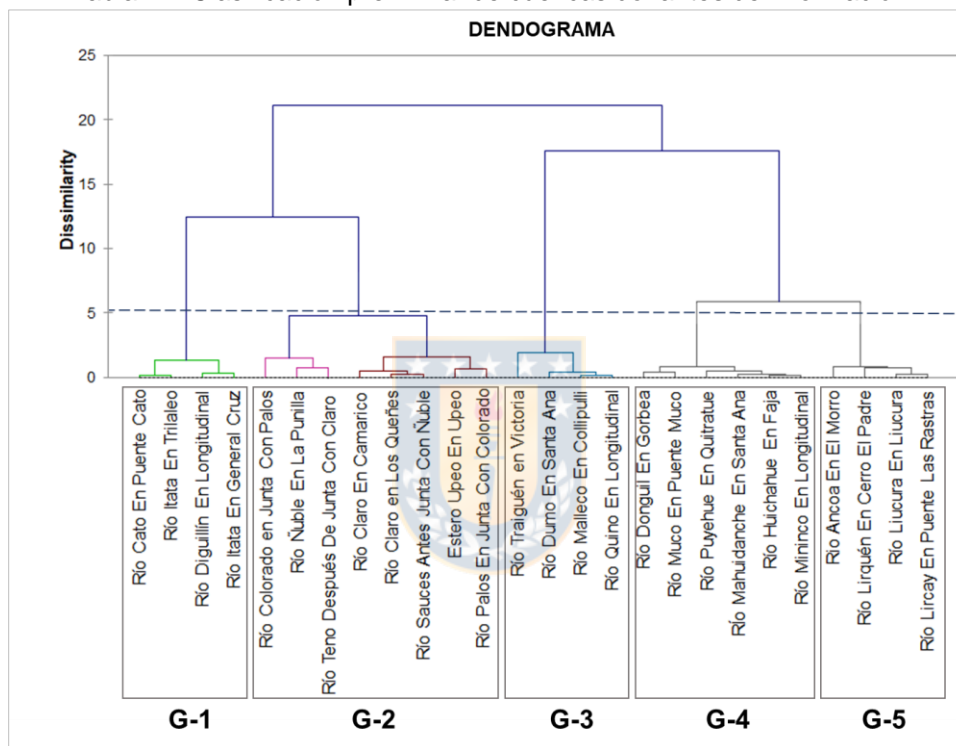
Figura 4-3 Relación de la respuesta de la cuenca y variables geomorfológicas

De esta clasificación de variables, es necesario elegir aquellas independientes que se utilizarán para realizar 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 3 variables geomorfológicas de fácil obtención, las que se describen a continuación, considerando que reflejan la misma información.

- A. Para describir la respuesta pluvial, se escogió el índice de compacidad de Gravelius, el que nos 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 adquisición.
- B. 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 a su comportamiento durante periodos secos.
- C. 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. Fueron probadas diferentes metodologías de Clúster, como el K-medias y el jerárquico. Finalmente, se decidió que la clasificación más consistente fue la entregada por el método Jerárquico, mostrando la clasificación preliminar obtenida en la Figura 4.3

Tabla 4-2 Clasificación preliminar de cuencas donantes de información



Preliminarmente, la clasificación jerárquica arrojó 5 grupos. Es posible y altamente probable que esta distribución original cambie después de aplicar las pruebas de heterogeneidad y discordancia. Se debe privilegiar estos criterios por sobre la clasificación preliminar. Así, es posible reubicar los grupos, desarmarlos y formarlos nuevamente con la finalidad 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.

4.3 Aplicación del Análisis Regional de Frecuencias

El siguiente paso desarrollado según la metodología propuesta, fue la aplicación del análisis regional de frecuencias para completar la Etapa 2 y 3. En primera instancia, se verifica que los grupos propuestos preliminarmente fuesen homogéneos en sus registros de caudales de crecida. Del análisis de los grupos, se estableció que algunas de las cuencas que los conformaban generaban que disminuyera su homogeneidad. En cambio, si se reubicaba la cuenca problemática en otro de los grupos, provocaba un aumento de la homogeneidad del nuevo grupo de pertenencia. A partir de un análisis iterativo, buscando maximizar la homogeneidad de los registros, se reordenan los grupos de la siguiente manera:

- El Grupo 1 ve aumentada su homogeneidad al integrar la cuenca del Río Claro en Camarico.
- El Grupo 2 ve aumentada su homogeneidad al sacar las cuencas Río Claro en Camarico y Estero Upeo en Upeo.
- El Grupo 3 ve aumentada su homogeneidad al integrar la cuenca del Río Mininco en Longitudinal.
- El Grupo 4 ve aumentada su homogeneidad al sacar la cuenca Río Mininco en Longitudinal.
- El Grupo 5 ve aumentada su homogeneidad al integrar la cuenca del Estero Upeo en Upeo

A continuación, se presenta el análisis de homogeneidad de los grupos finales propuestos.

4.3.1 Análisis del Grupo N°1

Se verificó que los registros de caudales de las cuencas pertenecientes Grupo N°1 presenten independencia y fueran no estacionarias, supuestos que permiten aplicar el análisis regional de frecuencia a sus registros. Se calculó el Test de Discordancia

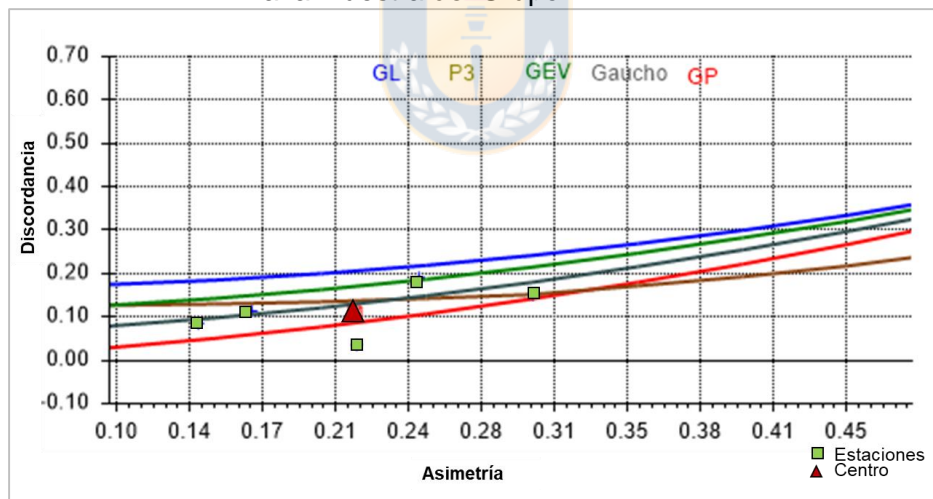
y Heterogeneidad que asegura con sus resultados la homogeneidad del Grupo N°1, resultados que se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4-3 Prueba de Discordancia y Heterogeneidad Grupo N°1

N°	Estación	Discordancia	Heterogeneidad
1	Río Cato en Puente Cato	1,21	1,47
2	Río Claro en Camarico	1,22	
3	Río Diguillín en Longitudinal	1,13	
4	Río Itata en General Cruz	0,53	
5	Río Itata en Trilaleo	0,9	
Valor Crítico		<1,33 Aceptar	<2 Homogéneo

Se aplicaron las pruebas de bondad de ajuste, tanto gráficamente como Test Z. obteniendo que la curva de distribución con mejor ajuste en la de Pareto Generalizada. El diagrama que relaciona los L-momentos cocientes se muestra en la Figura 4.4.

Figura 4-4 Método gráfico para determinar mejor ajuste de distribuciones de probabilidad a la muestra del Grupo N°1

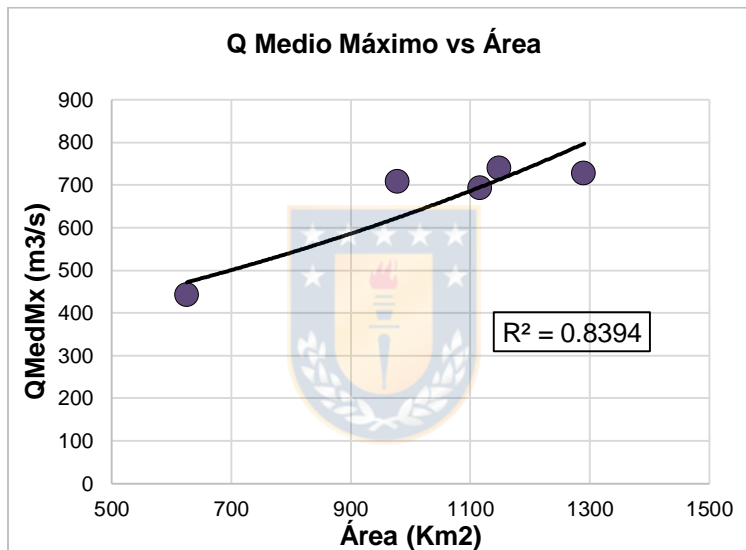


Finalmente, se obtuvieron las curvas regionales de transferencia de información. Es importante indicar que la relación más fuerte para el caudal Medio Máximo es el área, vinculada directamente con la magnitud media de los caudales. Es ideal que estas curvas presenten una cantidad de datos mayor para poder validarlas de manera adecuada, lamentablemente en esta primera clasificación se obtienen curvas a partir de una baja cantidad de observaciones, lo que debe solucionarse en

estudios posteriores basados en esta clasificación. Lo anterior ocurre frecuentemente en artículos de la literatura especializada, donde existen estudios dedicados exclusivamente a generar una validación adecuada de los grupos obtenidos. En definitiva, se logró establecer la relación del Q Medio Máximo versus el área de las cuencas pertenecientes al Grupo N°2, obteniendo la relación general que se muestra en la ecuación 4.1, cuyo ajuste gráfico se observa en la Figura 4.5.

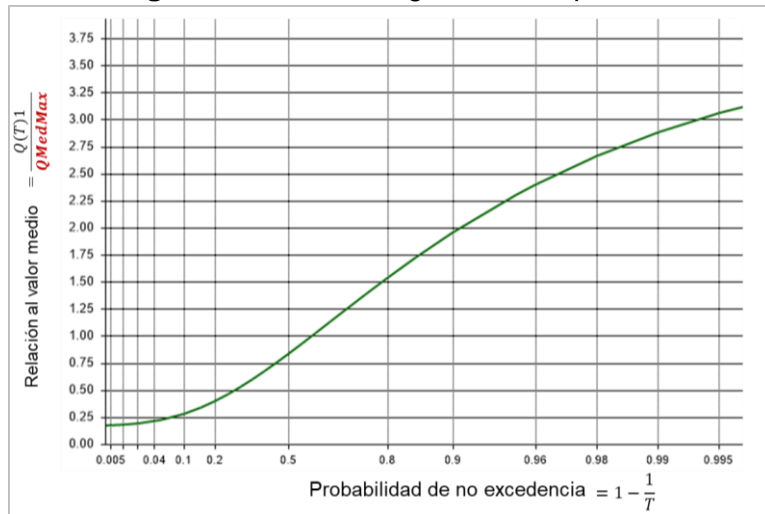
$$Q_{\text{Medio Max}} = 28.829 e^{0,0008A} \quad (4.1)$$

Figura 4-5 Curva regional Q medio Máximo Versus Área de Grupo N°1



Se espera que investigaciones posteriores se generen un aumento de la muestra de cuencas para incrementar la cantidad de cuencas en cada grupo. En esta investigación preliminar, cuyo objetivo es detectar una metodología que cumpla con la finalidad de automatizar las estimaciones de caudales de crecida, se aprecia una relación consistente entre el caudal medio de la cuenca y el área, algo esperable en base a los análisis desarrollados. Este planteamiento es considerado en los otros 4 grupos analizados.

Figura 4-6 Curvas Regionales Grupo N°1



Finalmente, se muestra la curva adimensional de estimación de caudales para diferentes periodos de retorno en la Figura 4.6.



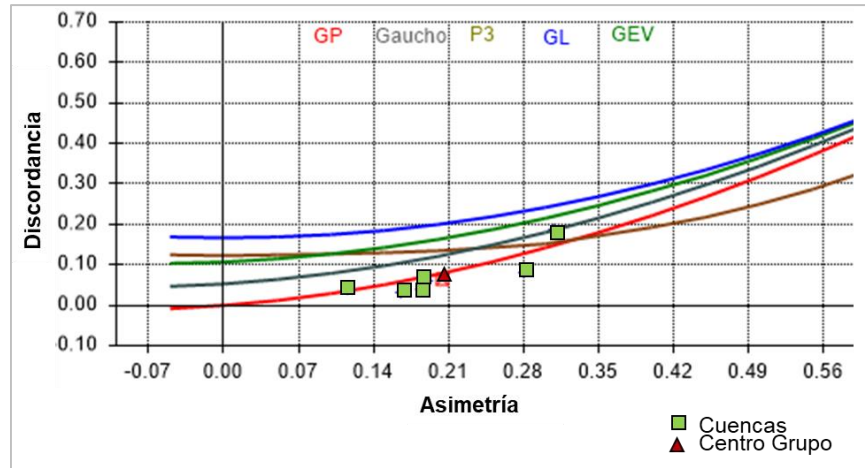
4.3.2 Análisis del Grupo N°2

Se verificó que los registros de caudales de las cuencas pertenecientes al Grupo N°2 presenten independencia y fueran no estacionarias, supuestos que permiten aplicar el análisis regional de frecuencia a sus registros. Se calculó el Test de Discordancia y Heterogeneidad que asegura con sus resultados la homogeneidad del Grupo N°2, resultados que se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4-4 Prueba de Discordancia y Heterogeneidad Grupo N°2

N°	Cuenca	D	H1
1	Río Claro en los Queñes	1,52	0,43
2	Río Colorado en Junta con Palos	1,63	
3	Río Ñuble en la Punilla	0,39	
4	Río Palos en Junta con Colorado	1,07	
5	Río Sauces Antes Junta con Ñuble	0,95	
6	Río Tenó Después de Junta con Claro	0,44	
Valor Crítico		<1,648 Aceptar	<2 Homogéneo

Figura 4-7 Método gráfico de relaciones de L momento para determinar mejor ajuste de distribuciones de probabilidad a la muestra del Grupo N°2



Además, se aplicaron las pruebas de bondad de ajuste, tanto a gráfica como Test Z. obteniendo que la curva de distribución con mejor ajuste es la de Pareto Generalizado. El diagrama que relaciona los L-momentos cocientes se muestra en la Figura 4.7

Finamente, se obtuvieron las curvas regionales de transferencia de información. Primero se obtuvo la relación del Q Medio Máximo versus el área de las cuencas pertenecientes al Grupo N°2, obteniendo la relación que se muestra en la ecuación 4.2. cuyo ajuste gráfico se muestra en la Figura 4.8.

$$Q_{\text{Medio Max}} = 150,76 e^{0,0012 \cdot A} \tag{4.2}$$

Figura 4-8 Curva regional Q medio Máximo Versus Área de Grupo N°2

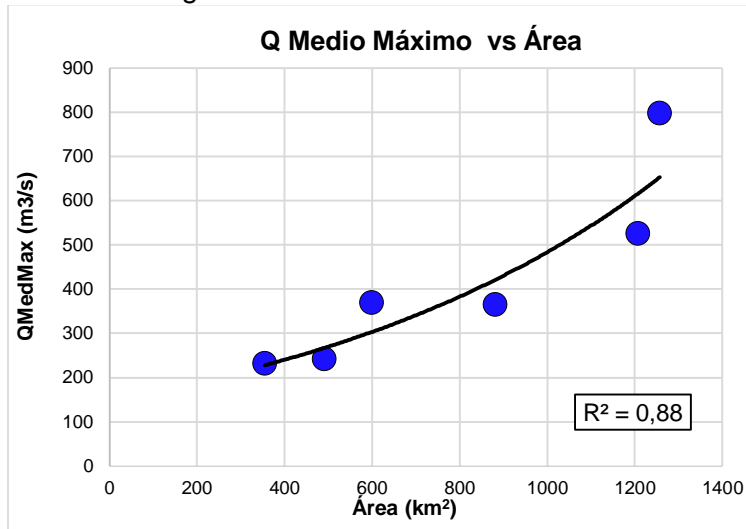
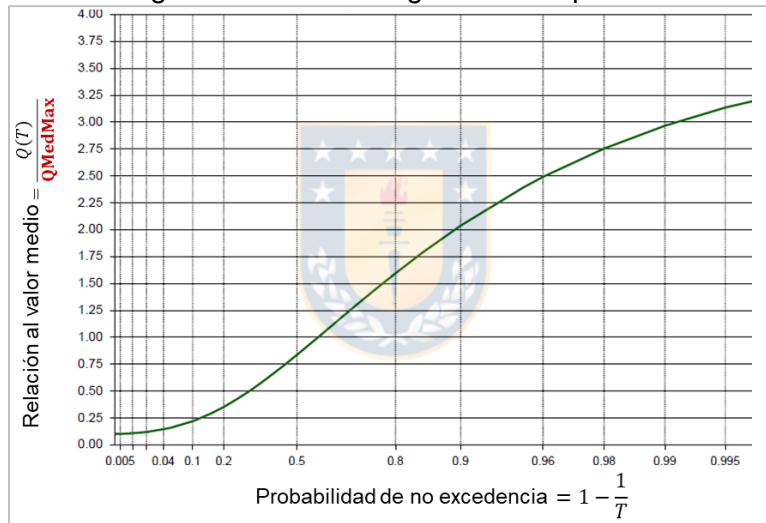


Figura 4-9 Curvas Regionales Grupo N°2



Finalmente se muestra la curva adimensional de estimación de caudales para diferentes periodos de retorno en la Figura 4.9.

4.3.3 Análisis del Grupo N°3

Se verificó que los registros de caudales de las cuencas pertenecientes Grupo N°3 presentan independencia y fueran no estacionarias, supuestos que permiten aplicar el análisis regional de frecuencia a sus registros. Se calculó el Test de Discordancia

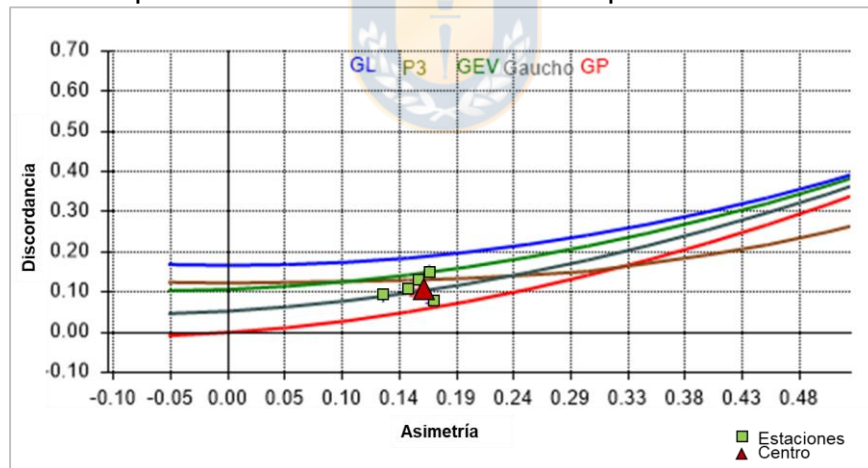
y Heterogeneidad que asegura con sus resultados la homogeneidad del Grupo N°3, resultados que se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4-5 Prueba de Discordancia y Heterogeneidad Grupo N°3

N°	Cuencas	Discordancia	Heterogeneidad
1	Río Dumo en Santa Ana	0,31	0,51
2	Río Malleco en Collipulli	1,04	
3	Río Mininco en Longitudinal	1,28	
4	Río Quino en Longitudinal	1,07	
5	Río Traiguén en Victoria	1,30	
Valor Critico		<1,33 Aceptar	<2 Homogéneo

Se aplicaron las pruebas de bondad de ajuste, tanto a gráfica como Test Z. obteniendo que la curva de distribución con mejor ajuste en la de Pareto Generalizada. El diagrama que relaciona los L-momentos cocientes se muestra en la Figura 4.10.

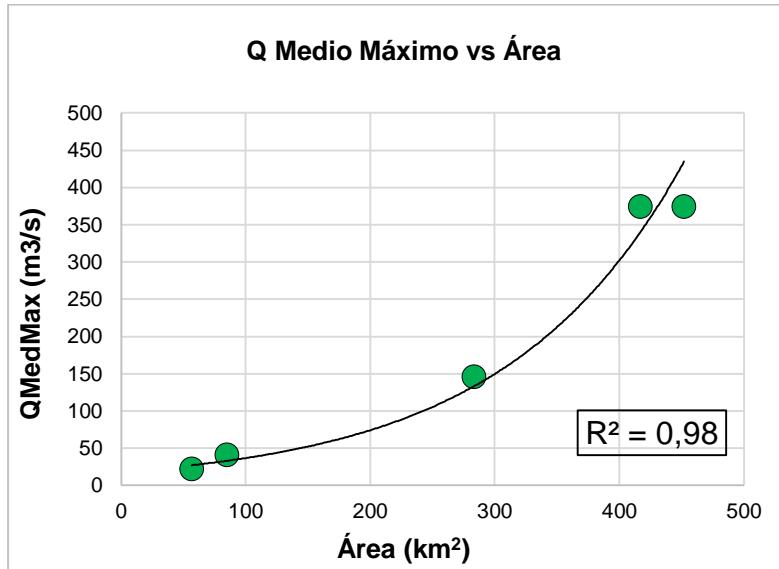
Figura 4-10 Método gráfico para determinar mejor ajuste de distribuciones de probabilidad a la muestra del Grupo N°3



Finamente, se obtuvieron las curvas regionales de transferencia de información. Primero se obtuvo la relación del Q Medio Máximo versus el área de las cuencas pertenecientes al Grupo N°3, obteniendo a siguiente relación regional: obteniendo la relación que se muestra en la ecuación 4.3. cuyo ajuste gráfico se muestra en la Figura 4.11.

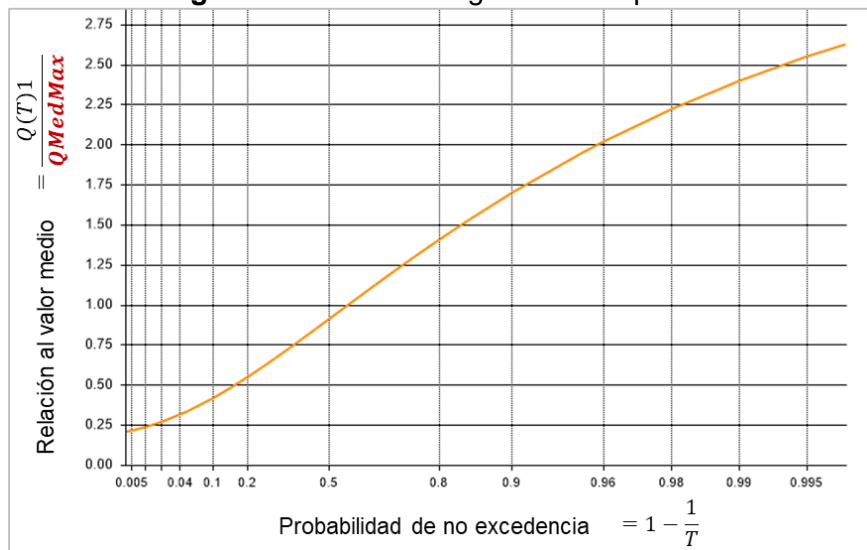
$$Q_{\text{Medio Max}} = 18,211 e^{0,007A} \tag{4.3}$$

Figura 4-11 Curva regional Q medio Máximo Versus Área de Grupo N°3



Finalmente, se muestra la curva adimensional de estimación de caudales para diferentes periodos de retorno en la Figura 4.12.

Figura 4-12 Curvas Regionales Grupo N°3



4.3.4 Análisis del Grupo N°4

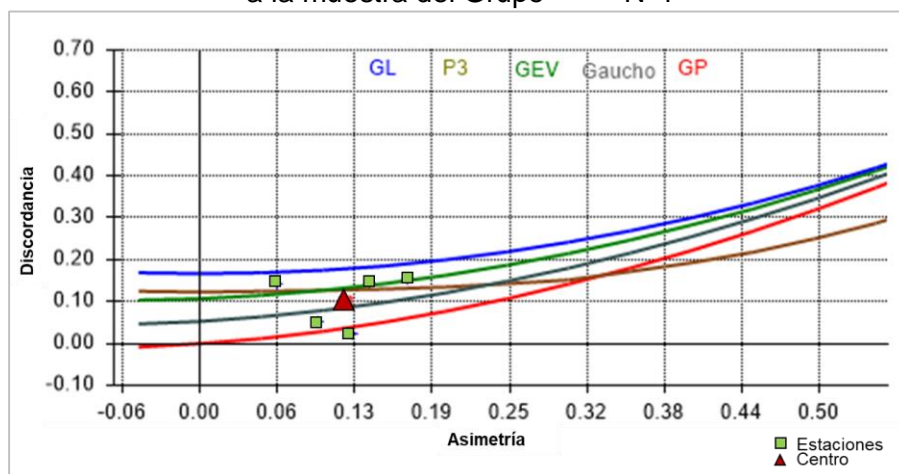
Se verificó que los registros de caudales de las cuencas pertenecientes Grupo N°4 presenten independencia y fueran no estacionarias, supuestos que permiten aplicar el análisis regional de frecuencia a sus registros. Se calculó de Test de Discordancia y Heterogeneidad que asegura con sus resultados la homogeneidad del Grupo N°4, resultados que se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4-6 Prueba de Discordancia y Heterogeneidad Grupo N°4

N°	Cuenca	D	H1
1	Río Donguil en Gorbea	1,25	1,01
2	Río Huichahue en Faja	0,66	
3	Río Mahuidance en Santa Ana	1,02	
4	Río Muco en Puente Muco	0,94	
5	Río Puyehue en Quitratue	1,12	
Valor Crítico		<1,33 Aceptar	<2 Homogéneo

Se aplicaron las pruebas de bondad de ajuste, tanto a gráfica como Test Z, obteniendo que la curva de distribución de mejor ajuste es la de Pearson III. El diagrama que relaciona los L-momentos cocientes se muestra en la Figura 4.13.

Figura 4-13 Método gráfico para determinar mejor ajuste de distribuciones de probabilidad a la muestra del Grupo N°4

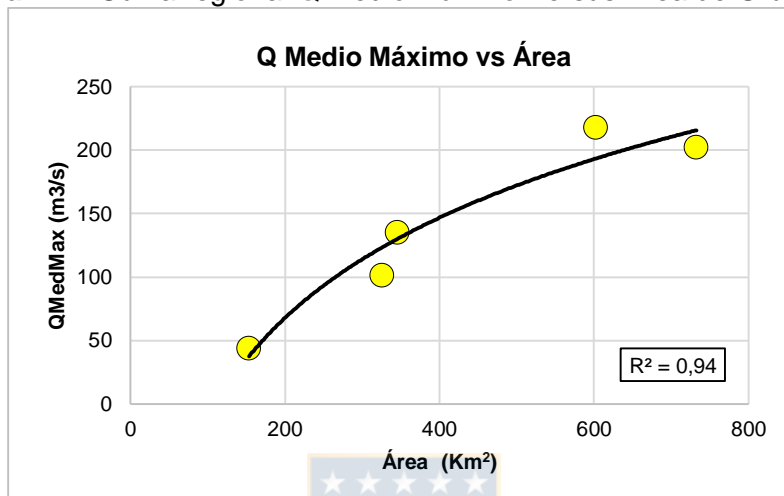


Finamente, se obtuvieron las curvas regionales de transferencia de información. Primero se calcula la relación del Q Medio Máximo versus el área de las cuencas

pertencientes al Grupo N°4, generando la relación regional que se muestra en la ecuación 4.4. cuyo ajuste gráfico se expone en la Figura 4.14.

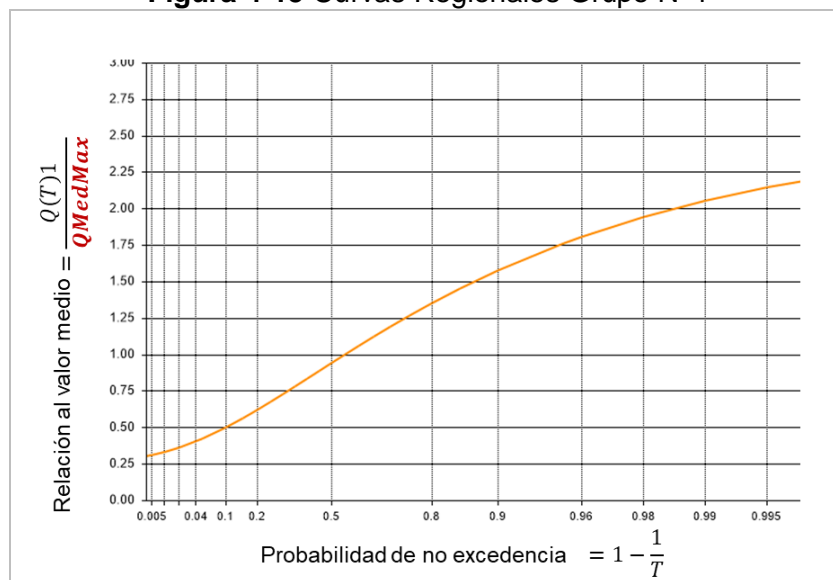
$$Q_{\text{Medio Max}} = 113,92 \ln(A) - 535,79 \tag{4.4}$$

Figura 4-14 Curva regional Q medio Máximo Versus Área de Grupo N°4



Finalmente, se grafica la curva adimensional de estimación de caudales para diferentes periodos de retorno en la Figura 4.15.

Figura 4-15 Curvas Regionales Grupo N°4



4.3.5 Análisis del Grupo N°5

Se verificó que los registros de caudales de las cuencas pertenecientes Grupo N°5 presenten independencia y fueran no estacionarias, supuestos que permiten aplicar el análisis regional de frecuencia a sus registros. Se calculó el Test de Discordancia y Heterogeneidad que asegura con sus resultados la homogeneidad del Grupo N°5, resultados que se muestran en la Tabla 4.7

Tabla 4-7 Prueba de Discordancia y Heterogeneidad Grupo N°5

N°	Estación	Discordancia	Heterogeneidad
1	Río Ancoa en el Morro	0,71	2,16
2	Río Licura en Licura	1,00	
3	Río Lircay en Puente las Rastras	0,98	
4	Río Lirquén en Cerro el Padre	1,02	
5	Estero Upeo en Upeo	1,29	
Valor Crítico		<1,33 Aceptar	<3 Posiblemente Homogéneo

Se aplicaron las pruebas de bondad de ajuste, tanto a gráfica como Test Z. obteniendo que la curva de distribución con mejor ajuste en la de Generalizada de Valores Extremos. El diagrama que relaciona los L-momentos cocientes se muestra en la Figura 4.16

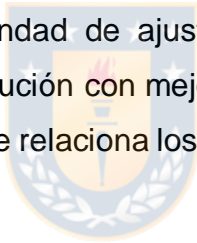
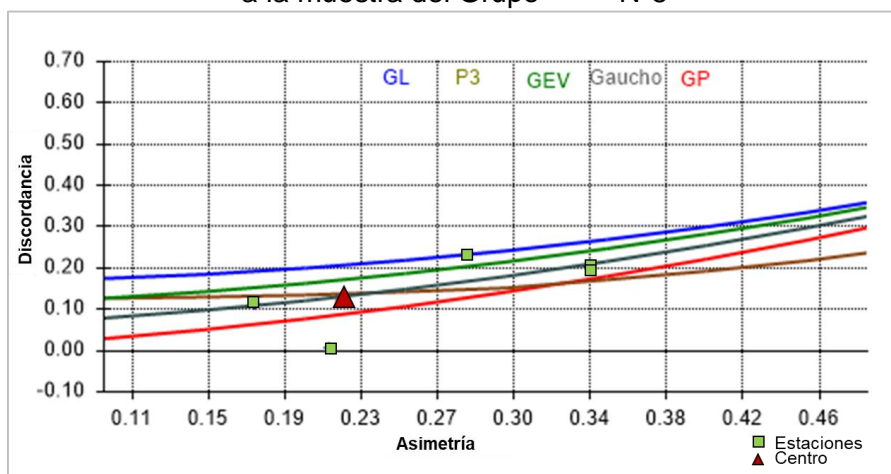


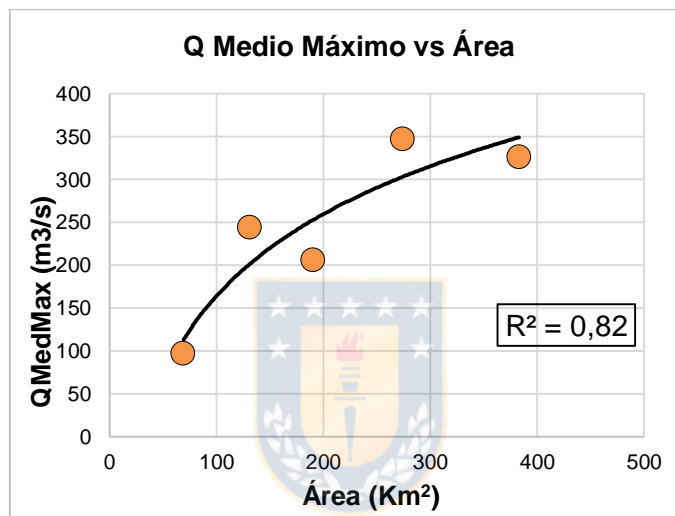
Figura 4-16 Método gráfico para determinar mejor ajuste de distribuciones de probabilidad a la muestra del Grupo N°5



Finamente, se obtuvieron las curvas regionales de transferencia de información. Primero se obtuvo la relación del Q Medio Máximo versus el área de las cuencas pertenecientes al Grupo N°5, obteniendo la relación que se muestra en la ecuación 4.5. cuyo ajuste gráfico se muestra en la Figura 4.17.

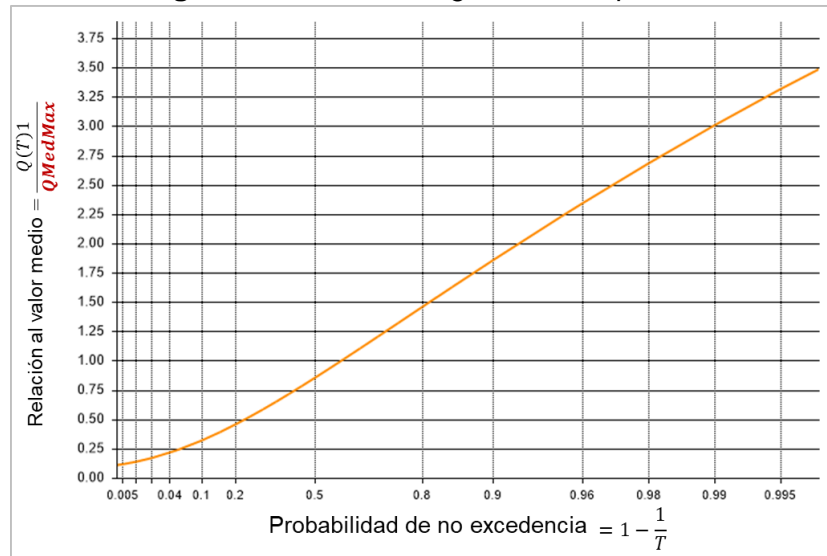
$$Q_{\text{Medio Max}} = 136,18 \ln(A) - 463,97 \quad (4.5)$$

Figura 4-17 Curva regional Q medio Máximo Versus Área de Grupo N°5



Finalmente se muestra la curva adimensional de estimación de caudales para diferentes periodos de retorno en la Figura 4.18.

Figura 4-18 Curvas Regionales Grupo N°5



4.4 Validación de la homogeneidad de los grupos obtenidos

Se aplicó la metodología propuesta por el US Geological Survey y recomendada por el Manual de Carreteras (2019) a cada uno de los grupos obtenidos. En la siguiente Tablas se muestra a modo de ejemplo los resultados completos en el Grupo N°1.

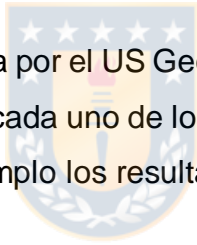


Tabla 4-8 Estimación Local de los registros de cada cuenca

Estimación Local: con registros de cada cuenca						
Cálculos	Claro en Queñes	Colorado en Junta con Palo	Ñuble en la Punilla	Palos en Junta con Colorado	Sauces en Junta con Ñuble	Teno en claro
Número de años con registro	31	31	31	31	31	31
Q(T=10) calculado análisis local	461	872	1633	544	697	1066
Q medio caculado análisis local (T=2.33)	236	377	818	249	378	538
Relación Q(T=10) / Qmedio por cuenca	1,95	2,31	2,00	2,19	1,85	1,98
Relación Q(T=10) / Qmedio grupal = 2,05						

Tabla 4-9 Estimación de las cuencas utilizando relación grupal $Q(T=10)/Q(T=2.33)$

Estimación nuevamente de caudales por cuenca, pero a partir de relación grupal: $Q(T=10)/Q(T=2.33)$						
Cálculos	Río Claro en Queñes	Colorado en Junta con Palo	Ñuble en la Punilla	Palos en Junta con Colorado	Sauces en Junta con Ñuble	Teno en claro
Qmedio obtenido de registros de cada cuenca	236	377	818	249	378	538
Estimación de $Q(T=10)$ a partir de relación grupal, $Q(T=10) = Q_{medio} \times 2,05$	485	773	1676	510	774	1.104
¿A qué periodo de retorno corresponde? (inversa de la distribución)	12	7	11	8	15	11
¿El T calculado para la cuenca a partir de la relación grupal está dentro del rango?	Apruebo	Apruebo	Apruebo	Apruebo	Apruebo	Apruebo

Así, se determina que el caudal calculado a partir de la relación grupal $Q(T=10)/Q_{medio}$, presenta periodos de retorno cercanos a 10, tal como sucede al realizar el análisis local de cada uno de los registros de las cuencas.

A continuación, se muestran los resultados por grupo. Es importante notar que el recalcu del periodo de retorno del caudal obtenido a partir de la relación grupal, tiene que ser cercano a 10. Según los criterios de aceptación de homogeneidad propuestos por el MDC, como las cuencas presentan registros de 31 años de duración, el periodo de retorno recalculado debe rondar entre los 3,5 a 30 años. De la Tabla 4.10 a la 4.15 se muestran los resultados del Test planteado en el Manual de Carreteras (MDC) en su versión 2019 para demostrar la homogeneidad de un grupo de cuencas.

Tabla 4-10 Validación de homogeneidad Grupo 1 (MDC 2019)

GRUPO N°1						
Cálculo	Río Claro en Queñes	Colorado en Junta con Palo	Ñuble en la Punilla	Palos en Junta con Colorado	Sauces en Junta con Ñuble	Teno en claro
Estimación Local $Q(T=10)$	461	872	1.633	544	697	1.066
Estimación a partir de relación grupal	484	771	1.673	509	772	1.101
¿A qué T corresponde realmente corresponde la estimación grupo?	12	7	11	8	15	11

Tabla 4-11 Validación de homogeneidad Grupo 2 (MDC 2019)

GRUPO N°2					
Cálculo	Donguil en Gorbea	Huichahue en Faja	Mahuidanche en Santa Ana	Muco en Puente Muco	Puyehue en Quetratue
Estimación Local Q(T=10)	330	220	164	365	69
Estimación a partir de relación grupal	329	220	164	355	71
¿A qué T corresponde realmente corresponde la estimación grupo?	10	10	10	9	12

Tabla 4-12 Validación de homogeneidad Grupo 3 (MDC 2019)

GRUPO N°3					
Cálculo	Ancoa en el Morro	Estero Upeo en Upeo	Licura en Licura	Lircay en Puente las Rastras	Lirquén en Cerro los Padres
Estimación Local Q(T=10)	752	423	412	672	175
Estimación a partir de relación grupal	684	397	476	642	190
¿A qué T corresponde realmente corresponde la estimación grupa?	8	8	19	9	14

Tabla 4-13 Validación de homogeneidad Grupo 4 (MDC 2019)

GRUPO N°4					
Cálculo	Cato en Puente Cato	Claro en Camarico	Diguillín en Longitudinal	Itata en General Cruz	Itata en Trilaleo
Estimación Local Q(T=10)	1.336	966	1.532	1.322	1.426
Estimación a partir de relación grupal	1.433	878	1.461	1.385	1.480
¿A qué T corresponde realmente corresponde la estimación grupa?	13	8	9	12	11

Tabla 4-14 Validación de homogeneidad Grupo 5 (MDC 2019)

GRUPO N°5					
Cálculo	Dumo en Santa Ana	Malleco en Collipulli	Mininco en Longitudinal	Quino en Longitudinal	Traiguén en Victoria
Estimación Local Q(T=10)	37	674	270	250	69
Estimación a partir de relación grupal	38	656	259	254	71
¿A qué T corresponde realmente corresponde la estimación grupa?	11	9	9	11	11

A partir de los resultados mostrados, se observa que los grupos propuestos presentan homogeneidad según el test sugerido por el MDC, por lo cual se consideran adecuados para generar un traspaso de caudales de crecida para diferentes periodos de retorno en la zona central de Chile.



CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

5.1 Discusión: Ubicación geográfica y mapa de clasificación de los grupos homogéneos

A continuación, se muestra la ubicación geográfica de los grupos homogéneos. Los nombres de las cuencas corresponden a la numeración indicada en la Tabla 4.1. Se observa que el grupo N°1 corresponde a cuencas cordilleranas, generalmente redondeadas. El grupo N°2 alude a cuencas planas ubicadas en la planicie intermedia. Estas son alargadas y de mediana longitud. El grupo N°3 comprende cuencas precordilleranas, de mediano desnivel y redondeadas. El grupo 4 está conformado por cuencas que presentan una cabecera de gran anchura cercana a la precordillera, pero que a medida que se acerca su descarga va disminuyendo de magnitud y anchura, siendo alargada. Finalmente, el grupo 5 está compuesta por cuencas alargadas y estrechas, ubicadas en territorios de bajo desnivel considerados como planicie intermedia

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.

Por otro lado, se presenta en la Figura 5.2 el mapa de clasificación de cuencas. Este es utilizado para determinar a cuál grupo es más probable que pertenezca una cuenca sin registros fluviométricos. Sumado a esto, se presentan las coordenadas de los centros de los grupos homogéneos conformados.

Figura 5-1 Ubicación geográfica de los grupos obtenidos

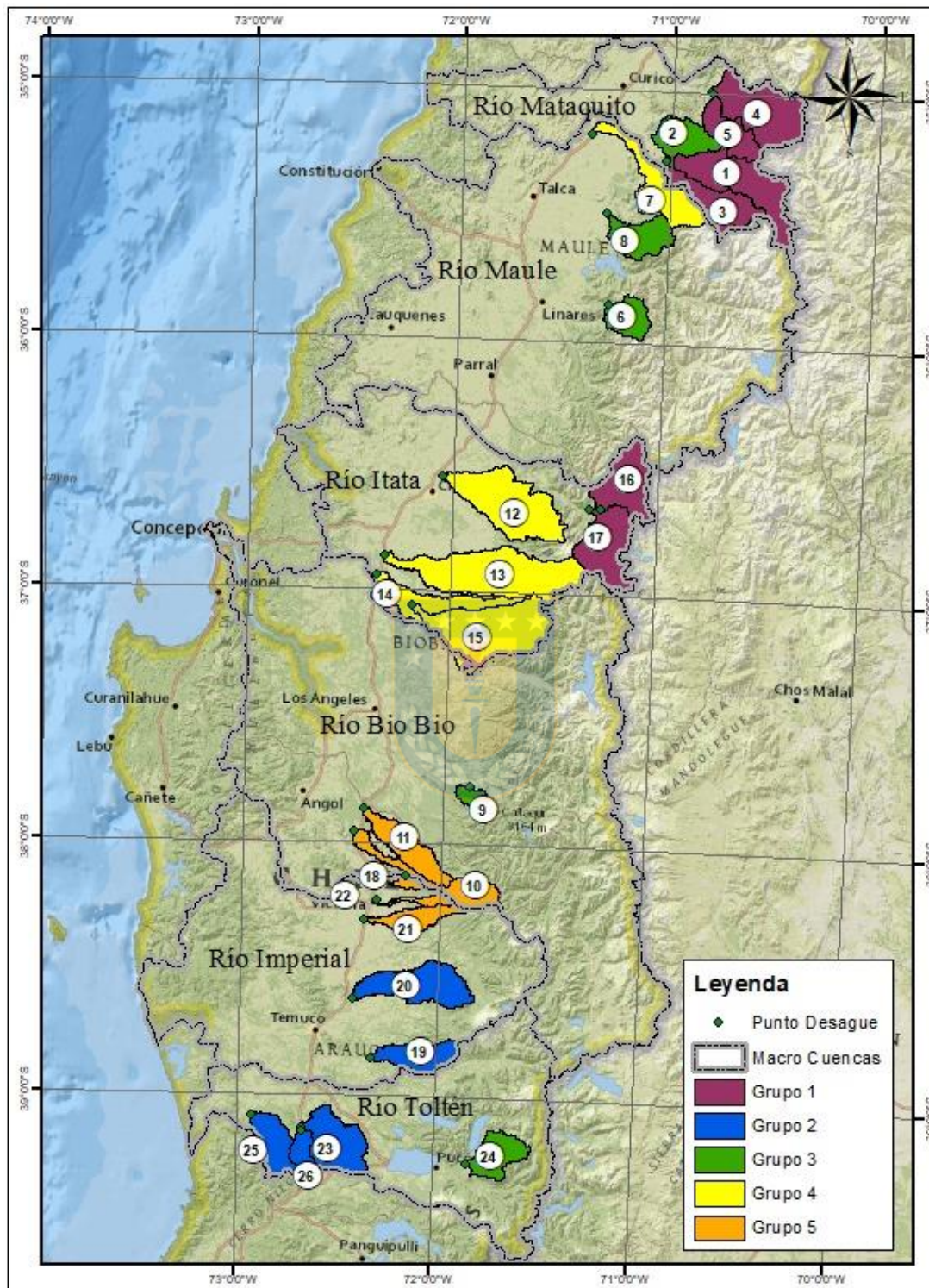


Figura 5-2 Propuesta de Mapa de clasificación de cuencas sin información hidrológica

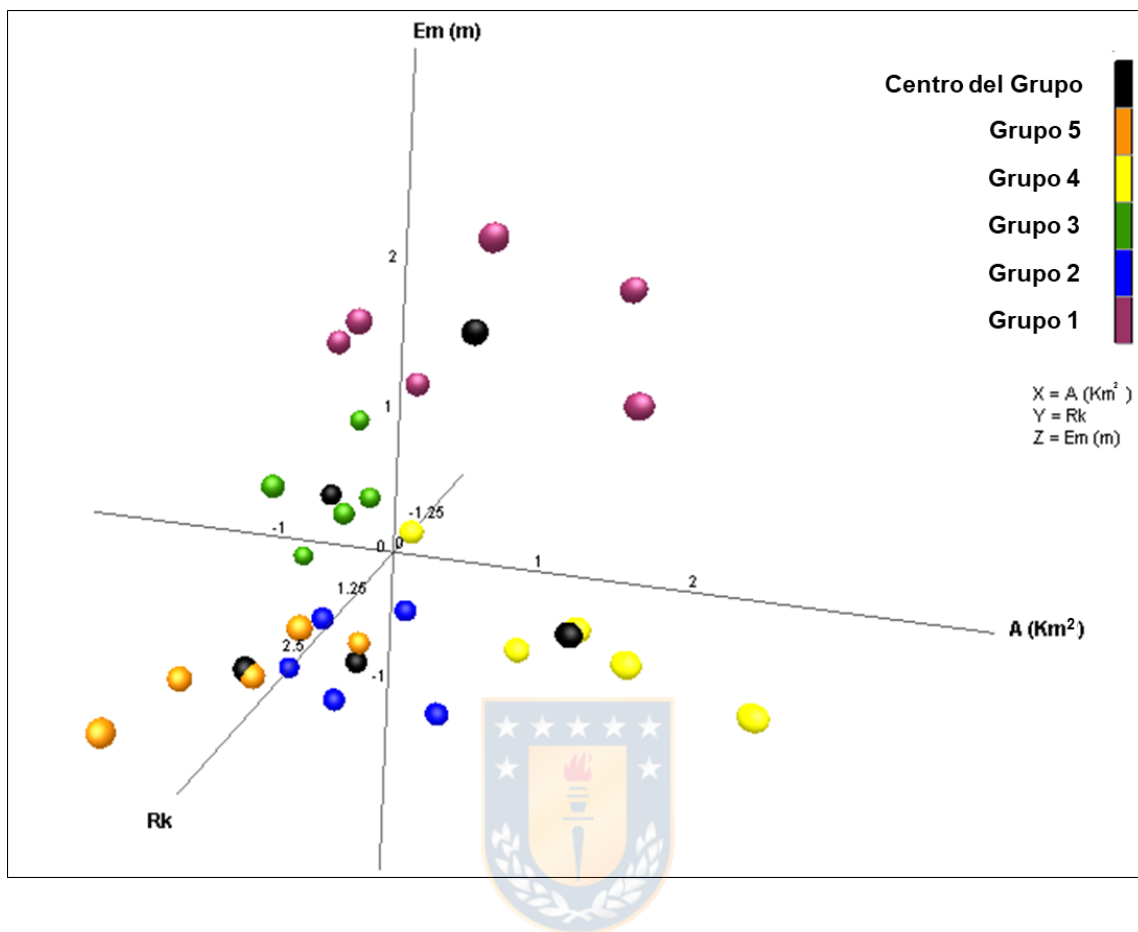


Tabla 5-1 Coordenadas de los centros de cada grupo homogéneos

Grupo	A (Km ²)	Rk	Em (m)
Grupo N°1	799	2,36	1931
Grupo N°2	436	2,11	355
Grupo N°3	263	1,78	1078
Grupo N°4	1131	2,45	765
Grupo N°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, 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 detecta así, una metodología que logra una automatización de las estimaciones de caudales de crecidas para cualquier periodo de retorno.

5.2 Conclusiones

Se propone una metodología para generar una automatización de las estimaciones de caudales de crecidas en cuencas sin información fluviométrica, basándose 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. En base a esta comprensión, se generó una clasificación preliminar de 5 grupos homogéneos de cuencas donantes de información. Esto implica que cada grupo presenta similitud en la distribución de sus registros de caudales de crecida, siendo 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: (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, concluyendo 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, distanciando 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. Finalmente, se obtuvieron las ecuaciones regionales de estimación de caudales de crecida para cada uno de los 5 grupos determinados. Preliminarmente al término de esta investigación se generó un test propuesto en el MDC del Ministerio de Obras Públicas de Chile, que con sus resultados reafirma la homogeneidad de los 5 grupos establecidos en la zona centro sur de Chile. Sin embargo, las ecuaciones propuestas requieren ser validadas por completo en investigaciones posteriores, aumentando la cantidad de cuencas en estudio. Esto es posible disminuyendo los requisitos para seleccionar cuencas propuestas al inicio de esta investigación, donde se escogieron exclusivamente cuencas donantes que presentaban condiciones ideales de registros. Lo anterior se basa en que esta investigación se propuso, en primera instancia, detectar un método que entregara resultados confiables.

Con lo anterior se logra una automatización de los caudales de crecida. El método de regionalización hidrológica está actualmente autorizado y respaldado por el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas de Chile (2019). Lamentablemente, aplicarlo de manera correcta requiere de tiempo, debiendo realizar un proceso iterativo en la formación de los grupos para identificar el agrupamiento que maximiza su homogeneidad, siendo difícil identificar cuáles son las mejores variables que describen el comportamiento de las cuencas frente a caudales de crecida, así como elegir el método de clasificación adecuado. El solo hecho de recolectar la información hidrológica adecuada es un proceso que consume una gran cantidad de tiempo. Por esto, se espera 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 por sobre todo, basadas en un análisis adecuado de su comportamiento hidrológico.



REFERENCIAS

Horton, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology Geological. **Society of America Bulletin. Volumen 56.** 275-370.

Schumm, S. (1956) Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Bulletin of the Geological Society of America. Volumen 67.**597-646.

Strahler, A. (1957) Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Trans Am Geophys Union. Volumen 38.** 920-931.

Dalrymple, T. (1960) Flood Frequency Analysis. US Geological Survey. **Water Supply Paper**, 1543 A.

Greenwood, J., J. Landwehr, N. Matalas, y J. Wallis (1979) Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. **Water Resour. Volumen 15(5).**1049-1054.

Burn, D. (1989) Cluster analysis as applied to regional flood frequency. **Journal of Water Resources Planning and Management. Volumen 115.** 567-582.

Nathan, R., y T. McMahon (1990) Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalization. **Journal of Hydrology. Volumen 121.** 217-238.

Voguel, R. , W. Thomas, y T. McMahon (1993) Flood – Flow Frequency Model. Selection In Southwestern United States. **Journal of water Resources Planning and Management. Volumen 119.**

Blöschl, G., y C. Sivapalan (1995) Scale issues in hydrological modelling: a review. **Journal Hydrological processes. Volumen 9.** 251–290.

Chorley, R. (1995) Classics in physical geography revisit: R.E. Horton. **Progress in physical Geography. Volumen 19.**533-54.

Hosking, J., y J. Wallis (1997) Regional frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments. **Cambridge University Press. Volumen 8.** N°7.

Zhang, J., y M. Hall (2004). Regional flood frequency analysis for the Gan-Ming River basin in China. **Journal of Hydrology. Volumen 296.** 98–117.

Hannah, D., S. Kansakar, A. Gerrard, y G. Rees (2005) Flow regimes of Himalayan rivers of Nepal: nature and spatial patterns. **Journal of Hydrology. Volumen 308(1–4).** 18–32.

Norbiato, D. , M. Borga, M. Sangati, y F. Zanon (2007) Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. **Journal of Hydrology. Volumen 345.** 149-166.

Ouarda, T., K. Ba[^], C. Diaz, A. Carsteanu, K. Chokmani, H. Gingras, E. Quentin, E. Trujillo, E. Bobee (2008) Intercomparison of regional flood frequency estimation methods at ungauged sites for a Mexican case study. **Journal of Hydrology. Volumen 348.** 40–58.

Núñez, J.C. **Guía Metodológica para la Aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de Sequías basado en L-momentos y Resultados de Aplicación en América Latina (2010).** Documento Técnico PHI-LAC, N° 27.

Oudin, L., A. Kay, V. Andréassian, y C. Perrin (2010) Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar. **Water Resources Research, Volumen 46.** W11558.

Yang, T., S. Quanxi, H. Zhen-Chun, C. Xi, Z. Zengxin, X. Chong - Yu (2010) Regional frequency analysis and spatio-temporal pattern characterization of rainfall extremes in the Pearl River Basin, China. **Journal of Hydrology. Volumen 380.** 386-405.

Álvarez, G., N. Hotait, y F. Sustaita (2011) Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. **Ingeniería Investigación y Tecnología. Volumen 12.** 277-284.

Blöschl, G. (2011) Scaling and regionalization in hydrology. **Journal Treatise on Water Science. Volume 2.** 519–535

MOP (2011) Regionalización de parámetros en cálculo de escorrentía en cuencas pluviales. **Dirección General de Aguas. Chile.**

Naranjo R (2011) Análisis regional de frecuencia mediante el método de los L-Moments en las regiones de Valparaíso y metropolitana para la generación de cartografía probabilística de sequía meteorológica. **Universidad de Chile.**

Sawicz, K., T. Wagener, M. Sivapalan, P. Troch, y G. Carrillo (2011) Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA. **Hydrology and Earth System Sciences. Volumen 15.** 2895–2911,

Ssegane, H., E. Tollner, Y. Mohamoud, T. Rasmussen, y J. Dowd (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. Volumen 438.** 16-25.

Blöschl, G., M. Sivapalan, T. Wagener, A. Viglione, H. Savenije (2013) Runoff Prediction in ungauged basins. Cambridge (ed). **Prediction of annual runoff in ungauged basins.** Association of Hydrological Sciences (IAHS).

Vera, J., y R. Mora (2013) Un método para el análisis de frecuencia regional de lluvias máximas diarias: Aplicación en los Andes Bolivianos. **Revista chilena de ingeniería. Volumen 21.** 111-124.

Campos, D. (2014) Análisis regional de frecuencia de crecientes en la región hidrológica No. 10 (Sinaloa), México: Índices de estacionalidad y regiones de influencia. **Agrociencia. Volumen 48.** 147-158.

Salazar, J. (2016) Una metodología para la estimación de curvas de duración de caudales en cuencas no instrumentadas. **Universidad Nacional de Colombia. Colombia.**

Apolinario, L., J. Pitágoras, E. Lujano, B. Tapia (2017) Regionalización de Caudales Mensuales en la Región Hidrográfica del Titicaca, Perú. **Journal of High Andean Research. Volumen 19.** 219-230

Zucarelli, G. (2017) Regionalización hidrológica con métodos estadísticos multivariados. Tesis doctoral, programa de doctorado en ciencia y tecnología ambiental. **Universidad de da Coruña. España**

Cifuentes D., J. Vargas (2018) Determinación de regiones hidrológicamente homogéneas en la zona centro sur de Chile. Memoria de Título. **Universidad de Concepción.**

Gao, Y., P. Kamal, H. Xianfeng, S. Naresh y P. Khem (2019) Estimation of Hydrologic Alteration in Kaligandaki River Using Representative Hydrologic Indices. **Water. Volumen 11.**

Pagliero, L, F. Bouraoui, P. Willems, N. McIntyre (2019). Investigating regionalization techniques for large-scale hydrological modelling. **Journal of Hydrology. Volumen 570.** 220-235.

Da Silva, L, J. García, S. Nascimento, A. Bicioni, R. Wainer, W. Wolff (2020) Assessment of hydrological regionalization methodologies for the upper Jaguari River basin. **Journal of South American Earth Sciences. Volumen 97.** 102-112.

Yang X., J. Magnusson, S. Huang, S. Beldring, C. Xu (2020) Dependence of regionalization methods on the complexity of hydrological models in multiple climatic regions. **Journal of Hydrology. Volumen 582.**