

CLASIFICACIÓN DE LOS REGÍMENES DE CAUDALES NATURALES EN LOS RÍOS DE CHILE

A. Riffo Luco¹, F. Peñas Silva², E. Muñoz Ortiz³

RESUMEN

Hoy en día los ríos están siendo cada vez más intervenidos por infraestructuras hidráulicas que alteran su régimen natural de caudales y, como consecuencia, degradan los ecosistemas fluviales. En este ámbito, las clasificaciones hidrológicas son una herramienta cada vez más utilizada, ya que nos permite segregar los ríos de acuerdo con su naturaleza hidrológica y son parte fundamental de diversos marcos de actuación en los ámbitos de los caudales ecológicos. Es por esto, el desarrollo de una clasificación hidrológica en Chile es de vital importancia para mejorar la gestión de recursos hídrico en el país. Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio es realizar una clasificación hidrológica mediante el proceso inductivo en los ríos de Chile y analizar los patrones de variación hidrológica de las clases y su distribución espacial. La determinación de la clasificación hidrológica se desarrolló utilizando 284 estaciones naturales no alteradas en un periodo de 40 años desde 1976-2016, basada en 85 índices hidrológicos. Estos índices incluyeron cinco aspectos fundamentales para la ecología, magnitud de las condiciones de caudal mensual y anual, magnitud de intensas condiciones de caudales altos y bajos, estacionalidad de caudales, frecuencia y duración de pulsos de caudales altos y bajos y tasa de cambio de caudales. A través, de los métodos ACP y Broken Stick, se determinaron los índices hidrológicos que representaron la mayor variabilidad hidrológica. Por consiguiente, con el cluster PAM, se agruparon las estaciones, generando clasificaciones de 1 a 50 clases, basado en los índices sintéticos, para generar clasificaciones distribuidas espacialmente. Lo que se llevó a una clasificación de 12 clases, distribuidas espacialmente de norte a sur y validadas con Classification Strength. La clasificación hidrológica, representaron ríos bastante estables, estacionarios y con variabilidades interanuales por años húmedos y secos. Por lo tanto, esta clasificación es fundamental para estudiar el comportamiento de los ríos naturales y compararlos con los ríos alterados, para así de esta forma generar estrategias para el mantenimiento de los ecosistemas fluviales.

ABSTRACT

Nowadays, rivers are being increasingly intervened by hydraulic infrastructures that alter their natural flow regime and, as a consequence, degrade fluvial ecosystems. In this area, hydrological classifications are an increasingly used tool, since they allow us to segregate rivers according to their hydrological nature and are a fundamental part of various action frameworks in the fields of ecological flows. For this reason, the development of a hydrological classification in Chile is of vital importance to improve the management of water resources in the country. Therefore, the main objective of this study is to perform a hydrological classification through the inductive process in the rivers of Chile and analyze the patterns of hydrological variation of the classes and their spatial distribution. The determination of the hydrological classification was developed using 284 natural stations not altered in a period of 40 years from 1976-2016, based on 85 hydrological indices. These

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, ariffo@ing.ucsc.cl

² Investigador FONDECYT, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, fpenas@ucsc.cl

³ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, emunozo@ucsc.cl

indices included five fundamental aspects for the ecology, magnitude of the monthly and annual flow conditions, magnitude of intense conditions of high and low flow, seasonality of flows, frequency and duration of pulses of high and low flows and rate of change of flows. Through the ACP and Broken Stick methods, the hydrological indices that represented the greatest hydrological variability were determined. Therefore, with the PAM cluster, the stations were grouped, generating classifications of 1 to 50 classes, based on synthetic indices, to generate spatially distributed classifications. Which led to a classification of 12 classes, spatially distributed from north to south and validated with Classification Strength. The hydrological classification represented rivers that were quite stable, stationary and with interannual variability for wet and dry years. Therefore, this classification is fundamental to study the behavior of natural rivers and compare them with altered rivers, in order to generate strategies for the maintenance of fluvial ecosystems.

INTRODUCCIÓN

El régimen natural de caudales o régimen hidrológico es muy importante para el ecosistema fluvial y un factor clave para mantener la biodiversidad nativa y la integridad del ecosistema fluvial. Existe cinco aspectos del régimen hidrológico determinantes para el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas fluviales: magnitud, frecuencia, duración, tiempo y tasa de cambio en los procesos hidrológicos (Poff et al., 1997). A pesar de esto, existe una alteración generalizada de los regímenes naturales, debido a que hoy en día, la sociedad está interviniendo constantemente los ríos tanto para abastecimiento, generación de energía a través de hidroeléctricas y regadío. Están relacionados con la modificación de la temporalidad de los caudales, y los episodios de perturbaciones naturales. Las alteraciones de estos dos elementos, tiene muchas repercusiones en el funcionamiento y la estructura de ecosistemas fluviales (Peñas et al, 2016). Por lo tanto, debido a esta problemática es necesario estudiar la variabilidad de los caudales y demostrar su relación con los procesos ecológicos, tal como establece ELOHA (Poff et al., 2010). ELOHA representa un cambio en el paradigma de actuación respecto a la gestión de los recursos hídricos y la sustentabilidad de los ecosistemas fluviales.

Por esto, es necesario clasificar los ríos según características hidrológicas similares. En este ámbito, las clasificaciones hidrológicas, han sido ampliamente utilizada para comprender la variabilidad de los ríos, explorar la influencia de caudales en las comunidades biológicas y procesos ecológicos, mantener la conservación de los ecosistemas fluviales entre otros (Olden et al., 2012), y de esta forma generar estrategias de gestión y manejo de recursos hídricos. Ejemplo de esto es el gran número de clasificaciones que se han realizado en el mundo como España (Solans & Poff, 2012; Peñas et al., 2014), Nueva Zelanda (Snelder & Booker, 2013), Australia (Kennard et al., 2010), Francia (Snelder, 2009), USA (Lane et al., 2017), entre otras. Sin embargo, existe una gran variación en los procedimientos para desarrollar estas clasificaciones hidrológicas, principalmente se pueden dividir en métodos inductivos y deductivos.

En Chile la única clasificación realizada es una clasificación deductiva que corresponde a la tesis doctoral realizada por Peredo-Parada (2010). Dicha clasificación agrega las cuencas de acuerdo con factores de clima, origen de flujo, geología, posición relativa de subcuenca, uso de suelo y pendiente del tramo, pero no utiliza series hidrológicas (Olden et al., 2012).

El método deductivo utiliza datos ambientales de alta calidad (e.g. clima, geología, vegetación, usos de suelo y topografía) para describir y calificar la variación espacial en los regímenes. Tal es el caso de la clasificación desarrollada por Peredo-Parada (2010) en Chile. Este método es recomendado cuando la disponibilidad de datos hidrológicos es escasa o inexistente. Las desventajas de los procedimientos deductivos es que pueden ser de baja precisión y en algunas ocasiones podrían presentar cierto grado de subjetividad, ya que diferentes expertos podrían obtener diferentes

resultados (Snelder & Booker, 2013). Además, Snelder & Booker (2013) demostraron que las clasificaciones inductivas consiguen mejores resultados que las clasificaciones deductivas.

El método inductivo es uno de los más utilizados en los estudios de clasificación (Snelder & Booker, 2013). Este método tiene la ventaja de ser utilizado directamente utilizando serie de datos de caudales medidos en estaciones de aforo, donde la limitante es la calidad y cantidad de datos en las estaciones. Además, para realizar clasificaciones del régimen natural solo se deben incluir estaciones mínimamente afectadas por alteraciones en el río aguas arriba. Estos datos luego son analizados para calcular índices hidrológicos, que representan los componentes de régimen de caudales, y que a través de diferentes técnicas estadísticas son utilizados para disminuir la variabilidad dentro de los grupos y maximizar la variabilidad entre grupos, como resultado se obtiene la clasificación hidrológica.

Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio es realizar una clasificación hidrológica mediante el proceso inductivo en los ríos de Chile y analizar los patrones de variación hidrológica de las clases y su distribución espacial en el país.

Es importante mencionar que este trabajo se enmarca en el proyecto de investigación FONDECYT titulado “A Regional Scale Assessment Of Hydrologic Alteration in South-Central Chile: Implications on River Functioning and Ecosystem Services Provisioning”. El objetivo principal del proyecto es estimar como las alteraciones hidrológicas producidas por operaciones de represas y cambios en los usos de los suelos que modifican el funcionamiento de los ecosistemas fluviales en el centro-sur de Chile, para luego generar recomendaciones para la gestión de recursos. Por lo tanto, los resultados obtenidos en este estudio serán de aplicación directa dentro de dicho proyecto, entre otras cosas, para el desarrollo de una clasificación predictiva para toda la red fluvial chilena.

METODOLOGÍA

Área de Estudio

El área de estudio comprende las cuencas de Chile continental. Chile es uno de los países más largos del mundo con 4.300 km de longitud y un ancho promedio de 180 km, lo que supone una superficie de 756.096 km². Se ubicada en el Sudoeste de América del Sur, limitado por la Cordillera de los Andes al este y el Océano Pacífico al oeste. La geografía comprende de 5 zonas naturales de Chile (Figura 1): Norte Grande (18-26°S) siendo su principal característica la aridez del clima, asociada a altas temperaturas y gran escasez de lluvias debido al anticiclón del Pacífico que impide el ingreso de masas de aire húmedas que provienen del Pacífico, por la corriente fría Humboldt, y la elevación de la Cordillera de los Andes; Norte Chico (26-32°S) dominado por el clima semiárido; Zona Centro (32-37°S), con clima templado mediterráneo. Se caracteriza por la presencia de una estación seca y precipitaciones invernales, con temperaturas más bajas que la zona norte; Zona Sur (37-45°S), con clima templado lluvioso, temperaturas anuales bajas y regulares que disminuyen hacia el sur. Además, llueve todos los meses del año, las que aumentan según descendemos hacia el sur. Zona Austral (45-56°S), posee clima marítimo lluvioso, temperaturas bajas generalmente menores a 0°C y gran aumento de la pluviosidad, que varía entre los 2342 mm y los 3000 mm de promedio.

De acuerdo con esta gran variabilidad climática, se produce un gradiente de vegetación de norte a sur. Así, la zona norte está dominada por suelos desprovisto de vegetación, predominando diversas especies de cactus por la aridez de la tierra. A partir de la zona centro-norte a centro-sur, comienza una gran abundancia de vegetación, bosque esclerófilo que permiten resistir las sequías en el periodo de verano, producto del clima mediterráneo. Además, en la zona sur, el aumento de las precipitaciones y los procesos de deshielo aumentan la humedad del suelo, lo que permite el desarrollo de bosques valdivianos. Por otra parte, la vegetación comienza a disminuir a lo largo de la zona austral, la que se

encuentra en su mayor parte congelada. No obstante, los patrones de vegetación nativa han sido ampliamente modificados, debido al aumento de la agricultura y plantaciones forestales de pino y eucalipto. Así mismo, Chile contiene un relieve diferenciado de oeste a este, correspondiente a las Planicies Litorales, la Cordillera de la Costa, la Depresión Intermedia y la Cordillera de los Andes. Por lo tanto, se pueden encontrar tres tipos de cuenca que se diferencian dependiendo de su origen: las Andinas, provenientes de la cordillera de los andes; las Trasandinas originadas en las zonas argentinas de la cordillera de los andes y atraviesan desembocando en el océano pacífico; y por ultimo las cuencas costeras que su origen es en la cordillera de la costa y desembocan en el mar, presentes desde el norte de Chile hasta Puerto Montt.

Todas estas características le confieren a Chile una gran variedad de ríos en cuanto a sus características hidrológicas. Existen ríos endorreicos que no llegan a desembocar en el mar, en la zona norte, hasta ríos permanentes con regímenes pluviales, nivales o mixtos, dependiendo del origen dominante de su caudal.

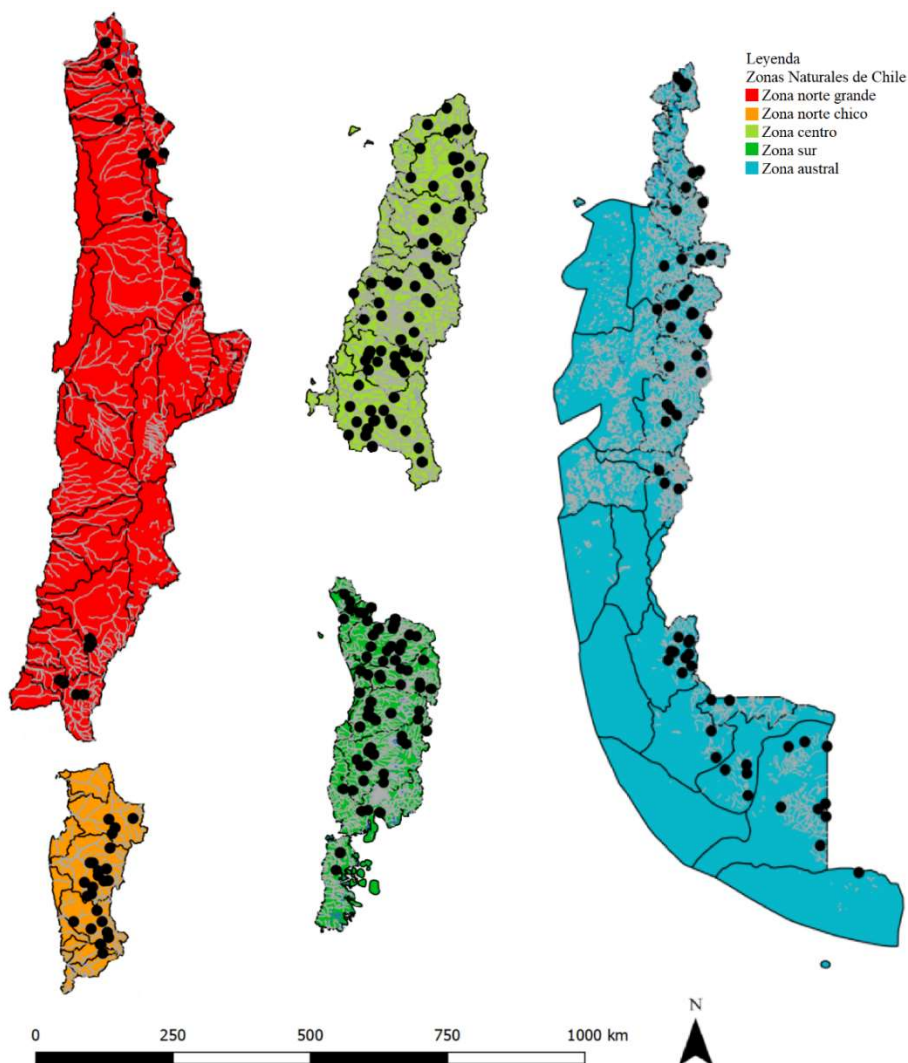


Figura 1: Mapa de zonas naturales de Chile, representado por color; Zona Norte Grande(rojo); Zona Norte Chico (Naranja); Zona Centro (Verde Claro); Zona Sur (Verde Oscuro); y Zona Austral (Celeste). Distribución de cuencas y estaciones naturales en el área de estudio (● n= 284).

Datos Hidrológicos

La información de partida consiste en las series de caudales medios diarios medidos en 809 estaciones de aforo por un periodo de 40 años desde 1976-2016, adquirida de la Dirección General de Aguas (DGA). Del total de estaciones de aforo, se consideraron únicamente las que no estaban afectadas por infraestructuras hidráulicas, reservorios artificiales o detracciones significativas, para esto, se utilizó información espacial sobre la localización de embalses, reservorios artificiales y foto aérea para solventar los posibles escapes de información. Además, se ha usado la base de datos del centro de ciencia del clima y resiliencia (CR2), que informa los derechos consultivos en los ríos y finalmente se han realizado consultas a expertos para verificar los resultados. Así mismo, se analizó la calidad de las series de acuerdo con una serie de criterios, incluyendo la presencia de valores constantes consecutivos en un periodo determinado, caudales extremadamente bajos no naturales por periodos de corto tiempo, periodos de caudales con valores cero en ríos no intermitentes, crecidas y disminuciones de caudales no naturales, que pueden deberse a alteraciones de la estación de aforo o cambios del método del registro de caudal. Los años con datos faltantes superiores a 30 días fueron suprimidos del análisis. En el último paso, se descartaron las estaciones que poseían menos de 8 años (Peñas et al., 2014). Después de aplicar estas restricciones, la selección final de estaciones de aforo para realizar la clasificación constaba de 284 estaciones.

Índices Hidrológicos

Previamente a la aplicación del procedimiento de clasificación propiamente dicho, las series de caudales obtenidas en las 284 estaciones seleccionadas fueron normalizadas. La normalización se utilizó para minimizar la influencia de la magnitud del caudal, lo que permite definir las clases hidrológicas en función del rango completo de atributos hidrológicos (Snelder & Booker, 2013). Las series de caudales fueron normalizadas, dividiendo cada valor de caudal diario por el promedio del caudal anual, es decir, que tras la normalización todas las series presentarían un caudal medio anual igual a 1.

Posteriormente se calcularon 85 índices hidrológicos (Anexo, Tabla 1) que caracterizan la tendencia central (promedio) y la variación interanual (desviación estándar) de los cinco aspectos de los regímenes de caudales que se consideran importantes desde una perspectiva ecológica: (i) Magnitud de las condiciones medias de caudal mensual y anual, (ii) Magnitud y duración de condiciones extremas de caudales altos y bajos, (iii) estacionalidad de caudales, (iv) frecuencia y duración de pulsos de caudales altos y bajos, (v) tasa de cambio de caudales (Olden and Poff, 2003).

Dado el alto grado de correlación que puede existir entre los 85 índices hidrológicos, se realizó el Análisis de Componentes Principales (ACP) para examinar los patrones dominantes de intercorrelación entre los índices hidrológicos (Olden & Poff, 2003), obtener un conjunto de índices sintéticos (IS) no correlacionados e identificar el subconjunto de índices hidrológicos que describen las principales fuentes de variación minimizando la redundancia. Es decir, cada IS representa una combinación de los IH originales que explican la mayor parte los patrones de variación observados. Por tanto, el significado hidrológico de los IS se determinó mediante los IH con mayor peso en cada uno de ellos. El método Broken Stick (BS), fue utilizado para definir el número óptimo de IS significativos (Jackson, 1993). El método compara la proporción de variabilidad que explica cada IS del ACP, con la variabilidad explicada por una distribución aleatoria con el mismo número de partes que el total de números de IS. Por lo tanto, si la variabilidad explicada por un IS es menor que la variabilidad explicada por una distribución aleatoria, el IS no se considera. Finalmente, cada IS fue estandarizado antes de realizar los análisis posteriores, para dar a cada IS el mismo peso (Snelder & Booker, 2013) demostraron que este paso adicional aumenta el rendimiento de la clasificación.

Procedimiento de Clasificación

Finalmente se realizó la clasificación de las estaciones de aforo en función de los valores de los IS obtenidos en el paso previo. En este paso, se procede a agrupar las estaciones, usando el Partitioning Around Medoids (PAM; Kauffman & Rousseeuw, 1990). PAM define un grupo de n medoides y minimiza la suma de disimilitudes entre todos los objetos y sus medoides asignados. Un medoide se define como el elemento, cuyo promedio de disimilitud respecto a todos los objetos del grupo es mínima (es decir, es el punto más céntrico en el grupo). Una de las características más ventajosas del PAM es que nos permite especificar el número de grupos. En este sentido, como no se puede conocer el número de clases *a priori*, se produjeron clasificaciones con un número de clases en un rango de 2 a 50.

Finalmente, el rendimiento de las clasificaciones generadas y el análisis del número óptimo de clases para el área de estudio se realizó mediante el estadístico Classification Strength (CS; Van Sickle, 1997). CS estima el grado de diferencia “hidrológica”, entre estaciones de aforo, explicadas por las clasificaciones (Snelder and Brooker, 2013). Este análisis se realizó sobre los índices hidrológicos con el peso más alto en cada uno de los IS retenidos. El valor de CS se calcula según la ecuación $CS=W-B$, donde (W) es el promedio ponderado de similitudes dentro de la clase y (B) el promedio de similitudes entre clases. Si W-B son positivos y grandes, señala un CS fuerte, en caso contrario, si los valores de W-B están cerca de 0, indica que las estaciones de aforo se asignaron aleatoriamente a las clases.

Finalmente, a través de gráficas de box and whiskers, se analizó la variación de los índices hidrológicos con mayor peso en los IS, con el objetivo de interpretar las clases hidrológicamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Procedimiento de Clasificación

En primer lugar, es de gran importancia señalar que la base de datos fue normalizada, para disminuir la influencia de la magnitud de los caudales, y de esta forma comparar ríos de distintos tamaños. Tras realizar el ACP, el método BS seleccionó los 5 primeros (Tabla 1). Los IS seleccionados representan el 84.9% de la mayor parte de la variabilidad (Tabla 1). De acuerdo con los índices hidrológicos con mayor peso en cada IS. El IS1 representó la variabilidad de la magnitud y duración de caudales bajos estacionales, mientras el IS2 representó la variabilidad de la magnitud y duración de los caudales altos. El IS3 representó la frecuencia de eventos con caudales bajos y la variabilidad de la frecuencia de eventos de caudales altos y bajos, por otra parte, el IS4 e IS5 representaron la magnitud de los caudales en diferentes meses.

Tabla 1. Los 5 Índices hidrológicos con el mayor peso en cada IS y explicando la variabilidad para los IS normalizados.

Eje	Índices Hidrológicos con los valores más altos en los Índices Sintéticos	Variabilidad Explicada (%)
IS1	M90DL, M30DL, M7DL	39.3
IS2	SDM90DH, SDM30DH, SDM11	21.7
IS3	nPLow, SDFRE1, nPHigh	10.2
IS4	M11, M12, SD FRE3	8.5
IS5	M10, M9, M2	5.2

Como se estableció en la metodología, se utilizaron los índices hidrológicos con mayor influencia en cada IS y que representaron de mejor forma la variabilidad hidrológica, los cuales fueron, M90DL, que represento la magnitud de los caudales mínimos estacionales; SDM90H, representó la

variabilidad de los caudales máximos estacionales; nPLow, representó los números de pulsos bajos anuales; M11, represento la magnitud de los caudales en el mes de noviembre; y por último M10, represento la magnitud de los caudales en el mes octubre.

Finalmente, mediante el método de clasificación PAM, se agruparon las estaciones, generando clasificaciones de 2 a 50 clases, basado en los IS seleccionados.

La selección de la clasificación optima, de acuerdo al número de clases se realizó según los resultados del método estadístico CS. Se observo un incremento en los valores de CS, a medida que el número de clases aumenta, desde clasificaciones de 2 hasta 10 clases (Figura 2). Por otra parte, se observa una tendencia lineal creciente desde las clasificaciones de 12 a 50 clases. Sin embargo, no existió un aumento significativo de CS desde la clasificación de 12 clases a la de 50 clases. Por lo tanto, se consideró que la clasificación formada por 12 clases representaba una situación óptima, debido a su alto valor de CS, es decir, maximizar la similitud de las clases, a la vez que no generaba una complejidad excesiva a la hora de describir las clases. Así mismo, se consideró que esta clasificación presenta una distribución espacial adecuada para analizar el significado de las clases (Figura 3).

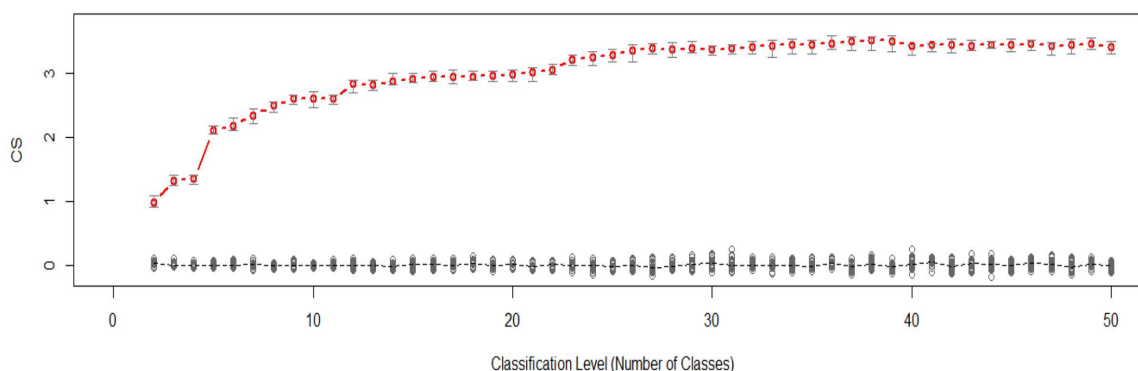


Figura 2: Valores de Classification Strength (CS) obtenidos para las clasificaciones con 2 a 50 clases basado en los IS.

Interpretación Hidrológica de las Clases

Las clases 1, 2, 3, 4 y 9, presentaron los máximos en el índice M90DL (Figura 4). Este índice representa la magnitud de los caudales mínimos en una escala temporal estacional de 90 días, por lo tanto, en estas se ve reflejado que sus caudales mínimos estacionales son más altos con respecto a la media. Principalmente, las clases 1, 2, 3 y 4 que se encuentran distribuidas en la zona norte, mientras que la clase 9 está distribuida en la zona sur y algunas estaciones de las clases 1 y 3 en la zona austral. Es decir, todas son clases con caudales mínimos estacionales muy estables, similares a la media anual, pero por diferentes razones. En las clases del norte, se debe a que están distribuidas en zonas áridas y sus precipitaciones anuales son bajas, pero prácticamente invariables a lo largo del año y presencia de nieve en las cumbres volcánicas. Por el contrario, en las estaciones de la clase 9, la estabilidad de los caudales medios anuales se asocia a la regulación natural de caudales de los lagos precordilleranos de origen glacial, por lo tanto, no se ven afectados por variabilidades interanuales, debido que en la zona tiene un clima templado lluvioso, lo que desarrolla precipitaciones durante todo el año y los meses con mayor precipitación son en los meses de invierno. Por otra parte, las clases 1 y 3, también presenta una estabilidad en sus caudales medio anuales, por lagos y valles precordilleranos y por la mayor parte de los Andes Patagónicos que presentan nieves eternas a menor altura, debido a las bajas temperaturas y a los vientos húmedos provenientes del oeste que ocasionan intensas nevadas en la zona.

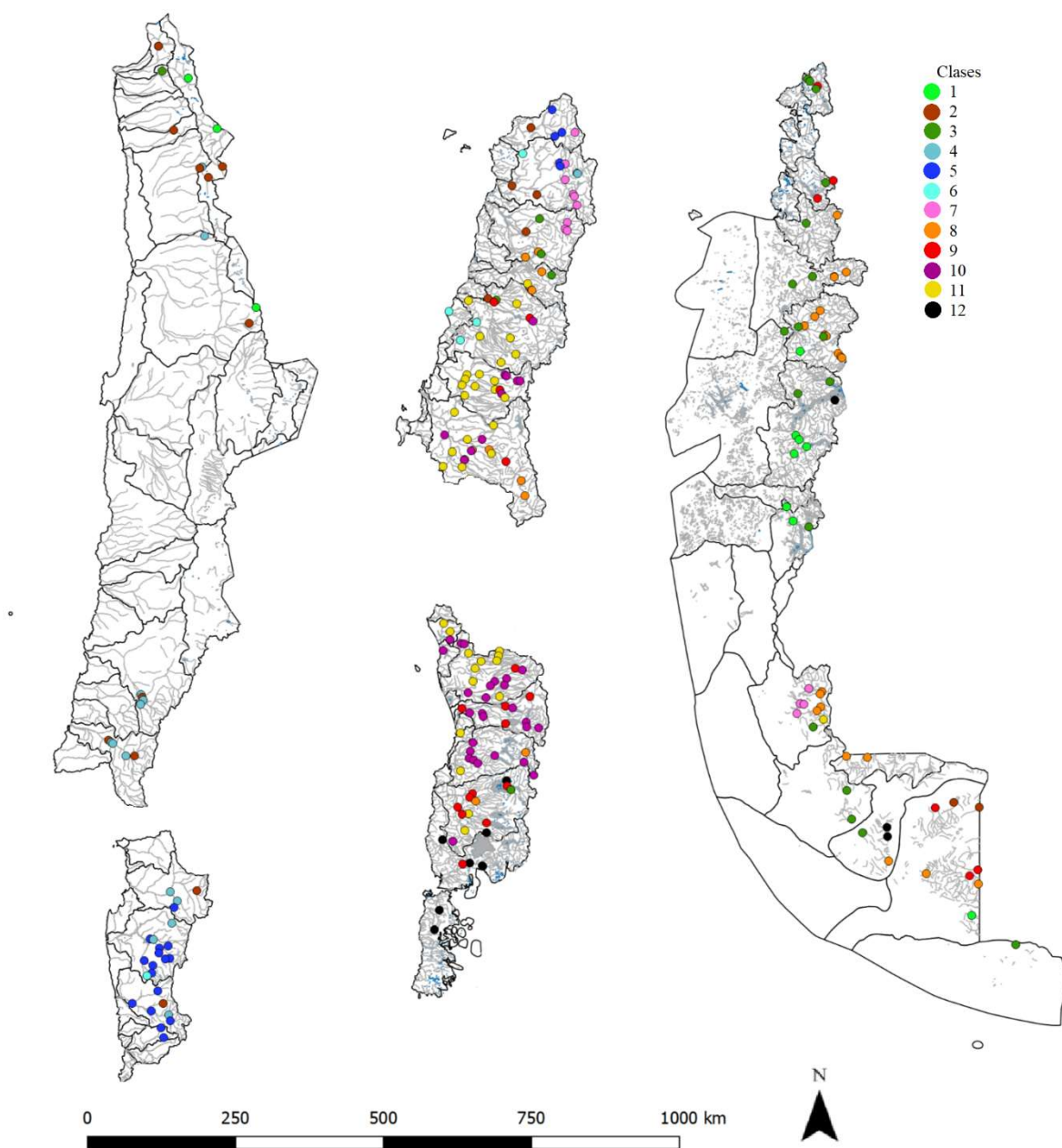


Figura 3: Clasificación Hidrológica de los caudales naturales en Chile representado en 12 clases de regímenes de caudales en las zonas, a) Zona Norte Grande y Norte Chico, b) Zona Centro y Zona Sur y c) Zona Austral.

Las clases 4 y 5, presentaron los máximos valores del índice SD90DH (Figura 4), lo que representa una alta variabilidad interanual de los caudales máximos estacionales en 90 días. Estas clases se encuentran principalmente en la zona norte chico, desde elevaciones bajas a estar en la precordillera, con un clima semi árido y precipitaciones relativamente bajas. Por otra parte, la clase 6, presentó una alta variabilidad en este mismo índice, la que está distribuida en la cordillera de la costa en la zona centro, clima mediterráneo, lo que presenta una alta variabilidad estacional, representado por intensas precipitaciones en invierno mientras que en verano no hay influencia de ellas ni deshielos. Por lo tanto, las clases presentan una variabilidad interanual de sus caudales, es decir, son ríos sensibles a sequías en verano, provocando una disminución de los caudales, por escasas de precipitaciones y aumento de las temperaturas, y por otra parte intensas lluvias en invierno, provocando un incremento de los caudales. Además, existen dos fenómenos importantes que pueden estar influyendo en la variabilidad interanual, que son el Niño y la Niña. El fenómeno La Niña, provoca temperaturas bajas en el aire que afectan el clima en Chile desde la zona centro hacia la zona norte, lo cual genera un déficit de lluvias en gran parte del año. Por otra parte, El Niño, presenta un calentamiento del agua marina lo que provoca un aumento de la temperatura en el aire sobre lo normal, provocando que zonas con altas presiones en el anticiclón del Pacífico, se desplacen hacia el oeste, debilitando sus efectos en Chile, permitiendo que los sistemas frontales que provienen del Pacífico sur, alcancen la zona central y norte chico del país, incrementando las precipitaciones en estos sectores.

Las clases 2, 3 y 8, presentaron los máximos valores en el índice nPLow (Figura 4), el que representa la frecuencia de eventos de caudales bajos durante el año. Principalmente, las clases 3 y 8, se encuentran distribuidas la mayor parte en la zona austral, presentando altas precipitaciones y bajas temperaturas durante todo el año, además se distribuyen en elevaciones bajas de los Andes Patagónicos, la cual producto a una elevación baja de la isoterma disminuye el efecto del derretimiento de la nieve, provocando un caudal permanente y con caudales relativamente bajos a la media, además se ven regulados por lagos precordilleranos de origen glacial. Por el contrario, en las estaciones de la clase 2, la frecuencia de caudales bajos se relaciona a su distribución en la zona norte, debido a escasas precipitaciones por largos periodos y altas temperaturas.

Las clases 5 y 8, presentaron las máximas en el índice M10 y M11 (Figura 4), con respecto al resto, es decir, presentan un aumento de su caudal medio en los meses de octubre y noviembre, que puede asociarse al efecto del deshielo debido al incremento de la temperatura durante esos meses, representando ríos estacionales. Sin embargo, es importante analizar las diferencias entre estas clases. La clase 5, se encuentra distribuida en la zona de norte chico y presenta un clima semi árido, por esto, el aumento de las temperaturas de la zona provoca que los deshielos aumenten de octubre a noviembre, en el cual los caudales máximos sobre la media sean en noviembre. Por lo tanto, se observa que las estaciones muestran un régimen nival, con mayores caudales en primavera y principios de verano. Por el contrario, la clase 8, está distribuida mayoritariamente en la zona centro y austral, en el cual las temperaturas anuales son bajas y regulares, las cuales decrecen hacia el sur, además llueve todos los meses del año, por lo tanto, las estaciones representaron un régimen pluvio-nival, ya que sus mayores caudales ocurrirán durante invierno y en menor medida en noviembre, producto de los aportes de lluvias invernales y de los deshielos. En la zona austral, las estaciones presentarán un régimen nivo-pluvial, en el cual sus caudales medios presentarán un aumento en el mes de octubre (M10, Figura 4), debido al derretimiento de nieves ubicadas en los Andes Patagónicos con elevaciones bajas y que se acumulan durante el invierno.

Las clases 9 a la 12, representaron ríos estables estacionarios, los que tienen caudales permanentes durante el año con variaciones estacionales por el incremento de las temperaturas en verano que disminuyen los caudales mínimos estacionales con respecto a la media, como se observa en el índice M90DL (Figura 4). La mayor parte de las clases se encuentra distribuida en la zona centro y sur de

Chile con clima mediterráneo y clima húmedos respectivamente en elevaciones bajas, las cuales no tienen gran influencia por deshielos cordilleranos, como se observa en el M10 y M11 (Figura 4), por lo que su mayor aporte son las precipitaciones en la temporada de invierno las que aumentan desde la zona centro a la zona sur, lo que produce un leve aumento en la variabilidad de los caudales medios máximos en el índice SDM90DH. Además, en la zona sur presentan caudales estables debido que su mayoría provienen de lagos precordilleranos de origen glacial.

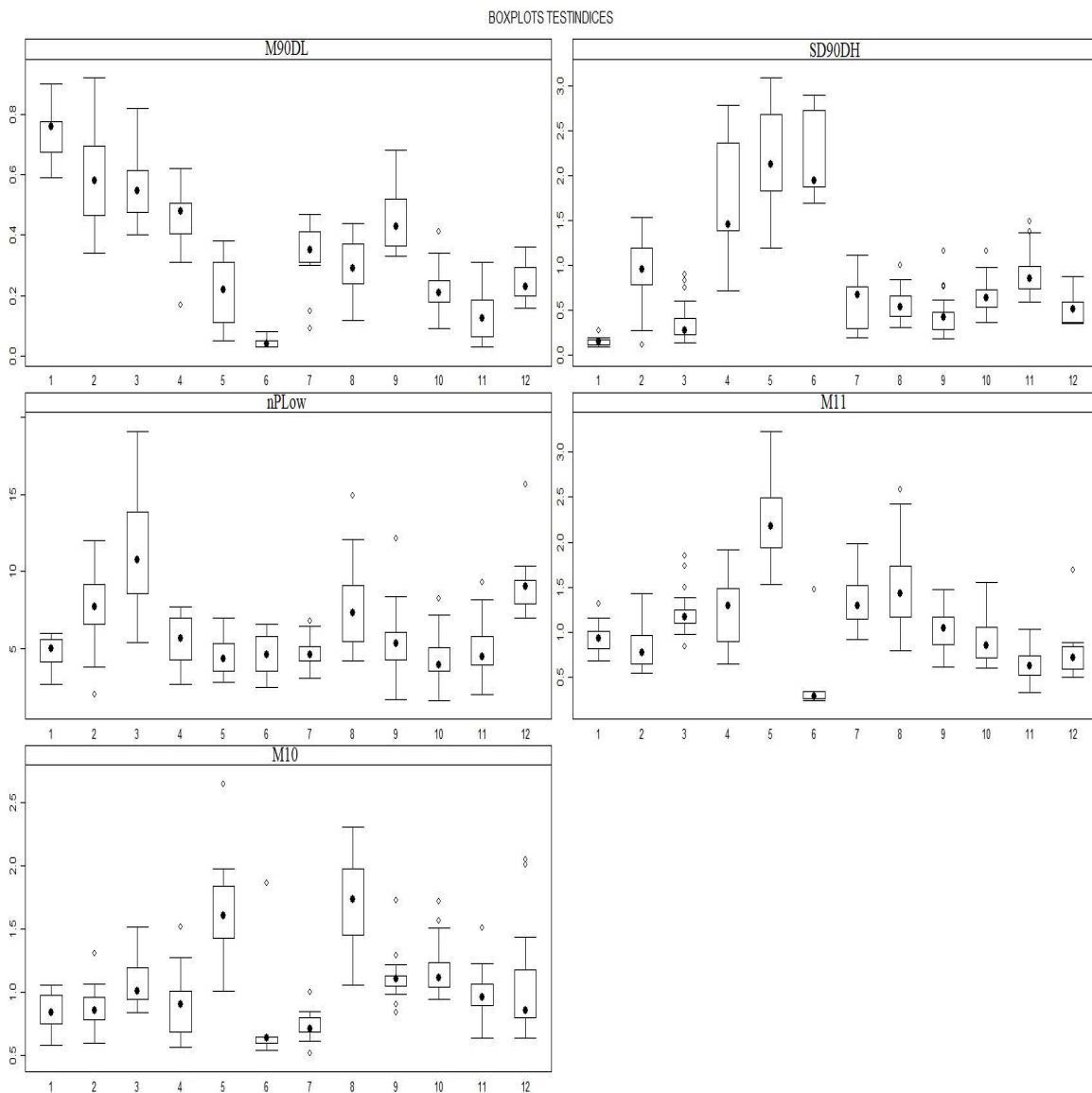


Figura 4: Grafica Box and Whisker de los Índices Hidrológicos seleccionados usados en las 12 clasificaciones. Los índices son definidos como: M90DL, media máxima anual en 90 días; SDM90H, desviación estándar de los valores anuales para la media máxima en 90 días; nPLow, número de pulsos bajos; M11, caudal medio diario en noviembre; M10t, caudal medio diario en octubre.

CONCLUSIONES

En este estudio se definió una clasificación hidrológica inductiva con un número óptimo de clases para todo Chile. Esta clasificación permitió organizar, conceptualizar y describir los regímenes de caudales naturales en Chile, para luego continuar con los estudios en el Proyecto FONDECYT “A Regional Scale Assessment Of Hydrologic Alteration in South-Central Chile: Implications on River Functioning and Ecosystem Services Provisioning”. La clasificación desarrollada sirve como punto de partida para evaluar las alteraciones hidrológicas producidas por estructuras hidráulicas en los ríos y cambios en los usos del suelo, para finalmente generar recomendaciones para la gestión del ecosistema fluvial.

El método de clasificación inductiva es de gran ayuda para cuando no se tiene una gran base de datos ambientales, y para ello se utilizan base de datos hidrológicas. El utilizar las clasificaciones con series normalizadas ayuda a clasificar los ríos de acuerdo con una mayor cantidad de atributos hidrológicos, ya que al normalizar se desprecia la influencia de la magnitud del caudal, cuya variabilidad enmascara en muchas ocasiones en otros atributos (Peñas et al., 2014). Utilizando el marco ELOHA (Poff et al., 2010), clasificaciones basadas en serie de caudales normalizadas tienen un gran valor en la evaluación de la alteración hidrológica causada por los humanos o respuesta de los ecosistemas de agua dulce.

La clasificación hidrológica, representaron ríos bastante estables a lo largo de Chile, con variabilidades interanuales, debido que Chile se ve influenciado por años húmedos y secos donde las regiones más afectadas son las de la zona centro y zona norte. El relieve y el clima tienen un gran rol que permite que los ríos sean estables de norte a sur, respectivamente, en el cual se mantienen por deshielos de la cordillera o manteniendo un caudal estable por lagos o glaciares en la zona precordillerana. Así también en zonas con altas precipitaciones y bajas elevaciones las que representaron ríos estacionales, las cuales son reguladas por inviernos lluviosos y deshielos por el aumento de las temperaturas en primavera y verano.

Finalmente, clasificar los ríos tiene una gran importancia para analizar e investigar los comportamientos naturales de los ríos y así poder comparar los ríos que se encuentran alterados y poder generar mitigaciones para el mantenimiento de los ecosistemas fluviales.

REFERENCIAS

Bejarano, M.D., Marchamalo, M., García de Jalón, D and Gonzalez del Tánago, M.: Flow regime patterns and their controlling factors in the Ebro basin (Spain), *Journal of Hydrology* 385, 323-335, 2010.

Belmar, O., Velasco, J. and Martinez-Capel, F.: Hydrological Classification of Natural Flow Regimes to Support Environmental Flow Assessments in Intensively Regulated Mediterranean Rivers, Segura River Basin (Spain), *Environmental Management*, 47, 992-1004, doi: 10.1007/s00267-011-9661-0, 2011.

Jackson, D.: Stopping Rules in Principal Components Analysis: A Comparison of Heuristical and Statistical Approaches, 74(8), pp 2204-2214, 1993.

Kennard, M.J., Pusey, B.J., Olden, J.D., Mackay, S.J., Stein, J.L. and Marsh, N.: Classification of natural flow regimes in Australia to support environmental flow management, *Freshwater Biology*, 55, 171-193, doi:10.1111/j.1365-2427.2009.02307.x, 2010.

Lane, B.A, Dahike, H.E., Pasternack, G.B. and Sandoval-Solis, S.: Revealing the Diversity of Natural Hydrologic Regimes in California with relevance for Environmental Flows Applications, 2017

Olden, J.D and Poff N.J.: Redundancy and the choice of Hydrologic Indices for Characterizing Streamflow Regimes, *River Res. Appl.*, 19, 101-121, doi: 10.1002/rra. 700, 2003

Olden, J.D., Kennard, M.J. and Pusey, B.J.: A framework for hydrologic classification with a review of methodologies and applications in ecohydrology, *Ecohydrol*, 5, 503-518, doi: 10.1002/eco.251, 2012

Peñas, F.J.: Classification of the natural flow regime and prediction of hydroecological characteristics in the northern third of the Iberian Peninsula, PhD Thesis. Universidad de Cantabria, 2014.

Peredo, M.: Implementación de una Clasificación Eco-Hidrológica de los Ríos de Chile y su Aplicación a la Gestión Ambiental, PhD Thesis. Universidad Politécnica de Valencia, 2010.

Poff, N., Richter, B., Arthington, A., Bunn, S., Naiman R, Kendy, E., Acreman, M., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B., Freeman, M., Henriksen, J., Jacobson, R., Kennen, J., Merritt, D., O'Keede, J., Olden, J., Roger, K., Tharme, R. and Warner, A.: The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards, *Freshwater Biology*, doi:10.1111/j.1365-2427.2009.02204.x, 2010.

Snelder, T. H and Booker, D.: Natural Flow Regimen Classifications are sensitive to definition Procedures, *Rivers Res. Appl.*, 7, 822-838, doi:10.1029/2009wr008839, 2013.

Snelder, T., Lamouroux, N., Leathwick, J., Pella, H., Sauquet, E. and Shankar, U.: Predictive mapping of the natural flow regimes of France, *Journal of Hydrology*, 373, 57-67, 2009

Solans, M. A. and Poff, N.L.: Classification of Natural Flow Regimes in the Ebro Basin (Spain) by using a Wide Range of Hydrologic Parameters, *River Re. Appl.*, 23, 1147-1163, doi:10.1002, 2012.

Van Sickle, J.: Using Mean Similarity Dendrograms to Evaluate Classifications, *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*, MS 96037, 1997.

ANEXOS

Tabla 1. Índices hidrológicos usados en la clasificación. La desviación estándar (referido en el manuscrito por el prefijo SD) fue calculada para cada índice excepto para l2, lca, lkur, Pred, mPos y mNeg.

Grupo	Abreviación	D
1) Magnitud de los caudales mensuales	M1 – M12	Caudal medio mensual.
	l2	Momento lineal que representa la varianza de la curva de duración del caudal calculado.
	lca	Momento Lineal que representa la simetría de la curva de duración del caudal calculado.
	lkur	Momento lineal que representa la curtosis de la curva de duración del caudal calculado.
2) Magnitud y duración de condiciones extremas de caudales bajos y altos.	M1DL	Magnitud de los caudales mínimos anuales de 1 día de duración.
	M3DL	Magnitud de los caudales mínimos anuales de 3 día de duración.
	M7DL	Magnitud de los caudales mínimos anuales de 7 día de duración.
	M30DL	Magnitud de los caudales mínimos anuales de 30 día de duración.
	M90DL	Magnitud de los caudales mínimos anuales de 90 día de duración.
	M1DH	Magnitud de los caudales máximos anuales de 1 día de duración.
	M3DH	Magnitud de los caudales máximos anuales de 3 día de duración.
	M7DH	Magnitud de los caudales máximos anuales de 7 día de duración.
	M30DH	Magnitud de los caudales máximos anuales de 30 día de duración.
	M90DH	Magnitud de los caudales máximos anuales de 90 día de duración.
	ZeroDays	Número de días con caudal cero.
	BFI	Caudal mínimo de siete días dividido por caudales diarios medios anuales.
	X5	Magnitud de los caudales que exceden el 5% del tiempo.
	X25	Magnitud de los caudales que exceden el 25% del tiempo.
	X75	Magnitud de los caudales que exceden el 75% del tiempo.
	X95	Magnitud de los caudales que exceden el 95% del tiempo.
3) Estacionalidad de caudales	JMin	Día juliano del máximo anual.
	JMax	Día juliano del mínimo anual.
	Pred	Predictibilidad.
4) Frecuencia y duración de pulsos	nPLow	Número de pulsos bajos dentro de cada año.
	nPHigh	Número de pulsos altos dentro de cada año.

caudales altos y bajos		MPLL	Promedio de pulsos bajos
		MPLH	Promedio de pulsos bajos.
		FRE1	Numero de eventos de un caudal alto por año utilizando un umbral superior de caudal mediano de 1 vez durante todos los años.
		FRE3	Numero de eventos de un caudal alto por año utilizando un umbral superior de caudal mediano de 3 veces durante todos los años.
		FRE7	Numero de eventos de un caudal alto por año utilizando un umbral superior de caudal mediano de 7 veces durante todos los años.
5) Tasa de cambio de caudales	de	nPos	Número de días con aumento del caudal.
		nNeg	Número de días con disminución del caudal.
		mPos	Promedio de todas las diferencias positivas.
		mNeg	Promedio de todas las diferencias negativas.
		Reversals	Número de cambios hidrológicos.