



ESTUDIO DE ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA
PRODUCCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL EN SUB SUB CUENCAS
CON APROVECHAMIENTO HUMANO, EN LAS REGIONES DEL
MAULE, BIOBÍO Y LA ARAUCANÍA, Y SU RELACIÓN CON EL
USO ACTUAL DEL SUELO

INFORME FINAL

01/06/2014

CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDROLOGÍA AMBIENTAL -
UNIVERSIDAD DE TALCA

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
2. METODOLOGÍA	5
2.1. Ubicación de puntos de extracción de agua potable	5
2.2. Selección de las sub sub cuencas hidrográficas	5
2.3. Determinación del uso actual del suelo para cada cuenca	6
2.4. Confección de mapa	6
2.5. Recopilación de las series de caudales	7
2.6. Análisis Temporal de las series de caudales	7
2.6.1. Prueba de Tendencia Mann Kendall	7
2.6.2. Análisis temporal a través de la comparación entre 2 Periodos	8
2.6.2.1. Ajuste de las series a funciones de distribución de probabilidad	9
2.6.2.2. Pruebas de Bondad y Ajuste	9
2.6.2.3. Determinación de la tendencia entre 2 periodos	9
2.7. Análisis de la Relación de Cobertura Vegetal vs Tendencia Mann Kendall	10
2.7.1. Relaciones gráficas	10
2.7.2. Relaciones matemáticas	11
3. RESULTADOS	12
3.1. Ubicación de puntos de extracción de agua potable	12
3.2. Selección de las sub sub cuencas hidrográficas	14
3.3. Determinación del uso actual del suelo	14
3.4. Confección de mapas	17
3.5. Recopilación de las series de caudales	21
3.6. Análisis Temporal de las series de caudales	21
3.6.1. Prueba de Tendencia Mann Kendall	21
3.6.1.1. Análisis de tendencia Mann – Kendall para caudales medios	21
3.6.1.2. Análisis de tendencia Mann – Kendall para caudales punta	27
3.6.2. Análisis temporal a través de la comparación entre 2 Periodos	32
3.6.2.1. Ajuste de las series a funciones de distribución de probabilidad	33
3.6.2.2. Comparación entre 2 periodos	34

3.6.2.2.1.	Comparación entre 2 periodos para caudales medios.....	34
3.6.2.2.2.	Comparación entre 2 periodos para series de caudal punta.....	36
3.6.3.	Resumen del análisis de tendencia de caudales	39
3.7.	Análisis de la Relación de Cobertura Vegetal vs Tendencia Mann Kendall.....	41
4.	CONCLUSIONES	50
	ANEXOS	52
	ANEXO 1: Reclasificación del uso actual del suelo del catastro de bosque nativo de CONAF	53
	ANEXO 2: Valores de caudales medio y punta a nivel mensual y anual estimados por la fdp Gumbel para un periodo de retorno de 20 años.	54
	APÉNDICE: FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD.....	58

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales juegan un papel importante en la conservación del agua y del suelo, en especial las plantaciones forestales, las cuales paradójicamente son consideradas peligrosas por su alto consumo de agua. En este sentido, la relación entre el agua y los bosques es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo, tanto del sector forestal como del país en general. Sin embargo, no se conoce el real impacto de las plantaciones y sus efectos en el ciclo hidrológico, dando lugar a aseveraciones muchas veces sin fundamento, como por ejemplo, que las plantaciones de pino secan las vertientes, consumen mucha agua o que dañan los ecosistemas. Esta situación provoca una presión de parte de las comunidades rurales y de la sociedad en general sobre el sector forestal, cuestionando los efectos del bosque, en particular de especies exóticas sobre la disponibilidad hídrica de una cuenca.

No obstante sí se reconoce un impacto positivo que poseen los bosques y las plantaciones en la calidad del agua del ciclo hidrológico, en la disminución de la erosión y/o retención de sedimentos y en el aumento de la calidad del suelo, entre otros. A ello se suma la creciente necesidad de contribuir a la conservación de los recursos hídricos, mediante la implementación de planes de manejo integrado de cuencas, que consideren la parte económica (productividad y crecimiento), la social (disponibilidad de agua y soslayo de conflictos), la ambiental (nuevas demandas sociales) y los nuevos escenarios (cambio climático).

A este propósito, se plantea la necesidad de sustentar una visión común sobre el rol de los bosques en los procesos hidrológicos fundamentada en la consolidación de toda la información existente sobre la materia, así como el desarrollo de estudios más precisos sobre el régimen hídrico y la generación de datos del monitoreo de cuencas experimentales y operacionales, incluido el desarrollo de modelos de base física que permitan obtener información más precisa y entender los procesos hidrológicos interrelacionados de modo de proyectar escenarios de desarrollo y manejo sustentable sobre todo tipo de bosques que mejoren la gestión del agua en tierras forestales.

En este marco, surge el **“Estudio de análisis temporal y espacial de la producción de agua superficial en sub sub cuencas con aprovechamiento humano, en las regiones del Maule, Biobío y la Araucanía, y su relación con el uso actual del suelo”** que tiene como objetivo “determinar de manera preliminar si las actividades silvoagropecuarias han afectado la escorrentía superficial, en las sub sub cuencas de las regiones del Maule, Biobío y La Araucanía”.

El estudio es dirigido por el Dr. Roberto Pizarro y desarrollado por el Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental de la Universidad de Talca, en conjunto con el Dr. Andrés Iroumé de la U. Austral de Chile y el Dr. David González, de la U. de Concepción. La contraparte técnica del estudio es la Unidad de Hidrología y Certificación Forestal de la Corporación Nacional Forestal y se ha mantenido estrecho contacto con sus profesionales, Ing. Jaime Salas, Ing. Wilfredo Alfaro y el Ing. Rodrigo Rojas.

Este documento corresponde al informe final del estudio y muestra todas las actividades y resultados alcanzados en los 3 meses que duró. El informe consta de 3 partes: Metodología, Resultados y Conclusiones y Recomendaciones.

2. METODOLOGÍA

2.1. Ubicación de puntos de extracción de agua potable

Con el apoyo de la contraparte técnica, se obtuvieron las coordenadas geográficas de los puntos de extracción de agua potable rural y urbana para la zona en estudio. Esta información fue aportada por CONAF, quién a su vez la obtuvo de la Sub dirección de Agua Potable Rural (APR) de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), y de Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) en el caso de sistemas urbanos. En total, se encontraron 1.047 puntos pertenecientes a los sistemas de Agua Potable Rural (APR) entre las regiones de O'Higgins y de los Lagos y 409 puntos para agua potable de uso urbano entre las regiones del Maule y Araucanía, aunque no todos ellos se ubican dentro de las cuencas seleccionadas.

2.2. Selección de las sub sub cuencas hidrográficas

En total, se seleccionaron 42 cuencas que poseen un control fluviométrico de al menos 20 años de registro y que además no estaban muy intervenidas por la acción del hombre. Para ello se trabajó en conjunto con el departamento de recursos hídricos de la Dirección General de Aguas (DGA) y la Unidad de Hidrología y Certificación Forestal de CONAF. Inicialmente el área de estudio comprendía las regiones Maule, Biobío y Araucanía, pero fue necesario ampliar el área hacia la región de O'Higgins por el norte y a hasta la región de Los Lagos por el sur. Ello debido a que varias de las cuencas de la zona originaria no contaban con el mínimo de años de registro en las variables que fueron consideradas para el estudio (caudal medio y caudal instantáneo máximo), o bien, eran cuencas que estaban demasiado intervenidas el hombre.

Las cuencas seleccionadas fueron delimitadas a partir del punto geográfico de cada estación fluviométrica (Figura 1). Se utilizó el método estándar para delimitar cuencas a partir del modelo digital de terreno (MDT) utilizando un software de sistemas de información geográfica (SIG) e imágenes SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de resolución 90 x 90 m de la NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) y la NASA (National Aeronautics and Space Administration). Una vez construidas las cuencas, se ajustaron los límites de éstas a las líneas divisorias de aguas establecidas en la base de datos de las subsubcuencas de la DGA.

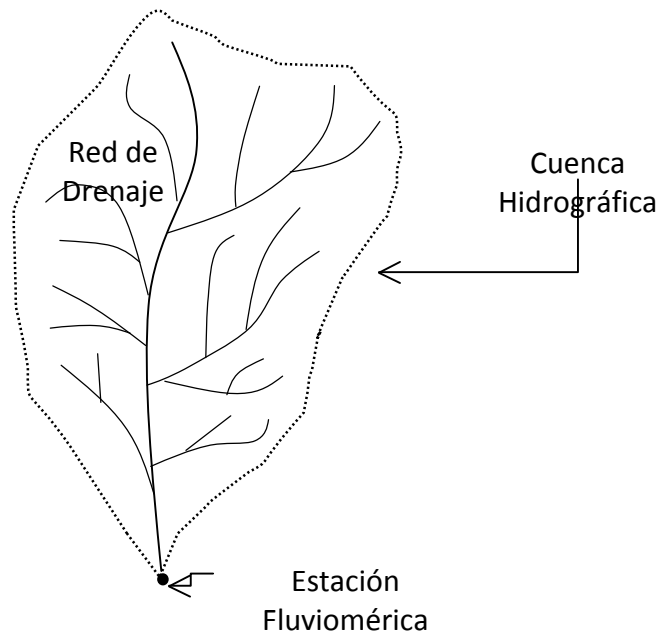


Figura 1. Esquema de la ubicación de la estación fluviométrica y su cuenca hidrográfica aportante.

2.3. Determinación del uso actual del suelo para cada cuenca

Posteriormente, se determinó el uso actual del suelo para cada cuenca, utilizando como base la clasificación del Catastro de Bosque Nativo (CBN) de CONAF del año 2013. Para ello fue necesario agrupar las casi 60 categorías consideradas en el catastro en 7 macro categorías, a saber, Bosque Nativo, Bosque Mixto, Plantación, Matorral, Pradera, Agrícola y Sin Uso. Esta clasificación se realizó en conjunto con la Unidad de Hidrología y Certificación Forestal de CONAF.

2.4. Confección de mapa

Se confeccionaron mapas de las regiones O'Higgins, Maule, Biobío, Araucanía, Los Ríos y parte de Los Lagos, en proyección UTM y utilizando datum y elipsoides WGS 84, que es el formato compatible con la base de datos IDE-Minagri (Infraestructura de Datos Espaciales del Ministerio de Agricultura). Cada mapa contiene la ubicación de los puntos de extracción de agua potable rural (APR) y urbano, la ubicación de las estaciones fluviométricas, la delimitación de las cuencas utilizadas para el estudio, el uso de suelo en cada una de ellas y la hidrografía. Dichos mapas se adjuntan en formato PDF y se adjuntan además, los archivos en formato shape. Adicionalmente, se imprimieron 2 copias de cada mapa en tamaño A1 y fueron entregados a la contraparte técnica del proyecto.

2.5. Recopilación de las series de caudales

Se recopilaron los datos fluviométricos disponibles de caudal medio y caudal instantáneo máximo (punta) a nivel mensual y anual para las 42 estaciones seleccionadas, información que fue aportada por la Dirección General de Aguas (DGA). Las variables utilizadas para los análisis se pueden resumir como sigue:

- Q_{mm_i} : representa el caudal medio del mes i en m^3/s
- Q_{ma_i} : representa el caudal medio del año i en m^3/s
- Q_{pm_i} : representa el caudal máximo del mes i en m^3/s
- Q_{pa_i} : representa el caudal máximo del año i en m^3/s

A nivel mensual, se eligieron los meses con influencia estival, es decir, los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril. Esto porque en estos meses se refleja de mejor manera el problema de la disponibilidad de agua, en tanto que en los meses invernales las variaciones de la disponibilidad pueden ser fuertemente influenciadas por las lluvias existentes.

Esto significó trabajar con un total de 7 series de datos mensuales de caudales medios, 7 series de datos mensuales de caudales máximos, 1 serie de datos de caudales medios anuales y 1 serie de datos de caudales máximos anuales, y todo esto para las 42 estaciones, lo que da un total de 672 series de datos para analizar.

2.6. Análisis Temporal de las series de caudales

Como ya se ha mencionado, las variables a estudiar consisten en los caudales medio mensual y anual y los caudales máximos o punta también a nivel mensual y anual para las 42 cuencas consideradas. Para el análisis temporal se utilizaron 2 métodos: análisis de tendencia de Mann-Kendall y comparación entre periodos, los que se detallan a continuación.

2.6.1. Prueba de Tendencia Mann Kendall

Se aplicó el análisis no-paramétrico de tendencia de Mann-Kendall a las series de caudales medios y máximos a nivel mensual y anual, de cada cuenca. Los meses considerados son desde octubre hasta abril. Asimismo, con el objetivo de homogeneizar la longitud y el periodo de las series, se consideraron los últimos 20 años de registro de cada serie, es decir, desde 1993 a 2012 para los meses entre de octubre y diciembre y desde 1994 a 2013 para los meses entre enero y abril; de forma es posible realizar comparaciones entre las estaciones. También se aplicó la prueba no paramétrica de Sen para obtener la magnitud de la tendencia. Para ello se utilizó la aplicación MAKESENS (Mann-Kendall test for trend and Sen's slope estimates), aplicación para Excel desarrollada por el Instituto Meteorológico Finlandés. Se accede libremente a través del enlace <http://en.ilmatietaenlaitos.fi/makesens>.

El análisis se realizó para cada una de las series de caudales mensuales y anuales, medios y máximos de cada estación, obteniéndose el estadístico Z (para $n > 10$) y el parámetro Q. Éste último refleja la magnitud de la pendiente, mientras que su signo muestra si la tendencia es positiva o negativa. Además, se obtuvieron el nivel de significancia de la pendiente para $\alpha = 0,1; 0,05; 0,01$ y $0,001$.

2.6.2. Análisis temporal a través de la comparación entre 2 Periodos

En las series de caudales más longevas, mayores a 40 años de registro, se estableció un análisis probabilístico estableciendo 2 periodos de influencia que permitió ver la variación de los caudales en el tiempo. Para ello, la serie de cada estación se dividió en 2 periodos, y cada uno fue ajustado a una función de distribución de probabilidad.

De esta forma, del total de 42 estaciones consideradas en el estudio, sólo 25 de ellas presentan registros de más de 40 años, calificando para realizar el análisis del comportamiento de los caudales en el tiempo a través de la comparación entre 2 periodos. Para las series anuales, el primer periodo considera los registros de los años 1973 al 1992 y el segundo, desde 1993 a 2012. No se incluyó el año 2013 pues dada la fecha del estudio, no se cuenta con los registros de los últimos meses del año 2013. En el caso de los años incompletos que le faltasen hasta 3 meses de registro, estos fueron completados con el promedio histórico del mes faltante, mientras que si a un año le faltan más de 3 meses no se consideró el valor anual.

En cuanto a las series mensuales de ambos periodos, estas fueron definidas dependiendo del mes. Para los meses entre enero y abril, el primer periodo estuvo comprendido entre los años 1974 a 1993 y el segundo periodo desde el año 1994 al año 2012; en cambio, para los meses de octubre, noviembre y diciembre, el primer periodo comienza en el año 1973 y termina en el año 1992, mientras que el segundo periodo abarca desde el año 1993 al año 2012. Lo anterior puede resumirse en el siguiente cuadro:

Cuadro 1. Periodos para cada tipo de serie de datos

Serie de datos	Primer periodo	Segundo periodo
Anual	1973-1992	1993-2012
Enero-Febrero-Marzo-Abril	1974-1993	1994-2013
Octubre-Noviembre-Diciembre	1973-1992	1993-2012

De esta forma se analizaron 16 series para caudales medios y 16 para caudales punta por cada estación, lo que da un total de 800 series analizadas.

2.6.2.1. Ajuste de las series a funciones de distribución de probabilidad

Para cada periodo, las series de caudales medios y punta, tantos mensuales como anuales, se ajustaron a una función de distribución de probabilidad (FDP), en primer lugar se usó la fdp de Gumbel, luego la Goodrich y finalmente, las que no ajustaron con ninguna de las 2 anteriores se probó con LogNormal. En todo caso Gumbel y Goodrich han mostrado buenos resultados para el ajuste de caudales en el país. Mayores antecedentes de las FDP se encuentran en el Apéndice 1.

En primer lugar, se ajustaron para cada periodo, los datos mensuales de caudal medio y caudal instantáneo máximo de ambos periodos sólo con los datos existentes sin realizar ningún tipo de completación. Luego, se procedió a obtener las series anuales, para las cuales se completaron los datos mensuales faltantes en aquellos años que tuviesen a lo más 3 meses faltantes. Dichos datos fueron completados con el valor del promedio histórico del mes.

2.6.2.2. Pruebas de Bondad y Ajuste

Se utilizó la Prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS) para verificar el ajuste de cada serie de caudal a las funciones de distribución de probabilidad. De esta forma, cada vez que se hace un ajuste, se corrobora con esta prueba y en caso de que no apruebe el ajuste, se busca otra fdp.

2.6.2.3. Determinación de la tendencia entre 2 periodos

Una vez ajustadas las series, se obtuvieron los valores del caudal medio y del caudal instantáneo máximo para un periodo de retorno de 20 años, esto para cada mes y para cada año de ambos periodos de cada estación. Luego, se calculó la diferencia entre los 2 periodos establecidos, pero dada la diferente magnitud de caudales entre todas las estaciones, fue necesario estandarizar esta diferencia. Así se calculó una diferencia proporcional respecto al primer periodo, lo que es expresado en la siguiente ecuación:

$$\text{Diferencia porcentual} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} \times 100$$

Donde:

Q_1 =Caudal medio o punta del periodo 1 (más antiguo)

Q_2 = Caudal medio o punta del periodo 2 (más antiguo).

De esta forma, una diferencia porcentual positiva indica una tendencia positiva y viceversa. Esta diferencia se obtuvo tanto para caudal medio, como caudal punta, y ello a nivel mensual (entre octubre y abril) y anual.

2.7. Análisis de la Relación de Cobertura Vegetal vs Tendencia Mann Kendall

Se analizaron las relaciones existentes entre la superficie cubierta con bosque nativo, plantación y uso agrícola vs. la magnitud de la tendencia obtenida de la prueba Mann Kendall para cada serie de caudales, de 2 formas: una gráfica y otra matemática.

2.7.1. Relaciones gráficas

Se relacionó gráficamente la magnitud de la tendencia Mann-Kendall de los caudales y la proporción de superficie cubierta por bosque, para cada cuenca seleccionada. Así se puede visualizar cómo se comportan las tendencias de los caudales medios, máximos, mensuales y anuales en relación al tipo de uso del suelo de la cuenca, es decir, en relación a la superficie de uso forestal, dividido en bosque nativo y bosque exótico y de uso agrícola de la cuenca aportante.

A modo de ejemplo, a continuación se muestra en forma esquemática las situaciones extremas que pudiesen darse en estas relaciones.

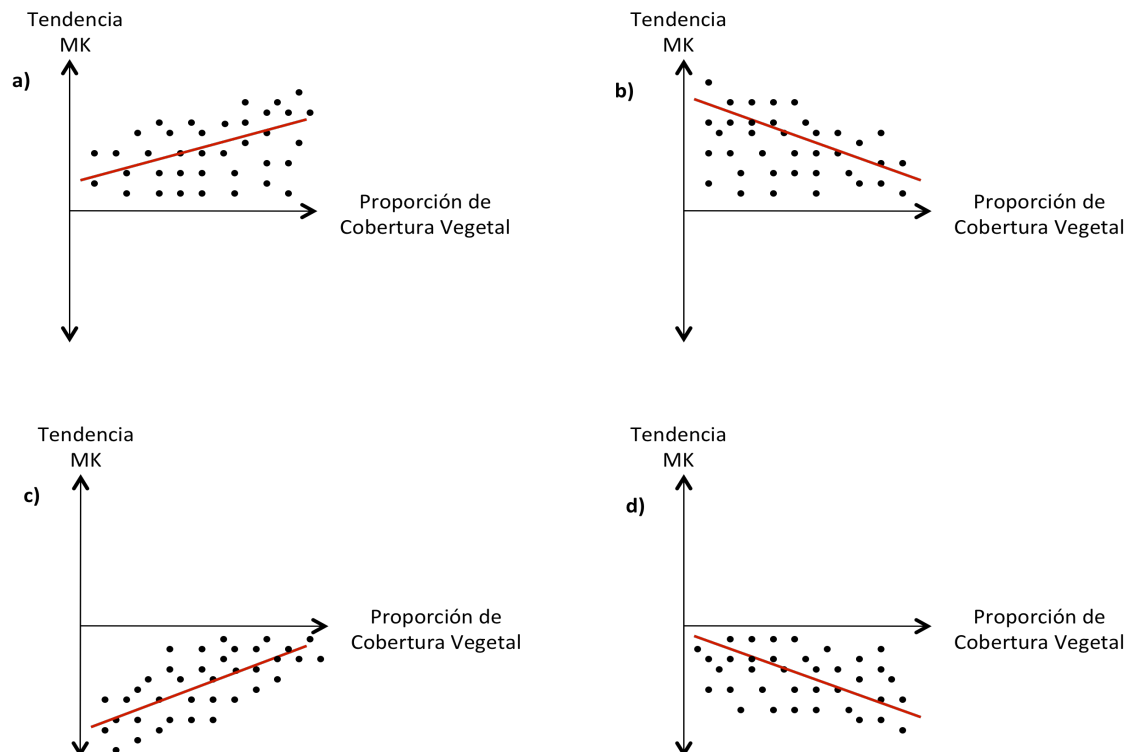


Figura 2. Ejemplos de la relación gráfica entre la magnitud de la tendencia en el tiempo de los caudales (Mann-Kendall) y la proporción de la superficie de bosques para cada cuenca.

Como se aprecia en la Figura 2, pueden darse las siguientes relaciones entre las tendencias de los caudales y la superficie cubierta por un determinado uso: a) Tendencia positiva de los caudales y a mayor cobertura forestal aumenta la tendencia de los caudales; b) Tendencia positiva de los caudales, y a mayor cobertura forestal la tendencia disminuye; c) tendencia negativa de los caudales, pero esta tendencia aumenta a medida que se incrementa la cobertura forestal; d) tendencia negativa de los caudales y esta tendencia disminuye a medida que se incrementa la cobertura forestal.

Asimismo, también puede ocurrir que no exista tendencia en los caudales y/o que esta no esté influenciada por la cobertura forestal, lo cual de todos modos será relevante analizar con los datos que se obtengan.

2.7.2. Relaciones matemáticas

Adicionalmente, se analizaron los coeficientes de correlación entre los caudales analizados y la cubierta forestal para cada cuenca hidrográfica, de tal forma de apoyar a los análisis gráficos. Para ello, se utilizó el coeficiente de Correlación de Pearson, que es un valor estadístico que mide la relación lineal entre dos variables mediante la siguiente fórmula:

$$P_{x,y} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)]}{\sigma_x \sigma_y}$$

Donde:

σ_{xy} : Covarianza de (X,Y).

σ_x : Desviación estándar de la variable X (porcentaje de cobertura vegetal)

σ_y : Desviación estándar de la variable Y (magnitud de la tendencia)

Los rangos de valor van de +1 a -1, lo que indica una perfecta relación lineal positiva y negativa respectivamente entre ambas variables, mientras que valores cercanos al cero indican que no existe correlación.

3. RESULTADOS

3.1. Ubicación de puntos de extracción de agua potable

Se recibió de parte de la Dirección de Obras Hidráulicas la ubicación de los puntos de extracción de agua potable rural ubicados entre las regiones de O'Higgins y de Los Lagos a diciembre del 2011. En total existe registro de un total de 1.047 puntos de extracción y estos están asociados a una población de 938.955 personas. Se destaca que el 91 % de estas extracciones se instalaron a partir del año 1977 (cuadro 2).

Por otro lado, se recibió de parte de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) la ubicación de los puntos de extracción de agua potable, detallando la ubicación y tipo de sistema, este último dividido en 7 categorías: Superficial Río, Superficial Canal, Superficie Lago Embalse, Subterránea Drenes Galerías, Subterránea Punteras, Subterránea Norias, Subterránea Sondajes. Se debe recordar que inicialmente este estudio comprendía las regiones del Maule, Biobío y La Araucanía, por lo que solicitó información solo de de estas regiones. En el cuadro 2 se detalla el número de puntos ubicados por región, y en el cuadro 3 se muestran cuántos de estos puntos pertenecen a las cuencas analizadas.

Cuadro 2. Número de extracciones de agua potable por región para uso urbano y rural

Región	Nº Extracciones Agua potable rural por año de instalación				Nº extracciones Agua potable urbana		
	Total	1964-1970	1977-1992	1993-2011	Total	Superficial	Subterránea
O'Higgins	214	38	81	95	s/i	s/i	s/i
Maule	266	34	96	136	15	106	121
Biobío	177	20	77	80	41	142	183
Araucanía	189	0	64	125	26	79	105
Los Ríos	71	0	22	49	s/i	s/i	s/i
Los Lagos	131	0	48	83	s/i	s/i	s/i
	1.048	92	388	568	82	327	409

s/i: sin información de estas regiones

Cuadro 3. Número de Extracciones de agua potable rural y urbana en las cuencas en estudio

Cuenca	Subcuenca	N° de puntos de extracción		
		APR	APU - Sup	APU - Sub
RAPEL	Claro en Hacienda Las Nieves	0	sin información	sin información
	Claro en El Valle	0	sin información	sin información
	Tinguiririca bajo Briones	0	sin información	sin información
MATAQUITO	Mataquito en Licantén	55	0	33
	Teno después junta Claro	0	0	1
MAULE	Maule en Forel	186	2	70
	Maule en Longitudinal	12	0	0
	Lircay en puente Las Rastras	3	0	0
	Loncomilla en Las Brisas	96	2	24
	Loncomilla en Bodega	41	2	13
	Cauquenes en Desembocadura	1	2	5
	Perquillauquén en Quella	17	0	0
Purapel en Nirivilo	2	0	0	
ITATA	Itata en Coelemu	78	3	54
	Itata en General Cruz	4	1	8
	Cato en puente Cato	14	0	3
	Diguillín en Longitudinal	5	0	7
BIOBÍO	Biobío en Desembocadura	82	8	55
	Biobío en Rucalhue	11	0	2
	Laja en puente Perales	18	0	0
	Mininco en Longitudinal	3	0	0
IMPERIAL	Cautín en Almagro	49	2	52
	Cautín en Cajón	15	1	5
	Cautín en Rari Ruca	4	1	0
	Quepe en Quepe	15	1	2
TOLTÉN	Toltén en Teodoro Smith	49	6	9
	Toltén en Villarica	15	1	1
	Donguil en Gorbea	4	3	0
	Allipen en Los Laureles	6	0	1
	Curaco en Colico	1	0	0
CALLE CALLE	San Pedro en Desagüe lago Riñihue	7	sin información	sin información
BUENO	Damas en Tacamo	0	sin información	sin información
	Coihueco antes junta Pichicope	1	sin información	sin información
TOTAL		794	35	345

Entre las cuencas con mayor número de extracciones, sean estas, para uso rural o urbano, destacan las del Biobío en Desembocadura (145 extracciones), Maule en Forel (258 extracciones) y Loncomilla en Las Brisas (122 extracciones). No obstante, si se analiza el número de extracciones por unidad de superficie de la cuenca, destacan las cuencas Cautín en Almagro con $1,84E-02$ extracciones/ km^2 , Cato en puente Cato con $1,80E-02$ extracciones/ km^2 y Mataquito en Licantén con $1,54E-02$ extracciones/ km^2 . De esta forma, se puede decir estas 3 últimas cuencas son las más intervenidas, no obstante, para un análisis más profundo es necesario conocer los caudales que se extraen de cada punto.

3.2. Selección de las sub sub cuencas hidrográficas

Se seleccionaron 42 cuencas que poseen un control fluviométrico de al menos 20 años de registro y que además no estaban muy intervenidas por la acción del hombre. De las 42 cuencas, 3 pertenecen a la región de O'Higgins, 16 a la región del Maule, 10 a la región del Biobío, 10 a la región de la Araucanía, 1 a la región de los Ríos y por último, 2 a la región de los Lagos. El detalle de las estaciones y el periodo de registro se muestran en el Cuadro 4.

3.3. Determinación del uso actual del suelo

La clasificación del Catastro de Bosque Nativo (CBN) de CONAF del año 2013 considera cerca de 60 categorías, las que fueron agrupadas en 7 macro categorías, a saber, Bosque Nativo, Bosque Mixto, Plantación, Matorral, Pradera, Agrícola y Sin Uso. La categorización del uso actual del suelo se presenta en el (Anexo 1). A continuación, en el Cuadro 5 se muestra la superficie de cada categoría de suelo para cada cuenca.

Cuadro 4. Estaciones fluviométricas con el periodo de registros y el número de años recopilados

Cuenca	Estación	Caudal Medio				Caudal Instantáneo Máximo				Años de registro	
		Inicio		Término		Inicio		Término		Q medio	Q inst Max
		Mes	Año	Mes	Año	Mes	Año	Mes	Año		
RAPEL	Claro en Hacienda Las Nieves	9	1960	7	2013	9	1960	7	2013	54	54
	Claro en El Valle	5	1970	7	2013	5	1970	7	2013	44	44
	Tinguiririca bajo Briones	10	1947	7	2013	11	1984	7	2013	67	30
MATAQUITO	Mataquito en Licantén	1	1987	7	2013	1	1987	7	2013	27	27
	Teno después junta Claro	9	1947	7	2013	1	1959	7	2013	67	55
	Teno bajo Quebrada Infernillo	1	1985	7	2013	1	1985	7	2013	29	29
	Claro en Los Queñes	5	1929	7	2013	5	1986	7	2013	85	28
	Upeo en Upeo	2	1963	7	2013	2	1963	7	2013	51	51
	Palos en junta con Colorado	5	1947	7	2013	3	1967	7	2013	67	47
	Colorado en junta con Palos	11	1917	7	2013	3	1967	7	2013	97	47
MAULE	Maule en Forel	1	1985	7	2013	3	1988	7	2013	29	26
	Maule en Longitudinal	8	1962	4	2013	8	1962	4	2013	52	52
	Lircay en puente Las Rastras	12	1961	7	2013	11	1961	7	2013	53	53
	Loncomilla en Las Brisas	5	1975	7	2013	8	1983	7	2013	39	31
	Loncomilla en Bodega	5	1967	7	2013	6	1972	7	2013	47	42
	Achibueno en Recova	11	1986	7	2013	6	1987	7	2013	28	27
	Cauquenes en Desembocadura	4	1986	4	2013	4	1986	4	2013	28	28
	Perquilauquén en Quella	2	1963	7	2013	2	1963	7	2013	51	51
Purapel en Nirivilo	3	1957	7	2013	3	1957	7	2013	57	57	
ITATA	Itata en Coelemu	8	1985	7	2013	8	1985	7	2013	29	29
	Itata en General Cruz	1	1956	7	2013	2	1958	7	2013	58	56
	Cato en puente Cato	9	1956	7	2010	9	1957	7	2010	55	54
	Ñuble en San Fabián	5	1946	7	2013	2	1958	7	2013	68	56
	Ñuble en La Punilla	4	1957	7	2013	4	1958	7	2013	57	56
	Diguillín en Longitudinal	9	1956	1	2013	2	1978	1	2013	58	36
	Diguillín en San Lorenzo	5	1946	7	2013	6	1958	7	2013	68	56
BIOBÍO	Biobío en Desembocadura	9	1970	7	2013	9	1970	7	2013	44	44
	Biobío en Rucalhue	6	1937	3	2013	9	1970	3	2013	77	44
	Laja en puente Perales	8	1957	6	2013	4	1959	6	2013	57	55
	Mininco en Longitudinal	6	1963	7	2013	6	1963	7	2013	51	51
IMPERIAL	Cautín en Almagro	5	1965	7	2013	5	1988	7	2013	49	26
	Cautín en Cajón	3	1949	7	2013	2	1972	7	2013	65	42
	Cautín en Rari Ruca	3	1929	7	2013	2	1961	7	2013	85	53
	Quepe en Quepe	12	1929	7	2013	11	1962	7	2013	85	52
TOLTÉN	Toltén en Teodoro Smith	2	1991	12	2012	3	1991	7	2013	22	23
	Toltén en Villarica	3	1929	7	2013	5	1962	7	2013	85	52
	Donguil en Gorbea	5	1965	7	2013	9	1988	7	2013	49	26
	Allipen en Los Laureles	3	1946	7	2013	9	1962	7	2013	68	52
	Curaco en Colico	10	1986	7	2013	11	1986	7	2013	28	28
CALLE CALLE	San Pedro en Desagüe lago Ríñihue	3	1985	7	2013	3	1985	7	2013	29	29
BUENO	Damas en Tacamo	2	1986	6	2013	11	1990	6	2013	28	24
	Coihueco antes junta Pichicope	8	1987	7	2013	4	1990	7	2013	27	24

Cuadro 5. Área (en Km²) del uso actual del suelo de cada cuenca

N°	Estación	Cuenca Principal	Superficie (Km ²)							Sin Uso	Total
			Bosque Nativo	Bosque Mixto	Plantación	Matorral	Pradera	Agrícola			
1	Claro en Hacienda Las Nieves	Rapel	16	1	-	65	39	2	123	245	
2	Claro en El Valle		86	-	23	112	13	7	123	364	
3	Tinguiririca bajo Briones		24	-	25	389	126	11	863	1.439	
4	Mataquito en Licantén	Mataquito	855	23	337	1.182	368	1.100	1.857	5.721	
5	Teno después junta Claro		99	1	2	252	259	3	590	1.206	
6	Teno bajo Quebrada Infernillo		0	-	-	31	206	-	359	596	
7	Claro en Los Queñes		40	1	1	116	49	3	144	353	
8	Upeo en Upeo		74	-	7	52	14	8	60	215	
9	Palos en junta con Colorado		88	-	1	42	1	2	362	496	
10	Colorado en junta con Palos		110	-	-	43	54	1	670	877	
11	Maule en Forel	Maule	2.797	180	3.224	3.291	1.709	5.560	4.079	20.840	
12	Maule en Longitudinal		492	4	38	742	1.296	137	3.221	5.931	
13	Lircay en puente Las Rastras		204	2	65	52	2	28	27	380	
14	Loncomilla en Las Brisas		1.669	123	2.246	1.731	286	3.565	657	10.276	
15	Loncomilla en Bodega		912	105	2.000	1.430	180	2.576	245	7.449	
16	Achibueno en Recova		389	2	72	69	87	22	251	892	
17	Cauquenes en Desembocadura		58	46	712	459	43	267	10	1.596	
18	Perquillauquén en Quella		387	21	446	280	48	823	73	2.078	
19	Purapel en Nirivilo		11	22	176	32	3	18	1	263	
20	Itata en Coelemu	Itata	2.044	232	2.104	752	212	3.548	1.059	9.950	
21	Itata en General Cruz		397	30	514	148	14	557	33	1.691	
22	Cato en puente Cato		244	15	310	28	1	314	31	944	
23	Ñuble en San Fabián		708	-	3	112	107	10	709	1.650	
24	Ñuble en La Punilla		433	-	-	86	94	2	641	1.255	
25	Diguillín en Longitudinal		412	8	186	81	12	600	113	1.412	
26	Diguillín en San Lorenzo		99	-	-	49	5	1	49	203	
27	Biobío en Desembocadura	Biobío	7.065	432	6.213	2.766	1.693	3.970	2.112	24.251	
28	Biobío en Rucalhue		3.586	6	69	1.320	936	112	876	6.903	
29	Laja en puente Perales		931	22	562	619	340	277	842	3.592	
30	Mininco en Longitudinal		49,6	6	272	1	7	108	-	444	
31	Cautín en Almagro	Imperial	1.554	34	455	302	218	2.759	276	5.597	
32	Cautín en Cajón		980	11	203	195	95	1.060	182	2.726	
33	Cautín en Rari Ruca		692	3	34	138	67	196	167	1.297	
34	Quepe en Quepe		494	12	146	78	59	868	43	1.699	
35	Toltén en Teodoro Smith	Toltén	3.384	133	589	476	1.966	458	835	7.841	
36	Toltén en Villarica		1.780	16	33	213	361	8	455	2.866	
37	Donguil en Gorbea		97	35	90	6	463	44	2	735	
38	Allipen en Los Laureles		749	6	108	136	250	142	259	1.649	
39	Curaco en Colico		324	8	36	37	70	5	59	539	
40	San Pedro en Desagüe lago Riñihue	Calle-Calle	2.146	18	32	87	390	596	35	3.304	
41	Damas en Tacamo	Bueno	49	3	2	10	188	1	-	252	
42	Coihueco antes junta Pichicope		242	-	15	20	40	-	7	324	

3.4. Confección de mapas

Se elaboraron los 3 mapas para la zona en estudio, y cada uno contiene la ubicación de los puntos de extracción de agua potable rural (APR) y urbano, la ubicación de las estaciones fluviométricas, hidrografía, las cuencas utilizadas para el estudio y el uso de suelo en cada una de ellas. El primer mapa representa a las regiones de O'Higgins y Maule, el segundo, a la Región del Biobío, y el tercero, muestra las regiones de La Araucanía, Los Ríos y parte de Los Lagos. Los mapas fueron impresos en tamaño A1 (60 x 90 cm) y los archivos digitales (en formato shape) fueron transferidos a la contraparte técnica. A continuación se muestran los 3 mapas elaborados (Figuras 3, 4 y 5).

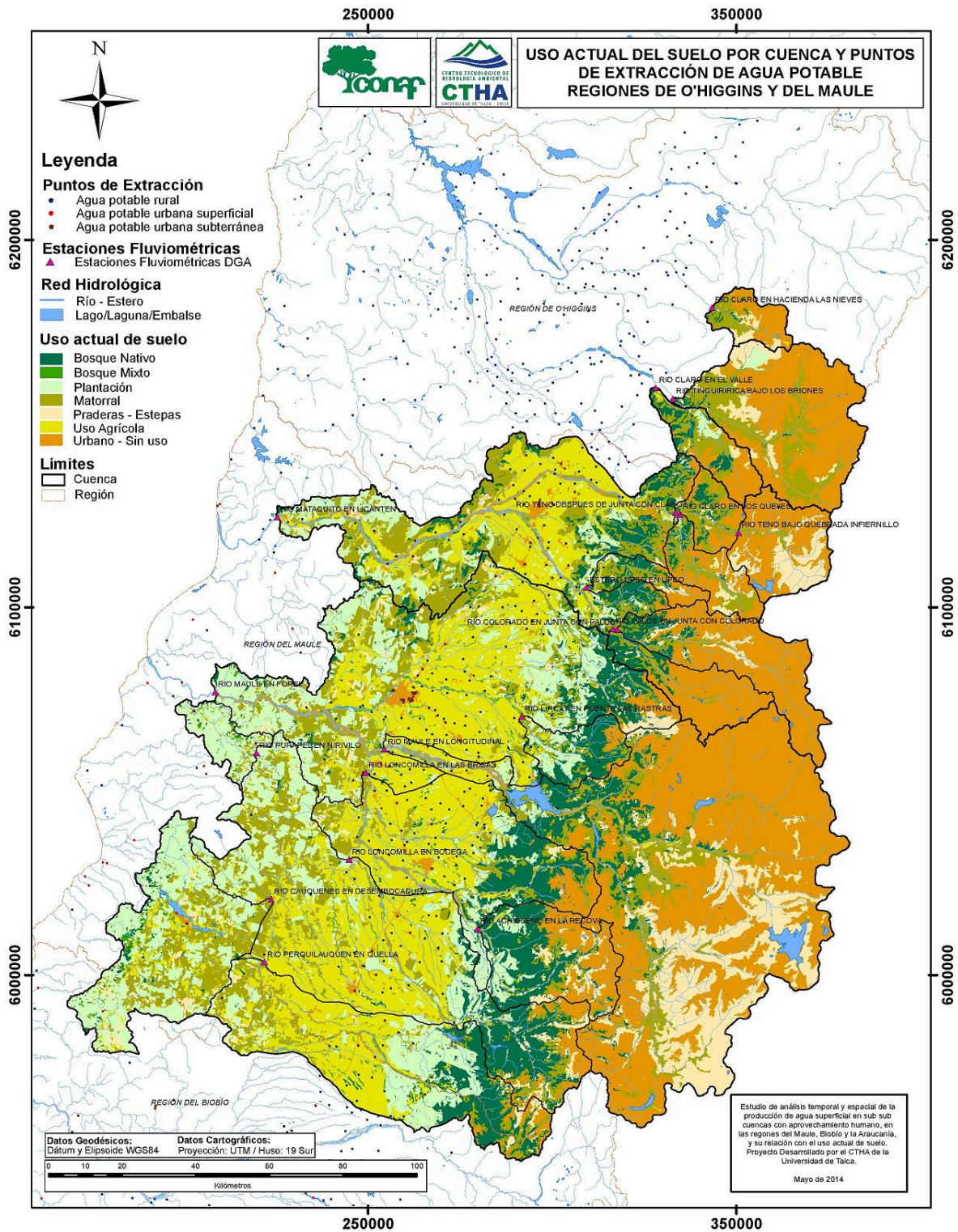


Figura 3. Mapa ubicación de las cuencas estudiadas y de los puntos de extracción de agua potable de las regiones O'Higgins y Maule.

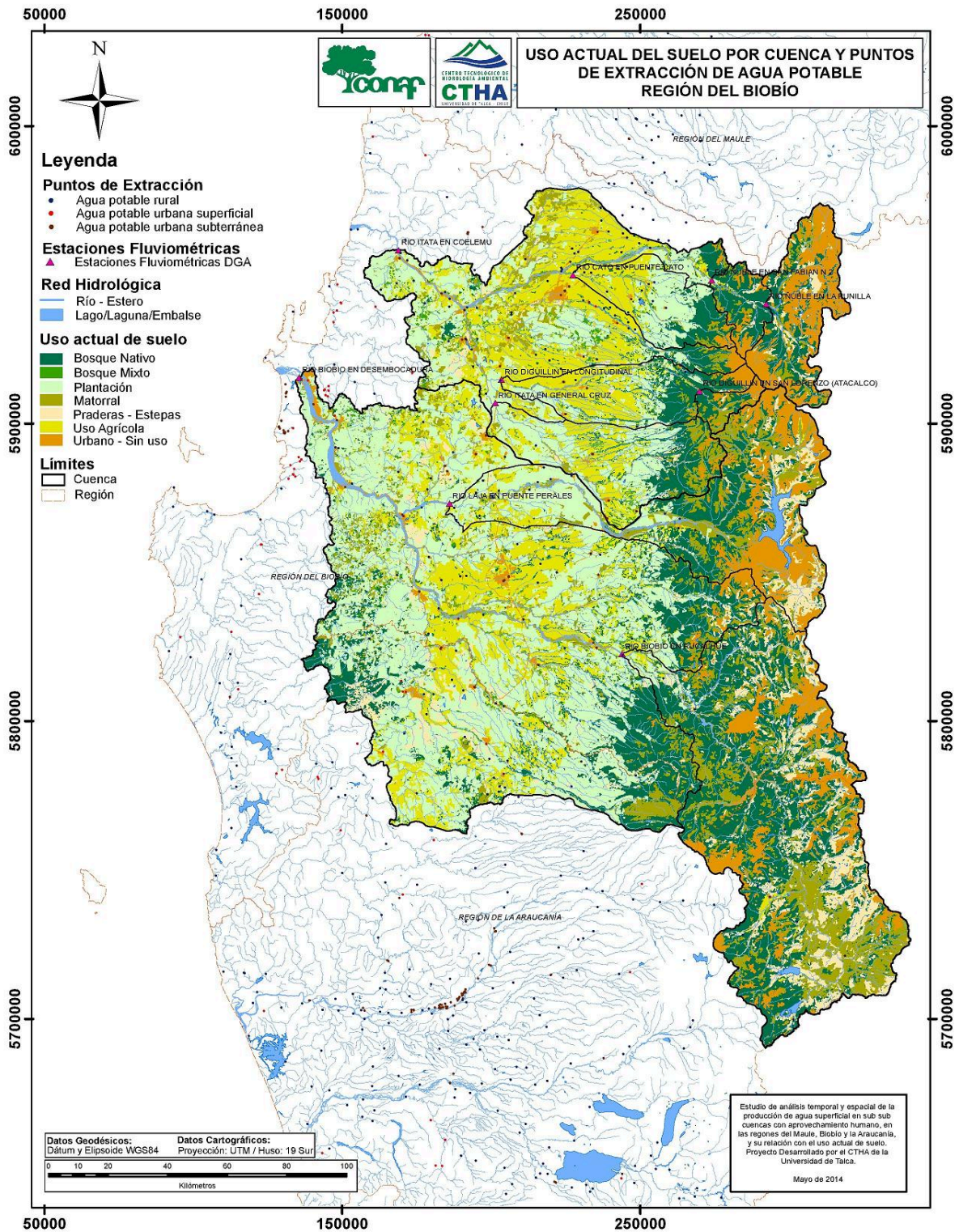


Figura 4. Mapa ubicación de las cuencas estudiadas y de los puntos de extracción de agua potable para la región del Biobío.

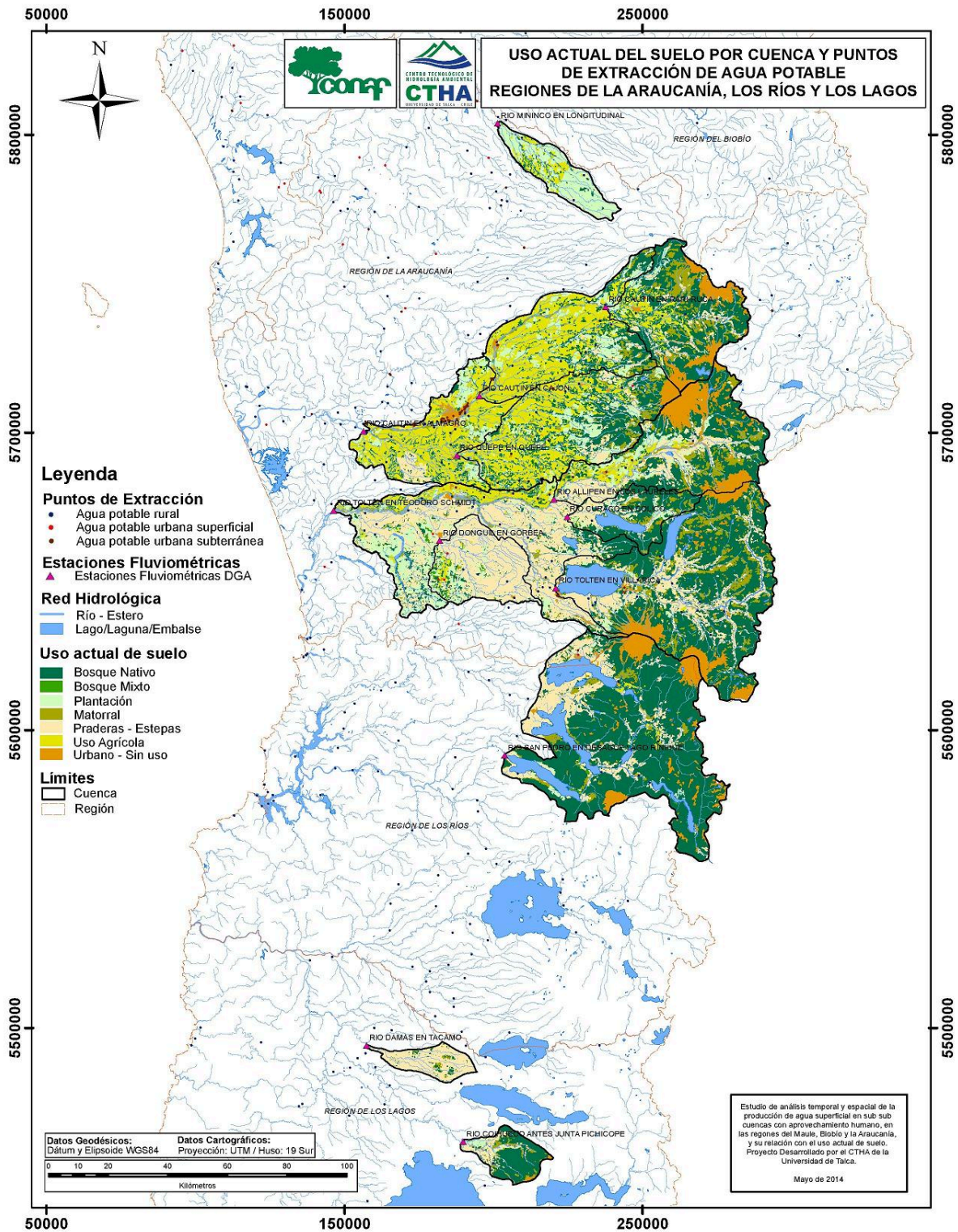


Figura 5. Mapa ubicación de las cuencas estudiadas y de los puntos de extracción de agua potable de las regiones La Araucanía, Los Ríos y parte de Los Lagos.

3.5. Recopilación de las series de caudales

Se recopilaron los datos fluviométricos disponibles de caudal medio y caudal instantáneo máximo (punta) para las 42 estaciones seleccionadas, información que fue aportada por la Dirección General de Aguas (DGA). Como se observa en el Cuadro 4, la estación más antigua data del año 1917, completando una serie de 97 años de registro de caudal medio en la estación Colorado en junta con Palos; mientras que para caudal punta, la más antigua posee 57 años de registro, que corresponde a la estación Purapel en Nirivilo. En promedio, las series tienen una longitud de 51 y 41 años de registro para caudal medio y punta, respectivamente. No obstante, para efectos de los análisis posteriores, se consideraron los últimos 20 años para el análisis de Mann y Kendall y los últimos 40 años para la comparación entre 2 periodos, como se verá más adelante.

3.6. Análisis Temporal de las series de caudales

3.6.1. Prueba de Tendencia Mann Kendall

Se aplicó el análisis no-paramétrico de tendencia de Mann-Kendall a las series de caudales medios y máximos a nivel mensual y anual, de cada cuenca, considerando los últimos 20 años de registro de cada serie, es decir, desde 1993 a 2012 para los meses entre de octubre y diciembre y desde 1994 a 2013 para los meses entre enero y abril. A continuación se muestran los resultados obtenidos para caudales medios y punta.

3.6.1.1. Análisis de tendencia Mann – Kendall para caudales medios

En el Cuadro 6 se muestran los valores Q de la prueba Mann - Kendall para cada estación, a nivel mensual y anual. El signo que antecede al valor Q muestra la tendencia de la serie, pudiendo ser positiva o negativa. Además, si el valor Q está acompañado de un símbolo, indica que esa serie de datos presenta algún nivel de significancia.

Al analizar las tendencias de los caudales medios anuales de las 42 estaciones (Cuadro 6), se observan 40 estaciones que presentan tendencia a disminuir, y de estas, solo 5 tienen tendencia significativa. Las 2 estaciones restantes, 13. *Lircay en puente las Rastras* y 19. *Purapel en Nirivilo* tienen tendencia positiva aunque solo en la primera, la tendencia es significativa. A nivel de cuencas, las de Rapel y Mataquito tienen una tendencia a disminuir sus caudales medios, tanto mensuales como anuales.

En términos espaciales, destacan las estaciones 5. *Teno después junta Claro* y 7. *Claro en Los Queñes* que se encuentran distanciadas solo por 1,4 km, y esta última es subcuenca de la primera. Como es de esperar el comportamiento de los caudales medios son similares. Lo mismo se observa en las cuencas 9. *Palos en junta con Colorado* y 10. *Colorado en junta con Palos*, aunque

estas cuencas son contiguas (cuencas gemelas) y presentan un comportamiento similar respecto a las tendencias de los caudales medios.

Asimismo, en el Cuadro 6 se puede observar que existen 12 estaciones con tendencia a la disminución en todos los meses analizados y en 4 de ellas la tendencia no es significativa para ningún mes. Además, como referencia geográfica, estas estaciones se ubican en las zonas cordilleranas. Sólo destaca la estación 29. *Laja en puente Perales*, que ha disminuido su caudal en forma significativa en 4 de los 7 meses analizados, y su ubicación geográfica es en el valle (Figuras 7, 8 y 9).

En relación a las series de caudales medios mensuales, en términos generales se observa una tendencia a la disminución en el tiempo, pero, en la mayoría de los casos estas tendencias no son significativas, es decir, no existen evidencias suficientes para establecer un patrón de comportamiento. Por otra parte, destaca la estación 13. *Lircay en puente las Rastras* que presenta un aumento de caudal medio significativo en todos los meses a excepción de abril que disminuye y de marzo y diciembre donde aumenta pero no en forma significativa. La estación 19. *Purapel en Nirivilo* presenta una tendencia positiva en el caudal medio anual, aunque a nivel mensual, presenta tendencia negativa en los meses octubre, noviembre y abril. El resto de las estaciones disminuyen su caudal medio.

A nivel mensual, de las 294 series analizadas con Mann y Kendall, 195 (67%) presentan tendencia negativa, aunque de estas, solo 16 tienen tendencia significativa. Por su parte, de las que tienden al alza solo 15 son significativas. En este sentido, destaca que del total de series mensuales analizadas solo el 12 % presenta tendencia significativa (cuadro 5), lo que refleja la inexistencia de un patrón de comportamiento del caudal medio.

Cuadro 6. Tendencia (Valores Q) de los caudales medio mensuales y anuales para cada estación

Cuenca	Estación	Valor Q (Tendencia)							
		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Anual
RAPEL	1. Claro en Hacienda Las Nieves	-0,12	0,02	-0,39	-0,24	-0,16	-0,14+	-0,12 *	-0,15
	2. Claro en El Valle	-0,34	-0,45	-0,26	-0,03	-0,06	-0,02	-0,02	-0,19
	3. Tinguiririca bajo Briones	-0,98	-1,75	-2,73	-1,42	-1,24	-0,47 *	-0,41	-0,82
MATAQUITO	4. Mataquito en Licantén	-0,30	-1,48	-1,96	-1,38	-0,45	-0,27	-1,22	-2,14
	5. Tenó después junta Claro	0,24	-1,99	-2,50	-1,01	-1,00	-0,58 +	-0,57 +	-0,88
	6. Tenó bajo Quebrada Infernillo	-0,81	-0,88	-1,29	-0,69	-0,47	-0,34	-0,48	-0,81
	7. Claro en Los Queñes	-0,35	-0,69	-0,75 +	-0,27	-0,13	-0,05	-0,16	-0,52 +
	8. Upeo en Upeo	0,03	-0,04	-0,05	0,00	-0,00	0,01	-0,07	-0,18
	9. Palos en junta con Colorado	-0,43	-0,75 +	-1,09	-0,90	-0,58	-0,39	-0,49 +	-0,46
	10. Colorado en junta con Palos	0,20	-1,46	-1,68	-1,15	-0,88 +	-0,57	-0,41 +	-0,61
MAULE	11. Maule en Forel	-5,79	-3,36	-2,56	4,57	1,41	-0,52	-2,77	-3,55
	12. Maule en Longitudinal	-6,19	-5,31	-3,96	1,74	-0,11	-3,51	-1,30	-3,79
	13. Lircay en puente Las Rastras	1,06 *	0,63 **	0,29	0,29 *	0,21 *	0,10	-0,01	0,67 *
	14. Loncomilla en Las Brisas	-0,24	1,98	1,17	0,29	0,12	0,11	-1,74	-0,89
	15. Loncomilla en Bodega	-0,55	0,81	-0,16	-0,94	-0,75	-1,07	-1,78	-2,60
	16. Achibueno en Recova	-0,26	-0,16	-0,55	-0,19	-0,07	-0,05	-0,47	-0,51
	17. Cauquenes en Desembocadura	-0,09	-0,00	0,03	0,03 *	0,03 +	0,02	0,01	-0,14
	18. Perquillauquén en Quella	-0,05	-0,02	0,58	0,28	0,17	0,17	0,18	-0,52
	19. Purapel en Nirivilo	-0,02	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,01
ITATA	20. Itata en Coelemu	-8,99	-1,94	-2,64	-0,40	0,58	1,00	-3,15	-9,27
	21. Itata en General Cruz	-1,04	-0,25	0,38	0,27 *	0,34	0,34	0,10	-1,26
	22. Cato en puente Cato	-0,33	0,29	0,16	0,30 *	0,25 *	0,08	-0,65 +	-0,32
	23. Ñuble en San Fabián	-0,60	-0,41	-1,76	-0,69	-0,43	-0,24	-1,01 *	-1,62
	24. Ñuble en La Punilla	-1,09	-1,53	-1,85	-0,68	-0,46	-0,42	-0,91 **	-1,56 +
	25. Diguillín en Longitudinal	-1,14	-0,43	0,15	0,15 +	0,16 +	0,17 +	-0,25	-1,12
	26. Diguillín en San Lorenzo	0,07	0,14	0,11	0,05	-0,01	-0,02	-0,13 +	-0,22
BIOBÍO	27. Biobío en Desembocadura	-4,61	-4,80	-4,22	7,06	3,96 +	5,76 *	-7,10	-1,11
	28. Biobío en Rucalhue	-9,32	-7,78	-4,65	2,85	2,27	2,60	-0,67	-10,03
	29. Laja en puente Perales	-4,69 +	-2,92 +	-0,72	-2,23 +	-1,99	-1,89	-3,59 *	-2,06
	30. Mininco en Longitudinal	-0,27	-0,07	0,03	0,02	0,03	0,04	-0,01	-0,26
IMPERIAL	31. Cautín en Almagro	0,15	3,93	-0,41	0,37	1,36	1,94 *	-0,19	-0,75
	32. Cautín en Cajón	-2,94	-0,82	0,19	0,04	-0,32	-0,16	-0,82	-3,56 *
	33. Cautín en Rari Ruca	-1,03	-0,24	-0,94	-0,42	-0,51 *	-0,54 +	-0,83 +	-1,45
	34. Quepe en Quepe	-0,63	-0,05	0,07	0,24	-0,07	0,06	-0,78	-1,13
TOLTÉN	35. Toltén en Teodoro Smith	-6,94	2,07	-5,49	-1,64	-2,15	1,03	-1,44	-2,31
	36. Toltén en Villarica	-2,99	0,39	-1,66	0,71	0,48	0,75	-0,07	-2,50
	37. Donguil en Gorbea	-0,16	-0,07	-0,23	-0,12	-0,01	0,03	-0,10	-0,21
	38. Allipen en Los Laureles	-1,51	-1,39	-1,44	-0,88	-0,79	-0,73	-0,96	-2,79 *
	39. Curaco en Colico	-0,57	0,62	-0,40	0,47	-0,10	0,04	-0,02	-0,06
CALLE CALLE	40. San Pedro en Desagüe lago Riñihue	-3,86	1,33	0,53	1,92	0,70	1,27	0,13	-4,91
BUENO	41. Damas en Tacamo	-0,08	0,01	-0,03	0,01	0,00	0,01	0,00	-0,06
	42. Coihueco antes junta Pichicope	-0,11	0,28	0,25	-0,06	-0,08	-0,14	-0,34	-0,36 +

Nota: Los valores de tendencia negativa se presentan en color rojo y los positivos en color negro.

Nivel de significancia: += 0,1; *= 0,05; **= 0,01; ***= 0,001

Como se observa en la Figura 6, destaca el mes de abril, que es el que presenta el mayor número de estaciones con tendencia a la baja en sus caudales medios (37 estaciones), presentando 8 estaciones con algún nivel de significancia. Octubre presenta 36 estaciones con tendencia a la baja, pero solo 1 significativa. Por su parte, los meses de enero y marzo presentan un mayor número de estaciones con aumento de caudal medio: 22 y 21 estaciones respectivamente, pero solo 5 y 3 estaciones, respectivamente, tienen tendencia significativa.

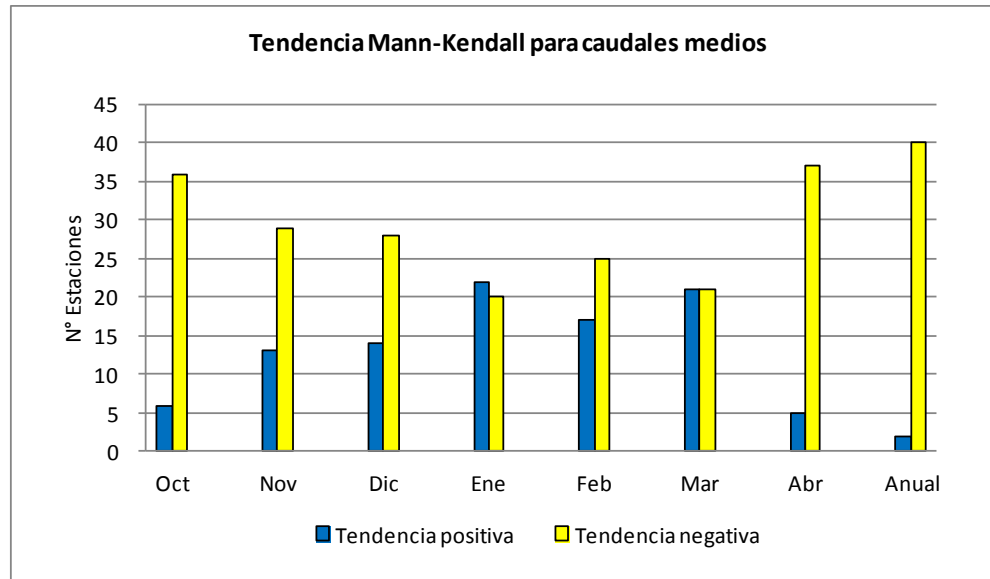


Figura 6. Número de estaciones con tendencia positiva y negativa de los caudales medios a través de Mann –Kendall

En general, no se observa un patrón en el comportamiento de los caudales medios respecto de la ubicación geográfica de las cuencas, solo se puede decir que las estaciones que presentan una mayor magnitud de la pendiente se ubican en el valle central o más cerca de la costa (Figuras 7, 8 y 9), como es el caso de las estaciones 20. *Itata en Coelemu*, 40. *San Pedro en Desagüe lago Riñihue*, 12. *Maule en Longitudinal* y 11. *Maule en Forel*, con valores de $Q = -9,27$; $-4,91$; $-3,79$ y $-3,55$, respectivamente.

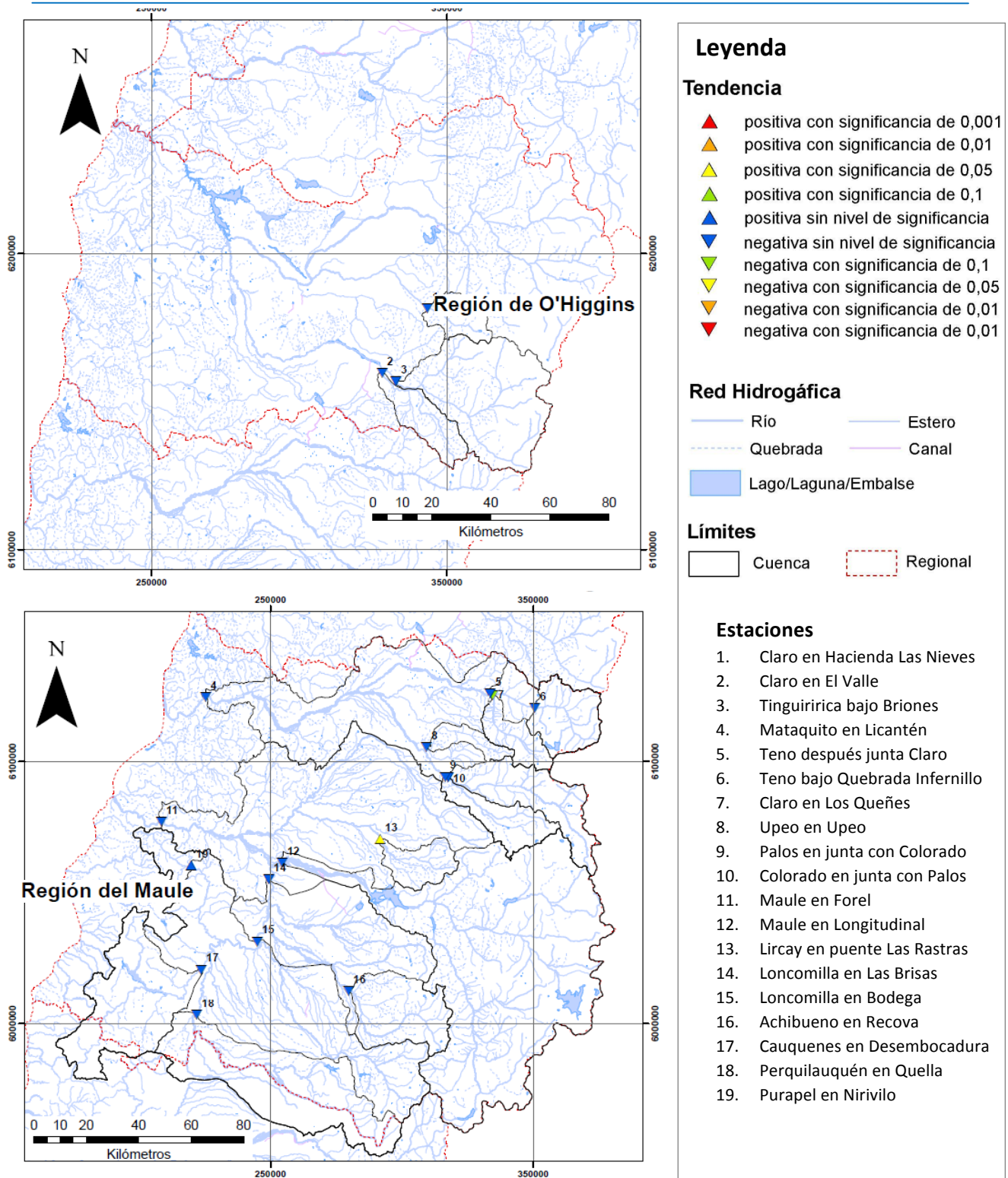


Figura 7. Mapa regional con las tendencias temporales Mann – Kendall para de caudales medios anuales para las regiones de O'Higgins y Maule

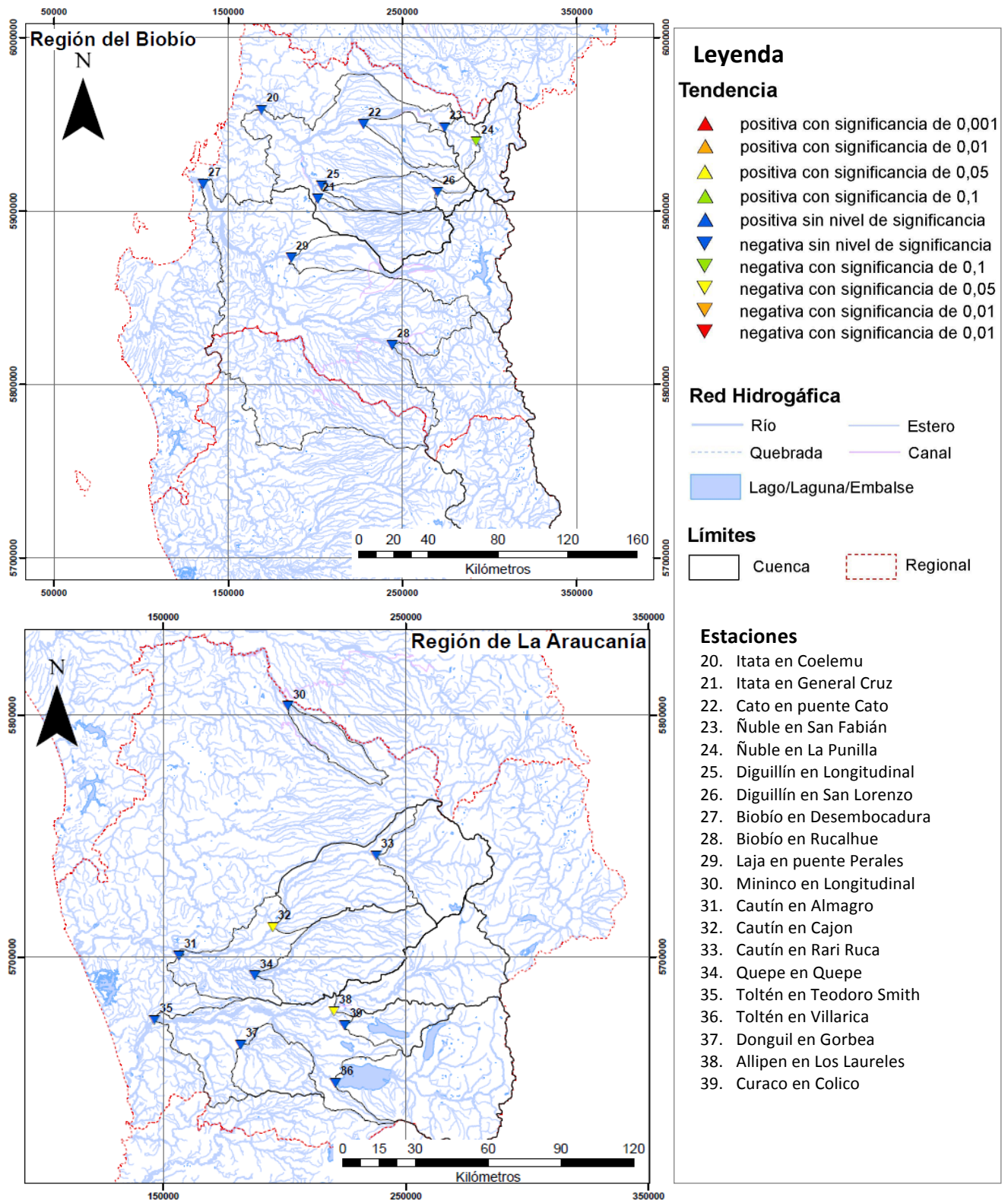


Figura 8. Mapa regional con las tendencias temporales Mann – Kendall para de caudales medios anuales para las regiones del Biobío y La Araucanía

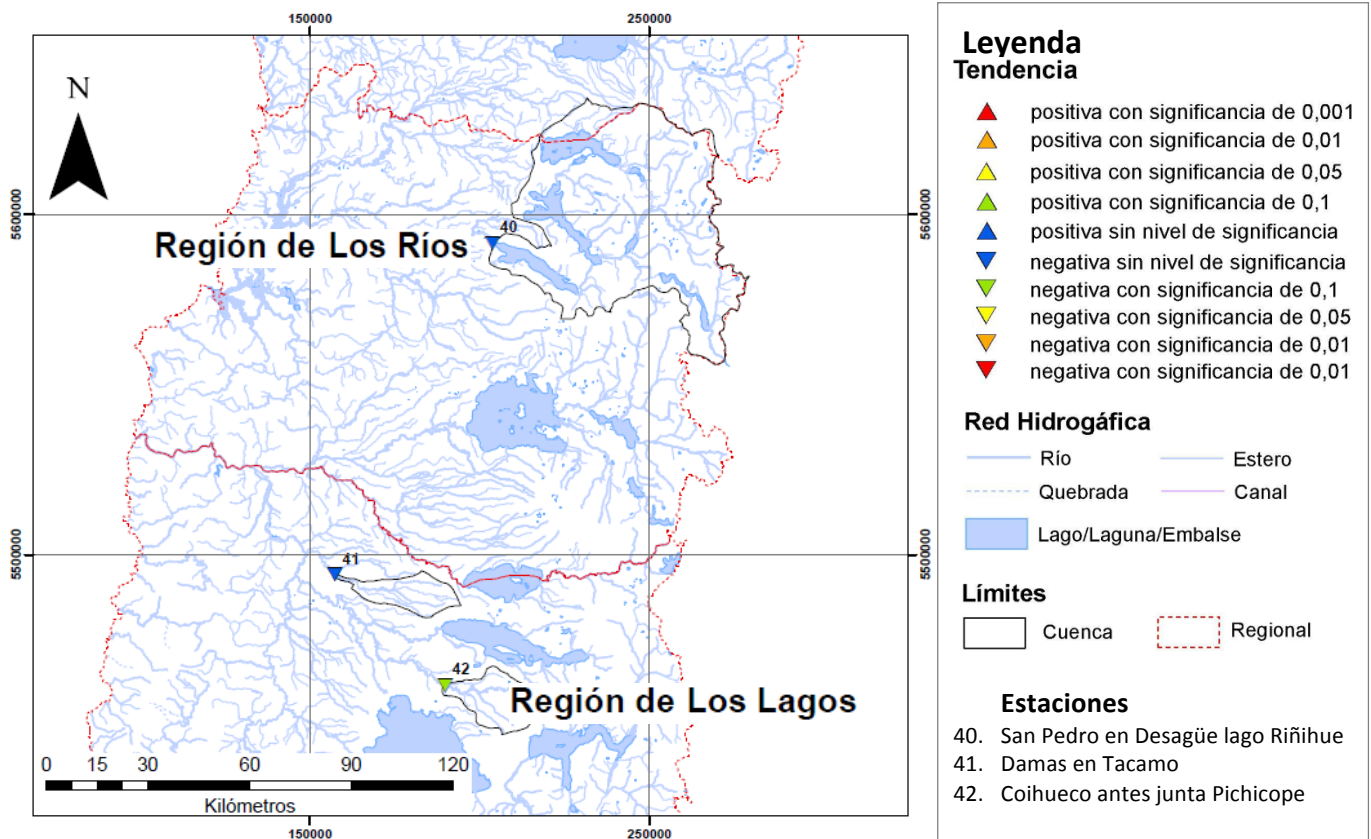


Figura 9. Mapa regional con las tendencias temporales Mann – Kendall para de caudales medios anuales para las regiones de Los Ríos y Los Lagos.

3.6.1.2. Análisis de tendencia Mann – Kendall para caudales punta

Al analizar los caudales punta anuales (Cuadro 7) se observa que 12 estaciones presentan tendencia al aumento en sus valores, mientras que las restantes 30 tienen tendencia a disminuir, pero ninguna de estas tendencias presentan alguna significancia estadística. Destaca la cuenca Rapel que presenta tendencia al aumento de los caudales punta en sus tres estaciones, pero no de manera significativa. Por otra parte, las estaciones con mayor valor de la pendiente son la 11. *Maule en Forel*, 20. *Itata en Coelemu* y 28. *Biobío en Rucalhue*, con valores de Q de -49,0; -37,5 y -32,6, respectivamente.

Cuadro 7. Tendencia (Valores Q) de los caudales máximos (punta) mensuales y anuales para cada estación

Cuenca	Estación	Valor Q (Tendencia)							
		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Anual
RAPEL	1. Claro en Hacienda Las Nieves	0,13	0,47	-0,47	-0,20	-0,14	0,01	-0,70 +	0,14
	2. Claro en El Valle	0,07	0,13	-0,59	-0,16	-0,13 +	-0,05	-0,21	0,39
	3. Tinguiririca bajo Briones	-2,19	-2,91 +	-4,13	-0,41	-0,61	-0,07	-4,13 +	1,15
MATAQUITO	4. Mataquito en Licantén	0,78	1,58	-2,45	-2,09	-0,22	0,29	-7,01 *	-5,10
	5. Teno después junta Claro	4,74 *	-1,99	-4,78	-2,33	-1,41 +	-0,63	-5,69 *	1,01
	6. Teno bajo Quebrada Infernillo	-0,62	-0,75	-2,45	-0,68	-0,86	-0,26	-2,76 +	-1,09
	7. Claro en Los Queñes	-0,03	-0,15	-0,98	-0,42	-0,29 *	-0,18	-3,58 *	-1,42
	8. Upeo en Upeo	0,25	0,08	-0,14	0,03	-0,02	0,01	-0,85 +	-0,43
	9. Palos en junta con Colorado	-0,00	-0,80	-1,68 +	-1,13	-0,76 +	-0,42	-4,06 *	-0,60
10. Colorado en junta con Palos	1,32	-1,38	-2,31	-1,71	-0,76 *	-0,46	-2,90 *	1,34	
MAULE	11. Maule en Forel	-14,16	-25,07	13,16	8,59	-6,03	-3,29	-2,14	-48,99
	12. Maule en Longitudinal	-6,71	-5,95	-4,08	-0,31	-1,22	-3,90	-4,14	-9,05
	13. Lircay en puente Las Rastras	3,45 *	1,52 *	1,52 *	0,67 *	0,63 *	0,44 +	-1,43	2,81
	14. Loncomilla en Las Brisas	4,04	2,88	3,26	1,32	-0,05	1,29	-4,76	-17,94
	15. Loncomilla en Bodega	0,43	0,83	1,01	0,22	-0,37	-0,05	-5,02 *	-8,67
	16. Achibueno en Recova	-0,28	1,38	-0,64	-0,13	-0,16	-0,20	-8,77 +	0,69
	17. Cauquenes en Desembocadura	-0,01	0,12	0,05	0,08 *	0,06 +	0,04	-0,01	-0,63
	18. Perquillauquén en Quella	-0,26	0,56	1,94 +	1,20 *	0,79 *	0,64	-1,41	-1,80
	19. Purapel en Nirivilo	0,06	0,02	-0,01	-0,00	0,00	0,00	-0,04	0,53
ITATA	20. Itata en Coelemu	-6,31	-5,27	0,60	0,34	1,22	0,40	-21,58	-37,51
	21. Itata en General Cruz	-1,95	0,56	0,93	0,49 *	0,59	0,27	-2,59 +	-4,61
	22. Cato en puente Cato	-0,55	-0,41	-0,25	0,22	0,18 +	0,11	-5,14 *	-6,55
	23. Ñuble en San Fabián	-0,40	2,19	-1,62	-0,78	-0,22	-0,19	-5,92 *	-5,63
	24. Ñuble en La Punilla	-1,17	0,17	-1,18	-0,37	-0,21	-0,53	-4,07 **	-4,00
	25. Diguillín en Longitudinal	-0,58	-0,35	0,12	0,11	0,14	0,04	-1,63 *	-5,86
26. Diguillín en San Lorenzo	0,45	0,28	0,45	0,20	0,27	-0,04	-1,33 +	-1,21	
BIOBÍO	27. Biobío en Desembocadura	-15,62	-7,11	-2,05	12,66	12,22 *	14,87 +	-35,24	-15,55
	28. Biobío en Rucalhue	-18,38	-10,37	-0,25	11,94 +	13,08 **	11,13	-23,36	-32,59
	29. Laja en puente Perales	-4,60	-4,31	-0,79	-2,41	-3,13 +	-2,79 +	-9,75 *	-1,09
	30. Mininco en Longitudinal	-0,54	-0,10	-0,15	0,01	0,00	0,01	-0,22 +	-0,98
IMPERIAL	31. Cautín en Almagro	1,79	6,81	2,65	2,72 +	3,40	4,17	-2,95	2,22
	32. Cautín en Cajón	-4,28	-1,87	-0,79	1,96	-0,34	-0,26	-3,86	-10,39
	33. Cautín en Rari Ruca	-2,33	0,16	-1,17	1,93	0,15	-0,75	-2,10	-0,23
	34. Quepe en Quepe	-0,70	1,25	0,70	0,51	0,02	-0,40	-2,88	-3,04
TOLTÉN	35. Toltén en Teodoro Smith	-0,83	10,62	-0,83	0,75	-1,44	-0,01	-6,39	13,47
	36. Toltén en Villarrica	-1,03	0,64	-1,93	0,34	-0,17	0,99	-0,97	-0,43
	37. Donguil en Gorbea	-0,19	0,45	-0,69	-0,13	-0,15	0,10	-0,60 +	1,32
	38. Allipen en Los Laureles	-3,26	-1,23	-2,00	0,60	-1,22	-0,21	-4,47	-4,81
	39. Curaco en Colico	-0,51	2,33	0,43	0,82	-0,20	0,01	-0,13	-0,92
CALLE CALLE	40. San Pedro en Desagüe lago Riñihue	-1,18	2,77	2,67	3,83	0,90	2,04	0,72	-5,38
BUENO	41. Damas en Tacamo	-0,35	-0,02	-0,11	0,06	0,01	-0,01	-0,11	0,26
	42. Coihueco antes junta Pichicope	0,43	2,81	2,16	1,41	0,91	0,18	-1,70	-1,12

Nota: Los valores negativos de tendencia se presentan en color rojo y los positivos en color negro.

Nivel de significancia: += 0,1; *= 0,05; **= 0,01; ***= 0,001

En términos espaciales, destacan las estaciones 5. *Teno después junta Claro* y 7. *Claro en Los Queñes*, en que la segunda es una subcuenca de la primera. A pesar de la corta distancia que las separa (1,4 km), los caudales punta presentan diferencias en su tendencia. Mientras la estación 7. *Claro en Los Queñes* presenta una tendencia negativa, la estación 5. *Teno después junta Claro* ubicada aguas abajo de la anterior, presenta una tendencia positiva, es decir, los caudales anuales punta han aumentado. Esto indica que la segunda subcuenca que drena a la estación tendría mayor influencia (Figura 11).

Por otra parte, las estaciones 9. *Palos en junta con Colorado* y 10. *Colorado en junta con Palos*, que también son contiguas (separadas por 1,2 km) pero independientes, las estaciones poseen distinta tendencia. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de incorporar otras variables al análisis, tales como factor climático, acumulación de nieves y hielos y el uso del suelo, entre otras.

A nivel mensual solo 6 estaciones presentan tendencia a la disminución del caudal punta en todos los meses, a saber, 3. *Tinguiririca en Bajo Briones*, 6. *Teno bajo Quebrada Infernillo*, 7. *Claro en Los Queñes*, 9. *Palos en junta con Colorado*, 12. *Maule en Longitudinal* y 29. *Laja en puente Perales*, pero solo en algunos meses esta tendencia es significativa.

Del cuadro 7 también se desprende que de las 294 series mensuales, alrededor del 60% presentan tendencia negativa, aunque de este porcentaje, sólo 30 tienen tendencia significativa, mientras que de las restantes series con tendencias positivas, 19 son las que presentan algún nivel de significancia. Asimismo, los meses de enero y noviembre presentan el mayor número de estaciones con tendencia a aumentar los caudales punta (Figura 10), mientras que en el mes de abril, prácticamente en todas las estaciones se registra una disminución de los caudales punta, excepto en la estación de 40. *San Pedro en Desagüe lago Riñihue*.

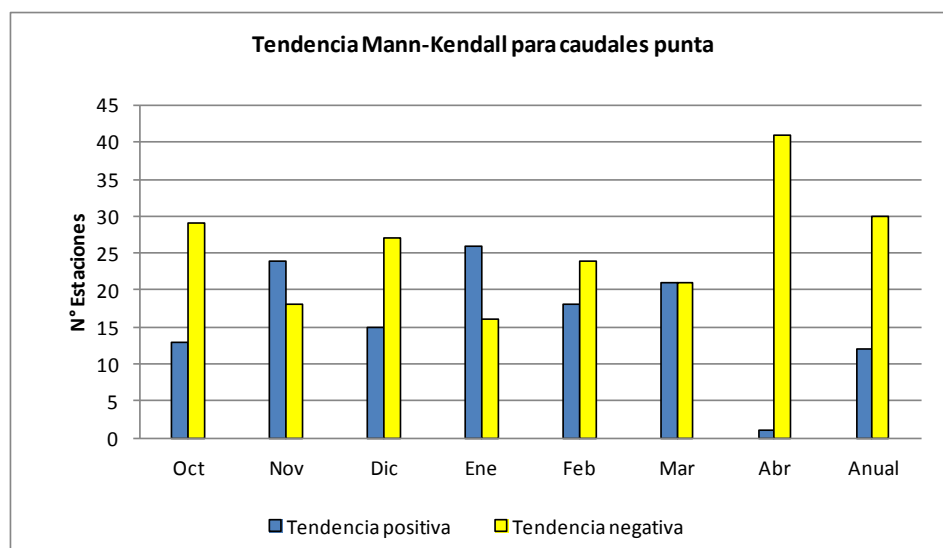


Figura 10. Número de estaciones con tendencia positiva y negativa de los caudales punta a través de Mann -Kendall

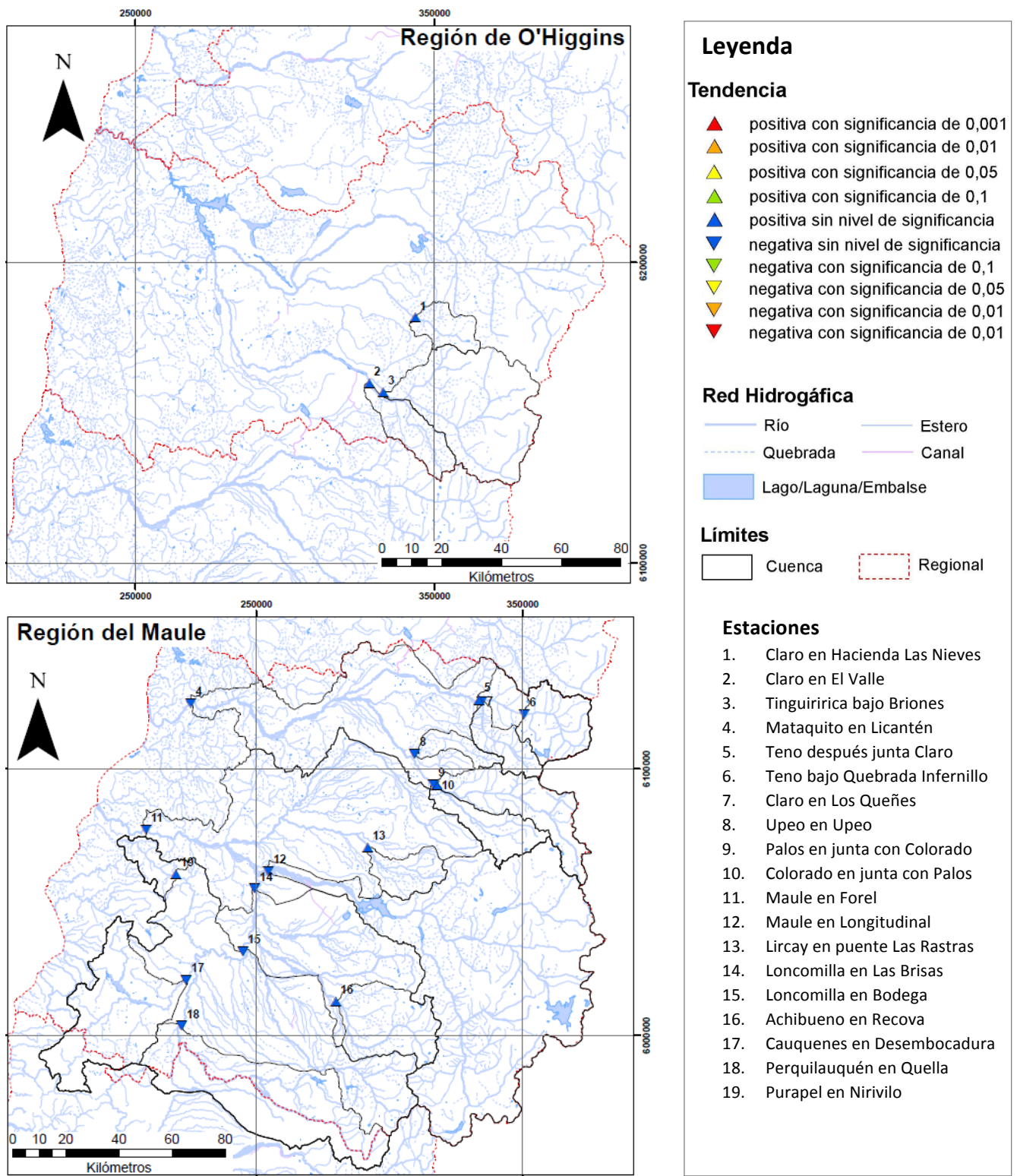


Figura 11. Mapa regional con las tendencias temporales Mann – Kendall para de caudales punta anuales para las regiones de O'Higgins y Maule

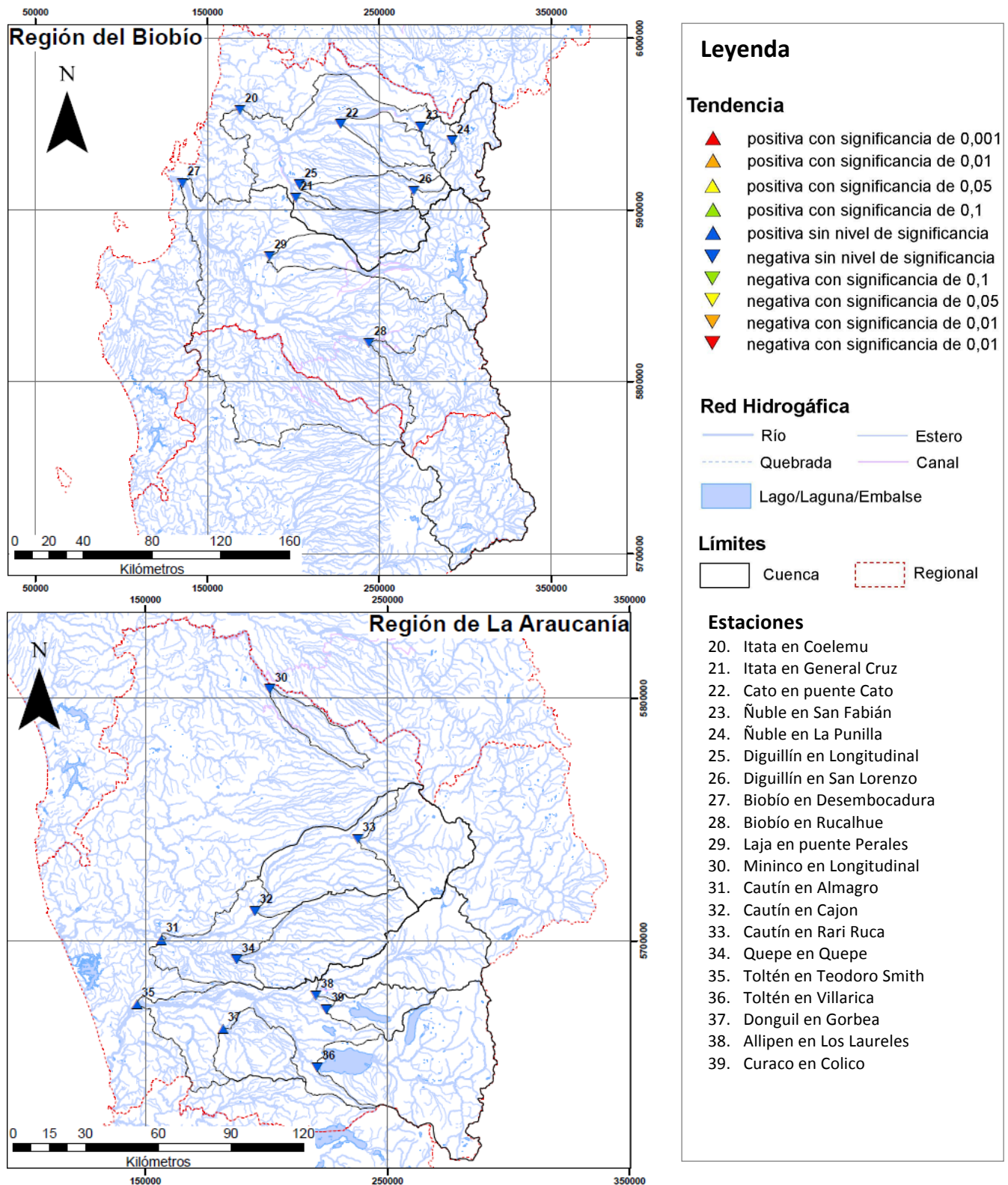


Figura 12. Mapa regional con las tendencias temporales Mann – Kendall para de caudales punta anuales para las regiones del Biobío y La Araucanía

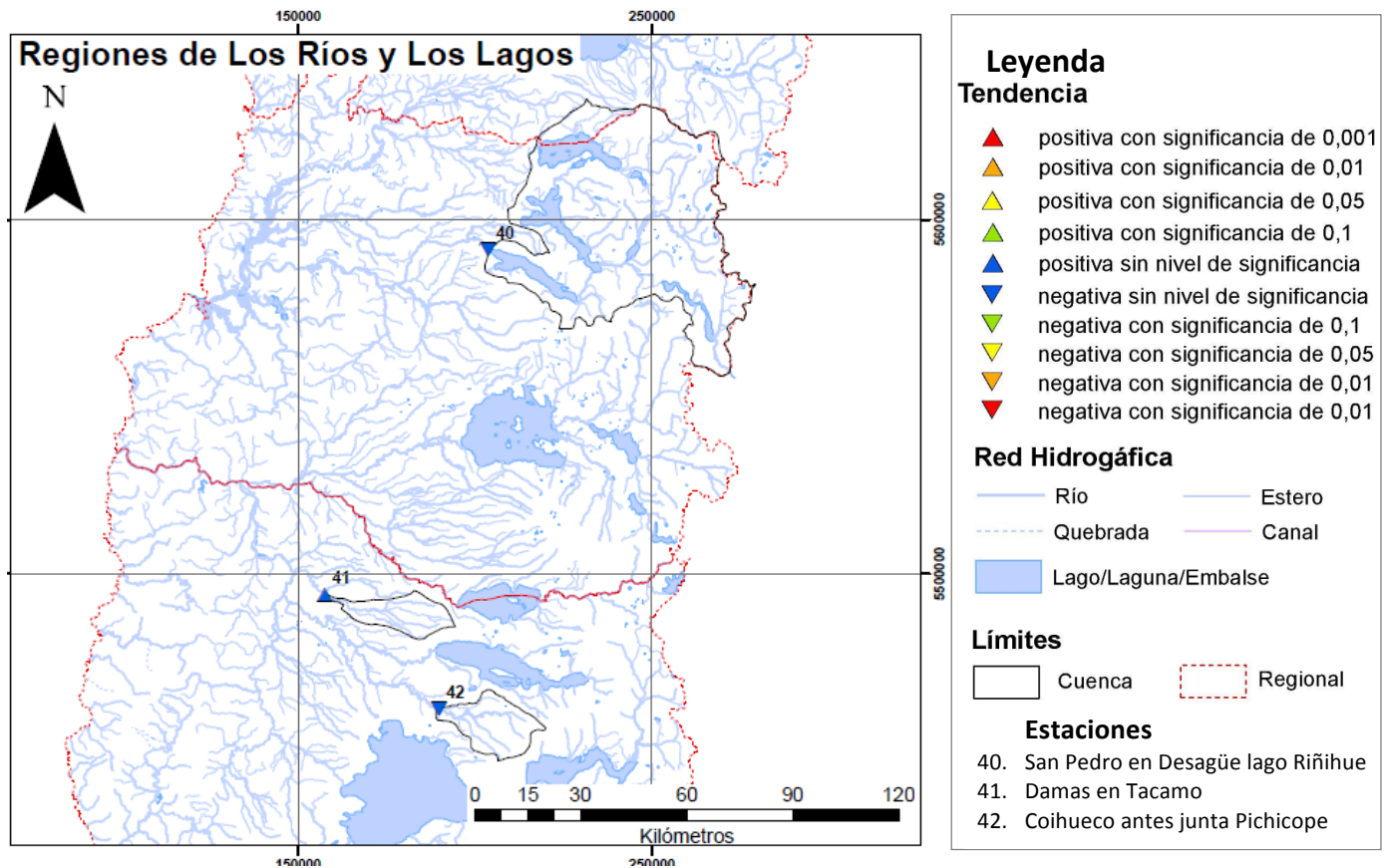


Figura 13. Mapa regional con las tendencias temporales Mann – Kendall para de caudales punta anuales para las regiones de Los Ríos y Los Lagos

3.6.2. Análisis temporal a través de la comparación entre 2 Periodos

Como ya se mencionó, este análisis se realizó para las 25 estaciones con más de 40 años de registro. En el siguiente cuadro se muestran las estaciones seleccionadas.

Cuadro 8. Estaciones utilizadas en el análisis Comparación entre 2 periodos

Cuenca	Estación
Rapel	Río Claro en hacienda Las Nieves Río Claro en El Valle
Mataquito	Río Teno después junta con Claro Estero Upeo en Upeo Río Palos en junta con Colorado Río Colorado en junta con Palos
Maule	Río Maule en Longitudinal Río Lircay en Las Rastras Río Loncomilla en Bodega Río Pequilauquén en Quella Río Purapel en Nirivilo
Itata	Río Itata en General Cruz Río Cato en pte. Cato Río Ñuble en San Fabián Río Ñuble en La Punilla Río Diguillín en San Lorenzo
Biobío	Río Biobío en Desembocadura Río Biobío en Rucalhue Río Laja en pte. Perales Río Mininco en Longitudinal
Imperial	Río Cautín en Cajon Río Cautín en Rari-Ruca Río Quepe en Quepe
Toltén	Río Toltén en Villarica Río Allipén en Los Laureles

3.6.2.1. Ajuste de las series a funciones de distribución de probabilidad

La función de distribución de probabilidad (fdp) Gumbel ajustó para la gran mayoría de las series de datos (tanto mensuales y anuales). Del total de 800 series ajustadas, sólo 4 no ajustaron con dicha fdp tras realizar el test de Kolmogorov-Smirnov, por lo que fue necesario probar con otras fdp. De esta forma, las series de caudal medio para los meses enero, febrero y marzo del periodo 1973 – 1993 de la estación Purapel en Nirivilo se ajustaron con fdp de Goodrich y la serie de caudal punta correspondiente al mes de febrero del periodo 1993 – 2013 de la estación Upeo en Upeo se ajustó con fdp Lognormal. Cabe destacar esta última estación que presenta un valor bastante fuera de lo común para su serie histórica, ocurrido en febrero de 1999, valor que causó dificultades para ajustar la serie. No obstante, este valor fue confirmado con la fuente (Dirección General de Aguas) quienes corroboraron que durante ese mes ocurrió un alza de temperatura importante, modificando la isoterma cero y provocando un excesivo aumento de caudal.

Posteriormente, se obtuvieron los valores del caudal medio y del caudal instantáneo máximo para un periodo de retorno de 20 años, esto para cada mes y para cada año de ambos periodos de cada estación (Anexo 2).

3.6.2.2. Comparación entre 2 periodos

3.6.2.2.1. Comparación entre 2 periodos para caudales medios

A continuación se presentan las tendencias de cada serie de caudal medio analizada reflejada en la diferencia porcentual entre los 2 periodos.

De esta forma, una diferencia porcentual positiva indica una tendencia positiva y viceversa. Estas diferencias porcentuales fueron graficadas para cada mes como se muestra en la figuras 14 y 15.

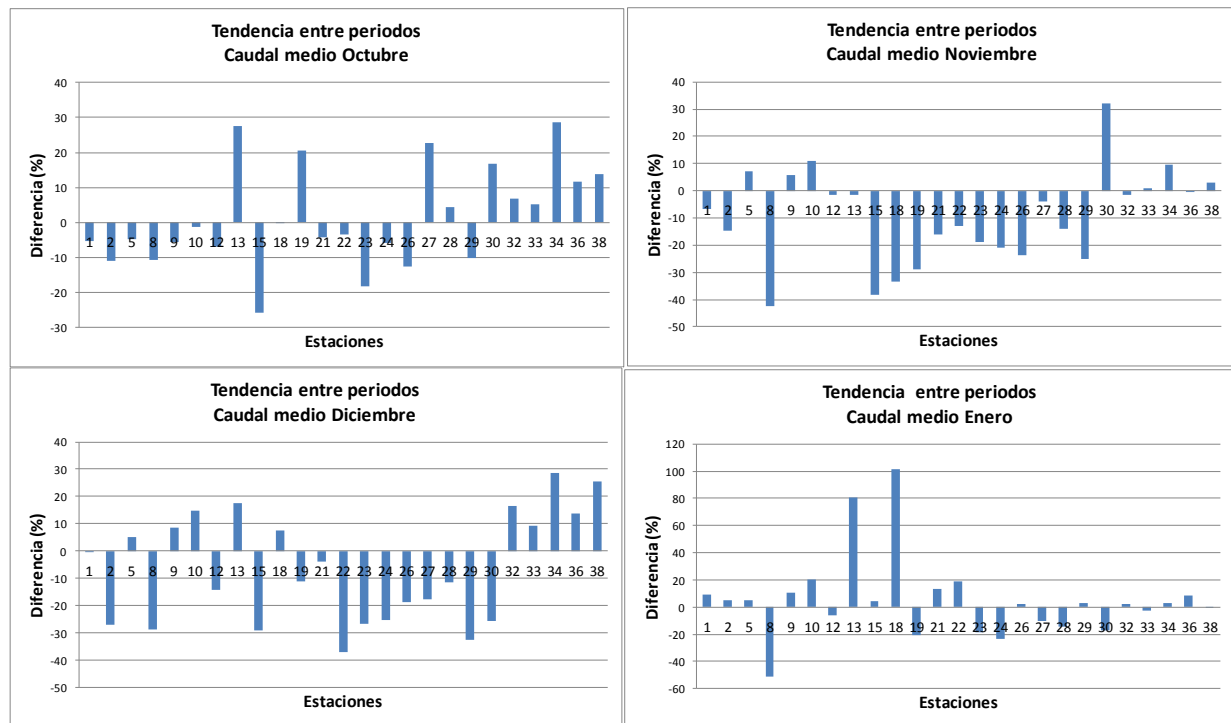


Figura 14. Gráficos de diferencia porcentual de caudales medio entre los periodos definidos para los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero. *Estaciones:* 1. Río Claro en hacienda Las Nieves; 2. Río Claro en El Valle; 5. Río Teno después junta con Claro; 8. Estero Upeo en Upeo; 9. Río Palos en junta con Colorado; 10. Río Colorado en junta con Palos; 12. Río Maule en Longitudinal; 13. Río Lircay en Las Rastras; 15. Río Loncomilla en Bodega; 18. Río Perquilauquén en Quella; 19. Río Purapel en Nirivilo; 21. Río Itata en General Cruz; 22. Río Cato en pte. Cato; 23. Río Ñuble en San Fabián; 24. Río Ñuble en La Punilla; 26. Río Diguillín en San Lorenzo; 27. Río Biobío en Desembocadura; 28. Río Biobío en Rucalhue; 29. Río Laja en pte. Perales; 30. Río Mininco en Longitudinal; 32. Río Cautín en Cajón; 33. Río Cautín en Rari-Ruca; 34. Río Quepe en Quepe; 36. Río Toltén en Villarica; 38. Río Allipén en Los Laureles.

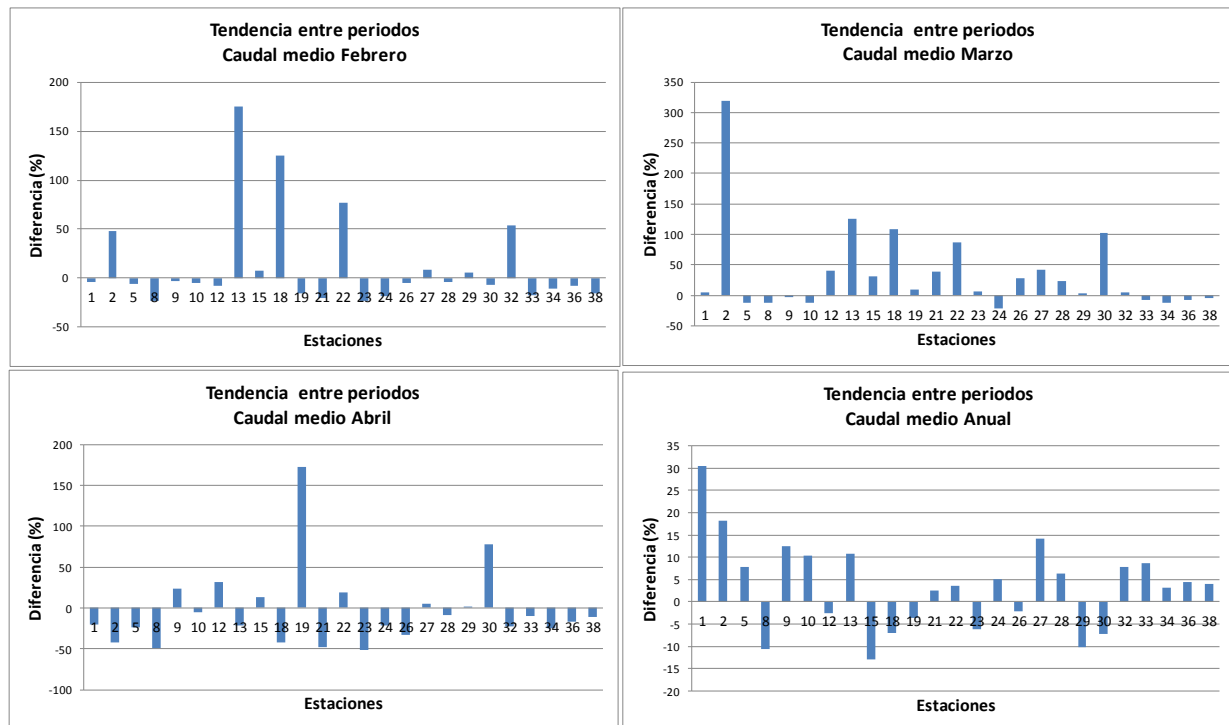


Figura 15. Gráficos de diferencia porcentual de caudales medio entre los periodos definidos para los meses de febrero, marzo, abril y el periodo anual. Estaciones: 1. Río Claro en hacienda Las Nieves; 2. Río Claro en El Valle; 5. Río Teno después junta con Claro; 8. Estero Upeo en Upeo; 9. Río Palos en junta con Colorado; 10. Río Colorado en junta con Palos; 12. Río Maule en Longitudinal; 13. Río Lircay en Las Rastras; 15. Río Loncomilla en Bodega; 18. Río Perquilauquén en Quella; 19. Río Purapel en Nirivilo; 21. Río Itata en General Cruz; 22. Río Cato en pte. Cato; 23. Río Ñuble en San Fabián; 24. Río Ñuble en La Punilla; 26. Río Diguillín en San Lorenzo; 27. Río Biobío en Desembocadura; 28. Río Biobío en Rucalhue; 29. Río Laja en pte. Perales; 30. Río Mininco en Longitudinal; 32. Río Cautín en Cajón; 33. Río Cautín en Rari-Ruca; 34. Río Quepe en Quepe; 36. Río Toltén en Villarica; 38. Río Allipén en Los Laureles.

Como se aprecia en las figuras anteriores, la mayor variación positiva ocurre en el mes de marzo en la estación 2. *Río Claro en el Valle*, donde supera el 300%, es decir, que en el segundo periodo (el más reciente) el caudal medio aumentó sobre 300% con respecto al primer periodo. Su extremo opuesto es el mes de abril en la estación 23. *Río Ñuble en San Fabián*, con una variación negativa de 51,3%.

A nivel mensual, de las 175 series analizadas, 76 (43,4%) muestran una variación positiva al comparar ambos periodos, en donde los meses que tienen más series positivas son enero y marzo, con 16 cada uno. En cuanto a las series que tienen variaciones negativas, destacan las de los meses de noviembre y abril, con 18 y 17 series, respectivamente. Lo anterior puede apreciarse con mayor detalle en la Figura 16.

En términos anuales, 16 estaciones presentan tendencia al aumento de los caudales medios (lo que equivale al 64%), mientras que 9 estaciones (el 36 %) disminuyen su caudal. Como se observa en las figuras 14 y 15, no existe un patrón claro del comportamiento en el tiempo de los caudales medios para las estaciones analizadas.

A nivel de cuenca, destacan las cuencas del Mataquito, Itata y Toltén, que presentan 3 meses con disminución del caudal medio en todas sus estaciones.

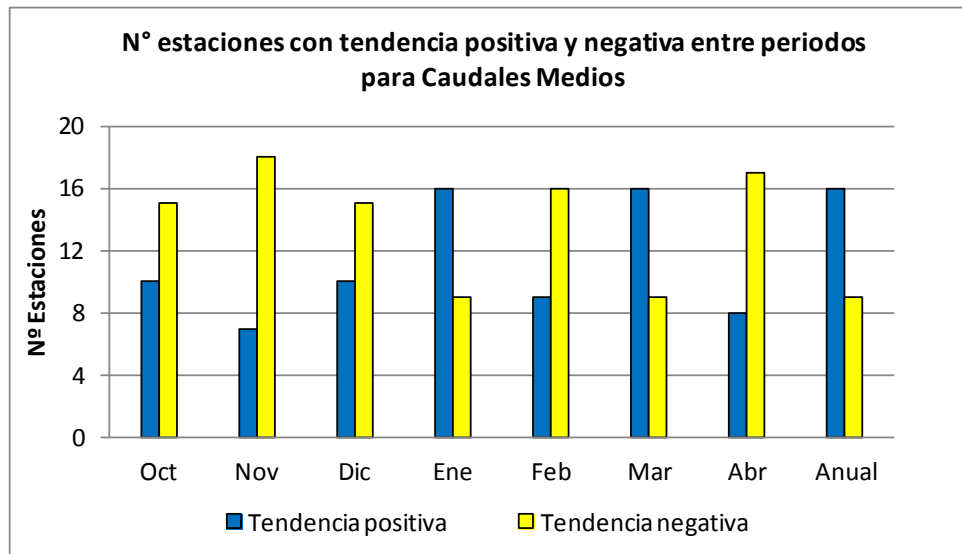


Figura 16. Número de estaciones con diferencias porcentuales positivas y negativas para cada mes y anual de caudales medios.

3.6.2.2.2. Comparación entre 2 periodos para series de caudal punta.

A continuación se presentan las tendencias de cada serie de caudal medio analizada reflejada en la diferencia porcentual entre los 2 periodos.

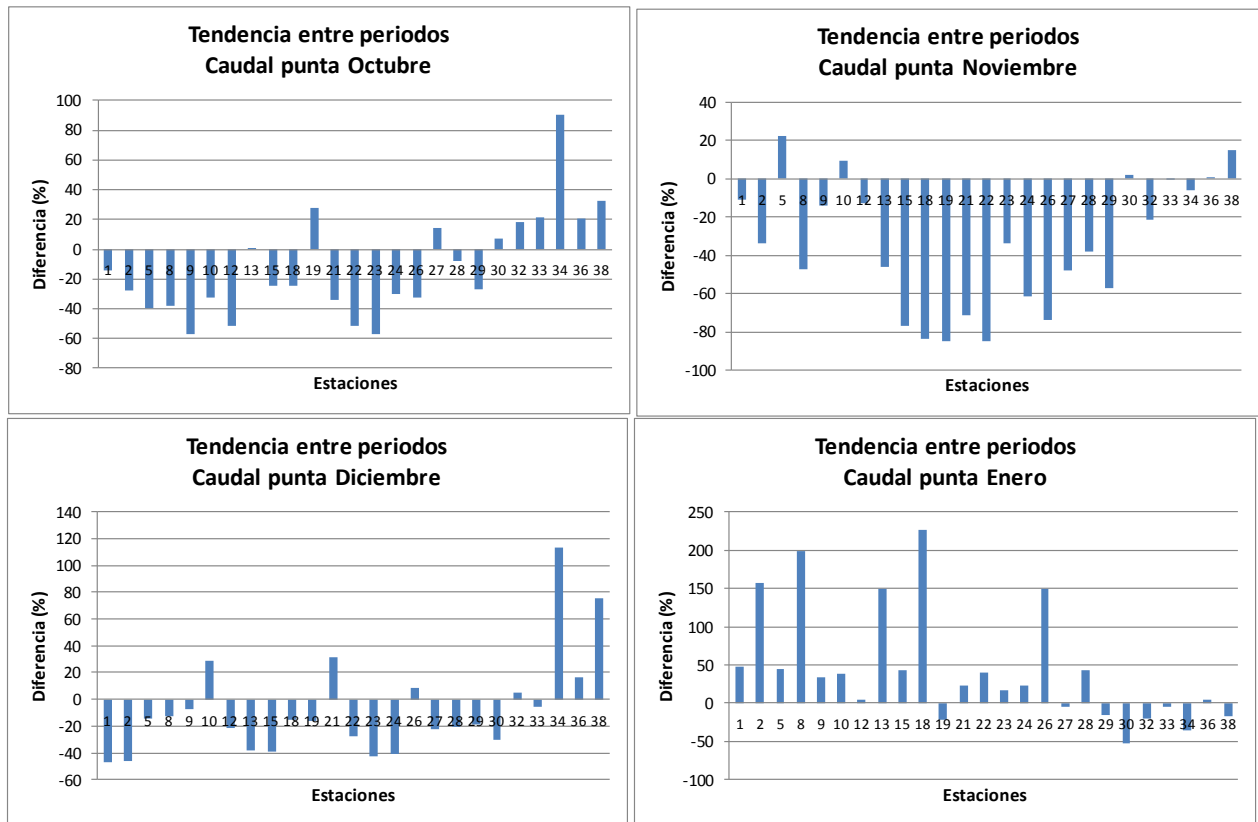


Figura 17. Gráficos de diferencia porcentual de caudales punta entre los periodos definidos para los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero. Estaciones: 1. Río Claro en hacienda Las Nieves; 2. Río Claro en El Valle; 5. Río Teno después junta con Claro; 8. Estero Upeo en Upeo; 9. Río Palos en junta con Colorado; 10. Río Colorado en junta con Palos; 12. Río Maule en Longitudinal; 13. Río Lircay en Las Rastras; 15. Río Loncomilla en Bodega; 18. Río Perquilauquén en Quella; 19. Río Purapel en Nirivilo; 21. Río Itata en General Cruz; 22. Río Cato en pte. Cato; 23. Río Ñuble en San Fabián; 24. Río Ñuble en La Punilla; 26. Río Diguillín en San Lorenzo; 27. Río Biobío en Desembocadura; 28. Río Biobío en Rucalhue; 29. Río Laja en pte. Perales; 30. Río Mininco en Longitudinal; 32. Río Cautín en Cajón; 33. Río Cautín en Rari-Ruca; 34. Río Quepe en Quepe; 36. Río Tolten en Villarica; 38. Río Allipén en Los Laureles.

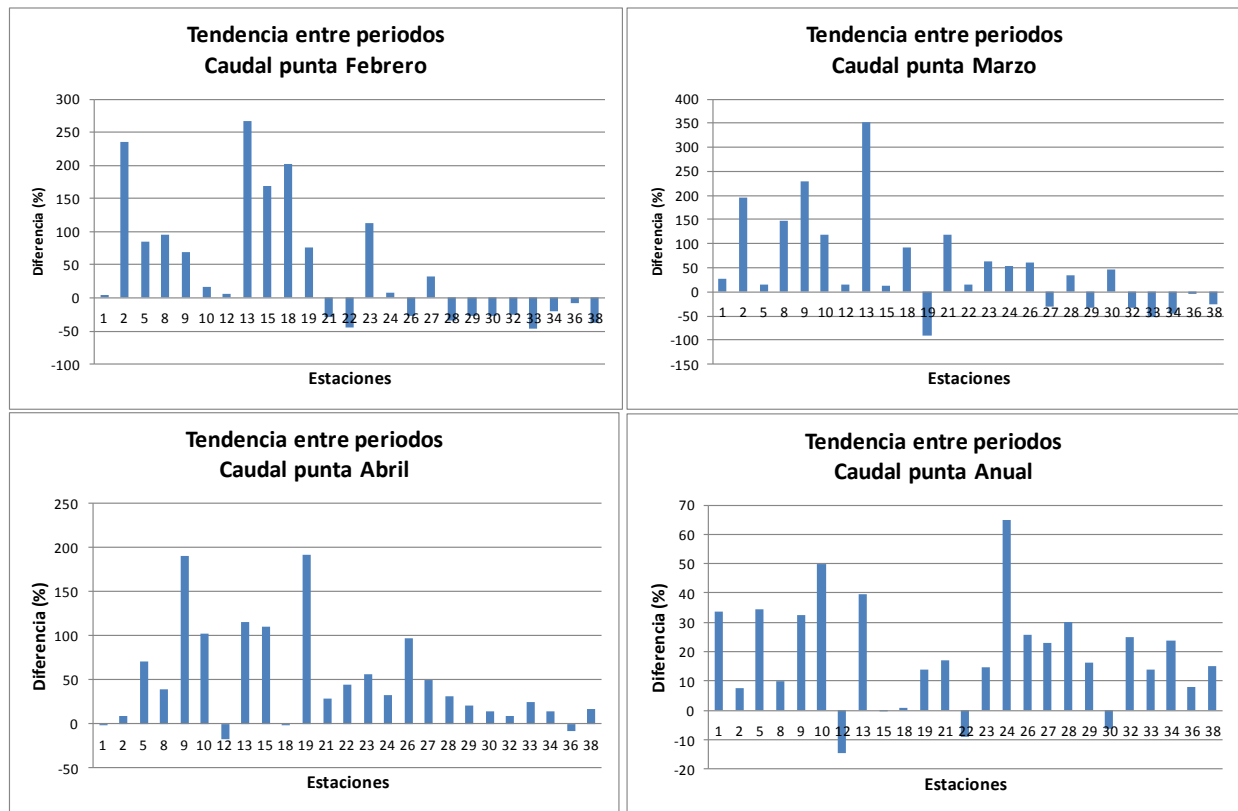


Figura 18. Gráficos de diferencia porcentual de caudales punta entre los periodos definidos para los meses de febrero, marzo, abril y el periodo anual. *Estaciones: 1. Río Claro en hacienda Las Nieves; 2. Río Claro en El Valle; 5. Río Teno después junta con Claro; 8. Estero Upeo en Upeo; 9. Río Palos en junta con Colorado; 10. Río Colorado en junta con Palos; 12. Río Maule en Longitudinal; 13. Río Lircay en Las Rastras; 15. Río Loncomilla en Bodega; 18. Río Perquillauquén en Quella; 19. Río Purapel en Nirivilo; 21. Río Itata en General Cruz; 22. Río Cato en pte. Cato; 23. Río Ñuble en San Fabián; 24. Río Ñuble en La Punilla; 26. Río Diguillín en San Lorenzo; 27. Río Biobío en Desembocadura; 28. Río Biobío en Rucalhue; 29. Río Laja en pte. Perales; 30. Río Mininco en Longitudinal; 32. Río Cautín en Cajón; 33. Río Cautín en Rari-Ruca; 34. Río Quepe en Quepe; 36. Río Tolten en Villarica; 38. Río Allipén en Los Laureles.*

En la figuras 17 y 18 se puede observar que la mayor variación positiva ocurre en el mes de marzo en la estación 13. *Río Lircay en Las Rastras*, donde esta variación supera el 300%. A su vez, su contraparte ocurre en el mes de noviembre en las estaciones 18. *Río Perquillauquén en Quella*, 19. *Río Purapel en Nirivilo* y 22. *Río Cato en Puente Cato*, con un valor negativo menor al -80%. En términos anuales, 21 estaciones presentan una variación positiva mensual (84%), mientras que sólo 4 (16%) tienen variación negativa (Figura 19).

De las 175 series analizadas, 90 (51,4%) presentan una diferencia entre periodos de tipo positivo, en donde el mes de abril es el que presenta la mayor cantidad de series con diferencia positiva (21) y le siguen los meses de enero y marzo con 17 series positivas cada uno. En cuanto al

mes que presenta la mayor cantidad de diferencias negativas, este es noviembre con 20 series, siguiéndole diciembre con 18 (Figura 19).

A nivel de cuencas, se destacan las cuencas Rapel, Mataquito, Maule, Itata y Biobío, las que presentan una disminución del caudal punta en prácticamente todas sus estaciones en los meses octubre, noviembre y diciembre. Por otra parte, estas mismas cuencas excepto la del Biobío, presenta un aumento del caudal punta en los meses desde enero hasta abril.

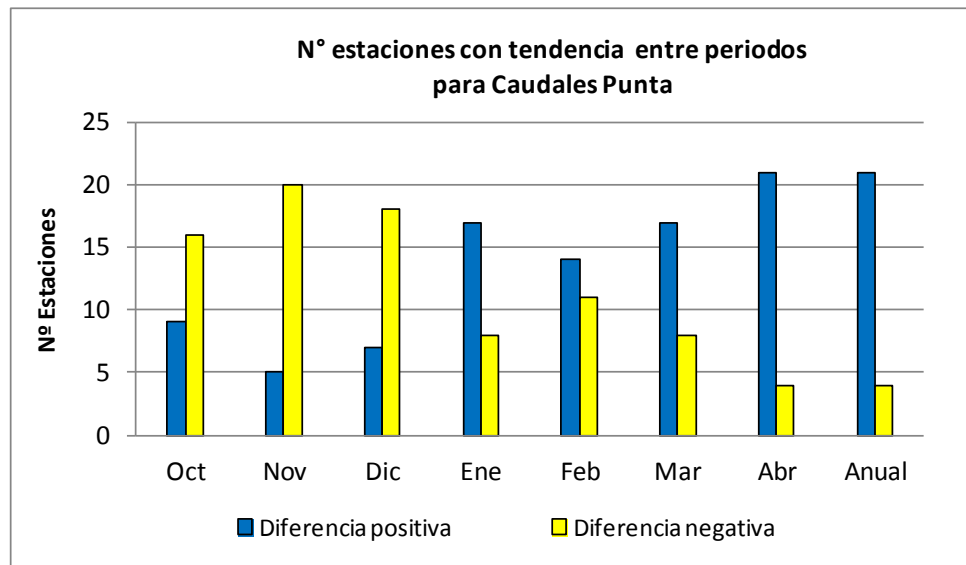


Figura 19. Número de estaciones con tendencia positivas y negativas para cada mes y anual de los caudales punta o máximo.

3.6.3. Resumen del análisis de tendencia de caudales

El análisis de los caudales medios presentó una mayor tendencia a disminuir en ambos métodos, no obstante esta tendencia no es significativa en el método de Mann - Kendall y en el segundo método, tampoco es concluyente. Similar situación se presenta en el análisis de los caudales punta, como se observa en los cuadros 9 y 10.

Cuadro 9. Resumen de análisis temporal de para caudal medio y punta a nivel mensual utilizando el método de Mann y Kendall y el de Comparación entre periodos

Mann y Kendall				
	Caudal medio mensual	Tendencia significativa	Caudal Punta mensual	Tendencia significativa
Nº series con tendencia positiva	98 (33%)	15	118 (40%)	19
Nº series con tendencia negativa	196 (67%)	16	176 (60%)	30
Total de series	294	31	294	49
Comparación entre 2 Periodos				
	Caudal medio mensual		Caudal Punta mensual	
Nº series con tendencia positiva	76 (43%)		90 (51%)	
Nº series con tendencia negativa	99 (57%)		85 (49%)	
Total de series	125		125	

Como se observa en el cuadro anterior, 98 series de datos analizadas para caudal medio mensuales tienden a la baja, pero sólo 16 de ellas son significativas (5,4%). Y de las que tienden al alza, sólo 15 son significativas (5,1%), lo que conlleva a que la proporción entre las que tienen algún nivel de significancia es prácticamente la misma, pero puede desbalancearse en los próximos años.

En relación a los caudales punta mensuales, 176 series de datos (alrededor del 60%) tienden a la baja, de las cuales 30 (10,2%) son significativas. En cuanto a las que tienden al alza, 6,5% (19 series) son significativas, por lo tanto, la proporción en este caso es casi 1:2.

El mes de enero es el que presenta el mayor número de tendencias positivas; a su vez; el mes de abril es el que presenta la mayor cantidad de tendencias negativas. Lo primero puede deberse al derretimiento glacial, mientras que lo segundo puede deberse a que ese mes marca el término y el inicio del año hidrológico.

A analizar las series anuales para caudal medio a través de Mann – Kendall, la cantidad de series con tendencia negativa supera ampliamente a las que tienen tendencia positiva, pero pocas son significativas (solo 6 de 42).

En cuanto a los caudales punta (cuadro 9), ninguna tendencia tiene significancia estadística usando Mann - Kendall, mientras que usando el método de comparación entre periodos, el número de estaciones con tendencia al alza es bastante mayor a las que tienen tendencia a la baja. No obstante, es necesario realizar otros análisis para determinar si estas tendencias tienen significancia.

Cuadro 10. Resumen de análisis temporal de para caudal medio y punta a nivel anual utilizando el método de Mann y Kendall y el de Comparación entre periodos

Mann y Kendall				
	Caudal medio Anual	Tendencia significativa	Caudal Punta Anual	Tendencia significativa
Nº estaciones con tendencia positiva	2 (5%)	1	12 (29%)	0
Nº series con tendencia negativa	40 (95%)	5	30 (71%)	0
Total de estaciones	42	6	42	0
Comparación entre 2 Periodos				
	Caudal medio Anual	Caudal Punta Anual		
Nº estaciones con tendencia positiva	16 (64%)	21 (84%)		
Nº series con tendencia negativa	9 (36%)	4 (16%)		
Total de estaciones	25	25		

Cabe recordar que ambos métodos utilizan distintos periodos de tiempo y distintas estaciones: mientras que Mann - Kendall se ejecutó para las 42 estaciones considerando 20 años de registro, el método de comparación entre periodos solo analizó 25 estaciones pero con 40 años de registro. De ahí que se requiere de un análisis mayor para obtener resultados más concluyentes.

La variable caudal punta es muy sensible a situaciones específicas, tales como ocurrencia de lluvias intensas y alzas de temperatura que favorece el derretimiento de nieves y glaciares, por lo que es esperable que tenga mayor variación en su comportamiento. Por su parte, los caudales medios tienen menores variaciones ya que dependerían de las lluvias de menor intensidad, del uso de la cuenca, de los tipos de cultivos presentes en la cuenca y de las demandas existentes de parte de distintos tipos de usuarios. Por lo que es relevante incluir otras variables al análisis de los caudales.

3.7. Análisis de la Relación de Cobertura Vegetal vs Tendencia Mann Kendall

Se construyeron gráficos que muestran el comportamiento de la tendencia de los caudales y la superficie de cada tipo de uso del suelo. Se analizó para tres tipos de cobertura: Bosque nativo, Plantaciones y Agrícola (Figuras 20, 21 y 22).

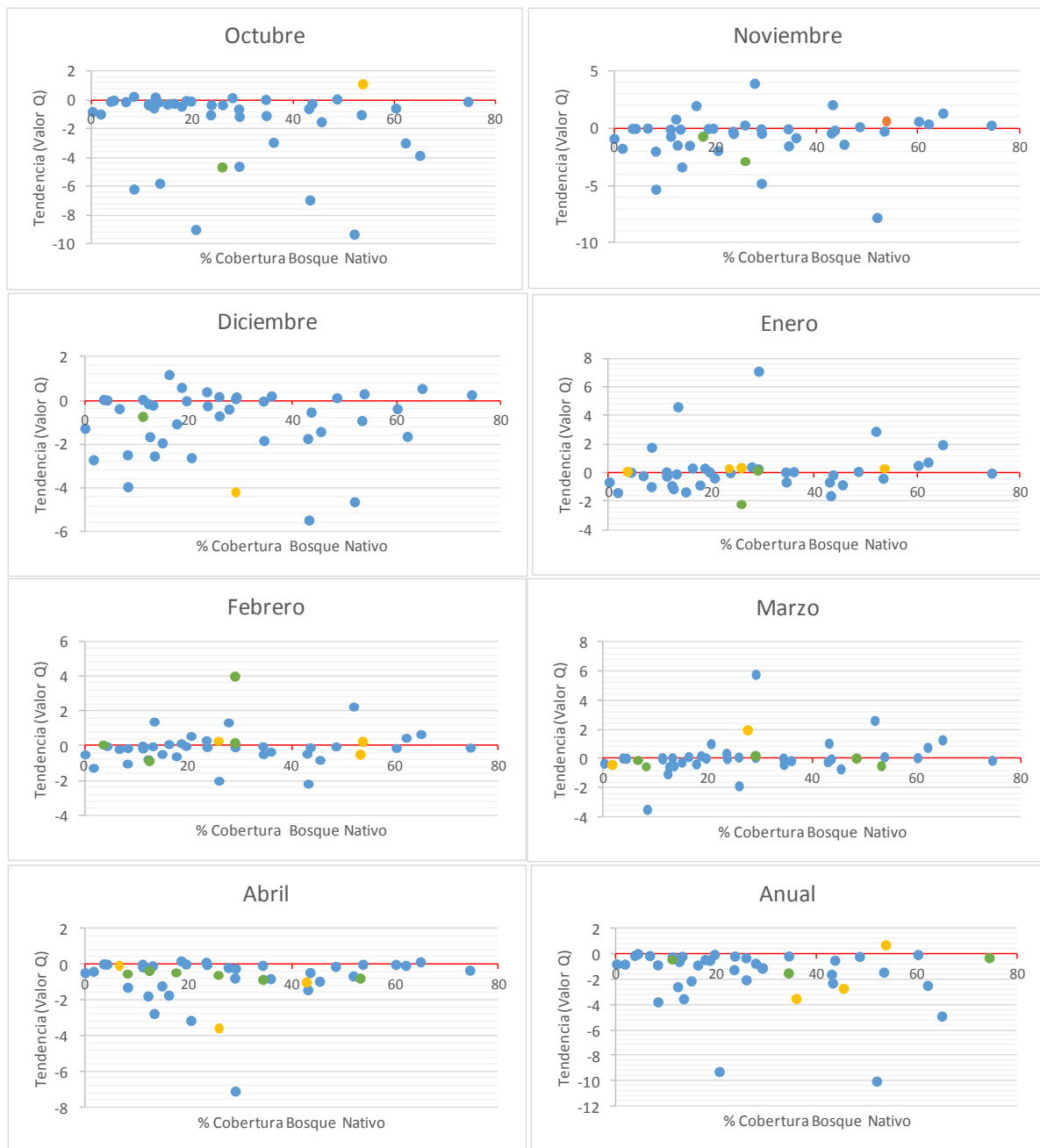


Figura 20. Relación de tendencia de Caudales Medios vs. Porcentaje de superficie cubierta con Bosque nativo considerando las 42 estaciones. Punto color azul: estación sin tendencia significativa; Punto color verde: estación con tendencia con 0,1 de significancia; Punto color amarillo: estación con tendencia con 0,05 de significancia; Punto color naranja: estación con tendencia con 0,01 de significancia; y Punto color rojo: estación con tendencia con 0,001 de significancia.

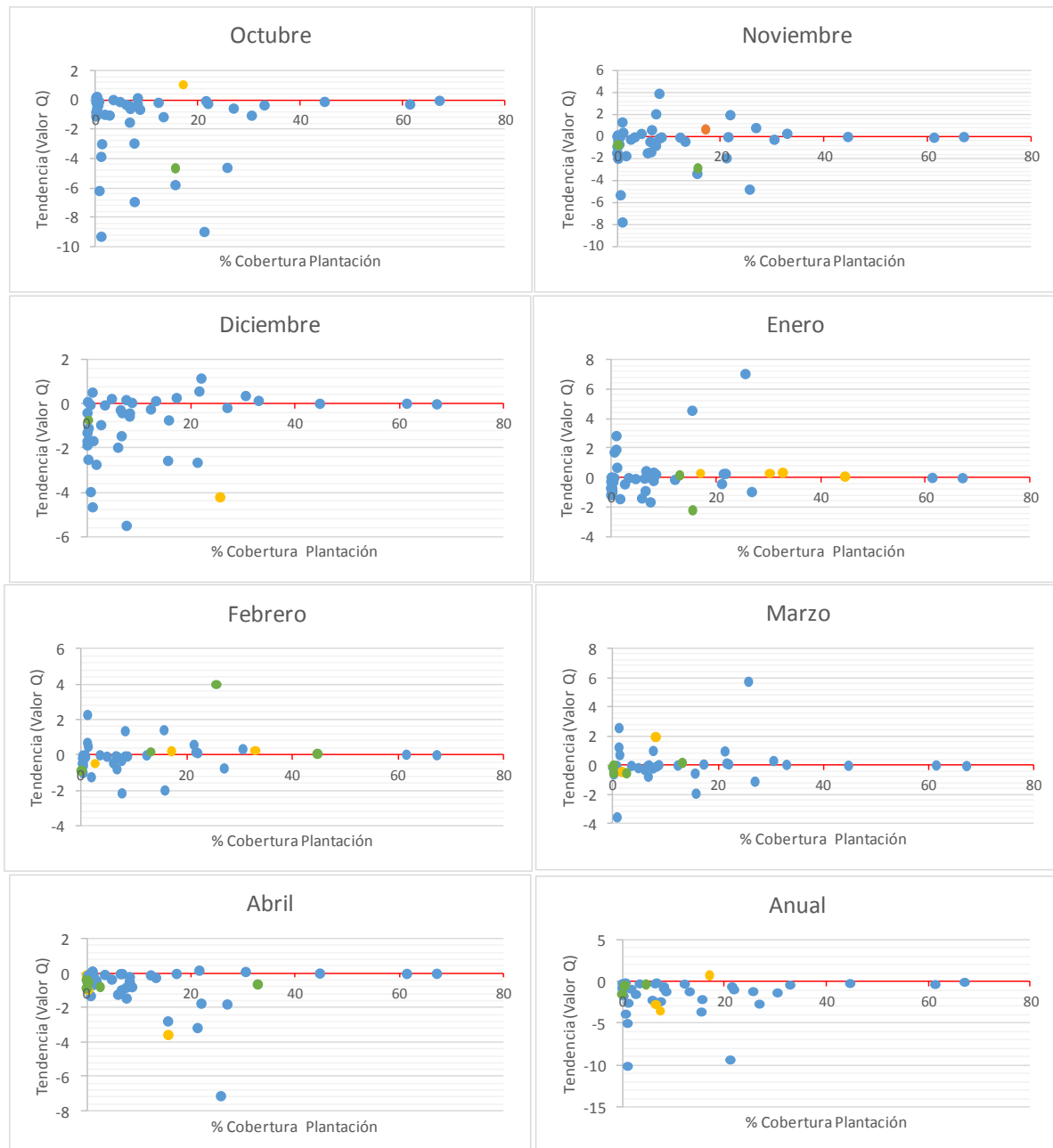


Figura 21. Relación de tendencia de Caudales Medios vs. Porcentaje de superficie cubierta con Plantación considerando las 42 estaciones. Punto color azul: estación sin tendencia significativa; Punto color verde: estación con tendencia con 0,1 de significancia; Punto color amarillo: estación con tendencia con 0,05 de significancia; Punto color naranja: estación con tendencia con 0,01 de significancia; y Punto color rojo: estación con tendencia con 0,001 de significancia.

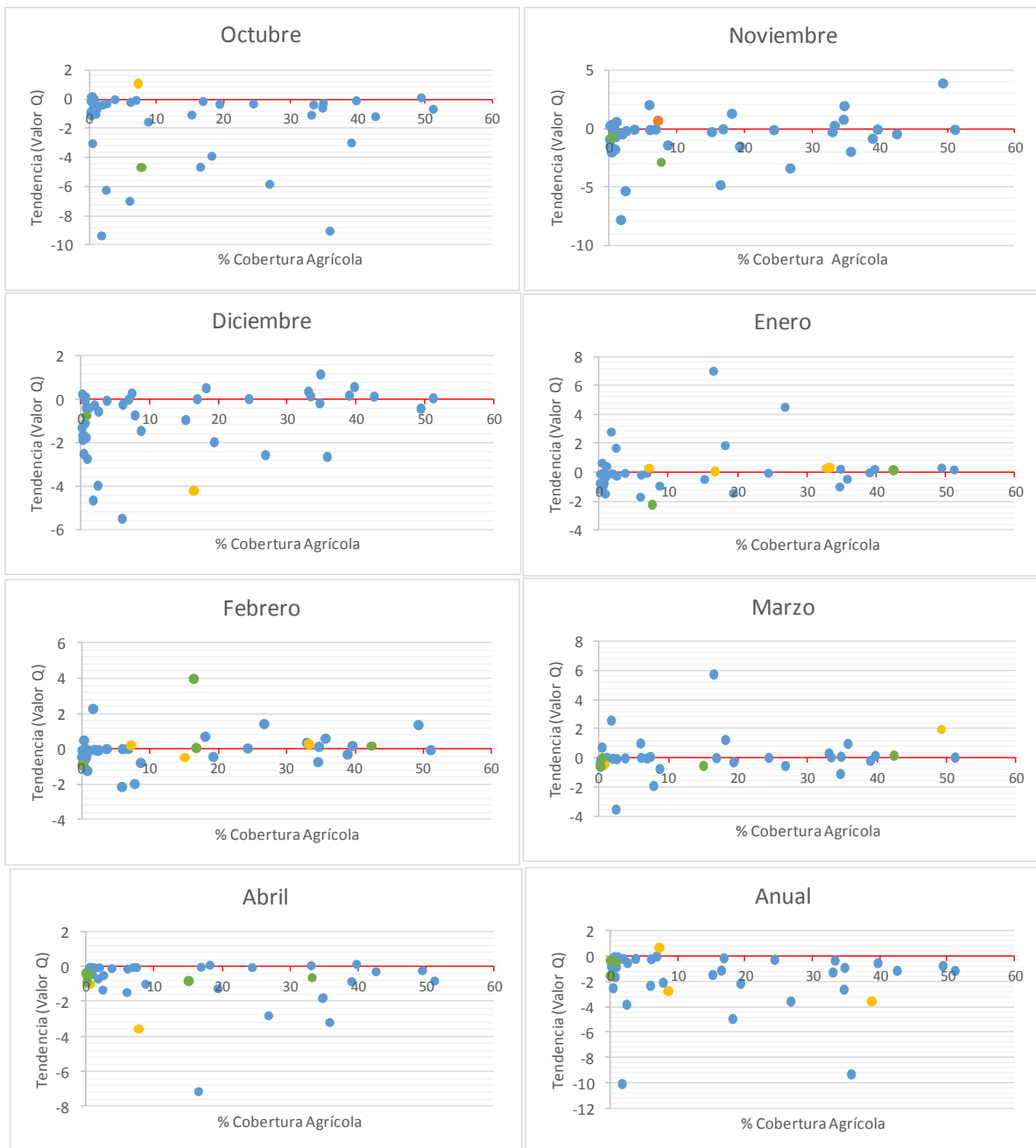


Figura 22. Relación de tendencia de Caudales Medios vs. Porcentaje de superficie cubierta con Uso Agrícola considerando las 42 estaciones. Punto color azul: estación sin tendencia significativa; Punto color verde: estación con tendencia con 0,1 de significancia; Punto color amarillo: estación con tendencia con 0,05 de significancia; Punto color naranja: estación con tendencia con 0,01 de significancia; y Punto color rojo: estación con tendencia con 0,001 de significancia.

Como se aprecia en la figura 20 en los meses de octubre y abril la mayoría de las estaciones presenta tendencia negativa para los caudales medios y esta magnitud no varía en relación con la cobertura de Bosque nativo. En el resto de los meses, existen estaciones con tendencia positiva y negativa, pero del mismo modo, la magnitud de la tendencia no varía en relación con la cobertura de Bosque nativo. Este mismo comportamiento se aprecia para cobertura de Plantaciones y Uso Agrícola (figuras 21 y 22).

Por otro lado, en la figura 18 se muestra que el coeficiente de correlación entre la magnitud de la tendencia de caudales medios y el porcentaje de superficie ocupada en la cuenca por los distintos usos analizados es de valores bajos, menor a 0,4; es decir, la relación entre ambas variables es baja.

Asimismo, a nivel anual, la superficie con plantación muestra una correlación positiva con los caudales medios, mientras que con el uso Bosque Nativo y Agrícola, el coeficiente es negativo, pero con valores cercanos a 0.

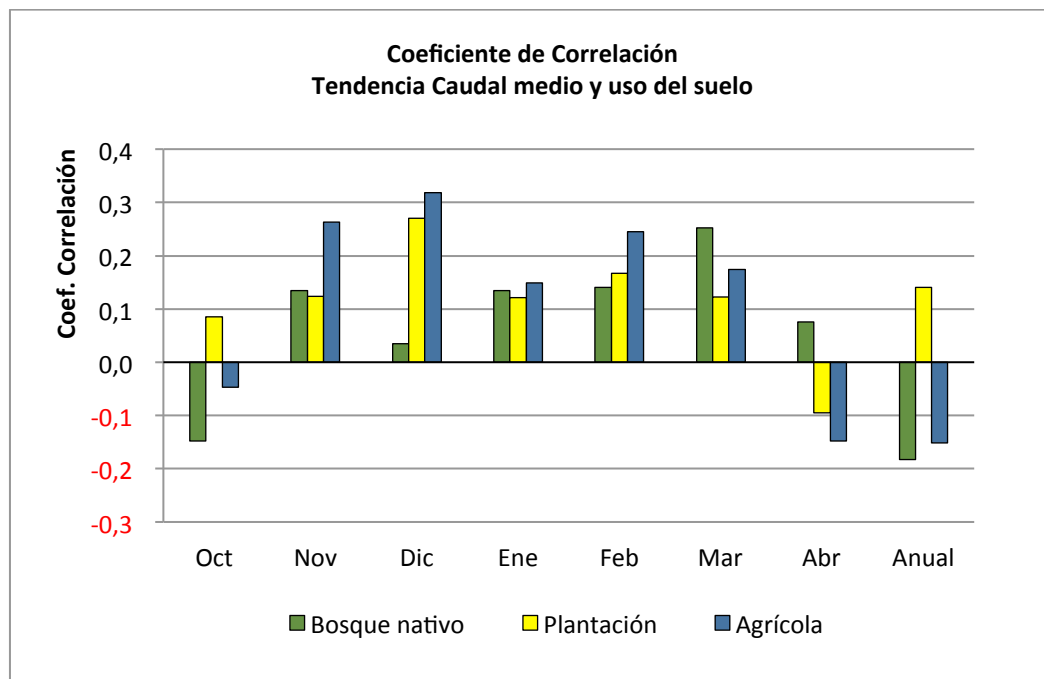


Figura 23. Coeficiente de correlación entre la tendencia de los caudales medios (Mann- Kendall) y los usos actuales del suelo: bosque nativo, plantación y uso agrícola.

A continuación se muestran los gráficos que relacionan la tendencia de los caudales punta con los distintos tipos de uso del suelo: bosque nativo, plantación y uso agrícola (Figuras 24, 25 y 26).

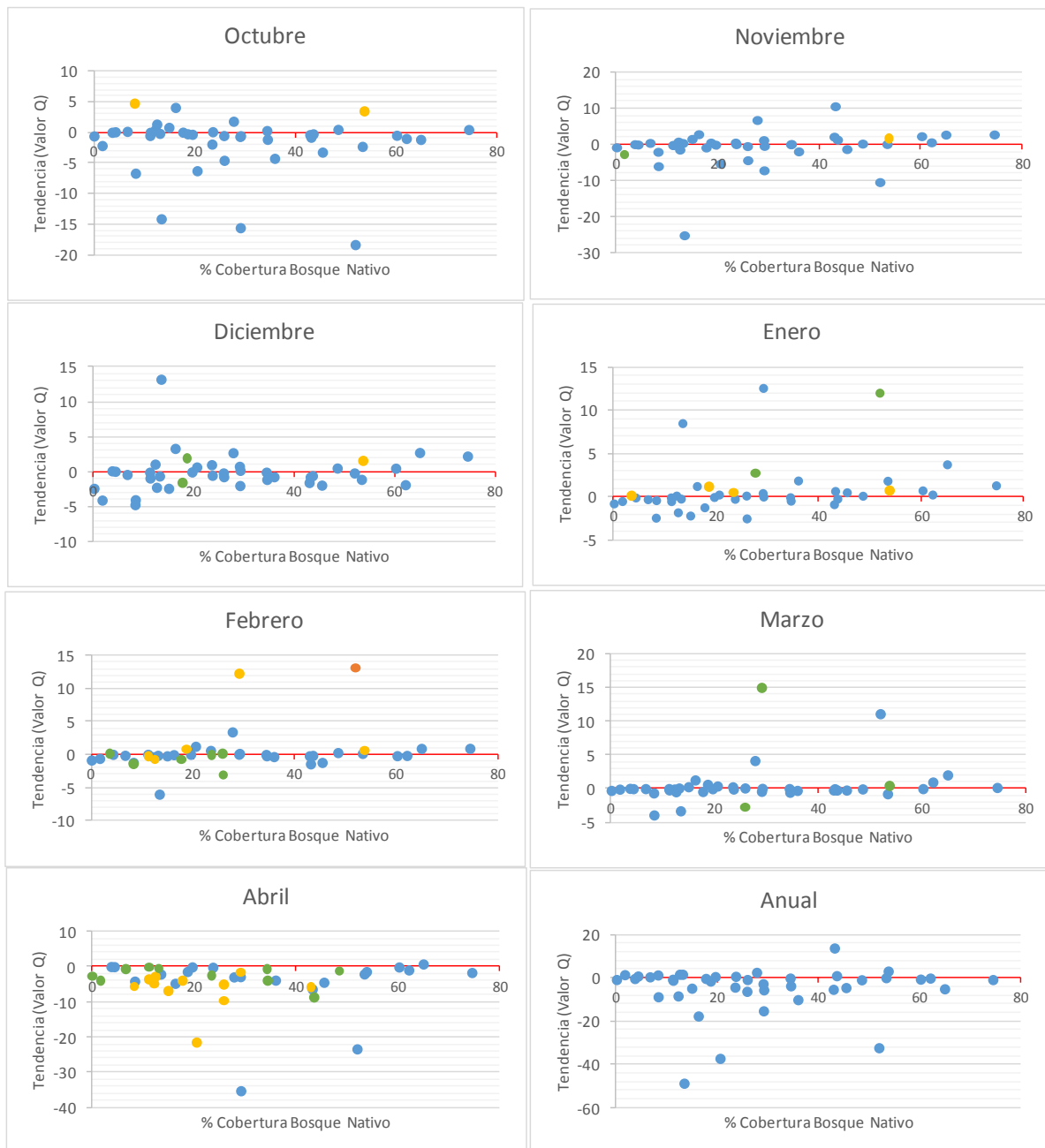


Figura 24. Relación de tendencia de Caudales Punta vs. Porcentaje de superficie cubierta con Bosque Nativo considerando las 42 estaciones. Punto color azul: estación sin tendencia significativa; Punto color verde: estación con tendencia con 0,1 de significancia; Punto color amarillo: estación con tendencia con 0,05 de significancia; Punto color naranja: estación con tendencia con 0,01 de significancia; y Punto color rojo: estación con tendencia con 0,001 de significancia.

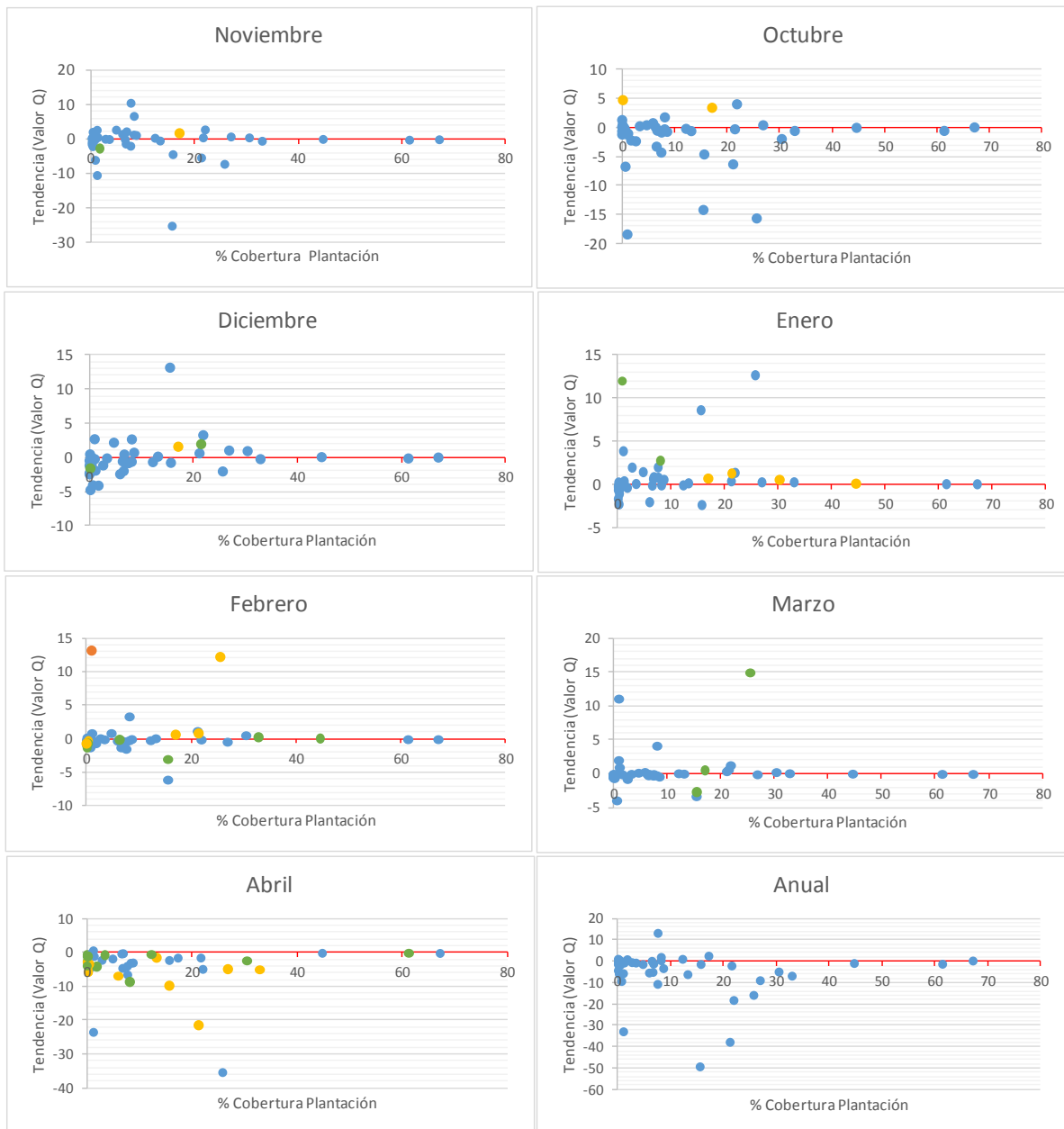


Figura 25. Relación de tendencia de Caudales Punta vs. Porcentaje de superficie cubierta con Plantación considerando las 42 estaciones. Punto color azul: estación sin tendencia significativa; Punto color verde: estación con tendencia con 0,1 de significancia; Punto color amarillo: estación con tendencia con 0,05 de significancia; Punto color naranja: estación con tendencia con 0,01 de significancia; y Punto color rojo: estación con tendencia con 0,001 de significancia.

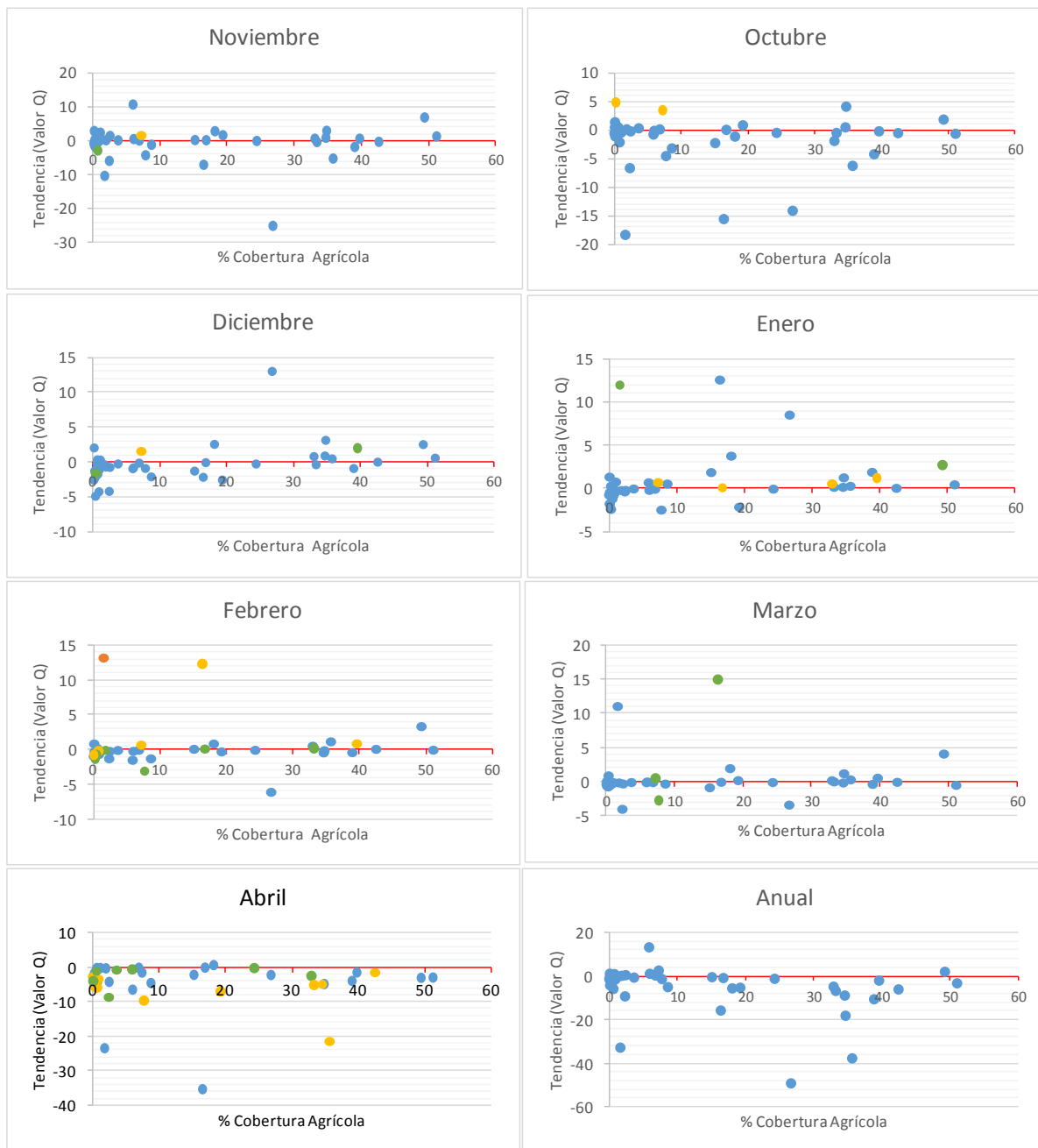


Figura 26. Relación de tendencia de Caudales Punta vs. Porcentaje de superficie cubierta con Uso Agrícola considerando las 42 estaciones. Punto color azul: estación sin tendencia significativa; Punto color verde: estación con tendencia con 0,1 de significancia; Punto color amarillo: estación con tendencia con 0,05 de significancia; Punto color naranja: estación con tendencia con 0,01 de significancia; y Punto color rojo: estación con tendencia con 0,001 de significancia.

Como se aprecia en las figuras 24 y 25 la magnitud de las tendencias de los caudales punta no varía en relación a la superficie ocupada con bosque nativo ni plantaciones. Aún si consideramos que sobre un 20% de la superficie ocupada con estos usos tiene impacto sobre la cuenca, no se ve una relación entre estas superficies y las tendencias. El mes de abril presenta mayor significancia en las tendencias, pero no se relaciona con el uso del suelo.

Por otro lado, en la figura 27 se muestra que el coeficiente de correlación entre la magnitud de la tendencia de caudales punta y el porcentaje de superficie ocupada en la cuenca por los distintos usos analizados es de valores bajos. El uso agrícola es el que presenta mayor coeficiente de correlación y en el mes de diciembre llega a 0,42, es decir, a mayor uso agrícola mayor tendencia de los caudales punta. En este sentido, a nivel mensual el bosque nativo se comporta similar al uso agrícola, mientras que las plantaciones tendrían un efecto más positivo al disminuir las tendencias de los caudales punta. No obstante, estos valores son bajos y no permiten obtener conclusiones.

A nivel anual, las superficies con plantación y uso agrícola mostrarían una correlación negativa con los caudales punta, lo que significaría que tienen un efecto positivo, no obstante los valores son muy bajos.

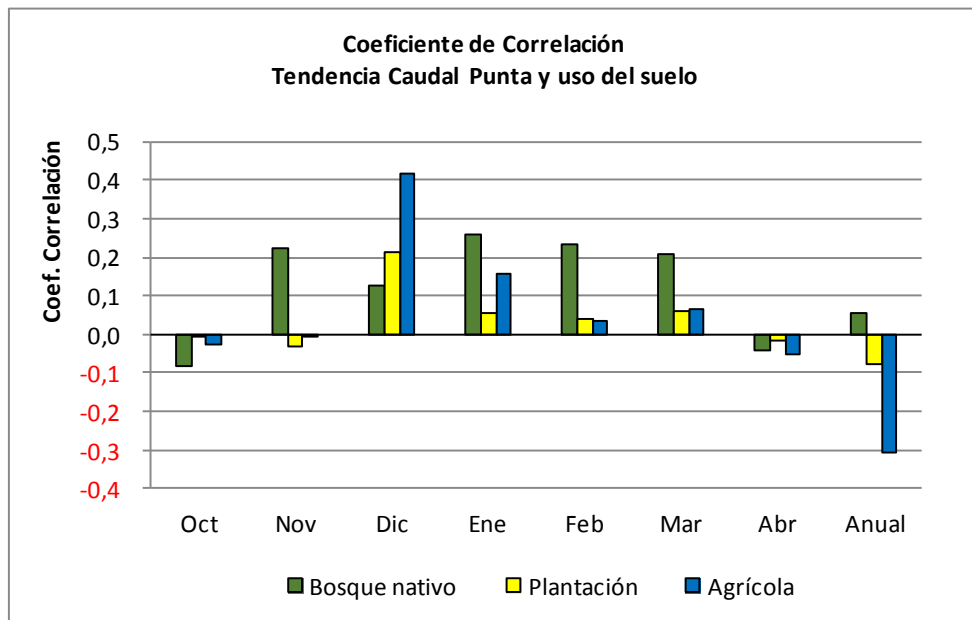


Figura 27. Coeficiente de correlación entre la superficie por tipo de uso del suelo y la tendencia Mann Kendall para caudal punta

4. CONCLUSIONES

Si bien la prueba de Mann - Kendall mostró tendencias mayoritariamente negativas en los caudales medios y puntas, en el análisis hecho para cada uno de los meses en análisis (octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril), y en las 42 cuencas en análisis, en su mayoría éstas no fueron significativas, por lo que no existen evidencias suficientes para concluir acerca del comportamiento de las variables analizadas.

De los análisis de caudales medio mensuales, de las 294 series analizadas con Mann y Kendall, 195 (67%) presentan tendencia negativa, aunque de estas, solo 16 tienen tendencia significativa (5,4%). Y de las que tienden al alza, sólo 15 son significativas (5,1%), lo que conlleva a que la proporción entre las que tienen algún nivel de significancia es prácticamente la misma, en base a la información con que se cuenta hasta hoy.

Por su parte, de las 294 series de caudales punta mensuales analizadas, 176 series (alrededor del 60%) presentan tendencia a disminuir, de las cuales 30 son significativa; mientras que 19 series presentan tendencia significativa a aumentar los caudales punta.

El mes de enero es el que presenta el mayor número de tendencias positivas y el mes de abril es el que presenta la mayor cantidad de tendencias negativas. Lo primero puede deberse al derretimiento glacial, mientras que lo segundo puede deberse a que ese mes marca el término y el inicio del año hidrológico y tienden a ocurrir las primeras precipitaciones.

A analizar las series anuales para caudal medio a través de Mann – Kendall, la cantidad de series con tendencia negativa supera ampliamente a las que tienen tendencia positiva, pero pocas son significativas (solo 6 de 42). En cuanto a los caudales punta, ninguna tendencia muestra significancia estadística.

La variable caudal punta es muy sensible a situaciones específicas, tales como la ocurrencia de lluvias intensas y alzas de temperatura que favorecen el derretimiento de nieves y glaciares, por lo que es esperable que tenga mayor variación en su comportamiento. Por su parte, los caudales medios tienen menores variaciones ya que dependerían de las lluvias de menor intensidad, del uso de la cuenca, de los tipos de cultivos presentes en la cuenca y de las demandas existentes de parte de distintos tipos de usuarios.

En cuanto al uso del suelo, no se aprecia una relación entre el comportamiento de los caudales y la superficie ocupada, ya sea por bosque nativo, plantaciones o uso agrícola, lo que se demuestra en que los coeficientes de correlación entre la proporción de uso del suelo de una determinada actividad, y las tendencias de Mann – Kendall, son muy bajos y aún más si se considera el coeficiente de determinación. En este sentido, el coeficiente más alto corresponde a uso agrícola con caudal medio para el mes de abril, pero con un valor de solo 0,32. Mientras que a nivel anual, la superficie utilizada por plantaciones tiene una correlación positiva con el caudal medio (0,14), mientras que el uso agrícola y el bosque nativo, tienen un coeficiente de correlación negativo (-0,15 y -0,18 respectivamente), pero con un valor muy bajo.

Finalmente, se puede decir que el análisis hecho a 42 cuencas de la zona centro sur de Chile, demostraría que no es posible afirmar que sea el tipo de uso del suelo el causante o el factor determinante de las tendencias de producción de agua (caudales medios o máximos) de cada cuenca y ello es válido también para el uso plantaciones artificiales. Esto hace inferir que existen otras variables que pudiesen explicar de mejor forma las variaciones en la disponibilidad de agua a la salida de una cuenca, tales como las precipitaciones, el cambio en las demandas de agua por parte de usuarios endógenos o exógenos a la cuenca, el comportamiento hidrogeológico de las cuencas y las extracciones de agua desde los caudales, entre otras.

ANEXOS

ANEXO 1: Reclasificación del uso actual del suelo del catastro de bosque nativo de CONAF

Categoría de Reclasificación	Categorías del catastro involucradas
AGRÍCOLA	Terrenos de Uso Agrícola. Otros Terrenos Húmedos. Rotación Cultivo-Pradera. Vegas.
BOSQUE MIXTO	Bosque Nativo - Plantación Abierto, Semidenso y Denso. Bosque Nativo - Exóticas Asilvestradas Abierto, Semidenso y Denso. Bosques Exóticas Asilvestradas.
BOSQUE NATIVO	Renoval Muy Abierto, Abierto, Semidenso y Denso. Bosque Nativo Achaparrado Abierto, Semidenso y Denso. Bosque Nativo Adulto – Renoval Muy Abierto, Abierto, Semidenso Denso. Bosque Nativo Adulto Abierto, Semidenso y Denso. Zona de Protección.
MATORRAL	Matorral Pradera Muy Abierto, Abierto, Semidenso y Denso. Matorral Muy Abierto, Abierto, Semidenso y Denso. Matorral Arborescente Muy Abierto, Abierto, Semidenso y Denso. Suculentas.
PLANTACIÓN	Plantación Joven - Recién Cosechada. Plantación de Arbustos. Plantación.
PRADERA	Pradera. Praderas Anuales. Praderas Perennes. Estepa Andina Central y Patagónica.
SIN USO	Ciudades – Pueblos - Zonas Industriales. Minera Industrial. Afloramientos Rocosos. Corridas de Lava y Escoriales. Derrumbes Sin Vegetación. Otros Terrenos Sin Vegetación. Sin Cobertura Aerofotográfica. Terrenos sobre límite vegetacional. Áreas de acceso Restringido. Ríos, Nieves y Cajas de Ríos. Lago-Laguna-Embalse-Tranque. Playas y Dunas. Vegetación herbácea en orilla.

ANEXO 2: Valores de caudales medio y punta a nivel mensual y anual estimados por la fdp Gumbel para un periodo de retorno de 20 años.

Cuadro 1. Valores de caudal medio (m^3/s) obtenidos con la función de probabilidad de Gumbel* de cada estación para el periodo 1973-1992

	Estación	Periodo 1973-1992 Caudal medio (m^3/s)							
		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Anual
1	Río Claro en hacienda Las Nieves	16,0	20,0	23,4	17,0	11,7	7,2	9,4	13,3
2	Río Claro en El Valle	33,3	36,2	27,8	9,0	5,4	2,6	9,7	17,5
5	Río Teno después junta con Claro	116,5	153,4	177,6	125,3	71,4	48,1	52,1	87,8
8	Estero Upeo en Upeo	18,8	14,3	8,3	5,7	1,9	1,4	7,5	14,8
9	Río Palos en junta con Colorado	47,5	58,7	71,6	60,6	44,1	31,0	25,6	39,2
10	Río Colorado en junta con Palos	74,7	112,2	147,6	108,8	64,1	40,0	37,1	61,8
12	Río Maule en Longitudinal	445,1	527,5	605,0	347,2	149,7	143,9	202,7	317,2
13	Río Lircay en Las Rastras	33,8	25,8	15,6	11,5	8,8	7,2	17,0	28,2
15	Río Loncomilla en Bodega	312,6	182,0	71,3	29,6	28,6	44,4	69,6	268,2
18	Río Perquilauquén en Quella	117,2	69,8	24,4	9,6	10,5	18,2	63,6	99,5
19	Río Purapel en Nirivilo	5,0	2,7	1,3	0,8	0,6	0,6	1,7	6,0
21	Río Itata en General Cruz	130,3	69,4	30,4	14,1	21,3	16,3	60,3	86,1
22	Río Cato en pte. Cato	88,8	51,3	26,3	7,4	5,8	8,8	35,4	65,2
23	Río Ñuble en San Fabián	286,2	269,5	210,7	102,5	61,8	43,0	131,2	165,0
24	Río Ñuble en La Punilla	189,3	224,5	180,3	98,7	50,8	46,2	58,2	111,2
26	Río Diguillín en San Lorenzo	39,6	28,5	18,9	8,6	7,6	6,6	19,1	25,0
27	Río Biobío en Desembocadura	1872,3	1744,5	1332,4	679,5	407,1	335,7	683,5	1358,6
28	Río Biobío en Rucalhue	1056,3	992,2	698,3	334,4	230,8	171,9	318,3	614,5
29	Río Laja en pte. Perales	287,3	225,8	152,9	87,6	90,7	109,4	167,4	215,7
30	Río Mininco en Longitudinal	28,6	21,5	13,6	5,7	3,7	3,2	6,2	26,0
32	Río Cautín en Cajón	266,3	219,3	152,5	79,1	61,3	54,1	113,7	187,5
33	Río Cautín en Rari-Ruca	170,2	154,7	117,1	73,5	67,2	57,0	77,8	117,2
34	Río Quepe en Quepe	154,0	120,6	84,1	46,3	38,9	37,6	75,0	120,2
36	Río Toltén en Villarica	418,3	431,4	351,0	229,0	178,4	154,2	207,8	333,1
38	Río Allipén en Los Laureles	223,2	207,2	162,2	113,4	103,8	87,8	125,5	175,4

*: Ajustado con función de distribución de probabilidad de Goodrich

Cuadro 2. Valores de caudal medio (m^3/s) obtenidos con la función de probabilidad de Gumbel de cada estación para el periodo 1993-2013

	Estación	Periodo 1993-2013 Caudal medio (m^3/s)							
		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Anual
1	Río Claro en hacienda Las Nieves	15,1	18,7	23,3	18,6	11,3	7,5	7,5	17,4
2	Río Claro en El Valle	29,7	30,9	20,4	9,5	8,0	10,9	5,6	20,7
5	Río Teno después junta con Claro	111,0	164,3	186,8	131,9	67,2	42,5	39,9	94,6
8	Estero Upeo en Upeo	16,8	8,2	6,0	2,8	1,5	1,3	3,8	13,3
9	Río Palos en junta con Colorado	44,8	62,1	77,8	67,0	42,9	30,1	31,7	44,1
10	Río Colorado en junta con Palos	73,8	124,5	169,3	130,9	60,9	35,4	35,3	68,3
12	Río Maule en Longitudinal	414,2	520,0	519,7	326,2	138,0	201,5	268,0	309,1
13	Río Lircay en Las Rastras	43,2	25,4	18,3	20,7	24,3	16,3	13,3	31,2
15	Río Loncomilla en Bodega	232,0	112,6	50,7	30,8	30,9	58,1	78,7	233,4
18	Río Perquilauquén en Quella	117,2	46,5	26,2	19,3	23,7	38,1	36,4	92,6
19	Río Purapel en Nirivilo	6,0	1,9	1,1	0,6	0,5	0,7	4,7	5,7
21	Río Itata en General Cruz	124,6	58,2	29,2	15,9	17,0	22,7	31,2	88,3
22	Río Cato en pte. Cato	85,8	44,6	16,6	8,8	10,2	16,4	42,1	67,5
23	Río Ñuble en San Fabián	234,3	218,7	154,6	83,3	47,4	45,7	63,9	154,8
24	Río Ñuble en La Punilla	178,2	177,7	134,7	75,4	41,6	36,6	45,8	116,8
26	Río Diguillín en San Lorenzo	34,6	21,7	15,3	8,8	7,2	8,4	12,8	24,5
27	Río Biobío en Desembocadura	2.295,3	1.672,7	1.095,7	609,0	440,2	474,9	721,4	1.550,3
28	Río Biobío en Rucalhue	1.103,3	854,6	619,0	286,7	222,2	213,6	290,8	653,0
29	Río Laja en pte. Perales	258,0	169,3	102,9	90,5	96,1	113,2	169,0	193,9
30	Río Mininco en Longitudinal	33,4	28,5	10,1	4,7	3,4	6,4	11,0	24,1
32	Río Cautín en Cajon	284,6	215,7	177,9	81,0	94,5	56,5	87,8	202,1
33	Río Cautín en Rari-Ruca	179,1	156,2	128,1	71,5	55,8	52,4	70,6	127,5
34	Río Quepe en Quepe	198,0	132,0	108,2	47,7	34,9	32,8	56,0	123,9
36	Río Toltén en Villarica	466,6	431,3	399,1	248,9	165,1	143,6	172,6	347,7
38	Río Allipén en Los Laureles	254,1	213,7	203,7	112,7	87,4	83,4	111,4	182,4

Cuadro 3. Valores de caudal punta (m^3/s) obtenidos con la función de probabilidad de Gumbel de cada estación para el periodo 1973-1992

	Estación	Periodo 1973-1992 Caudal punta (m^3/s)							
		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Anual
1	Río Claro en hacienda Las Nieves	37,4	41,8	67,6	24,6	18,3	11,5	56,8	54,6
2	Río Claro en El Valle	107,4	96,5	95,8	19,6	9,0	7,8	94,9	90,6
5	Río Teno después junta con Claro	455,5	274,0	369,7	183,7	115,5	62,6	367,1	259,6
8	Estero Upeo en Upeo	96,5	50,8	65,5	5,5	4,0	11,3	109,9	89,9
9	Río Palos en junta con Colorado	237,1	137,1	154,1	81,4	59,9	39,8	117,6	119,2
10	Río Colorado en junta con Palos	257,3	217,4	225,4	163,0	101,2	61,2	200,0	160,7
12	Río Maule en Longitudinal	1.511,8	1.191,8	1.000,0	570,7	288,4	325,6	476,4	816,0
13	Río Lircay en Las Rastras	182,4	181,9	139,5	24,4	20,4	30,2	102,1	140,1
15	Río Loncomilla en Bodega	1.129,3	960,5	248,1	52,5	113,6	224,8	350,5	917,8
18	Río Perquilauquén en Quella	509,2	603,5	114,3	18,2	35,5	73,3	279,4	451,4
19	Río Purapel en Nirivilo	29,2	28,4	2,9	1,3	0,7	10,7	7,2	52,6
21	Río Itata en General Cruz	557,2	499,0	128,2	30,8	194,7	32,8	166,2	310,4
22	Río Cato en pte. Cato	479,3	623,3	93,6	12,5	83,8	58,0	274,8	315,3
23	Río Ñuble en San Fabián	1.289,4	581,1	525,9	162,0	140,3	141,6	713,3	560,2
24	Río Ñuble en La Punilla	655,4	824,3	397,7	152,6	257,9	113,9	364,2	342,7
26	Río Diguillín en San Lorenzo	278,0	237,0	84,1	15,6	110,6	39,5	131,5	142,8
27	Río Biobío en Desembocadura	4.325,6	4.935,8	2.635,6	1.023,6	631,1	967,9	2.418,1	3.142,2
28	Río Biobío en Rucalhue	2.579,9	2.441,4	1.676,9	523,3	1.097,3	603,0	1.427,9	1.443,3
29	Río Laja en pte. Perales	921,1	603,0	267,7	160,2	299,5	270,5	412,2	492,2
30	Río Mininco en Longitudinal	75,7	40,7	31,3	16,6	7,2	15,1	22,8	72,4
32	Río Cautín en Cajon	652,5	578,2	479,4	183,0	230,3	229,8	343,0	457,2
33	Río Cautín en Rari-Ruca	376,8	368,3	385,3	154,7	254,8	243,9	256,4	268,9
34	Río Quepe en Quepe	427,9	331,2	171,9	125,8	193,0	138,4	236,2	292,8
36	Río Toltén en Villarica	517,5	527,6	447,8	301,9	216,3	178,6	285,7	410,1
38	Río Allipén en Los Laureles	604,3	376,5	406,9	236,6	364,5	229,9	395,5	400,7

Cuadro 4. Valores de caudal punta (m^3/s) obtenidos con la función de probabilidad de Gumbel* de cada estación para el periodo 1993-2013

	Estación	Periodo 1993-2013 Caudal punta (m^3/s)							
		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Anual
1	Río Claro en hacienda Las Nieves	32,1	37,2	35,9	36,2	19,1	14,6	56,3	73,1
2	Río Claro en El Valle	77,3	63,9	51,4	50,2	30,2	23,0	103,3	97,4
5	Río Teno después junta con Claro	275,4	335,4	315,1	265,9	213,8	72,7	624,1	349,3
8	Estero Upeo en Upeo	59,9	26,7	57,0	16,5	7,79	27,8	153,1	98,9
9	Río Palos en junta con Colorado	102,8	118,3	142,9	109,4	101,8	131,0	341,1	157,9
10	Río Colorado en junta con Palos	174,3	237,8	291,2	225,0	117,6	133,7	403,9	240,7
12	Río Maule en Longitudinal	732,8	1.044,1	782,5	596,5	306,5	376,9	394,3	698,3
13	Río Lircay en Las Rastras	184,2	97,7	85,6	60,7	74,8	136,3	219,1	195,5
15	Río Loncomilla en Bodega	855,8	221,9	152,0	75,2	305,7	251,9	734,6	914,7
18	Río Perquilauquén en Quella	384,9	98,7	96,4	59,5	107,1	140,0	277,5	455,8
19	Río Purapel en Nirivilo	37,2	4,4	2,4	1,0	1,3	1,1	21,1	60,0
21	Río Itata en General Cruz	369,6	142,4	168,1	37,7	139,7	71,3	214,2	363,4
22	Río Cato en pte. Cato	232,9	95,4	67,9	17,5	46,1	66,5	395,5	286,9
23	Río Ñuble en San Fabián	558,2	385,8	300,4	189,1	297,6	232,8	1.110,1	642,1
24	Río Ñuble en La Punilla	459,6	318,4	236,9	186,5	280,3	174,2	479,9	565,3
26	Río Diguillín en San Lorenzo	188,8	62,7	91,0	38,9	81,5	63,7	259,3	179,5
27	Río Biobío en Desembocadura	4.947,3	2.580,6	2.044,5	968,8	837,0	665,2	3.613,5	3.865,3
28	Río Biobío en Rucalhue	2.382,6	1.518,5	1.327,4	748,0	725,7	805,9	1.871,5	1.880,3
29	Río Laja en pte. Perales	670,7	259,9	216,2	134,4	218,9	179,3	495,3	573,1
30	Río Mininco en Longitudinal	81,4	41,7	22,0	7,9	5,2	22,2	26,0	67,8
32	Río Cautín en Cajón	769,8	454,5	502,1	147,2	171,9	153,3	373,0	572,1
33	Río Cautín en Rari-Ruca	456,7	366,7	364,8	146,6	136,7	115,5	318,0	306,1
34	Río Quepe en Quepe	814,5	310,7	367,0	81,2	153,5	77,5	270,3	362,7
36	Río Toltén en Villarica	626,4	531,3	521,3	317,1	199,4	170,0	262,5	442,8
38	Río Allipén en Los Laureles	801,3	433,6	714,7	195,9	228,3	172,0	458,6	461,7

*: Ajustado con función de distribución de probabilidad LogNormal

APÉNDICE: FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD

1. Función de Distribución de Gumbel:

La Función de Distribución de Gumbel es uno de los modelos que representan de mejor forma el comportamiento de variables hidrológicas ya que posee una adecuada capacidad de ajuste a valores máximos de caudales, (Pizarro y Novóa 1986). Esta función se comporta de la siguiente forma:

$$P(x \leq X) = F(x) = e^{-e^{-d(x-\mu)}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

χ : Representa el valor a asumir por la variable aleatoria

e: Constante de Neper.

μ y d: Parámetros

Los parámetros de la distribución de una muestra de tamaño infinito, tienden a los siguientes valores, en base a la media aritmética y la desviación estándar de la muestra:

$$d = \frac{1}{0,779696 * S} \quad ; \quad \mu = \bar{x} - 0,450047 * S$$

2. Función de Distribución de Goodrich:

Esta función posee la cualidad de eliminar valores extremos, es decir aquellos cuya probabilidad de ocurrencia es muy pequeña. Por lo mismo, consigue suprimir las distorsiones que pueda provocar un sólo valor anómalo. Posee la siguiente función de distribución de probabilidad (Pizarro *et. al.*, 1993).

$$P(x \leq X) = F(X) = 1 - e^{-a(x-x_1)^{1/p}} \quad \text{Para } X_1 < X \leq \infty, \quad (\text{Ecuación 2})$$

En tanto los parámetros se determinan a partir del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\frac{m^3}{s^3} = P(p) \quad ;$$

$$a^{2p} = \frac{1}{s^2} [\Gamma(2p+1) - \Gamma^2(p+1)] \quad ;$$

$$X_1 = \bar{x} - \frac{\Gamma(p+1)}{a^p}$$

Donde:

$$m_3 : \text{Momento central de orden tres, } m_3 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{n}$$

S^3 : Desviación típica al cubo.

$P(p)$: Función auxiliar de Goodrich.

S^2 : Varianza muestral.

Γ : Función Gamma.

\bar{x} : Media muestral.

e : Constante de Neper

Finalmente, despejando la variable aleatoria x de la función de distribución de probabilidad de Goodrich, se obtiene lo siguiente:

$$x = x_1 + \frac{1}{a^p} [-\ln(1 - F(X))]^p$$

3. Distribución Log-Normal:

Una tercera FDP importante de considerar importante es la **Distribución Log-Normal**, la cual tiene la desventaja sobre la distribución normal al estar limitada a ($X > 0$) y también que la transformación Log tiende a reducir la asimetría positiva comúnmente encontrada en la información hidrológica, debido a que al tomar los logaritmos, se reduce una proporción mayor de los números grandes en relación a los pequeños (Chow *et. al.* 1994). Presenta la siguiente función de distribución de probabilidad:

$$F(x) = \frac{1}{2\pi\sigma(\beta)} \int_0^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - a}{\beta}\right)^2} dx \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde los parámetros existentes que se basan en los logaritmos de la variable aleatoria, están definidos de la siguiente forma:

$$a = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n}$$

$$\beta = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - a)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

χ : Representa el valor a asumir por la variable aleatoria

α, β : Parámetros

e: Constante de Neper

En el mismo caso que la distribución normal, se asigna z como una variable estandarizada:

$$z = \frac{\ln x - a}{\beta}$$

Y la probabilidad se encuentra en la tabla Normal, donde el valor de la variable x es:

$$x = e^{\beta * z + a} \quad (\text{Ecuación 3 modificada})$$