PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

EFECTIVIDAD DE LOS PROGRAMAS DE ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL

HUGO ALFREDO GLORIA VARGAS

Memoria para optar al Título de

INGENIERO CIVIL

Profesor Guía:

JACKELLINE GONZÁLEZ BLANDÓN

2011

A mi familia, polola y amigos por haberme acompañado y apoyado en este camino.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue supervisada y apoyada por la profesora guía Jackelline González. Le agradezco su excelente apoyo, cooperación y disposición. Sus comentarios, correcciones y sugerencias a través de este tiempo fueron de utilidad y ayuda para haber concluido este trabajo de la mejor manera posible.

También quiero agradecer a la profesora coreferente Alexandra Jacquin, por sus acotaciones, sugerencias y direcciones para desarrollar de mejor manera esta investigación.

A su vez quiero agradecer a todo el Departamento de Ingeniería Civil de la PUCV, en especial a los profesores por su apoyo incondicional. También a todos mis compañeros de estudio, por su ayuda y amistad a través de todos estos años, especialmente a mi círculo más cercano.

Quiero agradecer a Robert Hilliard de la Junta de Vigilancia del río Cachapoal Primera Sección por ser el motivador de este trabajo y a Miguel Martínez de la empresa Asesorías y Servicios Hídricos y Meteorológicos Hidromet S.A. por prestarme todo el apoyo e información requerida para este estudio.

A todos ellos,

Muchas gracias por todo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN……..…xii
ABSTRACT……..…….xiii
1. INTRODUCCIÓN 1
2. OBJETIVOS 3
2.1. OBJETIVO GENERAL 3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3
3. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA 4
3.1. SISTEMA FÍSICO NATURAL 5
3.1.1. Geología y volcanismo 5
3.1.2. Hidrogeología 6
3.1.3. Geomorfología 7
3.1.4. Clima 8
3.1.5. Suelos 9
3.2. FLORA Y FAUNA 10
3.2.1. Flora 10
3.2.2. Fauna 10
3.3. SISTEMAS HUMANOS 11
3.3.1. Asentamientos humanos 11
3.3.2. Actividades económicas 12
3.4. USO DEL SUELO 13
3.4.1. Uso agrícola 13
3.4.2. Uso forestal 14
3.4.3. Uso urbano 14
3.4.4. Uso minero 15
3.4.5. Áreas bajo protección oficial 15

3.5. USO DEL AGUA 15

3.5.1. Usos extractivos 16

3.5.2. Biodiversidad 19

3.5.3. Administración de las aguas del río Cachapoal y sus afluentes 20

4. ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES 22

4.1. FUNDAMENTOS DE LA ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES 24

4.2. IMPLEMENTACIÓN Y OPERATIVIDAD DE LA RED DE GENERADORES TERRESTRES 27

4.3. EXPERIENCIAS REALIZADAS EN CHILE Y EL MUNDO 29

4.3.1. Programas de estimulación de precipitaciones en la cuenca del río Cachapoal 32

4.4. METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS PROGRAMAS DE ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES 36

4.4.1. Análisis gráfico de comportamiento histórico 38

4.4.2. Análisis de correlación - regresión 39

5. EVALUACIÓN DE LOS PROGRAMAS DE ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL 41

5.1. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA Y FLUVIOMÉTRICA 41

5.1.1. Análisis de las precipitaciones mensuales 45

5.1.2. Análisis de los caudales medios mensuales 47

5.2. EVALUACIÓN DE LOS PROGRAMAS DE ESTIMULACIÓN A TRAVÉS DEL ANÁLISIS GRÁFICO DE COMPORTAMIENTO HISTÓRICO 51

5.2.1. Evaluación del comportamiento histórico de las precipitaciones registradas en la estación Sewell respecto a las de la estación San José de Maipo Subcomisaría 51

5.2.2. Evaluación del comportamiento histórico del caudal del río Cachapoal y Pangal respecto al caudal del río Tinguiririca 54

5.2.3. Evaluación del comportamiento histórico del caudal del río Cachapoal y Pangal respecto al caudal del río Maipo 59

5.3. EVALUACIÓN DE LOS PROGRAMAS DE ESTIMULACIÓN A TRAVÉS DEl ANÁLISIS DE CORRELACIÓN - REGRESIÓN.....64

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....66

7. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS 69

8. BIBLIOGRAFÍA.....71

ANEXO A: ANÁLISIS DE EFECTIVIDAD REALIZADO POR HIDROMET PARA LOS PROGRAMAS DE ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL

ANEXO B: PRECIPITACIÓN ANUAL Y CAUDAL PROMEDIO ANUAL DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y FLUVIOMÉTRICAS DEL ÁREA OBJETIVO Y CONTROL

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1: Cuenca hidrográfica del río Cachapoal (Universidad de Concepción, 2005). 4
Figura 3-2: Mapa geológico de la cuenca del río Cachapoal (Sernageomin, 2003). 6
Figura 3-3: Características hidrogeológicas de la cuenca del río Cachapoal (DGA, 1989). 7
Figura 3-4: Precipitaciones medias mensuales registradas en la estación meteorológica de Coya (Universidad de Chile, 1999).....9
Figura 3-5: Evolución del uso extractivo del agua en m^3/s (Universidad de Chile, 2008). 19
Figura 3-6: Secciones administrativas del río Cachapoal (Universidad de Concepción, 2005). 20
Figura 4-1: Cantidad de precipitación v/s tiempo (Hidromet, 1998). 23
Figura 4-2: Formación de una gota de lluvia con un núcleo de condensación de yoduro de plata (Hidromet, 1998). 24
Figura 4-3: Congelación de una partícula de agua sobreenfriada (Hidromet, 1998). 25
Figura 4-4: Métodos de introducción del nucleante en la nubosidad (Hidromet, 1998). 26
Figura 4-5: Países donde se realizan programas de estimulación de precipitaciones (Hidromet, 2011a). 30
Figura 4-6: Ubicación generadores terrestres programas de estimulación en la cuenca del río Cachapoal (adaptada de Google Earth).....33
Figura 4-7: Partes que componen un generador terrestre de yoduro de plata (Hidromet, 1998). 34
Figura 4-8: Generador terrestre de yoduro de plata dispuesto en terreno (Hidromet, 1998). 35
Figura 4-9: Análisis del coeficiente de correlación entre dos variables (Vila y Sedano, 2005). 40
Figura 5-1: Ubicación de las estaciones pluviométricas y fluviométricas empleadas en este estudio (adaptada de Google Earth). 43
Figura 5-2: Precipitación anual de las estaciones pluviométricas del área objetivo y control.....44
Figura 5-3: Caudales promedio anual de las estaciones fluviométricas del área objetivo y control.....44

Figura 5-4: Correlación de las precipitaciones registradas en la estación Sewell v/s precipitaciones registradas en estación a) Graneros, b) Rengo, c) San Fernando, d) Tobalaba, e) Pirque y f) San José de Maipo. 46
Figura 5-5: Correlación de los caudales medios mensuales del río Cachapoal en Puente Termas v/s a) río Tinguiririca en Bajo Briones, b) río Maipo en San Alfonso c) río Maipo en Las Hualtatas y d) río Maipo en El Manzano. 48
Figura 5-6: Correlación de los caudales medios mensuales del río Pangal en Pangal v/s a) río Tinguiririca en Bajo Briones b) río Maipo en San Alfonso c) río Maipo en Las Hualtatas y d) río Maipo en El Manzano. 50
Figura 5-7: Precipitación anual en las estaciones Sewell y San José de Maipo.....51
Figura 5-8: Tendencia de la razón entre las precipitaciones registradas en la estación Sewell y San José de Maipo Subcomisaría. 53
Figura 5-9: Caudal promedio anual de los ríos Cachapoal, Pangal y Tinguiririca. 55
Figura 5-10: Tendencia de la razones de caudal entre los ríos Cachapoal y Tinguiririca. 57
Figura 5-11: Tendencia de la razones de caudal entre los ríos Pangal y Tinguiririca. ..57
Figura 5-12: Caudal promedio anual de los ríos Cachapoal, Pangal y Maipo. 59
Figura 5-13: Tendencia de la razones de caudal entre los ríos Cachapoal y Maipo. 62
Figura 5-14: Tendencia de la razones de caudal entre los ríos Pangal y Maipo. 62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Población total de la cuenca del río Cachapoal (INE, 2002a). 11
Tabla 3-2: Producción anual de cobre fino minera El Teniente (Wikipedia, en línea). ..13
Tabla 3-3: Producción anual de molibdeno minera El Teniente (Wikipedia, en línea)…13
Tabla 3-4: Usos del suelo en la cuenca del río Cachapoal (INE, 2002b). 13
Tabla 3-5: Usos del agua asociados a los cauces pertenecientes a la cuenca del río Cachapoal (CADE - IDEPE, 2004). 15
Tabla 3-6: Infraestructura de riego en la cuenca del río Cachapoal en el año 1991 (DGA, 1991). 16
Tabla 3-7: Demanda neta de agua potable en la cuenca del río Cachapoal para el año 2010 (DGA, 1996). 17
Tabla 3-8: Derechos de aguas de empresas mineras en la cuenca del río Cachapoal (DGA, 1996). 18
Tabla 4-1: Relación costo/beneficio de programas de estimulación de precipitaciones para diferentes localidades (Hidromet. 2011a). 31
Tabla 4-2: Regiones de Chile en las que se ha aplicado programas de estimulación de precipitaciones a través de siembra aérea (Sepúlveda y Ormazábal, 2001). 31
Tabla 4-3: Ubicación generadores terrestres programas de estimulación en la cuenca del río Cachapoal. 34
Tabla 5-1: Estaciones pluviométricas y fluviométricas del área objetivo y control. 42
Tabla 5-2: Grado de correlación entre las precipitaciones mensuales registradas en la estación Sewell y en las estaciones del área control. 45
Tabla 5-3: Grado de correlación entre caudales medios mensuales del río Cachapoal y de los ríos Tinguiririca y Maipo. 48
Tabla 5-4: Grado de correlación entre caudales medios mensuales del río Pangal y de los ríos Tinguiririca y Maipo. 50
Tabla 5-5: Razones de precipitación (P) entre la estación Sewell y San José de Maipo Subcomisaría. 52
Tabla 5-6: Variación de la precipitación (P) registrada en la estación Sewell en relación a la registrada en San José de Maipo Subcomisaría durante el programa de estimulación líquida.....54
Tabla 5-7: Razones de caudal (Q) entre los ríos Cachapoal y Pangal frente al Tinguiririca. 56

Tabla 5-8: Variación de caudal (Q) del río Cachapoal en relación al caudal del río Tinguiririca durante el programa de estimulación líquida y sólida. 58
Tabla 5-9: Variación de caudal (Q) del río Pangal en relación al caudal del río Tinguiririca durante el programa de estimulación líquida y sólida. 58
Tabla 5-10: Razones de caudal (Q) entre los ríos Cachapoal y Pangal frente al Maipo. 61
Tabla 5-11: Variación de caudal (Q) del río Cachapoal en relación al caudal del río Maipo durante el programa de estimulación líquida y sólida. 63
Tabla 5-12: Variación de caudal (Q) del río Pangal en relación al caudal del río Maipo durante el programa de estimulación líquida y sólida. 63
Tabla 5-13: Variación de la precipitación mensual en la estación Sewell durante el programa de estimulación líquida. 65
Tabla 5-14: Variación de los caudales medios mensuales del río Cachapoal y Pangal durante los programas de estimulación líquida y sólida. 65
Tabla 6-1: Resumen de resultados obtenidos de la evaluación de los programas de estimulación líquida y sólida. 66

RESUMEN

La falta de agua afecta a diversos sectores de nuestro planeta, el que está sufriendo grandes transformaciones en su clima producto del calentamiento global. Para resolver el problema del déficit hídrico se han desarrollado e implementado varias técnicas, una de estas es la estimulación de precipitaciones, capaz de influir en los procesos físicos de la formación y crecimiento de las gotas y cristales de hielo de las nubes. En este trabajo se evalúa la efectividad de dos programas de estimulación de precipitaciones llevados a cabo en la cuenca del río Cachapoal, entre los años 2000 - 2003 y 2008 - 2011, mediante dos metodologías denominadas: análisis gráfico de comportamiento histórico y de correlación - regresión. De acuerdo a los resultados obtenidos y análisis realizados en este estudio no es posible afirmar con exactitud el grado de efectividad de los programas de estimulación de precipitaciones desarrollados en la cuenca del río Cachapoal, se requieren de más datos y análisis. Sin embargo, hay evidencia de un aumento en los caudales del río Cachapoal durante el programa de estimulación sólida, en el cual se favorece el almacenamiento de agua en las altas cumbres y glaciares, lo cual alienta a seguir con este programa, ya que el caudal del río Cachapoal es la principal fuente de abastecimiento del recurso hídrico para las diversas actividades económicas de la zona.

PALABRAS CLAVES: estimulación de precipitación, cuenca del río Cachapoal, generadores terrestres.

ABSTRACT

The lack of water affects a several sectors of our planet, who is suffering great transformations in its climate consecuence of global warming. To solve the hydric deficit's issue it has been developed and implemented several tecnics, one of them is the stimulation of precipitations, capable of influence in the fisical process of the formation and growing of drops and crystals made of ice from clouds. In this work has been evalue the efficience of two programs of precipitations stimulation carried out on the Cachapoal basin, between 2000 - 2003 and 2008 - 2011, through two methologies so called: analysis of historical behavior and of correlation-regretion. According to the results obtained and analysis performed in this study can not say exactly the effectiveness of the programs of precipitations stimulation carried out on the Cachapoal basin, it requires more data and analysis. However, there is evidence of a increase in the flows Cachapoal river during the program solid stimulation, which favors the storage of water in the high peaks and glaciers, which encourages them to continue with this program, because Cachapoal river is the main source of supply for the hydric resource for economic activities of the basin.

KEYWORDS: stimulation of precipitation, Cachapoal basin, earth generators.

1. INTRODUCCIÓN

Existe una progresiva escasez de recursos hídricos a nivel mundial, ocasionada por el crecimiento de la población que exige un mayor consumo y por posibles cambios en los ecosistemas producidos por la intervención del hombre en el medioambiente, los que han ocasionado un desorden del clima en el mundo.

Mientras algunas zonas del planeta están siendo afectadas por mayor cantidad de lluvias, sufriendo inundaciones y temporales, existen otras donde las sequías están siendo cada vez más intensas y frecuentes. La única variable meteorológica que está variando en forma uniforme en todo el planeta es la temperatura, la cual aumenta en forma sostenida cada año. Este cambio en la temperatura está produciendo serios trastornos en los regímenes de lluvias, sufriendo alteraciones apreciables tanto en cantidad como en distribución de estas.

En la actualidad es posible afirmar que no es necesario aceptar con resignación que aquellas zonas donde había abundante agua y que por el cambio climático están comenzando a sufrir sequías o bien aquellas que siempre han padecido un clima seco deban continuar por siempre en esta situación. La ciencia y la experimentación han desarrollado la capacidad de aumentar la cantidad de precipitación a través de la "Estimulación de Precipitaciones mediante la Siembra de Nubes con Yoduro de Plata", la cual influye en los procesos físicos de la formación y crecimiento de las gotas y cristales de hielo de las nubes, convirtiéndose en una alternativa real de mitigación de la alarmante tendencia que tiene la caída pluviométrica en vastas zonas del planeta o de revertir en parte el seco clima de zonas áridas o desérticas.

En la actualidad se llevan a cabo una gran cantidad de programas de estimulación de precipitaciones en decenas de países, en particular en regiones áridas y semiáridas, donde la falta de suficientes recursos hídricos limita la capacidad de estas regiones para satisfacer la demanda de alimentación y energía (Hidromet, 1998).

En Chile, específicamente en la VI Región del Libertador General Bernardo O`Higgins se han realizado dos programas de estimulación de precipitaciones a través de la siembra con generadores terrestres en parte de la cuenca del río Cachapoal, entre los años 2000 - 2003 y 2008 - 2011 (continua en la actualidad), llevadas a cabo por la empresa Asesorías y Servicios Hídricos y Meteorológicos Hidromet S.A. y solicitadas

principalmente por la Junta de Vigilancia del río Cachapoal Primera Sección y sus Afluentes y Codelco Chile División El Teniente.

El presente trabajo tiene por objeto determinar la efectividad de estos programas de estimulación de precipitaciones realizados en la cuenca del río Cachapoal. Para esto en una primera instancia se realiza una caracterización de la cuenca en estudio y se explican los fundamentos y técnicas utilizadas por Hidromet para estimular precipitaciones. Luego se evalúan las metodologías para determinar la efectividad de este tipo de programas, llegando básicamente a dos. La primera, que se describe en la sección 4.4.1, analiza el comportamiento histórico de la variable meteorológica (caudal o precipitación) del área afectada por la estimulación en relación al comportamiento de la respectiva variable observada en un área sin efecto de la estimulación, para luego extrapolarlo al período de estimulación e identificar sus efectos. La segunda metodología, que se describe en la sección 4.4.2, utiliza el análisis de correlación - regresión, donde se correlaciona la variable meteorológica (caudal o precipitación) del área afectada por la estimulación con la del área no afectada, para así encontrar una ecuación de regresión y determinar los efectos del programa de estimulación. Las series de datos de precipitación y caudal utilizadas en este estudio son presentadas y analizadas en el subcapítulo 5.1, para luego evaluar los programas de estimulación en la cuenca del río Cachapoal en los subcapítulos 5.2 y 5.3. El análisis de resultados y las conclusiones y sugerencias se exponen en los capítulos 6 y 7 respectivamente.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la efectividad de los programas de estimulación de precipitaciones en la cuenca del río Cachapoal, desarrollados por la empresa Asesorías y Servicios Hídricos y Meteorológicos Hidromet S.A.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer las técnicas utilizadas por Hidromet para estimular precipitaciones.
- Profundizar en estudios hidrológicos en cuencas de la VI Región.
- Evaluar métodos para determinar la efectividad de los programas de estimulación de precipitaciones en la cuenca del río Cachapoal.
- Contrastar los resultados obtenidos con estudios existentes en la zona de análisis.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

La cuenca hidrográfica del río Cachapoal forma parte de la VI Región del General Libertador Bernardo O'Higgins, se sitúa entre los paralelos 33°53´ y 35°01´ de latitud sur, drena una superficie total de 6.370 km^2.

El río Cachapoal de régimen pluvio - nival y de 200 km de longitud, tiene su nacimiento en la cordillera de los Andes en el sector del volcán Overo, Pico del Barroso y Nevado de los Piuquenes. Recibe sucesivamente las aguas de los ríos Las Leñas, Cortaderal y Los Cipreses, los esteros Cadena e Idahue y más abajo recibe al río Claro de Rengo y estero Zamorano por la vertiente sur. Por el norte y en la zona cordillerana, recibe los ríos Pangal y Coya. El río Cachapoal es afluente norte del río Rapel. En la parte superior de la Figura 3-1 se puede apreciar la ubicación geográfica de la cuenca dentro de la región, y en la parte inferior la ubicación del río Cachapoal y sus afluentes dentro de la cuenca.

Figura 3-1: Cuenca hidrográfica del río Cachapoal (Universidad de Concepción, 2005).

3.1. SISTEMA FÍSICO NATURAL

3.1.1. Geología y volcanismo

En la Figura 3-2 se aprecian las formaciones rocosas de la cuenca del río Cachapoal de acuerdo al mapa geológico de Chile, las cuales se describen a continuación:

- Rocas Q1, del tipo sedimentarias del Pleistoceno - Holoceno. Depósitos aluviales coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados.
- Rocas J3i, del tipo volcánicas del Jurásico. Secuencias volcánicas continentales y marinas, lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas, riolíticos con intercalaciones de areniscas calizas marinas y conglomerados continentales.
- Rocas OM2c, del tipo volcano - sedimentarias del Oligoceno - Mioceno. Secuencia volcano - sedimentaria; lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas.
- Rocas Kia3, del tipo volcánicas del Cretácico inferior alto. Secuencias y complejos volcánicos continentales, lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas, andesíticas a riolíticas.
- Rocas Pl3t, del tipo volcánicas del Pleistoceno. Depósitos piroclásticos principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso.
- Rocas Ki2m, del tipo volcano - sedimentarias del Neocomiano. Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas; lavas andesíticas y basálticas, tobas y brechas volcánicas y sedimentarias de areniscas y calizas fosilíferas.
- Rocas M3i, del tipo volcánicas del Mioceno - Medio. Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas.
- Rocas Kiag, del tipo intrusivas del Cretácico inferior alto- cretácico superior bajo. Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzodioritas de hornblenda y biotita. Asociados a mineralización de Fe, Cu, Au.

- Rocas PPl1r, del tipo sedimentarias del Plioceno - Pleistoceno. Depósitos de remoción en masa: brechas polimícticas con matriz de arena/limo en proporción variable, de flujo o deslizamiento gravitacional.
- Rocas JK1m, del tipo sedimentarias del Jurásico Superior - Cretácico Inferior. Secuencias sedimentarias marinas litorales o plataformales: calizas, lutitas, areniscas calcáreas, areniscas y coquinas.

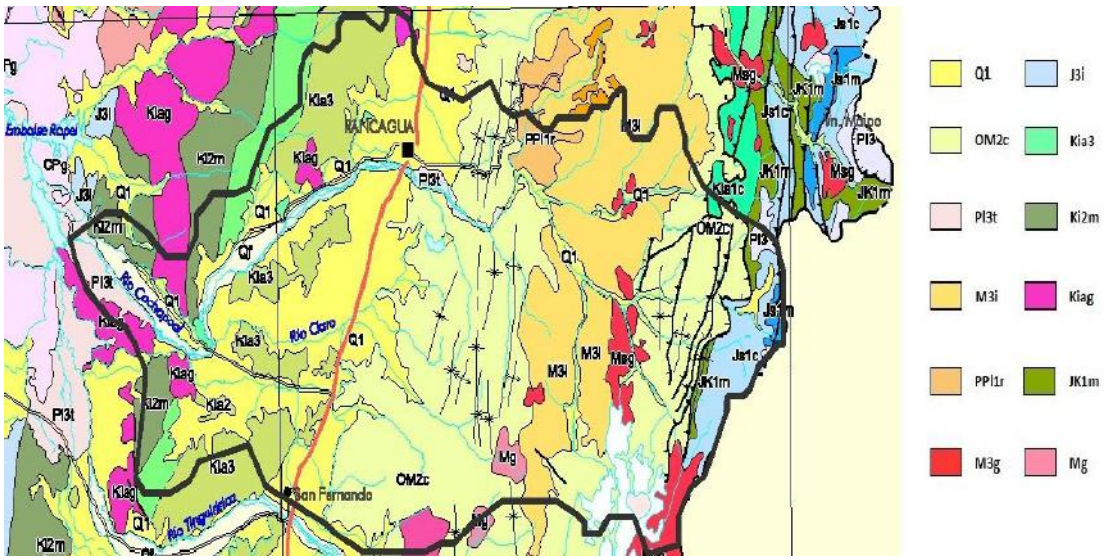

Figura 3-2: Mapa geológico de la cuenca del río Cachapoal (Sernageomin, 2003).

En la cuenca existe influencia de actividad volcánica debido a la presencia del volcán el Palomo que es un extinto estratovolcán ubicado en la provincia de Cachapoal, región de O`Higgins, al norte del volcán Tinguiririca. El volcán presenta evidencia de disección glacial, y tiene una altura de 4.850 m.s.n.m. Se alza dentro de la Reserva Nacional Río de los Cipreses.

3.1.2. Hidrogeología

Se observan dos direcciones de escurrimiento de aguas subterráneas. El primer acuífero es el que posee dirección este - oeste frente a Rancagua que drena siguiendo el curso paralelo al río Cachapoal, más abajo aflora parcialmente en el sector de Doñihue, para luego escurrir junto con el río hasta el Embalse Rapel.

El segundo acuífero drena desde el sector de Angostura de Paine en dirección norte - sur hasta confluir en el sector de Doñihue con el procedente de la cordillera de los Andes y bajar juntos por el Cachapoal hasta el Embalse Rapel.

La Figura 3-3, obtenida del Mapa Hidrogeológico de Chile, representa las características hidrogeológicas generales de la cuenca del río Cachapoal.

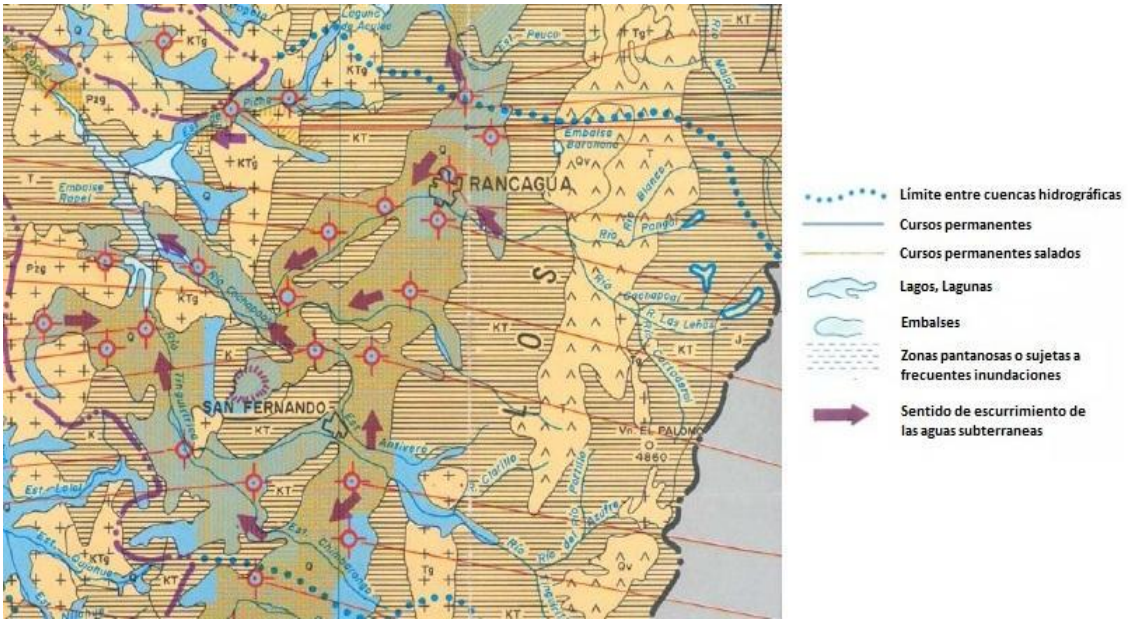

Figura 3-3: Características hidrogeológicas de la cuenca del río Cachapoal (DGA, 1989).

3.1.3. Geomorfología

Desde el punto de vista geomorfológico, la cuenca del río Cachapoal se caracteriza por presentar un territorio en el cual es posible identificar dos grandes unidades de relieve: la Cordillera de los Andes y la Depresión Intermedia.

Estas unidades geomorfológicas se originaron hace dos o tres millones de años atrás, como consecuencia de una intensa actividad volcánica asociada a grandes movimientos de la corteza terrestre, los que levantaron las montañas a su altura actual y hundieron la depresión intermedia.

La Cordillera de los Andes en la VI región presenta alturas superiores a los 4.000 m.s.n.m. y posee un ancho aproximado de 50 km. Las alturas más importantes

corresponden a Alto de los Arrieros (5.000 m.s.n.m.), El Portillo (4.986 m.s.n.m.), volcán El Palomo (4.850 m.s.n.m.) y volcán Tinguiririca (4.260 m.s.n.m.). Su relieve se formó a fines del terciario y una fuerte erosión fluvio - glacial ha disectado el relieve original, labrando profundos valles de laderas abruptas (CADE-IDEPE, 2004).

La depresión intermedia se presenta con formas planas generadas por el acarreo de material de origen glacio - fluvio - volcánico, destacando hacia el norte de la región la ciudad de Rancagua, que se extiende desde angostura de Paine hasta angostura de Pelequén, alcanzando una longitud de 60 km y un ancho aproximado de 25 km.

3.1.4. Clima

El clima templado cálido con estación seca prolongada se desarrolla prácticamente en toda la cuenca del río Cachapoal (depresión intermedia). Su característica principal es la presencia de una estación seca prolongada de 7 meses y un invierno bien marcado con temperaturas extremas. En la depresión intermedia la ciudad de Rancagua registra temperaturas medias anuales de 14,2° C, pero los contrastes térmicos son fuertes. En verano las temperaturas máximas alcanzan valores superiores a los 28° C durante el día y en invierno se encuentran temperaturas bajo los 0° C. Por efectos del relieve en el sector centro de la cuenca se presentan áreas de mayor sequedad y cantidades de precipitación media anual de 450 mm/año (Universidad de Chile, 1999).

En sectores más elevados las precipitaciones aumentan alcanzando valores medios anuales de 686 mm/año en la localidad de Coya y temperaturas medias anuales de 9,6° C en la localidad de Sewell.

En la cordillera de los Andes entre los 800 y 4.000 m.s.n.m. se desarrolla un clima templado cálido con estación seca donde las temperaturas medias en invierno se aproximan a los 0° C y las precipitaciones invernales se hacen sólidas dando lugar a ventisqueros y glaciares. La precipitación media anual registrada en el sector cordillerano alcanza valores aproximados de 1000 mm/año, acortándose así la duración de la estación seca a sólo 4 a 5 meses.

En general, los valores registrados de precipitación son mayores durante las temporadas invernales, especialmente durante los meses de mayo, junio, julio y agosto. Los meses de octubre a abril presentan menos de 40 mm de agua caída,

definiendo así la estación seca prolongada. Esto se puede apreciar en la Figura 3-4, que muestra de manera clara la estación seca prolongada de 7 meses.

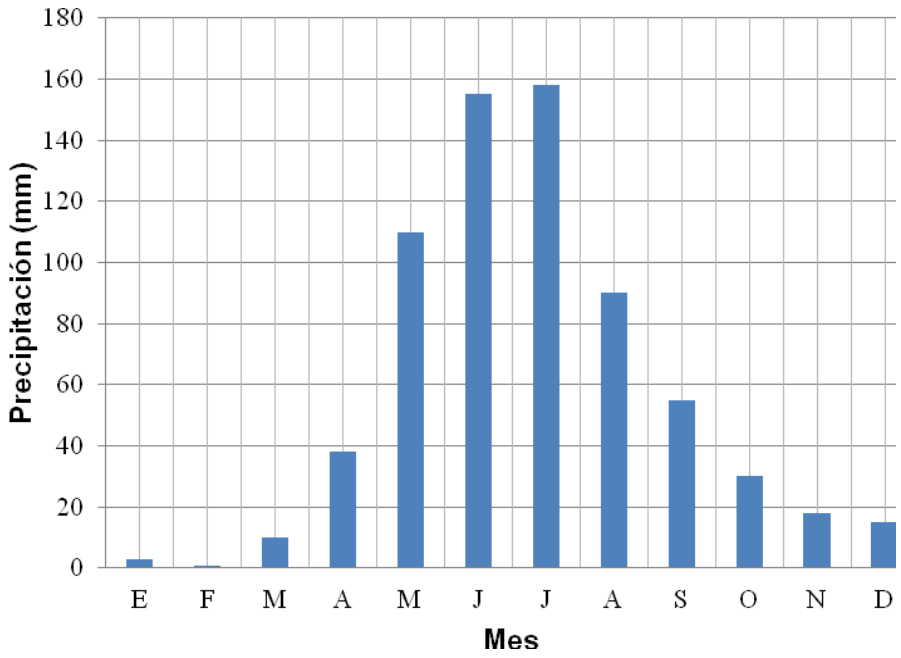

Figura 3-4: Precipitaciones medias mensuales registradas en la estación meteorológica de Coya (Universidad de Chile, 1999).

3.1.5. Suelos

En la VI región el promedio de lluvias y la alta humedad en algunas épocas del año muestran suelos aptos para la agricultura y la crianza de ganado de diversos tipos.

La cuenca del río Cachapoal posee unidades taxonómicas que corresponden básicamente a suelos molisoles, que se forman en áreas semihumedas bajo una cobertura de pastura. En esta zona es donde se encuentran los suelos más aptos para el desarrollo de la agricultura.

Además se encuentran los suelos de la Cordillera de los Andes centrales. Estos son suelos que se caracterizan porque han derivado de materiales volcánicos y de texturas gruesas. Corresponden a los suelos ubicados en los sectores de más fuerte relieve de la Cordillera de los Andes (CADE-IDEPE, 2004).

3.2. FLORA Y FAUNA

3.2.1. Flora

La flora terrestre de la cuenca, se caracteriza por la presencia de las siguientes comunidades vegetales: Bosque Esclerófilo, Bosque Caducifolio, Estepa Alto - Andina (CADE-IDEPE, 2004). Las principales características de las comunidades vegetales son las siguientes:

- Bosque Esclerófilo: el paisaje vegetal corresponde al de un bosque que se encuentra muy intervenido por encontrarse en la zona del país con mayor población. Sobre su composición florística hay pocos antecedentes. En esta formación vegetal, se distinguen las siguientes especies: Quillay, Litre, Maitén, Canelo, Boldo, Peumo, Laurel y Lingue.
- Bosque Caducifolio: constituye una formación vegetal de gran riqueza florística, pues señala el límite norte de muchas especies leñosas y herbáceas de los bosques más australes. En su fisionomía de bosque caducifolio tiene un papel importante la participación de ciprés de la cordillera, especie arbórea que muestra una alta frecuencia. En esta formación vegetal, se distinguen las siguientes especies: Roble, Zarzaparrilla y Ciprés.
- Estepa Alto - Andina: esta formación es poco conocida desde el punto de vista botánico. Debido a lo severo de las condiciones ambientales las plantas han evolucionado en tres formas fundamentales: plantas de cojín, coirones y arbustos bajos de follaje reducido. En esta formación vegetal, se distinguen las siguientes especies: Coirón de Vega y Chaurilla.

3.2.2. Fauna

Dentro de la fauna existente en la zona se pueden encontrar quiques, conejos, liebres, coipos, ratones, chillas, guiñas, chingues y guanacos (que actualmente se encuentran sólo en la Cordillera de los Andes). Entre las aves pueden encontrarse garzas, huairavos, gallinas ciegas, gaviotas, picaflor, pilpilenes, loicas, becacinas, golondrinas, perdicillas, piqueros, pollitos de mar, fardelas y petreles. Entre las aves rapaces se pueden encontrar águilas, nucos y bailarines.

En el valle y hacia el interior de la cordillera, la fauna presenta características propias. Además de especies como el guanaco, se encuentran vizcachas, culpeos, pumas, gato montés, quiques, piuquenes, cóndores, águilas, tórtolas, lechuzas, perdices cordilleranas, patos cortacorrientes, gallinas, queltehues, loros tricahues, jotes, tiuques, golondrinas, patos, chincoles, zorzales, chillas, gatos salvajes, tórtolas, peucos, zorros, vizcachas, cernícalos, insectos y arácnidos de todo tipo y tamaño. También se puede encontrar ranas chilenas, lagartos, sapos de rulo y culebras (Wikipedia, en línea).

3.3. SISTEMAS HUMANOS

3.3.1. Asentamientos humanos

La cuenca del río Cachapoal ocupa aproximadamente un 38% del territorio de la VI Región del General Libertador Bernardo O'Higgins.

Tabla 3-1: Población total de la cuenca del río Cachapoal (INE, 2002a).

Localidad	Población año 2002 (Hab.)
Rancagua	214.344
Rengo	50.830
San Vicente de Tagua Tagua	40.253
Machalí	28.628
Olivar	12.335
Requinoa	22.161
Pichidegua	17.756
Codegua	17.181
Doñihue	16.916
Graneros	25.961
Las Cabras	20.242
Coltauco	16.228
Peumo	13.948
Quinta de Quilcoco	11.380
Total	**508.163**

La población que abarca la cuenca según el censo del año 2002 es de 508.163 habitantes, lo que corresponde al 62% del total de la población de la región. La densidad de población alcanza los 80 hab/km^2.

Los centros urbanos de la cuenca que concentran mayor población, lo constituyen Rancagua y Rengo, con 214.344 y 50.830 habitantes respectivamente, representando ambas un 52% del total de la población de la cuenca.

Entre otras localidades urbanas importantes se encuentran Machalí, Graneros y San Vicente de Tagua Tagua. La población total de las localidades de la cuenca se presenta en la Tabla 3-1.

3.3.2. Actividades económicas

Las principales actividades económicas son la silvoagropecuaria y la minera.

La actividad agrícola en la zona destaca por su importante superficie destinada al cultivo de cereales, legumbres y cultivos industriales (raps, maravilla y remolacha). Entre los cultivos anuales se destaca el maíz y el trigo. Superficies menores de siembra están destinadas a la papa, poroto y arroz.

Además existe una gran explotación frutícola destacando la producción de duraznos, manzanas, peras, uva de mesa, naranjas, kiwis, entre otros. De la actividad pecuaria, la producción avícola es la más relevante.

El sector minero más importante está representado por la gran minería del cobre de El Teniente, localizado en la Cordillera de los Andes a 2.500 m.s.n.m. en la cuenca superior del río Cachapoal. Esta mina comenzó a ser explotada en 1904 y se compone de casi 2.400 km de galerías subterráneas, por lo que se considera la mina subterránea de cobre más grande del mundo. La producción anual de cobre fino de la mina El Teniente para diferentes años se presenta en la Tabla 3-2. Además como subproducto se obtiene molibdeno, presentándose su producción en la Tabla 3-3.

Entre los minerales no metálicos se encuentra el cuarzo explotado en Doñihue.

El sector industrial destaca por su diversidad, ya que cuenta con actividades como minería, industria de alimentos, conservas, caldos concentrados, industria avícola, fabricación de productos metálicos, fabricación de artículos de pulpa, papel y cartón, fabricación de vinos, fabricación de productos químicos industriales y frigoríficos relacionados con la conservación de todo tipo de carnes.

Tabla 3-2: Producción anual de cobre fino minera El Teniente (Wikipedia, en línea).

Producción			
Año	**Cobre fino (ton)**	**Año**	**Cobre fino (ton)**
1965	90.000	2000	355.700
1985	319.100	2005	437.400
1990	300.500	2008	381.224
1995	322.800	2009	404.035

Tabla 3-3: Producción anual de molibdeno minera El Teniente (Wikipedia, en línea).

Producción	
Año	**Molibdeno (ton)**
2008	4.500
2009	5.179

3.4. USO DEL SUELO

Los usos del suelo en la cuenca del río Cachapoal se resumen en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Usos del suelo en la cuenca del río Cachapoal (INE, 2002b).

Usos del suelo	**Superficie (Km^2)**	**Superficie de la cuenca destinada para cada uso (%)**
Praderas	1.036	16,3
Terrenos agrícolas y agricultura de riego	1.288	20,2
Plantaciones forestales	64	1,0
Áreas urbanas e industriales	50	0,8
Minería industrial	13	0,2
Bosque nativo y bosque mixto	2.791	43,8
Otros usos	458	7,2
Terrenos esteriles y otros no aprovechables	670	10,5
Total	**6.370**	100

3.4.1. Uso agrícola

Los terrenos de uso agrícola son los más importantes de la cuenca. Estos se ubican de preferencia en los llanos de la depresión intermedia, alcanzando un total de 1288 km^2, lo que corresponde al 20,2% de la superficie total de la cuenca.

Los grupos de cultivo predominantes corresponden a cereales y frutales. En la cuenca la superficie destinada a frutales alcanza los 553 km^2 y la de cereales 280 km^2. Otros grupos de cultivo presentes en la cuenca son los de hortalizas, leguminosas, flores, plantas forrajeras, viñas y parronales viníferos, viveros y semilleros (INE, 2007).

Es evidente la importancia del sector agrícola en la región, pero se debe tener en cuenta que es muy poco probable que esta superficie aumente en el futuro, más bien debería disminuir por motivos como: expansión de las ciudades y carreteras, pérdida de calidad de los suelos debido a la erosión, abandono de tierras, entre otros (Palma, 2004).

3.4.2. Uso forestal

La superficie de suelo destinada al uso de tipo forestal abarca 64 km^2 que corresponden al 1,1% de la superficie total de la cuenca. La superficie de bosque nativo y bosque mixto alcanza los 2.791 km^2 que corresponden al 43,8% de la superficie total de la cuenca.

La superficie forestal anteriormente mencionada está constituida principalmente por plantaciones de Pino Radiata y Eucalipto, que son el sustento de la economía del sector forestal regional y nacional.

3.4.3. Uso urbano

La superficie que abarca el uso urbano es de 50 km^2 correspondiente al 0,8% de la superficie total de la cuenca. Este tipo de uso comprende a ciudades, pueblos y zonas industriales.

El uso urbano, está dado por el emplazamiento de la población mayoritariamente en el sector oriente. En esta zona las ciudades con mayor número de población urbana corresponden a Rancagua, Rengo, Machalí y Graneros que alcanzan un total de 293.572 habitantes, según el censo poblacional realizado por el INE el año 2002. En cuanto a su distribución espacial, estas localidades se encuentran próximas a los principales cauces que posee la cuenca: Cachapoal, Claro de Rengo y Pangal.

3.4.4. Uso minero

La superficie destinada a la minería industrial, es reducida pero de gran importancia económica. Comprende una superficie de 13 km^2 que equivalen al 0,2% de la superficie total de la cuenca. Este tipo de uso, se presenta en el sector nororiente de la cuenca, en la localidad de Rancagua.

3.4.5. Áreas bajo protección oficial

Las áreas bajo protección oficial pertenecientes al Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE) que se emplazan en la cuenca, corresponden al Parque Nacional Las Palmas de Cocalán y Reserva Nacional río Los Cipreses.

3.5. USO DEL AGUA

Se pueden distinguir 4 tipos de uso de las aguas superficiales presentes en una cuenca: usos in - situ, usos extractivos, usos para la biodiversidad y usos ancestrales. Dentro de los usos in - situ se distingue la acuicultura y la pesca deportiva y recreativa, las cuales no se dan en la zona de estudio.

Tabla 3-5: Usos del agua asociados a los cauces pertenecientes a la cuenca del río Cachapoal (CADE - IDEPE, 2004).

Cauce	Extractivos					Biodiversidad
	Riego	Captación agua potable	Hidroeletricidad	Actividad Industrial	Actividad Minera	
Río Cachapoal	▪	▪		▪	▪	▪
Río Claro de Rengo	▪			▪		
Río Pangal	▪		▪		▪	

Además no existen derechos de agua otorgados a comunidades indígenas por lo que los usos ancestrales tampoco se dan en la cuenca. Finalmente solo existen usos del agua del tipo extractivos y para la biodiversidad, los que se plasman en la Tabla 3-5, asociados a cada uno de los cauces de la cuenca.

3.5.1. Usos extractivos

Los usos de agua extractivos son los que consumen en su lugar de origen. A continuación se mencionan los usos extractivos en la cuenca en estudio.

a. Riego

El uso del agua para riego es aquel que incluye la aplicación del agua desde su origen natural o procedente de tratamiento. Se distingue riego irrestricto y restringido. El primero es el que contempla agua, cuyas características físicas, químicas y biológicas la hacen apta para su uso regular en cada una de las etapas de desarrollo de cultivos agrícolas, plantaciones forestales o praderas naturales. En el riego restringido, en cambio, la aplicación se debe controlar, debido a que sus características no son las adecuadas para utilizarlas en todas las etapas de cultivos y plantaciones.

El acelerado proceso de desarrollo industrial en la cuenca ha provocado un aumento de la contaminación hídrica de los cauces. Las principales fuentes de contaminación de las aguas son las diversas agroindustrias, las industrias vitivinícolas, los criaderos de cerdos, la minería del cobre y las descargas de aguas servidas. Todo esto determina un riego restringido en la zona de estudio (Orrego, 2002).

Tabla 3-6: Infraestructura de riego en la cuenca del río Cachapoal en el año 1991 (DGA, 1991).

Fuente	Canales (Nº)	Longitud (km)	Embalses (Nº)	
			Menores	Mayores
Río Cachapoal	371	1.594, 50	227	3
Río Claro de Rengo	130	662,61	16	1
Estero Zamorano	64	447,45	11	-

La infraestructura de riego de la cuenca al año 1991 contaba con 565 canales de regadío, a través de 2.704,56 km de canal, regulados a través de 254 embalses menores y 4 embalses mayores (DGA, 1991). En la Tabla 3-6 se presenta un mayor detalle de la infraestructura de riego existente en la cuenca ese año.

b. Captación para agua potable

La captación para agua potable es aquella que se realiza en las plantas de tratamiento para el abastecimiento tanto residencial como industrial.

La ciudad de Rancagua ejerce una demanda de agua potable que corresponde al 46% del total ejercido por las diferentes ciudades y pueblos de la cuenca.

En la Tabla 3-7 se muestran las demandas netas de agua potable proyectas al año 2010 para diferentes localidades de la cuenca.

Tabla 3-7: Demanda neta de agua potable en la cuenca del río Cachapoal para el año 2010 (DGA, 1996).

Localidad	Demanda (l/s)
Rancagua	799
Rengo	80,11
Graneros	49,33
San Vicente	44,18
Machalí	28,9

c. Generación de energía eléctrica

La cuenca del río Cachapoal es de gran importancia para el abastecimiento del Sistema Interconectado Central (SIC). En esta cuenca existen 4 centrales hidroeléctricas (DGA, 1996), que se describen a continuación:

- Central Pangal: central que pertenece a Codelco, aprovecha las aguas del río Pangal. Es una central de pasada puesta en servicio en el año 1921. Posee una potencia instalada de 19.200 kW y su caudal de diseño es de 5.800 l/s.
- Central Coya: central que pertenece a Codelco, aprovecha las aguas de los ríos Cachapoal y Pangal. Es una central de pasada puesta en servicio en el año 1916. Posee una potencia instalada de 19.000 kW y su caudal de diseño es de 30.000 l/s.
- Central Sauzal: esta central pertenece a Endesa, aprovecha las aguas del río Cachapoal, las que capta en un lugar ubicado próximo a la descarga de la central Coya, y las aguas del río Claro de Rengo. Es una central de pasada

puesta en servicio en el año 1948. Posee una potencia instalada de 76.800 kW y su caudal de diseño es de 73.500 l/s.

- Central Sauzalito: esta central pertenece a Endesa, aprovecha parte de las aguas de la central Sauzal. Es una central de pasada puesta en servicio en el año 1959. Posee una potencia instalada de 9.500 kW y su caudal de diseño es de 45.000 l/s.

En la actualidad se encuentra en construcción la central hidroeléctrica Chacayes, central de pasada, con una potencia instalada de 111 MW.

d. Actividad industrial

La mayoría de las industrias existentes en la cuenca del río Cachapoal pertenecen al rubro agroindustrial y alimenticio.

Las empresas a las cuales se les ha otorgado derechos de agua con fines industriales se localizan principalmente en el río Cachapoal.

e. Actividad minera

En la Tabla 3-8 se presentan los derechos de aguas otorgados a empresas mineras sobre cursos superficiales, donde se especifica la fuente y la fecha en la que se le concedió los derechos sobre esta.

Tabla 3-8: Derechos de aguas de empresas mineras en la cuenca del río Cachapoal (DGA, 1996).

Minera	Fecha	Fuente	Derecho (l/s)
CODELCO	09-02-1987	Estero Coya	279
Compañia Minera río Pangal	11-10-1971	Río Blanco	5,8
Sociedad Minera el Teniente	16-09-1982	Río Pangal	140
Sociedad Minera el Teniente	16-09-1982	Río Pangal	460
CODELCO	22-05-1990	Río Blanco	1.200
CODELCO	28-06-1990	Estero Los Leones	3.000
CODELCO	27-12-1978	Río Cachapoal	70

En la Figura 3-5 se muestra la evolución del uso extractivo del agua en m^3/s entre los años 1990 y 2006.

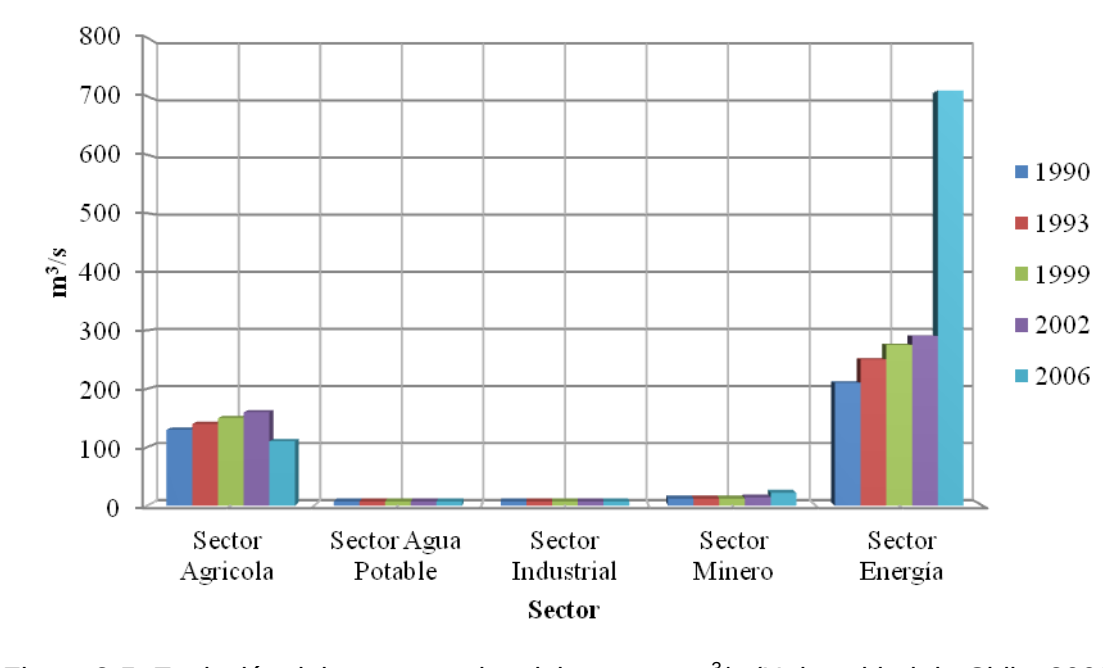

Figura 3-5: Evolución del uso extractivo del agua en m^3/s (Universidad de Chile, 2008).

Cabe destacar que el uso extractivo del río Cachapoal concedido el año 1872 fue de 87,26 m^3/s y en la actualidad es de 91,46 m^3/s, lo que determina que no existe una variación sustancial en el uso extractivo de este río a lo largo del tiempo (Hilliard y Romeu, 2009).

3.5.2. Biodiversidad

La protección y conservación de comunidades acuáticas son abordadas desde el punto de vista del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE). En la cuenca del río Cachapoal existen dos sitios contemplados en el SNASPE:

- Parque Nacional Las Palmas de Cocalán: Alberga la mayor población de palmas chilenas (*Jubaea chilensis*). Es una de las especies más importante de toda la zona central, por su gran belleza y por sus productos (la savia, base de la miel de palma, y sus frutos o "coquitos"). En el parque habitan también otras especies vegetales, como el Roble (*Nothofagus glauca*), el Quillay (*Quillaja saponaria*), el Boldo (*Peumus boldus*), el Litre (*Lithraea caustica*), el Peumo (*Cryptocaria alba*) y la Patagua (*Crinodendron patagua*).
- Reserva Nacional Río de los Cipreses: Esta reserva es el resultado de una combinación de fenómenos volcánicos, glaciares y fluviales. Dentro de sus

límites coexisten variadas especies de animales y aves, como el zorro culpeo, el loro tricahue (especie en peligro de extinción) y el zorro chilla. Uno de los aspectos más interesantes del parque son los bosques de ciprés de la cordillera que coexisten con ejemplares de olivillo de la cordillera. Otro aspecto notable son los petroglifos dejados por pequeños grupos de cazadores hace cinco mil u ocho mil años atrás en diversos lugares de la reserva, como la Piedra del Indio.

3.5.3. Administración de las aguas del río Cachapoal y sus afluentes

Las aguas del río Cachapoal son administradas por tres juntas de vigilancia, que tienen jurisdicción en distintos tramos del río y actúan independientemente unas de otras. Las secciones administrativas en que se divide el río Cachapoal se pueden apreciar en la Figura 3-6.

Figura 3-6: Secciones administrativas del río Cachapoal (Universidad de Concepción, 2005).

Las juntas de vigilancia tienen por objeto administrar y distribuir las aguas a que tienen derecho sus miembros, explotar las obras de aprovechamiento común, velar por la calidad y conservación del recurso, y preservar el medio ambiente (Universidad de Concepción, 2005).

La Junta de Vigilancia del río Cachapoal Primera Sección y sus Afluentes fue creada el 29 de mayo de 1952. Como junta de vigilancia riega las comunas de San Francisco, Graneros, Codegua, Rancagua, Machalí, Olivar y parte de las comunas de Rengo y Quinta de Tilcoco. El área de riego abarca una superficie de 55.581,75 hectáreas de las cuales 48.578,03 son de riego directo y 7.003,72 de riego por derrames.

La Junta de Vigilancia del río Cachapoal Segunda Sección y sus Afluentes fue creada el 4 de noviembre de 1964. Comprende el tramo entre la desembocadura del estero la Cadena, comuna de Doñihue y la desembocadura del estero Idahue, comuna de Coltauco. La junta de vigilancia se compone de 25 canales, contando con un total de 3000 regantes. Cuenta con canales básicos de tierra de bajo revestimiento, lo cuales tienen un promedio de recorrido de 15 km por cada canal. Además cuentan con compuertas de admisión y obras de distribución, tales como marco partidores y cajas de compuertas.

La Junta de Vigilancia del río Cachapoal Tercera Sección y sus Afluentes fue creada el 15 de julio de 1952. Su jurisdicción comprende desde la desembocadura del estero Idahue con el río Cachapoal, hasta su confluencia con el río Tinguiririca en el lugar denominado La Junta. Las comunas que riega son Peumo, Las Cabras y Pichidegua. Cuenta a la fecha con un total de 4000 regantes (Federación de Juntas de Vigilancia, en línea).

Cabe destacar que las tres juntas de vigilancia se encuentran registradas en la Dirección General de Aguas (D.G.A.).

Debido a la manera no integrada en que operan las juntas de vigilancia del río Cachapoal se producen problemas y desavenencias entre los usuarios de la segunda y primera sección durante los años de sequía, debido a que las aguas que son administradas por la junta de vigilancia de la segunda sección sólo tienen como recursos disponibles el estero la Cadena y eventuales derrames y sobrantes de la primera sección. Esta situación no afecta al quehacer de la junta de vigilancia de la tercera sección, debido a que su jurisdicción sobre los afluentes del río Claro, esteros Idahue y Zamorano y sobre la gran cantidad de aguas del río Cachapoal que afloran en esta sección, le asegura el uso del recurso durante todas las temporadas.

En la cuenca del río Cachapoal, además, coexiste la junta de vigilancia de la primera sección del río Claro de Rengo, afluente de la tercera sección del río Cachapoal, que cuenta con un total de 1200 regantes y tiene competencia hasta el estero Pichiguay. En la segunda sección del río Claro sólo existen comunidades de aguas, sin presencia de una organización de segundo nivel (Universidad de Concepción, 2005).

4. ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), en su vocabulario meteorológico internacional, define sequía como: "un período de tiempo con condiciones meteorológicas anormalmente secas, suficientemente prolongado como para que la falta de precipitación cause un grave desequilibrio hidrológico" (OMM, en línea). Este es un fenómeno de lento inicio, que ataca al comienzo casi sin manifestación, pero que luego de un tiempo, sus efectos se hacen paulatinamente más graves y profundos, afectando prácticamente a todas y cada una de las actividades humanas: agricultura, ganadería, generación hidroeléctrica, agua potable, entre otras. Al igual que su inicio, la recuperación es lenta y larga, debiendo volver a la normalidad no sólo el agua superficial (ríos, lagos y embalses), sino que también el complejo sistema de aguas subterráneas (Hidromet, 2011a).

Para combatir el problema de la sequía la ciencia meteorológica ha desarrollado una técnica que permite mitigar sus efectos y ayudar a la recuperación posterior, basada en la siembra de nubes con yoduro de plata (AgI), de manera de incrementar la caída natural de precipitaciones.

La técnica de estimulación de precipitaciones mediante la siembra de nubes con yoduro de plata es factible de aplicar por diversos métodos, entre los que destacan dos: aéreo y terrestre. Ambos métodos son efectivos, diferenciándose principalmente en sus costos de operación, donde el terrestre es aproximadamente 4 a 5 veces menor.

Esta tecnología se ha aplicado por más de medio siglo en muchos países con buenos y probados resultados. En general, los resultados obtenidos presentan una alta variabilidad, que van como promedio inferior entre un 5 a un 8% de aumento de las precipitaciones, si el sistema nuboso está en decadencia o en estado de disipación, y en el rango superior entre un 25 a un 30% de aumento si el sistema tormentoso esta

en desarrollo o en su máximo nivel de intensidad. Es en base a largos programas de aplicación ininterrumpida de siembra de nubes que se ha llegado a definir un aumento promedio de precipitación de un 10 a un 15% por sobre lo que caería en forma natural, lo que es aceptado mundialmente (Hidromet, 2011b).

Los beneficios socioeconómicos asociados a una mayor disponibilidad de agua, o a reducir un déficit, tiene un fuerte impacto en una mejor calidad de vida de las personas, permitiendo mantener ecosistemas y zonas productivas, entre otros innumerables beneficios.

Como muestra la Figura 4-1, en la actualidad (1) las necesidades de agua aumentan y la disponibilidad de ella tiende a disminuir. El momento crítico (2), cuando la necesidad es igual a la disponibilidad, será el comienzo de una época de serias dificultades.

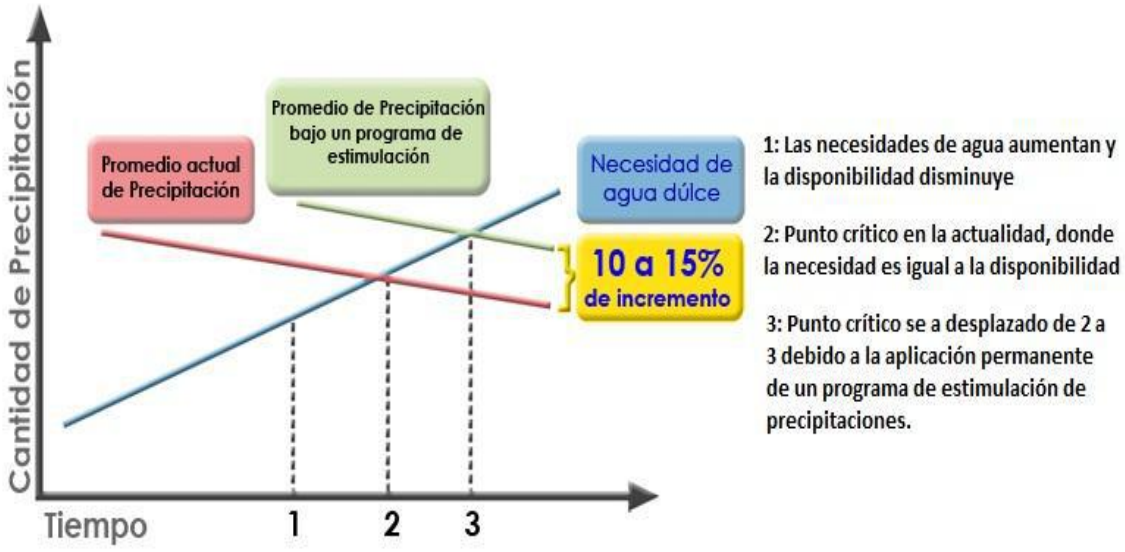

Figura 4-1: Cantidad de precipitación v/s tiempo (Hidromet, 1998).

La aplicación permanente de un programa de estimulación de precipitaciones, no evitará el momento de crisis, pero lo alejará varias décadas (3), tiempo suficiente para aplicar una serie de medidas, tanto a nivel público como privado, como por ejemplo desarrollo de nuevas tecnologías de riego y aplicación generalizada de las actuales, construcción de nuevos embalses y canalización de todos los niveles de transporte de

agua, desarrollo viable de plantas de tratamiento de aguas servidas con niveles de pureza aceptables para uso de riego, etc. (Hidromet, 1998).

4.1. FUNDAMENTOS DE LA ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES

La tecnología actualmente disponible referida a los avances en el conocimiento de los procesos físicos de la formación de la lluvia, ha permitido modificar la tradicional idea que las variables atmosféricas eran inmanejables y solamente debían soportarse de la mejor forma posible. Han surgido tecnologías que han puesto en la mano del hombre la posibilidad de aumentar el recurso hídrico, interviniendo el ciclo hidrológico en la fase de la precipitación.

Las nubes están formadas por gotas microscópicas de agua y cristales de hielo, las que por su escaso peso, no pueden vencer la atracción que existe entre ellas y caer a tierra. Para la formación de sólo una gota de lluvia, hace falta que miles de estas gotas microscópicas se unan para adquirir el peso suficiente y caer a tierra por gravedad.

Las gotas microscópicas no logran unirse unas con otras por sí solas. Es necesaria la presencia de una partícula sólida, alrededor de la cual las gotitas comienzan a adherirse formando una gota de lluvia. Estas partículas están presentes naturalmente en la atmósfera, en forma de sales, polvo, humo, etc. y son conocidas como "núcleos de condensación".

La estimulación de precipitaciones interviene en este punto del ciclo del agua, aumentando artificialmente la cantidad de "núcleos de condensación" al interior de la nubosidad. Con ello se logra aumentar la cantidad de gotas de lluvia y, por consiguiente, incrementar la cantidad de precipitación que llega a tierra, como se muestra en la Figura 4-2.

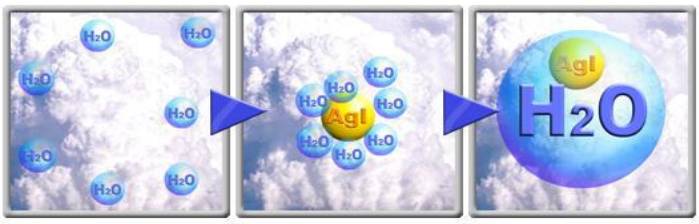

Figura 4-2: Formación de una gota de lluvia con un núcleo de condensación de yoduro de plata (Hidromet, 1998).

El núcleo de condensación o "nucleante" más utilizado es el Yoduro de Plata (AgI) que debe ser introducido en la nube a la altura de la isoterma -5 ºC o más fría para obtener la mayor efectividad. Además de servir para multiplicar el proceso de coalescencia, cumple con otra importante función como es la de congelar las partículas de agua "sobreenfriadas", es decir, partículas que se mantienen en estado líquido a pesar de estar a temperaturas bajo los 0 ºC. Este cambio de estado (líquido a sólido), que se aprecia en la Figura 4-3, libera cierta cantidad de calor latente a la atmósfera, produciendo un calentamiento en la nube del orden de 1 a 2 ºC y aumentando su inestabilidad, haciendo que las corrientes ascendentes de aire dentro de ellas las haga crecer, principalmente en la vertical. Ello conduce a una intensificación general de la actividad tormentosa en la nubosidad, y a un aumento de la precipitación que cae de ella.

Figura 4-3: Congelación de una partícula de agua sobreenfriada (Hidromet, 1998).

Una característica fundamental de los eventos de mal tiempo es que están asociados a una extensa área de baja presión. Las bajas presiones se caracterizan por tener intensas corrientes ascendentes de aire. Esta característica es aprovechada por la técnica de siembra de nubes mediante generadores terrestres, ya que son estas corrientes ascendentes las que se encargan de transportar el nucleante (AgI) desde la superficie terrestre al interior de la nubosidad en pocos minutos, alcanzando los niveles propicios de temperatura para desarrollar el máximo de potencialidad del sistema.

Cada gramo de Yoduro de Plata, aporta 10^{13} núcleos de condensación. Con la introducción en la nubosidad de esta enorme cantidad de núcleos extras, se obtiene un incremento promedio de precipitación del orden de 10 a 15%, dependiendo de muchos factores, como lo son la oportunidad de la siembra, el grado de actividad de los sistemas nubosos, la intensidad de las corrientes ascendentes, la cantidad de agua sobreenfriada presente en la nubosidad, etc.

Existen diversos métodos para introducir el nucleante en la nubosidad, siendo los más conocidos y usados el sistema de "Generadores Terrestres" y la "Siembra Aérea", como se puede apreciar en la Figura 4-4. Las ventajas y desventajas de ambos métodos se detallan a continuación.

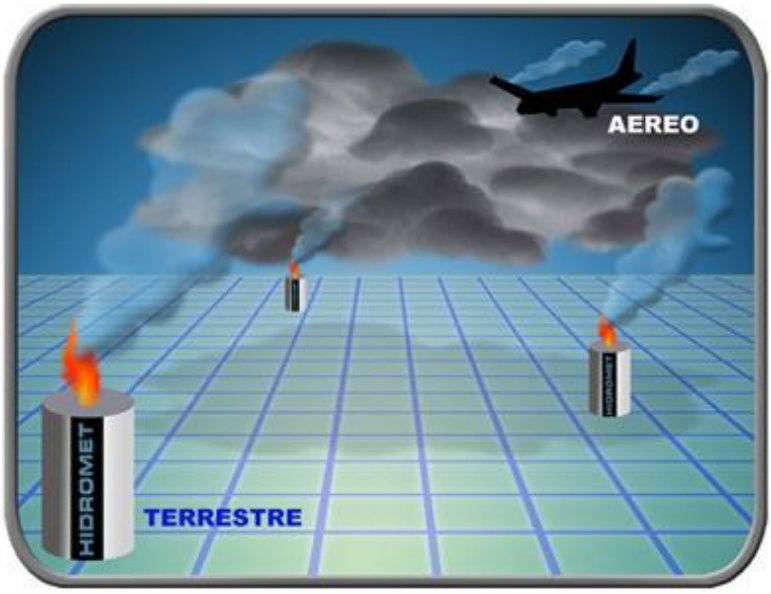

Figura 4-4: Métodos de introducción del nucleante en la nubosidad (Hidromet, 1998).

El sistema aéreo asegura en un 100% la introducción del nucleante en la nubosidad. Sus principales desventajas son el alto costo, el riesgo de la operación y la restringida superficie que puede abarcar. Lo encarece el utilizar material aéreo por una parte, y la necesidad de apoyo de un radar meteorológico por otra, para determinar la áreas dentro de la nubosidad con adecuada cantidad de agua sobreenfriada.

El sistema terrestre no asegura que la totalidad del nucleante ingrese a la nubosidad, pudiendo perderse algo en el trayecto. Si bien requiere de un costo inicial de implementación de la red, cuando ésta se instala en forma definitiva el costo de operación es varios órdenes más bajo que el sistema aéreo. Es útil tanto para superficies extensas como reducidas y no requiere equipamiento tan sofisticado como un radar, pues no es necesario determinar qué sectores dentro de la banda nubosa son los más apropiados, ya que se siembra y estimula la totalidad de la banda o sistema frontal asociado al área de baja presión.

Una de las características más relevantes y positivas que posee el sistema de quemadores terrestres, es que una vez instalada la red en una región entra en operación "permanente", es decir, es utilizable en todas y cada una de las situaciones atmosféricas que reúnan las condiciones para ser estimuladas dentro de la temporada de lluvias. Por el contrario, los elevados costos del sistema aéreo siempre obligan a contratarlo por cortos períodos, dejando fuera importantes eventos lluviosos.

Independiente del modo a utilizar, el éxito de esta técnica radica en su continuidad y permanencia en el tiempo. Si se considera que la estimulación de lluvias consiste en generar un porcentaje extra de precipitación a la que caerá en forma natural, lógicamente esta cantidad extra de agua será proporcional al agua que naturalmente caería. De acuerdo a esto, en un año seco, es decir con poca lluvia, la cantidad proporcional que será posible obtener mediante la siembra de nubes también será escasa. Al contrario, en un año con precipitación normal o abundante, el porcentaje extra a obtener será también considerable.

Dentro de la gran variabilidad que presenta el parámetro de la precipitación, la aplicación permanente y continua de un programa de estimulación, dará como resultado que los años secos no lo sean tanto, y que los porcentajes extras de lluvia que se obtengan en los años lluviosos sirvan de respaldo para futuros años secos, ya sea como nieve en las altas cumbres o como precipitación líquida en el interior de la cuenca.

4.2. IMPLEMENTACIÓN Y OPERATIVIDAD DE LA RED DE GENERADORES TERRESTRES

El sistema de estimulación de precipitaciones mediante una red de generadores terrestres que emplean AgI, se basa en la implementación de una red de equipos generadores en lugares estratégicamente seleccionados, los cuales deben estar a una distancia aproximada de 10 a 15 km entre ellos.

El programa es dirigido desde un centro de monitoreo atmosférico y de operaciones, el cual determina las condiciones adecuadas para la estimulación y decide la activación o desactivación de la red de generadores.

El centro de monitoreo y de operaciones debe estar a cargo de un meteorólogo especialista en modificación del tiempo y un técnico a cargo de los equipos. La red de generadores debe estar a cargo de operadores, los que se encargan de la mantención menor de los equipos, la recarga de la solución de AgI, la activación y desactivación de los generadores de acuerdo a las instrucciones del centro de operaciones y el reporte diario de las condiciones atmosféricas de su zona.

La ubicación de los generadores obedece a los siguientes criterios:

- Régimen de viento, tanto en superficie como en altura.
- Ubicación y desplazamiento de los sistemas nubosos productores de la precipitación.
- Factibilidad geográfica de accesibilidad a los lugares de instalación.
- Existencia de medios de comunicación con el lugar (radio, teléfono, etc.)

El equipo generador es de un diseño técnico altamente especializado, pero a la vez presenta facilidad de manipulación, necesitando una capacitación mínima para su manejo, la cual es apoyada por un manual de operación, por lo que el aspecto de funcionabilidad del sistema con operadores voluntarios o propios, no presenta problemas o riesgos.

Una vez instalada la red, la forma de operar es la siguiente:

- Ante la presencia de nubosidad tormentosa apta de ser estimulada, lo cual se visualiza en el centro de análisis y monitoreo, se alerta a la red para que permanezca atenta al momento de la orden de encender los generadores. La capacidad técnica que posee el centro de monitoreo le permite discriminar lo suficiente para activar toda o parte de la red, dependiendo de la extensión de los sistemas nubosos. Este centro permanece operativo permanentemente.
- Detectada la condición atmosférica y momento para iniciar la estimulación, se activa la parte de la red correspondiente, con indicación del tiempo que deberán permanecer encendidos los generadores.
- Mientras se presente la condición de mal tiempo el sistema se mantiene activo, evaluando la caída pluviométrica, la evolución de las condiciones atmosféricas, y determinando la activación y desactivación de la red.

- El técnico se debe encontrar permanentemente disponible para concurrir a solucionar eventuales problemas con los generadores, asegurando así una operación continua y eficiente.

Una vez concluida la precipitación, se desactiva la operación. El equipo técnico reúne todos los antecedentes y registros de tiempo (cantidad de precipitación caída). Los operadores abastecen los equipos de insumos y verifican el correcto funcionamiento de éstos, procediendo a su revisión y/ó reparación si fuese necesario, a objeto de asegurar un funcionamiento óptimo a la espera de condiciones atmosféricas apropiadas para volver a estimular (Hidromet, 1998).

4.3. EXPERIENCIAS REALIZADAS EN CHILE Y EL MUNDO

La posibilidad de influir artificialmente en los mecanismos de precipitación introduciendo determinados reactivos en las nubes fue constatada por primera vez en 1946 en los laboratorios de investigación de General Electric en Schenectady New York. Desde entonces en el mundo se han dedicado grandes esfuerzos y recursos al desarrollo de medios de siembra cada vez más eficientes y al esclarecimiento de los procesos físicos involucrados en la formación de las precipitaciones. Programas estables, permanentes y continuos de estimulación de precipitaciones se han realizado por más de 50 años en muchos países con problemas de disponibilidad de agua, como China, Israel, Estados Unidos, Venezuela, Cuba, México, España, Rusia, Chile, Argentina, entre otros.

En la actualidad, China se ha destacado en el desarrollo de esta actividad, donde en casi el 70% de su territorio se aplican en forma continua y regular programas de incremento de las precipitaciones y de supresión de granizo. La experiencia de Israel también es destacable, siendo uno de los pioneros en esta actividad, lo que le ha permitido en un clima casi desértico desarrollar una agricultura notable. Estados Unidos, fundador de esta tecnología, desarrolla programas operacionales desde hace décadas en lugares donde las precipitaciones son escasas o bien donde el granizo afecta a las plantaciones agrícolas, destacando 69 programas de estimulación en 11 estados.

En la Figura 4-5 se puede apreciar la experiencia a nivel mundial en relación a los programas de estimulación, destacando 150 programas operativos en 37 países.

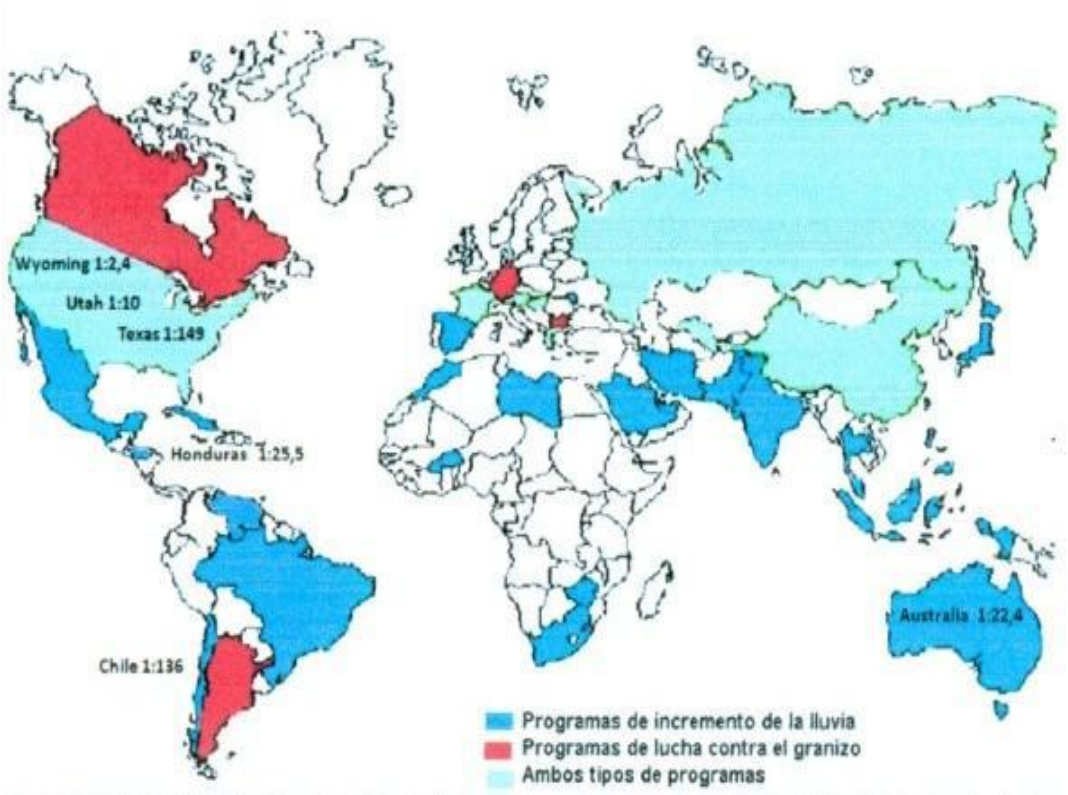

Figura 4-5: Países donde se realizan programas de estimulación de precipitaciones (Hidromet, 2011a).

Aludiendo a la relación costo/beneficio de este tipo de programas se incluyen algunos obtenidos para los países antes mencionados, los que se plasman en la Tabla 4-1. Cabe destacar que el resultado costo/beneficio varía dependiendo del lugar, uso del agua, condiciones meteorológicas, eficiencia del programa y tipo de programa (invierno o verano) (Hidromet, 2011a).

En Chile a mediados de la década de los años 50 se intentó estimular la precipitación en lugares como Copiapó, Vallenar, Ovalle, Valparaíso y Farellones. Se efectuaron una serie de experimentos que no tuvieron el éxito esperado, ya que fueron hechos en forma artesanal usando quemadores terrestres poco efectivos. Además no se tenía el conocimiento adecuado de la física de las nubes, ya que se estimularon nubes que no poseían las características adecuadas para ser tratadas.

Tabla 4-1: Relación costo/beneficio de programas de estimulación de precipitaciones para diferentes localidades (Hidromet. 2011a).

Localidad	Costo/Beneficio
Utah	1:10
Australia	1:22,4
Honduras	1:25,5
Chile	1:136
Cuba	1:120
Wyoming	1:2,4

Tabla 4-2: Regiones de Chile en las que se ha aplicado programas de estimulación de precipitaciones a través de siembra aérea (Sepúlveda y Ormazábal, 2001).

Año	Región
1987	IV
1988	Metropolitana
1989	III, IV, VII y Metropolitana
1990	I, III, IV, VI, VII y Metropolitana
1991	I, III, IV y VII
1992	I, III, IV y VII
1993	I, III y IV
1994	III y IV
1995	III, IV y V
1996	IV, V y Metropolitana
1997	IV y V
1998	VI, VII, IX y X
1999	IV, V, VI, VII, VIII, X y Metropolitana

No fue sino hasta la década de los años 60 que en el país las investigaciones interesadas en modificar artificialmente el tiempo atmosférico tuvieron éxito gracias al trabajo de científicos australianos del S.C.I.R.O. (Scientific Commonwealth and Industrial Research Organization), quienes con su aporte técnico y capacitación dieron origen al proyecto M.E.T.A. (Modificación Experimental del Tiempo Atmosférico), desarrollado entre los años 1960 y 1970. Este proyecto fue la antesala de los programas que desde la segunda mitad de los años 70 y hasta fines de los 90 se realizaron en el país. En la Tabla 4-2 se puede apreciar los programas de estimulación de precipitaciones realizados en el país a través del método de siembra aérea,

realizados por la empresa Centro Privado de Servicios Aéreos Limitada, CEPRISER (Sepúlveda y Ormazábal, 2001).

Desde el año 2000 se está aplicando el sistema en base a generadores terrestres de yoduro de plata en la VI Región, llevada a cabo por la empresa Asesorías y Servicios Hídricos y Meteorológicos Hidromet S.A., con una razón costo/beneficio bastante más conveniente y con niveles similares de eficiencia y efectividad.

4.3.1. Programas de estimulación de precipitaciones en la cuenca del río Cachapoal

Se han realizado dos programas de estimulación de precipitaciones en la cuenca del río Cachapoal, entre los años 2000 - 2003 y 2008 - 2011 (ambos períodos de cuatro años), este último sigue en operación. Ambos programas fueron ejecutados por la empresa Asesorías y Servicios Hídricos y Meteorológicos Hidromet S.A., contratada para el programa 2000 - 2003 por la Junta de Vigilancia del río Cachapoal Primera Sección y sus Afluentes, Codelco Chile División El Teniente, el Ministerio de Agricultura (Gobierno de Chile), la Empresa de Servicios Sanitarios El Libertador (ESSEL) y la empresa de agroinsumos COAGRA S.A., y para el programa 2008 - 2011 por la Junta de Vigilancia del río Cachapoal Primera Sección y sus Afluentes, Codelco Chile División El Teniente y la empresa hidroeléctrica Pacific Hydro S.A.

Las motivaciones principales para realizar este tipo de programas en la cuenca son las siguientes:

- Conservación de los recursos: Asegurar que las fuentes de agua estén provistas y evitar el retroceso de los glaciares, es decir que estos no pierdan masa de hielo.
- Que exista disponibilidad hídrica instantánea, lo que asegura menor sequía, mejor generación eléctrica y conservación de la flora y fauna.
- Reducir el riesgo de déficit hídrico, lo que permite a las mineras como Codelco División el Teniente operar a máxima capacidad.

En el primer programa de estimulación (2000 - 2003) se privilegió la caída de precipitación líquida, a diferencia del segundo (2008 - 2011) que privilegió la caída de precipitación sólida. Existen algunos cambios en el programa 2008 - 2011 respecto del

programa 2000 - 2003. En el programa 2008 - 2011 el período de cada temporada se inició el 15 de abril y concluyó el 15 de septiembre de cada año, a diferencia del programa 2000 - 2003 cuyo período de cada temporada se inició el 1 de marzo y concluyó el 30 de octubre. Además en el programa 2008 - 2011 se puso como norma de operación que la isoterma 0° C estuviera a una altura no superior a los 2500 m.s.n.m., en caso contrario no se realizaría la operación de estimulación.

En ambos programas se utilizaron 8 generadores terrestres de yoduro de plata, los cuales se ubicaron en la ladera de los cerros al este de la ciudad de Rancagua y dentro de la cuenca misma, entre la ciudad y el nacimiento del río Cachapoal, en la Tabla 4-3 se indica la ubicación de cada generador. En el período 2008 - 2011, por el hecho de privilegiar la caída de precipitación sólida (nieve), se reinstalaron algunos equipos respecto del programa 2000 - 2003, manteniéndose solo 4 ubicaciones originales y trasladando las otras a cotas más altas (ver Figura 4-6).

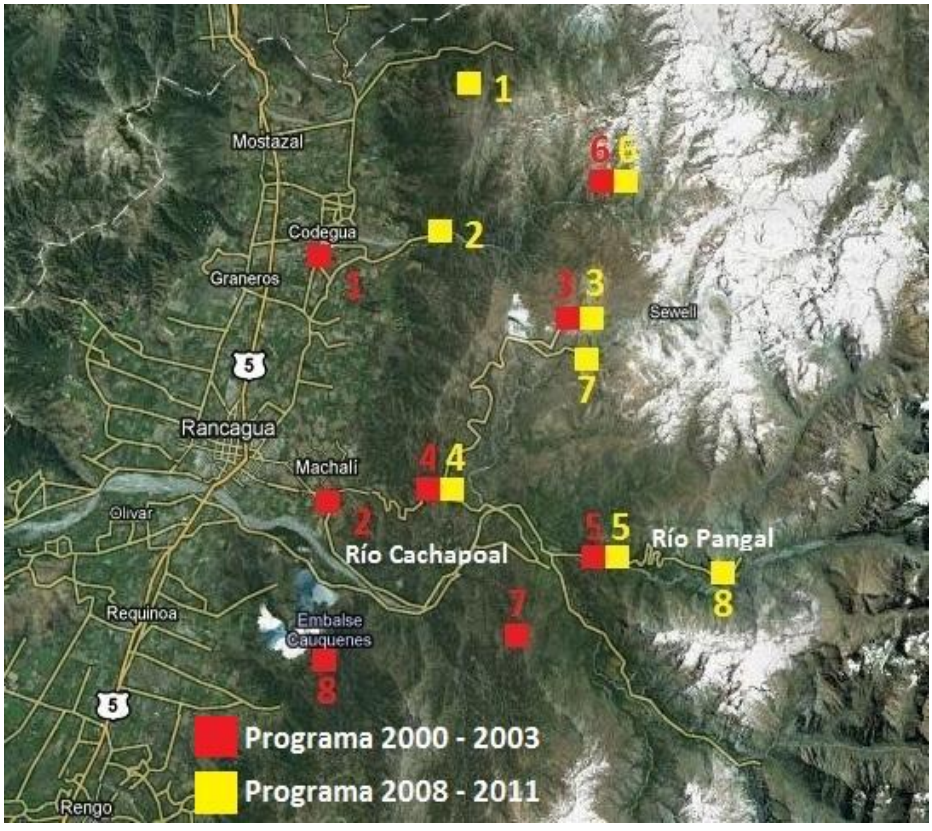

Figura 4-6: Ubicación generadores terrestres programas de estimulación en la cuenca del río Cachapoal (adaptada de Google Earth)

Tabla 4-3: Ubicación generadores terrestres programas de estimulación en la cuenca del río Cachapoal.

N°	Ubicación de generadores terrestres programa 2000 - 2003	Ubicación de generadores terrestres programa 2008 - 2010
1	Codegua	Picarquin
2	Nogales	La Leonera
3	Colón	Colón
4	Coya	Coya
5	Pangal	Pangal
6	Chapa Verde	Chapa Verde
7	Cipreses	Caletones
8	Parrones	Bocatoma Pangal

Los equipos generadores utilizados en ambos programas de estimulación están compuestos de 3 partes principales (ver Figura 4-7):

- Caseta protectora (A): Dentro de ella se encuentra el tanque de solución de yoduro de plata y el sistema de cañerías del equipo.
- Panel del operador (B): Desde esta parte se realiza el encendido y apagado del equipo, solo el operador puede tener acceso a él.
- Chimenea (C): En esta se realiza la combustión de la solución de yoduro de plata.

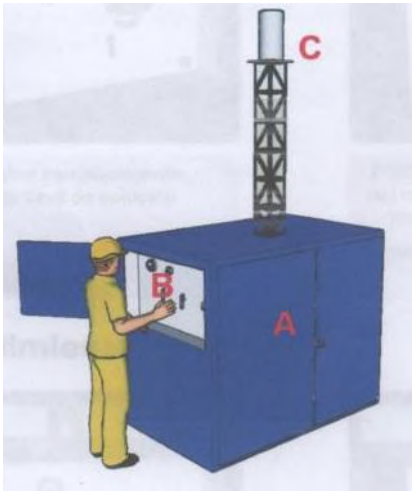

Figura 4-7: Partes que componen un generador terrestre de yoduro de plata (Hidromet, 1998).

Cada equipo generador posee efecto sobre un área de 150 km^2, por lo que la red de 8 equipos logra cubrir un área de 1200 km^2 (Hidromet, 2011a). En la Figura 4-8 se muestra el equipo generador dispuesto en terreno.

Figura 4-8: Generador terrestre de yoduro de plata dispuesto en terreno (Hidromet, 1998).

Hidromet a través de técnicas estadísticas, descritas en las secciones 4.4.1 y 4.4.2, ha evaluado la efectividad de los programas de estimulación de precipitaciones realizados en esta cuenca. Las principales consideraciones y resultados obtenidos de esta evaluación se describen a continuación.

Para el análisis del programa de estimulación 2000 - 2003 Hidromet estableció el comportamiento histórico entre la variable meteorológica caudal de la zona afectada o beneficiada por el programa de estimulación de precipitaciones (área objetivo) y la zona no afectada por ella (área control), es decir, la relación entre ellas sin la influencia de un elemento externo como lo es el programa de estimulación, para posteriormente analizar y evaluar como varió esta relación histórica cuando se aplicó este. Para esto determinó la relación histórica entre los caudales del río Cachapoal (área objetivo) y los caudales del río Tinguiririca (área control), a través de las razones de caudal entre ambos año a año. Se utilizó un período histórico de caudal para ambos ríos hasta antes de la aplicación del programa de estimulación, desde el año 1970 a 1999 (30 años), en el que se desecho años que poseían más de 3 meses sin información, por lo

que finalmente consideró 25 de los 30 años originales para el período histórico. Finalmente agrupó las razones de caudal, calculando un promedio de estas cada 5 años (quinquenio), para luego comparar la tendencia que presentaban estos quinquenios en relación al comportamiento que tuvo este parámetro en los 4 años del programa de estimulación, vale decir, el período bajo la acción de un elemento desestabilizador en la relación entre los caudales de los ríos. Los resultados obtenidos registran un aumento del caudal del río Cachapoal en relación al río Tinguiririca de aproximadamente un 15,6% (Hidromet, 2004) (ver Anexo A).

Para el programa 2008 - 2011 Hidromet utilizó el método estadístico de correlación - regresión. Para esto definió como área objetivo el río Cachapoal y como área control al río Maipo, ubicado al norte de éste. Para realizar la correlación entre los caudales de ambos ríos, utilizó como período histórico la información fluviométrica desde enero de 1990 hasta marzo del año 2000 (cuando comenzó el programa de estimulación 2000 - 2003), más el período de receso entre marzo del 2004 a mayo del 2008, obteniendo un total de 176 meses como período histórico (no afectado por el programa de estimulación). La correlación entre los caudales de ambos ríos la determinó a través del coeficiente de correlación de Pearson (r), obteniendo un r = 0,834 y la ecuación de regresión respectiva, a través de la cual obtuvo los porcentajes de variación de caudal del río Cachapoal para los meses a analizar en el programa de estimulación. Los resultados obtenidos por Hidromet para el programa 2008 - 2010 registran un aumento del caudal del río Cachapoal de un 18,6% (Hidromet, 2010), en el Anexo A se presenta en mayor detalle estos resultados. Cabe destacar que Hidromet realizó solo el análisis de los años 2008 y 2009, debido que no contaba con la información necesaria, es decir con los caudales medios mensuales hasta febrero del año 2011.

4.4. METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS PROGRAMAS DE ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES

En general, es difícil evaluar el efecto de la estimulación de precipitaciones debido al gran costo que significa implementar equipos para estos fines, además de las pocas estaciones meteorológicas que registran los efectos de estos programas (INIA, 1998). Algunas de las metodologías utilizadas con mayor frecuencia son el uso de radar en la banda C, TITAN y los instrumentos snow pillow (INIA, 1998).

El radar meteorológico detecta blancos que son capaces de reflejar la energía que emite el propio radar. Estos blancos suelen ser zonas de precipitación cuando las condiciones de propagación de las ondas electromagnéticas en la tropósfera son las normales. Mientras mayor es la intensidad de precipitación la energía devuelta es mayor. De esta forma, el radar detecta las zonas de precipitación caracterizándolas en su extensión, intensidad y movimiento. Los radares meteorológicos operativos suelen trabajar en la banda C cuya longitud de onda es de aproximadamente 5 cm. A menor longitud de onda mayor es la atenuación de la señal.

El software especializado TITAN (Thunderstorm Identification Tracking, Analysis, and Nowcasting) se desarrolló en la década de 1980 con el objetivo inicial de evaluar la eficacia de un experimento de mejora de precipitaciones realizadas en Sudáfrica, en la localidad de Nelspruit. A finales de la década de 1990 TITAN fue mejorado en apoyo del programa de estimulación de precipitaciones realizado en México, en la localidad de Coahuila.

Los instrumentos denominados “snow pillow”, deben ser instalados tanto en la zona afectada por la estimulación de precipitaciones como en una zona no afectada por ella. Por comparación se puede determinar el efecto de este tipo de programas. Esta metodología presenta algunas limitaciones:

- El instrumento “snow pillow” solo sirve para medir peso de nieve acumulada en un cierto punto y no altura de nieve, por lo que es incierto correlacionar la variable peso con altura por el efecto de la densidad de la nieve. Además se hace muy dificultoso medir la precipitación en forma de lluvia. Cuando el objetivo es medir la nieve, se recurre a dos o tres instrumentos diferentes, que en conjunto permiten medir la cantidad de nieve. Instalar este tipo de instrumentos en la cordillera resulta de un costo bastante elevado.
- Los instrumentos deben ser instalados en la alta cordillera, por lo que se dificulta la obtención de información en el caso de fuertes nevazones y ventiscas.

Sin embargo las metodologías más utilizadas son las basadas en métodos estadísticos, que utilizan las series de datos históricas de caudal o precipitación tanto de la zona afectada por la estimulación de precipitaciones, como de las no afectadas (Hidromet, 2011a).

A continuación se describen las metodologías que se emplearán en este estudio, las cuales son las mismas que utilizó Hidromet para analizar el efecto de los programas de estimulación en la cuenca del río Cachapoal. La primera metodología analiza el comportamiento histórico de la variable meteorológica (caudal o precipitación) del área objetivo o de siembra en relación a la del área control o sin efecto de siembra, de manera de identificar los efectos de un elemento desestabilizador como lo es el programa de estimulación de precipitaciones. La segunda metodología de correlación - regresión estima como se hubiese comportado la variable meteorológica (caudal o precipitación) del área objetivo en relación a lo observado en el área control durante el período de estimulación, mediante una ecuación de regresión. Esta metodología ha sido utilizada para analizar la efectividad de estos programas de estimulación en Estados Unidos (estado de Utah), Honduras (embalse El Cajón y Lago Yojoa), entre otros lugares (Griffith et al., 1997). A través de ambas metodologías es posible determinar las variaciones de la variable meteorológica del área objetivo en el período del programa de estimulación de precipitaciones.

El objetivo no es determinar si existe aumento o disminución en la precipitación, ya que este comportamiento de la variable podría ser resultado de variaciones naturales y haber afectado no sólo al área bajo el programa de estimulación, sino a todo el entorno. Lo importante es prestar atención a la variación que presenta la variable meteorológica examinada una vez iniciado el programa con respecto a su comportamiento histórico, con el fin de poder atribuir a la técnica de estimulación de precipitaciones como único elemento perturbador en dicha relación.

4.4.1. Análisis gráfico de comportamiento histórico

La presente metodología analiza el comportamiento histórico de la variable meteorológica (caudal o precipitación) del área objetivo en relación al comportamiento histórico de la respectiva variable observada en el área control, para luego extrapolarlo al período de estimulación (Hidromet, 2004). El procedimiento para realizar este análisis es el que se describe a continuación:

- Se calculan los valores anuales de la variable meteorológica del área objetivo y control. Para el caso del caudal se calculan los caudales promedio anual y para la precipitación las precipitaciones anuales.

- De manera de determinar y analizar la línea de tendencia de la variable meteorológica para el período histórico, se grafican los valores anuales calculados en el período común tanto del área objetivo como control, hasta antes de la aplicación del programa de estimulación.
- De manera de determinar el comportamiento de la variable meteorológica del área objetivo respecto a la del área control, se calcula la razón entre los valores anuales de estas.
- Para determinar y analizar la línea de tendencia histórica de las razones de la variable meteorológica del área objetivo y control, se grafican estas en el período histórico.
- Finalmente el análisis consiste en proyectar la línea de tendencia obtenida para las razones de la variable en el período histórico y suponer como hubiese sido lo más probable para el período de la estimulación, obteniéndose así un valor esperado para cada uno de los años estimulados. Por último se compara el valor de la razón real obtenido para cada año de la estimulación con el valor esperado de la razón obtenido de proyectar la línea de tendencia histórica, dando así el porcentaje de variación de la variable meteorológica del área objetivo en relación al área control en el período del programa de estimulación de precipitaciones.

4.4.2. Análisis de correlación - regresión

La metodología de correlación - regresión, se basa en elegir una variable meteorológica que se vea afectada por la estimulación, tal como precipitación, masa de nieve o caudal. Se utilizan datos históricos de la variable elegida para desarrollar un análisis de correlación - regresión, con el fin de estimar cómo habría sido la variable del área fijada como objetivo, en relación a la observada en el área control. Las estimaciones de la ecuación de regresión permiten comparar el comportamiento de la variable en su estado natural en el área determinada como objetivo de aquellas que realmente se dieron en el período de estimulación, con el fin de encontrar cualquier indicio de incremento o disminución en la variable (Dennis, 1980).

Se define primeramente cual será el área objetivo (zona que se ve afectada por el programa de estimulación de precipitaciones) y cual el área control (zona con

condiciones climáticas y geográficas similares al área objetivo), de manera de poder comparar el comportamiento de una en relación a la otra en un período histórico, sin elementos externos que influyan en esa relación, para posteriormente determinar cómo varía esta relación cuando se introduce un elemento desestabilizador como lo es el programa de estimulación.

Para el cálculo de la ecuación de regresión, así como de la correlación entre la variable meteorológica del área objetivo y control, se utiliza un período común de la serie de datos histórica de la variable escogida hasta antes de la aplicación del programa de estimulación.

La correlación que pueda existir entre la variable meteorológica del área objetivo y control será determinada a través del coeficiente de correlación lineal de Pearson (r), cuyo valor oscila entre -1 y 1.

Cuando el valor de r se aproxime a 1 la correlación entre las variables tiende a ser lineal directa, y cuando se aproxime a -1 la correlación tiende a ser lineal inversa. Cuando el valor de r es igual a 0 quiere decir que no hay correlación lineal, pero puede haber otro tipo de correlación. En la Figura 4-9 se resume el análisis del coeficiente de correlación entre dos variables.

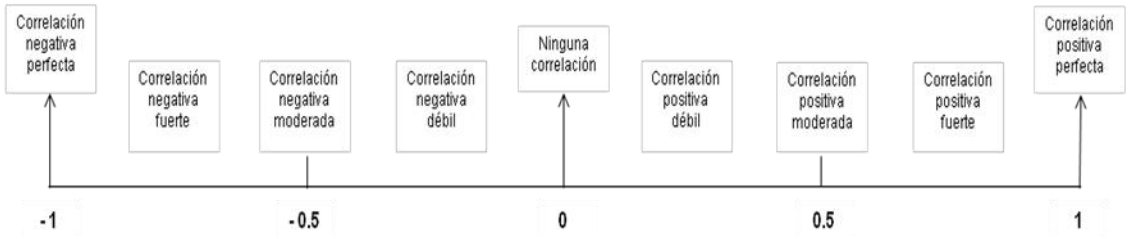

Figura 4-9: Análisis del coeficiente de correlación entre dos variables (Vila y Sedano, 2005).

Una vez obtenidas las correlaciones, se debe determinar cuál es la mejor correlación de la variable meteorológica del área objetivo con las del área control, para así finalmente obtener la ecuación de regresión. En el caso que la correlación sea débil se deberá utilizar para el análisis otra serie de datos histórica de la variable meteorológica del área control, con el fin de encontrar una correlación más fuerte.

Una vez obtenida la ecuación de regresión para la variable meteorológica del área objetivo se calcula un pronóstico para los meses a evaluar en el programa de estimulación. Cada uno de estos pronósticos de la variable meteorológica se compara con lo realmente obtenido para cada uno de los meses analizados, obteniendo un porcentaje de variación mes a mes. Finalmente se obtendrá un porcentaje promedio de variación de la variable meteorológica para el programa de estimulación.

5. EVALUACIÓN DE LOS PROGRAMAS DE ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL

En el presente capítulo se evalúa la efectividad que han tenido los programas de estimulación de precipitaciones en la cuenca del río Cachapoal. Para esto se definen y analizan las series de precipitaciones mensuales y caudales medios mensuales a utilizar, para finalmente evaluar la efectividad de los programas a través del análisis gráfico de comportamiento histórico y de correlación - regresión.

5.1. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA Y FLUVIOMÉTRICA

La elección de las estaciones pluviométricas y fluviométricas del área objetivo se debe exclusivamente a que son las únicas que registran los efectos de los programas de estimulación de precipitaciones en la cuenca del río Cachapoal, siendo las más próximas a ellas las actuantes como área control, debido a que pertenecen a la misma cuenca o a una cuenca adyacente con condiciones climáticas y orográficas muy similares a la zona de estudio, lo que permite obtener fuertes correlaciones entre ellas.

La información de precipitaciones mensuales ha sido proporcionada por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y Codelco Chile División El Teniente. Las estaciones pluviométricas requeridas son las que se presentan en la Tabla 5-1 (DGA, 1985). Se utilizan estaciones pertenecientes a la cuenca del río Maipo y a la cuenca del río Cachapoal, donde la estación pluviométrica de Sewell (área objetivo) es la que registra los efectos del programa de estimulación 2000 - 2003, debido a que privilegió la caída de precipitación líquida.

La información de caudales medios mensuales utilizada para la realización del presente trabajo ha sido proporcionada por la Dirección General de Aguas (DGA) y la Junta de Vigilancia del río Cachapoal Primera Sección y sus Afluentes. Las estaciones

fluviométricas requeridas para los ríos pertenecientes al área objetivo (Cachapoal y Pangal) y los ríos pertenecientes al área control (Tinguiririca y Maipo), son las que se presentan en la Tabla 5-1 (DGA, 1977). Las estaciones fluviométricas río Cachapoal en Puente Termas y río Pangal en Pangal son las que registran los efectos de los dos programas de estimulación de precipitaciones realizados en la cuenca del río Cachapoal. Cabe destacar que los datos de caudales medios mensuales registrados en las estaciones fluviométricas río Cachapoal en Puente Termas y río Pangal en Pangal son prácticamente naturales (la mayor cantidad de extracciones son posteriores), lo que permite atribuir cualquier alteración de caudal en el período del programa prácticamente solo a la estimulación de precipitaciones. Las estaciones fluviométricas que se presentan en la Tabla 5-1 obedecen a régimen nival, salvo las estación río Tinguiririca en Bajo Briones que obedece a régimen mixto, es decir con influencias tanto pluviales como nivales. La ubicación de las estaciones pluviométricas y fluviométricas se puede apreciar en la Figura 5-1.

Tabla 5-1: Estaciones pluviométricas y fluviométricas del área objetivo y control.

Tipo Estación	N°	Nombre	Área	Latitud S	Longitud W	Altitud m.s.n.m.
Pluviométrica	1	Sewell	Objetivo	34°05’	70°22’	2155
	2	Graneros Exp. SNA	Control	34°04’	70°44’	475
	3	Rengo Sendos	Control	34°24’	70°52’	319
	4	San Fernando Sendos	Control	34°35’	71°00’	350
	5	Tobalaba Aeródromo	Control	33°27’	70°32’	638
	6	Pirque	Control	33°40’	70°37’	640
	7	San Jose de Maipo Subcomisaría	Control	33°38’	70°21’	940
Fluviométrica	1	Río Cachapoal en Puente Termas	Objetivo	34°15’	70°34’	700
	2	Río Pangal en Pangal	Objetivo	34°14’	70°19’	1500
	3	Río Tinguiririca en Bajo Briones	Control	34°43’	70°49’	560
	4	Río Maipo en las Hualtatas	Control	33°58’	70°08’	1820
	5	Río Maipo en San Alfonso	Control	33°44’	70°18’	1092
	6	Río Maipo en el Manzano	Control	33°35’	70°22’	850

En las Figuras 5-2 y 5-3 se presentan las series de precipitación anual y caudales promedio anual de las estaciones del área objetivo y control.

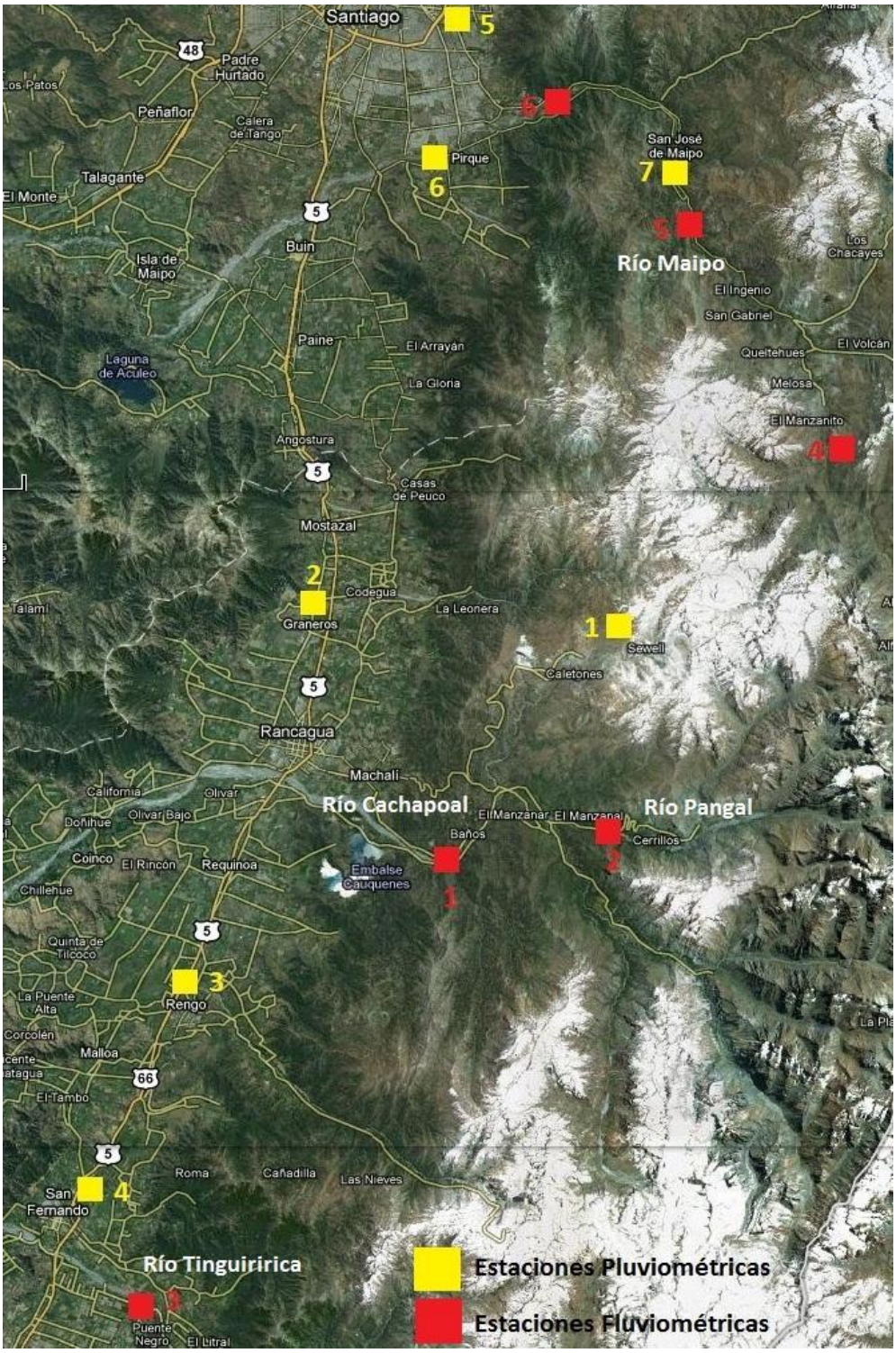

Figura 5-1: Ubicación de las estaciones pluviométricas y fluviométricas empleadas en este estudio (adaptada de Google Earth).

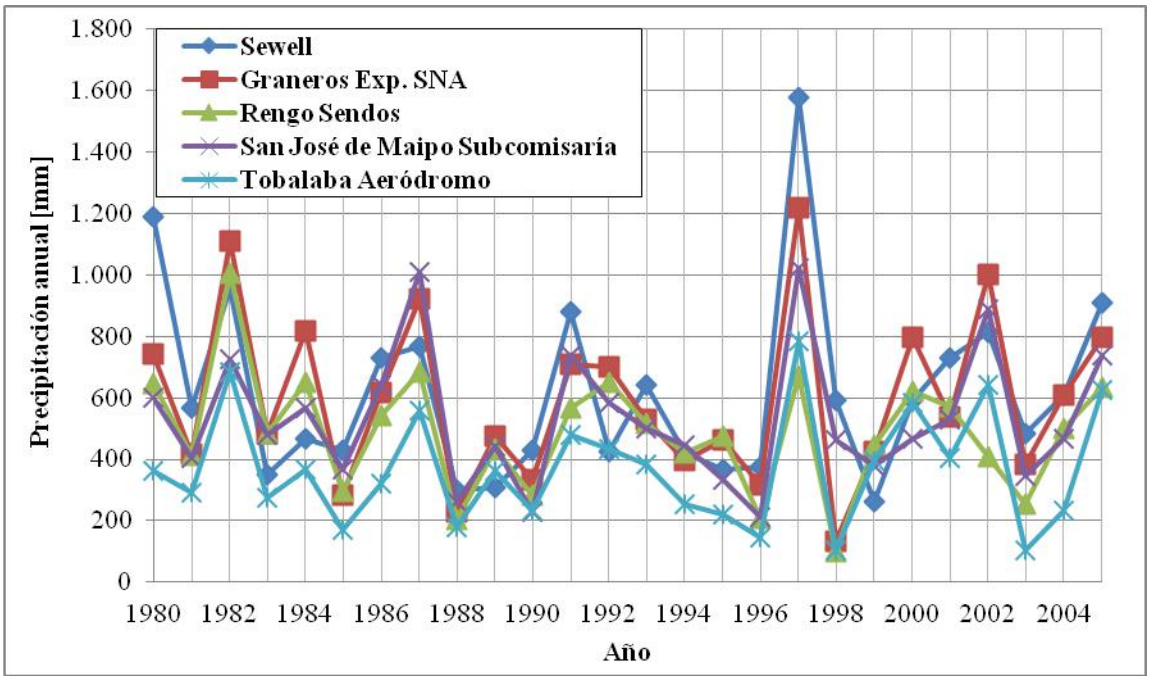

Figura 5-2: Precipitación anual de las estaciones pluviométricas del área objetivo y control.

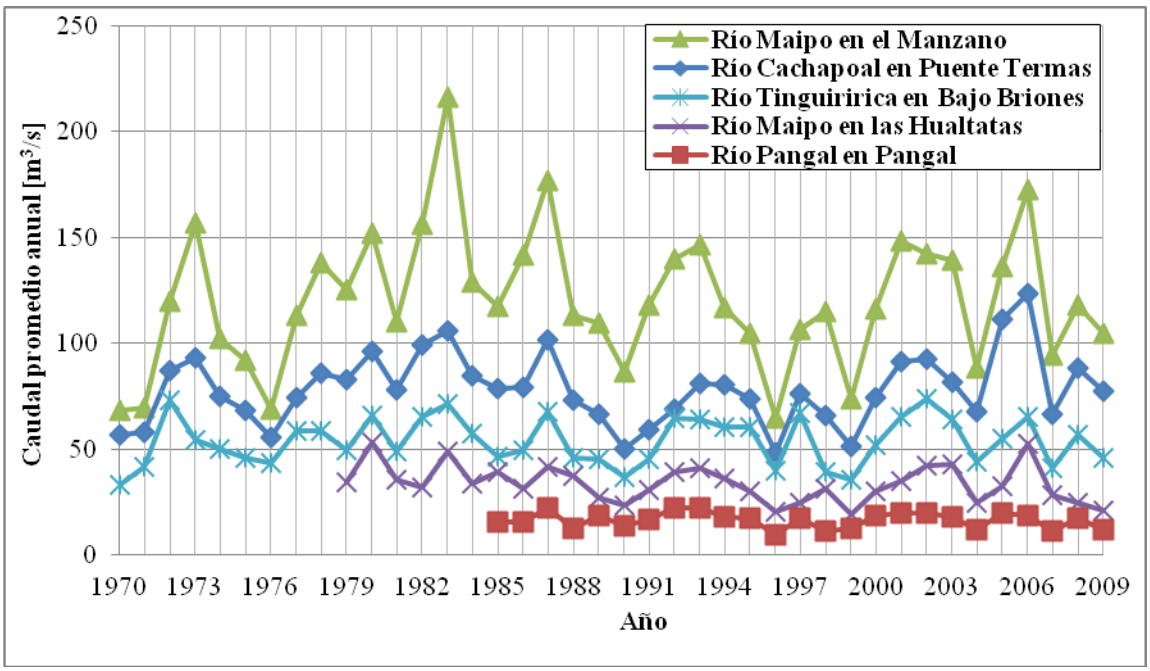

Figura 5-3: Caudales promedio anual de las estaciones fluviométricas del área objetivo y control.

Se puede apreciar en las Figuras 5-2 y 5-3 que existe una variación temporal similar tanto de las precipitaciones anuales como de los caudales promedio anual, lo que se debe principalmente a que representan el comportamiento de la variable meteorológica de una misma zona geográfica o adyacente a ella, con condiciones climáticas y orográficas similares. Además existe consistencia entre las series de precipitación y caudal, ya que se producen alzas en esta última cuando existe un incremento en las precipitaciones.

5.1.1. Análisis de las precipitaciones mensuales

Las series de datos antes de ser utilizadas deben ser rellenadas y se deben corregir los datos erróneos, lo que se realiza para las estaciones del área objetivo y control que presentan la mejor correlación, ya que se utilizarán para la evaluación de los programas de estimulación. Para esto se realiza un análisis de correlación entre las precipitaciones mensuales registradas en el área denominada como objetivo y las registradas en el área control. Como ya se mencionó la estación pluviométrica Sewell (cordillera) actúa como área objetivo, ya que es la que registra los efectos de la estimulación, siendo las otras pertenecientes al área control. En la Figura 5-4 se presenta la correlación de las precipitaciones registradas en la estación Sewell con las del área control. Conocidas las correlaciones, se debe determinar con que estación del área control presentan mejor correlación las precipitaciones mensuales de la estación pluviométrica Sewell. Para esto se determina el coeficiente de correlación de Pearson (r), que corresponde a la raíz del coeficiente de determinación (R^2). El grado de correlación entre las precipitaciones mensuales registradas en la estación Sewell y las registradas en las estaciones del área control se presentan en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Grado de correlación entre las precipitaciones mensuales registradas en la estación Sewell y en las estaciones del área control.

Precipitaciones mensuales	Coeficiente de correlación (r)
Sewell v/s Graneros Exp. SNA	0,817
Sewell v/s Rengo Sendos	0,738
Sewell v/s San Fernando Sendos	0,787
Sewell v/s Tobalaba Aeródromo	0,764
Sewell v/s Pirque	0,769
Sewell v/s San Jose de Maipo Subcomisaría	0,846

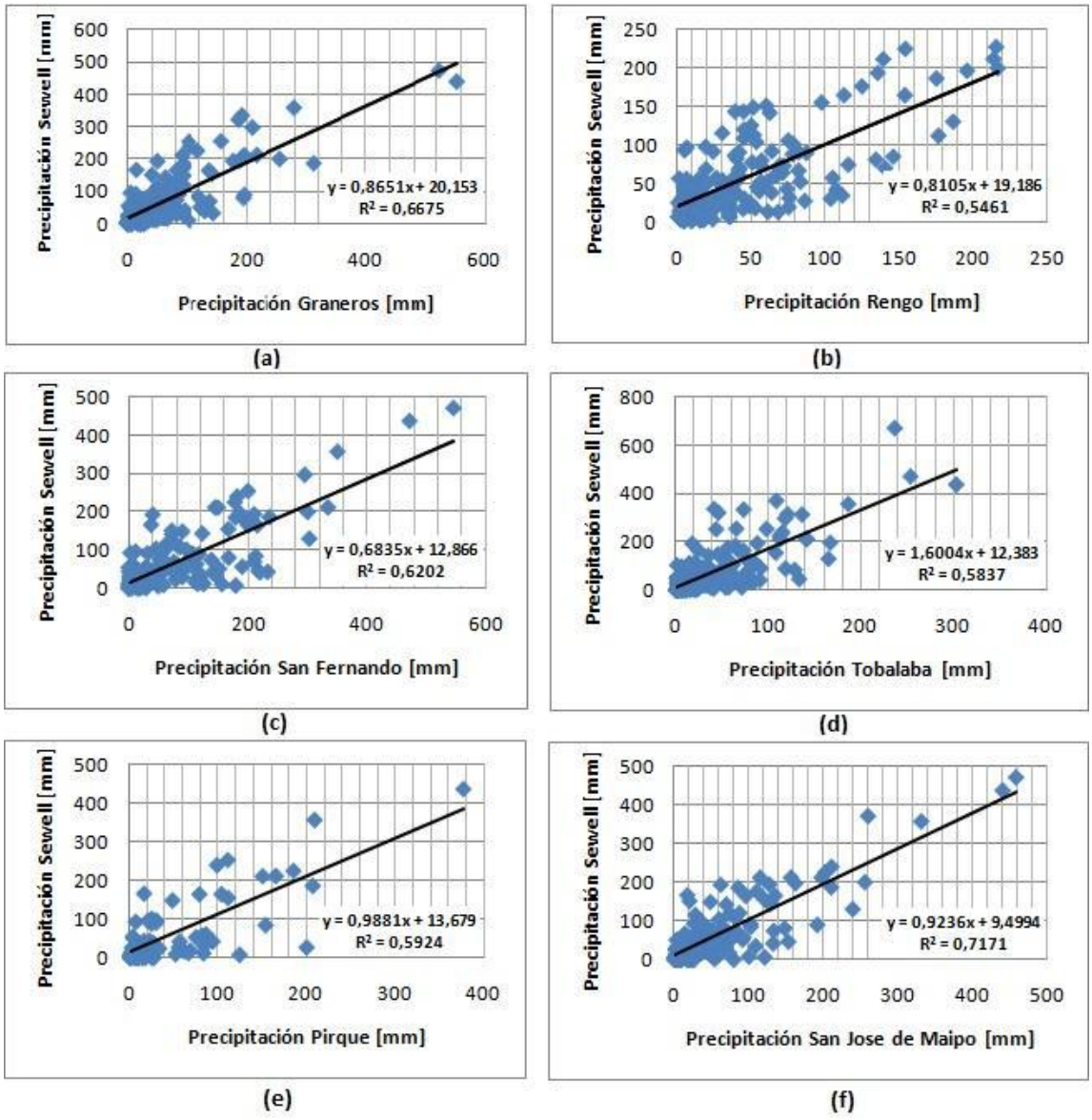

Figura 5-4: Correlación de las precipitaciones registradas en la estación Sewell v/s precipitaciones registradas en estación a) Graneros, b) Rengo, c) San Fernando, d) Tobalaba, e) Pirque y f) San José de Maipo.

La mejor correlación se obtuvo con las precipitaciones mensuales registradas en la estación pluviométrica San José de Maipo Subcomisaría, lo cual puede deberse a que esta estación se encuentra a una altura más cercana a la de Sewell. Las otras estaciones pluviométricas son más de centro de cuenca, donde la intensidad de

precipitaciones es menor a las registradas en cordillera. El coeficiente de correlación de Pearson obtenido es r = 0,846, lo que indica una correlación lineal positiva fuerte.

La ecuación de la recta que se ajusta a esta correlación es y = 0,9236*x + 9,4994, donde la variable dependiente (y) corresponde a las precipitaciones mensuales registradas en la estación pluviométrica Sewell y la variable independiente (x) a las precipitaciones mensuales registradas en la estación pluviométrica San José de Maipo Subcomisaría. Utilizando los datos de este último es posible rellenar y corregir las precipitaciones de la estación Sewell con un alto grado de certeza dado la fuerte correlación lineal que existe entre ellas. Para el relleno y corrección de las precipitaciones mensuales de la estación San José de Maipo Subcomisaría, se correlaciona estas con las registradas en la estación Sewell, obteniendo una ecuación en que la variable dependiente (y) corresponde a las precipitaciones mensuales registradas en la estación pluviométrica San José de Maipo y la variable independiente (x) a las precipitaciones mensuales registradas en la estación pluviométrica Sewell.

5.1.2. Análisis de los caudales medios mensuales

De igual forma que las precipitaciones mensuales se rellenan y corrigen las series de caudales medios mensuales de las estaciones del área objetivo y control que presenten la mejor correlación, ya que se utilizarán para la evaluación de los programas de estimulación de precipitaciones en la cuenca del río Cachapoal. Para esto se evalúan las correlaciones entre los caudales medios mensuales de los ríos pertenecientes al área objetivo (Cachapoal y Pangal) y área control (Tinguiririca y Maipo).

La correlación de los caudales medios mensuales del río Cachapoal registrados en la estación fluviométrica Puente Termas con los caudales del río Tinguiririca y Maipo se presentan en la Figura 5-5.

El grado de correlación entre los caudales medios mensuales del río Cachapoal y de los ríos Tinguiririca y Maipo se puede apreciar en la Tabla 5-3. La mejor correlación se obtuvo con los caudales medios mensuales registrados en la estación fluviométrica río Maipo en El Manzano, con un coeficiente de correlación de Pearson r = 0,9233, lo que indica una correlación lineal positiva fuerte.

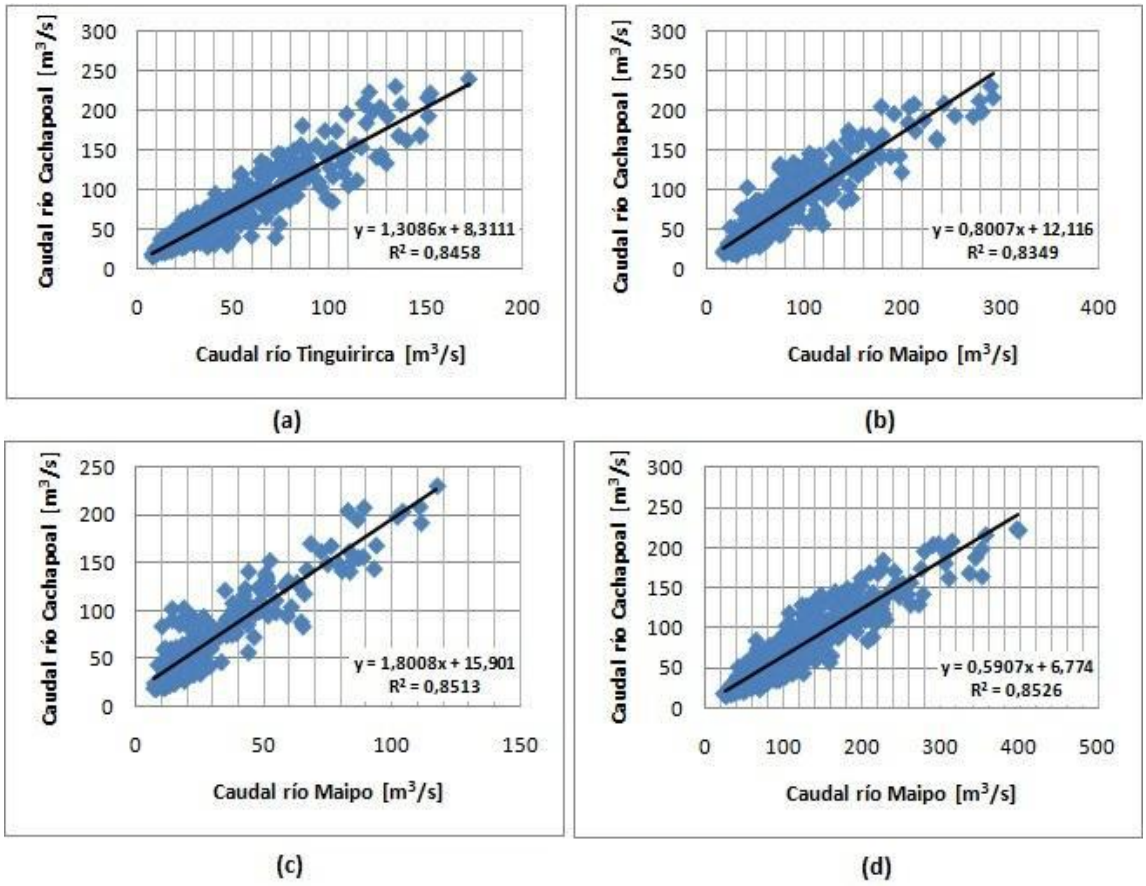

Figura 5-5: Correlación de los caudales medios mensuales del río Cachapoal en Puente Termas v/s a) río Tinguiririca en Bajo Briones, b) río Maipo en San Alfonso c) río Maipo en Las Hualtatas y d) río Maipo en El Manzano.

Tabla 5-3: Grado de correlación entre caudales medios mensuales del río Cachapoal y de los ríos Tinguiririca y Maipo.

Caudales medios mensuales	Coeficiente de correlación (r)
Río Cachapoal en Puente Termas v/s río Tinguiririca en Bajo Briones	0,9196
Río Cachapoal en Puente Termas v/s río Maipo en San Alfonso	0,9137
Río Cachapoal en Puente Termas v/s río Maipo en Las Hualtatas	0,9226
Río Cachapoal en Puente Termas v/s río Maipo en El Manzano	0,9233

La ecuación de la recta que se ajusta a esta correlación es y = 0,5907*x + 6,774, donde la variable dependiente (y) corresponde a los caudales medios mensuales del río Cachapoal registrados en la estación fluviométrica Puente Termas y la variable

independiente (x) a los caudales medios mensuales del río Maipo registrados en la estación fluviométrica El Manzano. Utilizando esta ecuación es posible rellenar y corregir los caudales del río Cachapoal en las estación fluviométrica Puente Termas con un alto grado de certeza. Para el relleno y corrección de los caudales medios mensuales de la estación fluviométrica Maipo en El Manzano, se correlaciona estos con los caudales del río Cachapoal en Puente Termas, obteniendo una ecuación en que la variable dependiente (y) corresponde a los caudales medios mensuales de la estación Maipo en el Manzano y la variable independiente (x) a los caudales medios mensuales de las estación Cachapoal en Puente Termas.

De manera análoga se evaluó la correlación de los caudales medios mensuales del río Pangal registrados en la estación fluviométrica Pangal con los caudales del río Tinguiririca y Maipo. En la Figura 5-6 se puede apreciar la correlación entre los caudales de los ríos.

El grado de correlación entre los caudales medios mensuales del río Pangal y los caudales medios mensuales de los ríos Tinguiririca y Maipo se pueden apreciar en la Tabla 5-4.

La mejor correlación se obtuvo con los caudales medios mensuales registrados en la estación fluviométrica río Tinguiririca en Bajo Briones, con un coeficiente de correlación de Pearson r = 0,9271, lo que indica una correlación lineal positiva fuerte.

La ecuación de la recta que se ajusta a esta correlación es y = 0,3922*x - 3,682 donde la variable dependiente (y) corresponde a los caudales medios mensuales del río Pangal registrados en la estación fluviométrica Pangal y la variable independiente (x) a los caudales medios mensuales del río Tinguiririca registrados en la estación fluviométrica Bajo Briones. Utilizando esta ecuación es posible rellenar y corregir los caudales del río Pangal en las estación fluviométrica Pangal con un alto grado de certeza dado la fuerte correlación lineal que existe entre ellas. Para el relleno y corrección de los caudales medios mensuales de la estación fluviométrica río Tinguiririca en Bajo Briones, se correlaciona estos con los caudales del río Pangal en Pangal, obteniendo una ecuación en que la variable dependiente (y) corresponde a los caudales medios mensuales de la estación Tinguiririca en Bajo Briones y la variable independiente (x) a los caudales medios mensuales de las estación Panga en Pangal.

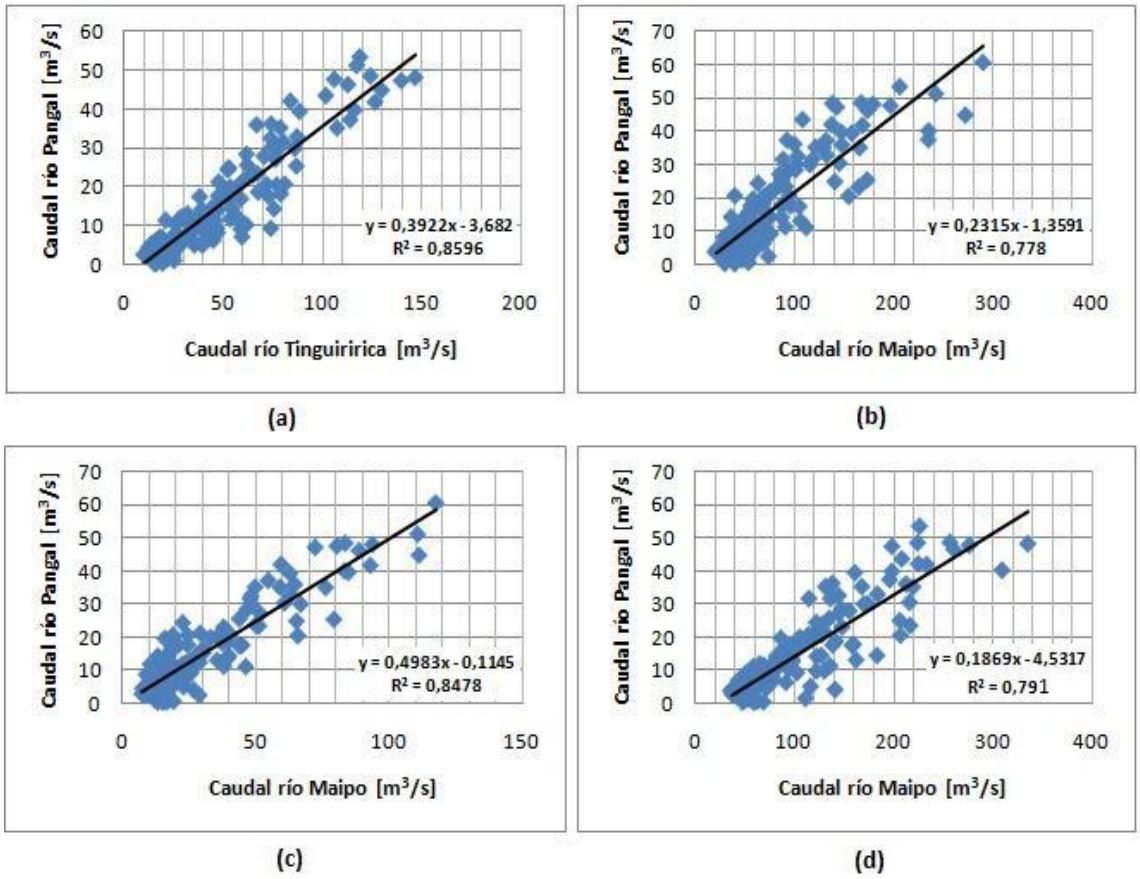

Figura 5-6: Correlación de los caudales medios mensuales del río Pangal en Pangal v/s a) río Tinguiririca en Bajo Briones b) río Maipo en San Alfonso c) río Maipo en Las Hualtatas y d) río Maipo en El Manzano.

Tabla 5-4: Grado de correlación entre caudales medios mensuales del río Pangal y de los ríos Tinguiririca y Maipo.

Caudales medios mensuales	Coeficiente de correlación (r)
Río Pangal en Pangal v/s río Tinguiririca en Bajo Briones	0,9271
Río Pangal en Pangal v/s río Maipo en San Alfonso	0,8820
Río Pangal en Pangal v/s río Maipo en Las Hualtatas	0,9207
Río Pangal en Pangal v/s río Maipo en El Manzano	0,8893

5.2. EVALUACIÓN DE LOS PROGRAMAS DE ESTIMULACIÓN A TRAVÉS DEL ANÁLISIS GRÁFICO DE COMPORTAMIENTO HISTÓRICO

5.2.1. Evaluación del comportamiento histórico de las precipitaciones registradas en la estación Sewell respecto a las de la estación San José de Maipo Subcomisaría

La evaluación de comportamiento histórico de las precipitaciones registradas en la estación pluviométrica Sewell se realiza respecto a las precipitaciones en San José Maipo Subcomisaría, en el período común 1980 - 2003. En la Figura 5-7 se presentan las precipitaciones anuales de la estación Sewell y San José de Maipo Subcomisaría hasta antes de la aplicación del programa de estimulación de precipitación líquida (dichos valores se presentan en el Anexo B). A pesar que la fluctuación temporal de las precipitaciones es similar no se mantiene una proporcionalidad entre las series, lo que se ve reflejado en la correlación existente entre ellas. Sin embargo ambas series de precipitación tienden a disminuir a largo plazo con una similitud bastante alta.

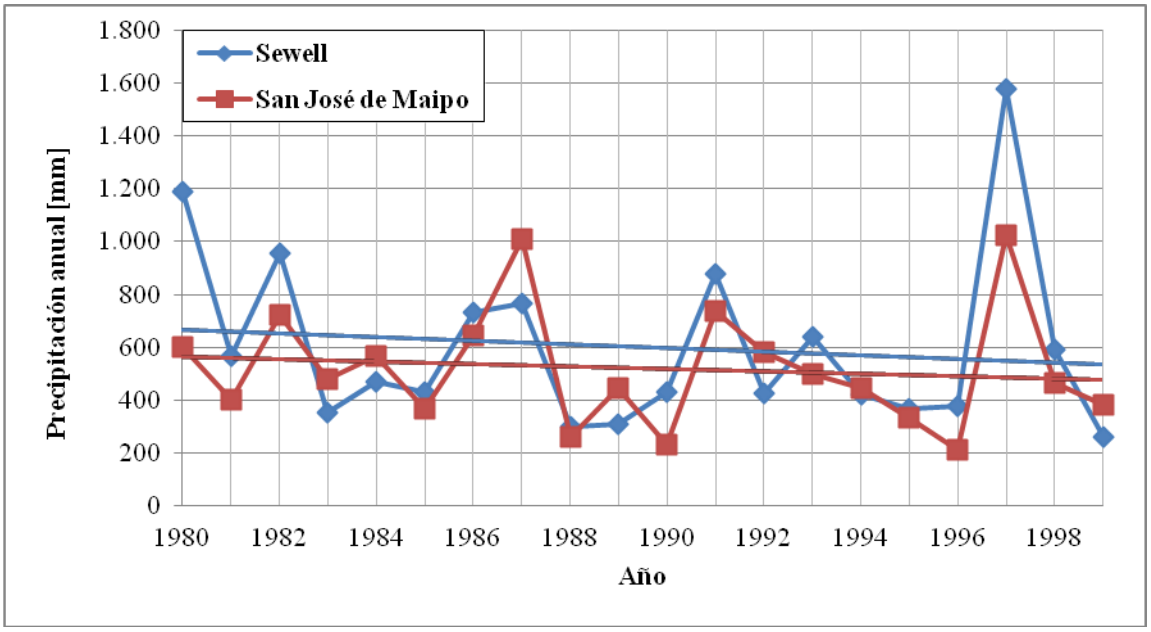

Figura 5-7: Precipitación anual en las estaciones Sewell y San José de Maipo.

En la Tabla 5-5 se presentan las razones de precipitación año a año de la estación Sewell y San José de Maipo Subcomisaría, de manera de determinar el

comportamiento entre ambas estaciones independiente si los años fueron secos o lluviosos. Los años marcados en rojo corresponden a los registros realizados en el período del programa de estimulación de precipitación líquida en la cuenca del río Cachapoal.

Tabla 5-5: Razones de precipitación (P) entre la estación Sewell y San José de Maipo Subcomisaría.

Año	P Sewell [mm]	P San José de Maipo Subcomisaría [mm]	P Sewell / P San José de Maipo Subcomisaría
1980	1.189,20	600,00	1,982
1981	567,80	403,00	1,409
1982	955,90	724,30	1,320
1983	350,10	480,50	0,729
1984	467,20	565,50	0,826
1985	428,50	365,00	1,174
1986	730,00	643,70	1,134
1987	766,40	1007,50	0,761
1988	300,30	262,00	1,146
1989	309,90	443,00	0,700
1990	431,40	231,10	1,867
1991	879,70	736,50	1,194
1992	425,60	583,00	0,730
1993	640,30	500,50	1,279
1994	422,80	444,50	0,951
1995	368,10	334,80	1,099
1996	376,80	213,00	1,769
1997	1.576,80	1022,00	1,543
1998	590,80	462,42	1,278
1999	260,40	380,00	0,685
2000	591,92	464,91	1,273
2001	728,70	530,50	1,374
2002	813,50	889,00	0,915
2003	482,60	344,00	1,403

La Figura 5-8 muestra la tendencia histórica que presentan las razones de precipitación en el período 1980 - 1999. Las razones calculadas presentan un considerable grado de dispersión en relación a la línea de tendencia, lo cual nos da un indicio de la confiabilidad a tener en las estimaciones que se hicieron con estos valores.

El siguiente paso consiste en proyectar la línea de tendencia que presentan las razones de precipitación y suponer como hubiese sido lo más probable para el período de estimulación líquida, obteniéndose así un valor estimado año a año. La hipótesis que la línea de tendencia debiera mantenerse para el período 2000 - 2003 no debiera alejarse mucho de la realidad, debido a que no existen elementos externos que pudiesen hacer variar tal tendencia. Por último se comparan los valores de la razón real obtenidos para el período de la estimulación con los valores estimados de la razón obtenidos de proyectar la línea de tendencia histórica, dando así un porcentaje de variación de la precipitación registrada en Sewell en relación a la registrada en San José de Maipo Subcomisaría en los 4 años del programa de estimulación líquida (ver Tabla 5-6).

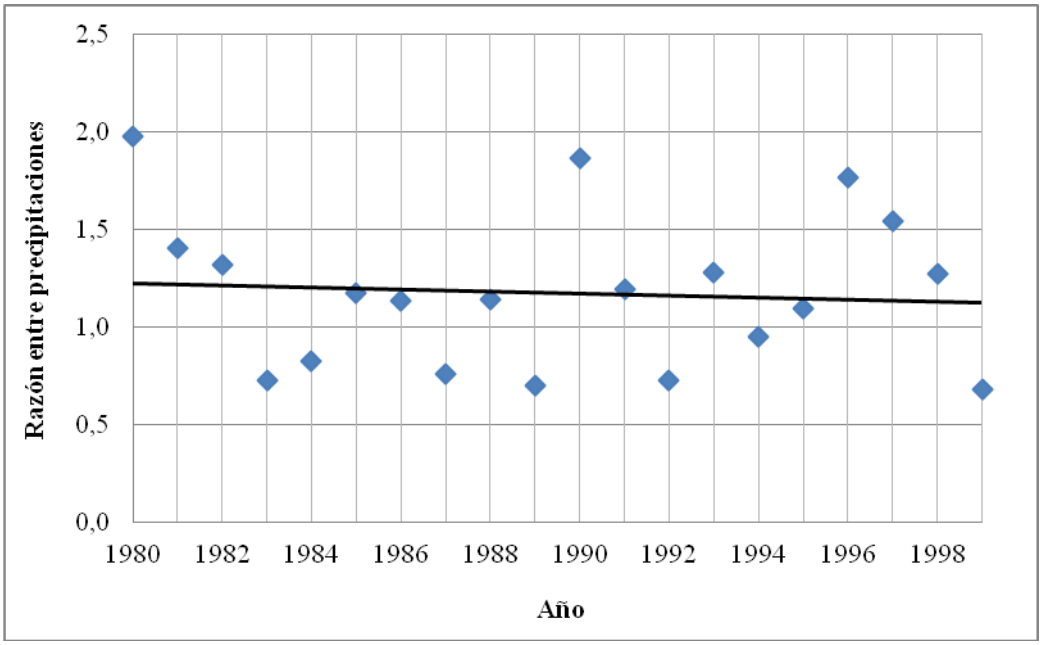

Figura 5-8: Tendencia de la razón entre las precipitaciones registradas en la estación Sewell y San José de Maipo Subcomisaría.

Según el análisis del comportamiento histórico se produjo un aumento promedio de las precipitaciones durante el programa de estimulación líquida del 11,02%. Sin embargo durante el 2002 no se evidenció aumento, lo cual puede ser producto de esta dispersión presente en los datos empleados para estas estimaciones.

Tabla 5-6: Variación de la precipitación (P) registrada en la estación Sewell en relación a la registrada en San José de Maipo Subcomisaría durante el programa de estimulación líquida.

Año	P Sewell / P San José de Maipo Subcomisaría		Variación P Sewell	
	Real	Estimada	Anual (%)	Promedio
2000	1,273	1,126	13,11	**11,02%**
2001	1,374	1,121	22,59	
2002	0,915	1,115	-17,96	
2003	1,403	1,110	26,35	

5.2.2. Evaluación del comportamiento histórico del caudal del río Cachapoal y Pangal respecto al caudal del río Tinguiririca

Se evalúa el comportamiento histórico del caudal del río Cachapoal y Pangal respecto al caudal del río Tinguiririca utilizando caudales promedio anual de la estación fluviométrica río Cachapoal en Puente Termas y río Tinguiririca en Bajo Briones en el período común 1970 - 2008, y caudales promedio anual de la estación río Pangal en Pangal y río Tinguiririca en Bajo Briones en el período común 1985 - 2008 (dichos valores se presentan en el Anexo B).

En la Figura 5-9 es posible apreciar que los caudales de los ríos Cachapoal y Pangal presentan una marcada y sostenida tendencia negativa a lo largo de los años, al contrario del caudal del río Tinguiririca que es muy estable en el tiempo, casi constante.

A pesar de que los ríos muestran una fluctuación temporal similar, se aprecian diferentes tendencias de caudal a largo plazo. Cuantitativamente la diferencia de caudal entre los ríos Cachapoal y Tinguiririca que en la década de los 70 era aproximadamente del orden de 1:1,47, es decir que por cada m^3 de caudal del río Tinguiririca corrían 1,47 m^3 en el río Cachapoal, disminuyó a lo largo del tiempo hasta aproximadamente una razón de 1:1,30 en la década de los 90, lo que significa una merma de caudal del río Cachapoal de aproximadamente 11,56% en 30 años. Ahora si se introduce al análisis el período de estimulación de precipitación líquida (2000 - 2003) la disminución a lo largo del tiempo es de 1:1,31, lo que implica una merma de caudal del río Cachapoal de solo un 10,88%, evidenciando los efectos del programa de estimulación.

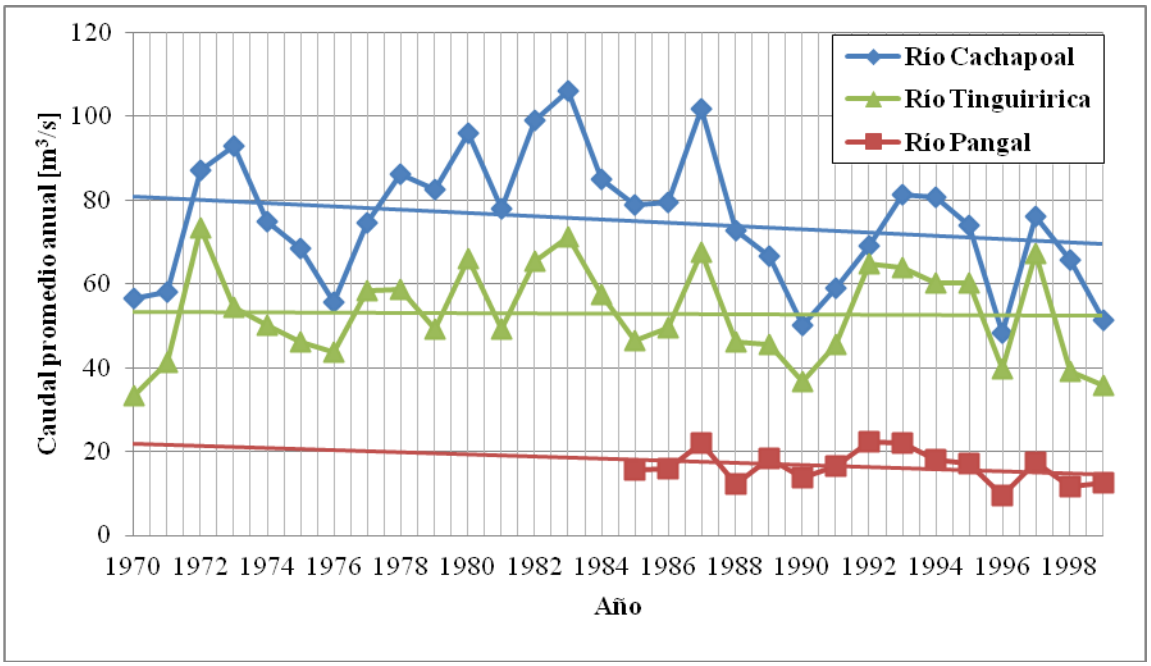

Figura 5-9: Caudal promedio anual de los ríos Cachapoal, Pangal y Tinguiririca.

En cuanto a la relación de caudales entre los ríos Pangal y Tinguiririca, la diferencia que a fines de la década de los 80 era aproximadamente del orden de 1:0,33, es decir que por cada m^3 de caudal del río Tinguiririca corrían 0,33 m^3 en el río Pangal, disminuyó a lo largo del tiempo hasta aproximadamente una razón de 1:0,287 a fines de la década de los 90, lo que significa una merma de caudal del río Pangal de aproximadamente 13,03% en 15 años. Ahora se introduce al análisis el período 2000 - 2003 la disminución a lo largo del tiempo es de 1:0,294, lo que implica una merma de caudal del río Pangal de solo un 10,9%, evidenciando los efectos de la estimulación.

En la Tabla 5-7 se presentan las razones de caudal entre los ríos Cachapoal y Pangal frente al río Tinguiririca año a año, de manera de determinar el comportamiento de estos independiente si los años fueron secos o lluviosos. Los años marcados en rojo corresponden a los registros realizados en el período del programa de estimulación de precipitación líquida y sólida en los ríos Cachapoal y Pangal.

Tabla 5-7: Razones de caudal (Q) entre los ríos Cachapoal y Pangal frente al Tinguiririca.

Año	Q Cachapoal [m^3/s]	Q Pangal [m^3/s]	Q Tinguiririca [m^3/s]	Q Cachapoal / Q Tinguiririca	Q Pangal / Q Tinguiririca
1970	56,64	-	33,43	1,694	-
1971	58,11	-	41,41	1,403	-
1972	87,12	-	73,29	1,189	-
1973	92,90	-	54,31	1,710	-
1974	75,02	-	50,08	1,498	-
1975	68,56	-	46,20	1,484	-
1976	55,52	-	43,78	1,268	-
1977	74,44	-	58,43	1,274	-
1978	86,09	-	58,65	1,468	-
1979	82,57	-	49,27	1,676	-
1980	95,93	-	65,93	1,455	-
1981	77,89	-	49,10	1,586	-
1982	99,16	-	65,30	1,519	-
1983	106,07	-	71,31	1,488	-
1984	84,83	-	57,54	1,474	-
1985	78,82	15,49	46,57	1,693	0,333
1986	79,41	15,84	49,55	1,602	0,320
1987	101,75	22,13	67,50	1,507	0,328
1988	72,90	12,35	46,04	1,583	0,268
1989	66,61	18,42	45,53	1,463	0,404
1990	50,01	13,83	36,58	1,367	0,378
1991	59,11	16,59	45,49	1,300	0,365
1992	68,96	22,30	64,83	1,064	0,344
1993	81,20	22,16	63,95	1,270	0,347
1994	80,67	18,11	60,16	1,341	0,301
1995	74,09	17,25	60,19	1,231	0,287
1996	48,27	9,62	39,86	1,211	0,241
1997	76,21	17,56	67,31	1,132	0,261
1998	65,77	11,64	39,03	1,685	0,298
1999	51,41	12,48	35,62	1,443	0,350
2000	74,30	18,46	51,84	1,433	0,356
2001	91,44	19,78	65,43	1,398	0,302
2002	92,43	19,63	73,65	1,255	0,267
2003	81,38	17,87	63,94	1,273	0,280
2008	88,23	17,51	56,71	1,556	0,309

En la Figuras 5-10 y 5-11 se presentan las razones de caudal entre los ríos Cachapoal y Tinguiririca, y Pangal y Tinguiririca con sus respectivas líneas de tendencia. En ambos casos se observa una tendencia a la baja de los caudales del área objetivo, consistente con lo observado en la Figura 5-9. Adicionalmente, existe una baja

dispersión de los datos en relación a la línea de tendencia, lo que nos asegura obtener resultados más confiables.

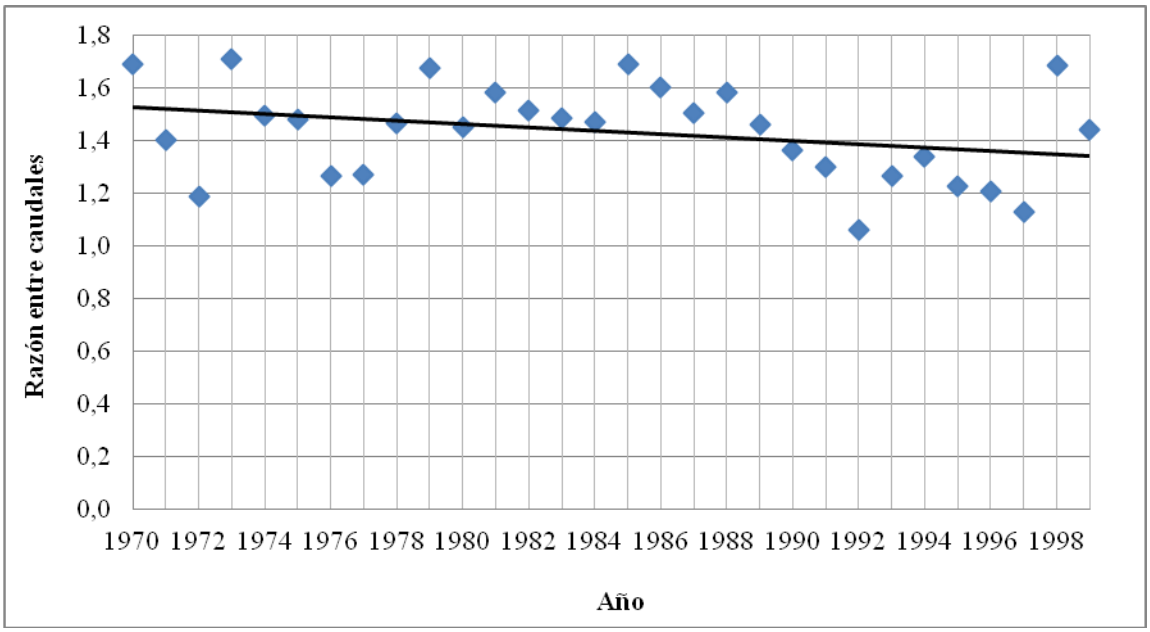

Figura 5-10: Tendencia de la razones de caudal entre los ríos Cachapoal y Tinguiririca.

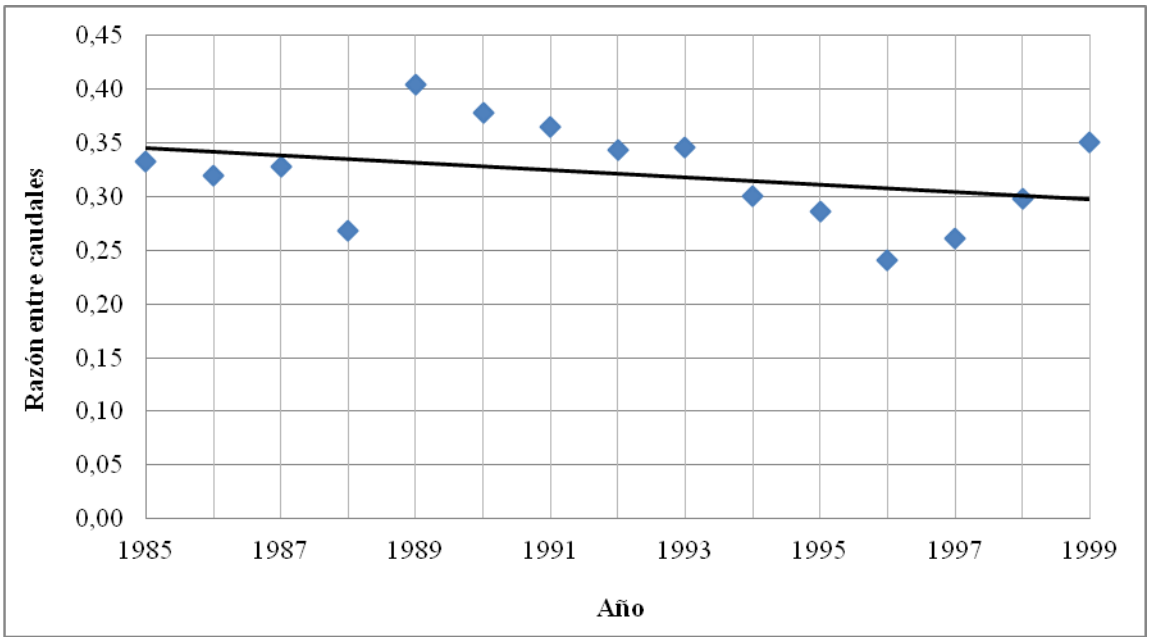

Figura 5-11: Tendencia de la razones de caudal entre los ríos Pangal y Tinguiririca.

El siguiente paso consiste en proyectar la línea de tendencia que presentan las razones de caudal y suponer como hubiese sido lo más probable para el período de estimulación líquida y sólida, obteniéndose así un valor estimado año a año. Por último se comparan los valores de la razón real obtenidos para el período de la estimulación con los valores estimados de la razón obtenidos de proyectar la línea de tendencia histórica, dando así un porcentaje de variación de caudal de los ríos Cachapoal y Pangal en relación al caudal del río Tinguiririca en ambos programas de estimulación de precipitaciones (ver Tablas 5-8 y 5-9).

Tabla 5-8: Variación de caudal (Q) del río Cachapoal en relación al caudal del río Tinguiririca durante el programa de estimulación líquida y sólida.

Año	Q Cachapoal / Q Tinguiririca		Variación Q Cachapoal	
	Real	Estimada	Anual (%)	Promedio
2000	1,433	1,335	7,39	
2001	1,398	1,328	5,23	**1,1%**
2002	1,255	1,322	-5,04	
2003	1,273	1,315	-3,23	
2008	1,556	1,283	21,31	**21,31%**

Se evidencia un aumento promedio de caudal del río Cachapoal en relación al caudal del río Tinguiririca de aproximadamente un 1,1% durante el programa de estimulación líquida y de un 21,31% durante el programa de estimulación sólida.

Tabla 5-9: Variación de caudal (Q) del río Pangal en relación al caudal del río Tinguiririca durante el programa de estimulación líquida y sólida.

Año	Q Pangal / Q Tinguiririca		Variación Q Pangal	
	Real	Estimada	Anual (%)	Promedio
2000	0,356	0,293	21,38	
2001	0,302	0,290	4,27	**4,37%**
2002	0,267	0,286	-6,95	
2003	0,280	0,283	-1,20	
2008	0,309	0,265	16,35	**16,35%**

Se evidencia un aumento promedio de caudal del río Pangal en relación al caudal del río Tinguiririca de aproximadamente un 4,37% durante el programa de estimulación líquida y de un 16,35% durante el programa de estimulación sólida.

5.2.3. Evaluación del comportamiento histórico del caudal del río Cachapoal y Pangal respecto al caudal del río Maipo

Se evalúa el comportamiento histórico del caudal del río Cachapoal y Pangal respecto al caudal del río Maipo utilizando caudales promedio anual de la estación fluviométrica río Cachapoal en Puente Termas y río Maipo en el Manzano en el período común 1970 - 2009 y caudales promedio anual de la estación río Pangal en Pangal y río Maipo en las Hualtatas en el período común 1985 - 2009 (dichos valores se presentan en el Anexo B).

En la Figura 5-12 es posible apreciar que los caudales de los ríos Cachapoal, Pangal y Maipo en las Hualtatas presentan una sostenida tendencia negativa a lo largo de los años, al contrario del caudal del río Maipo en el Manzano que es muy estable en el tiempo, casi constante.

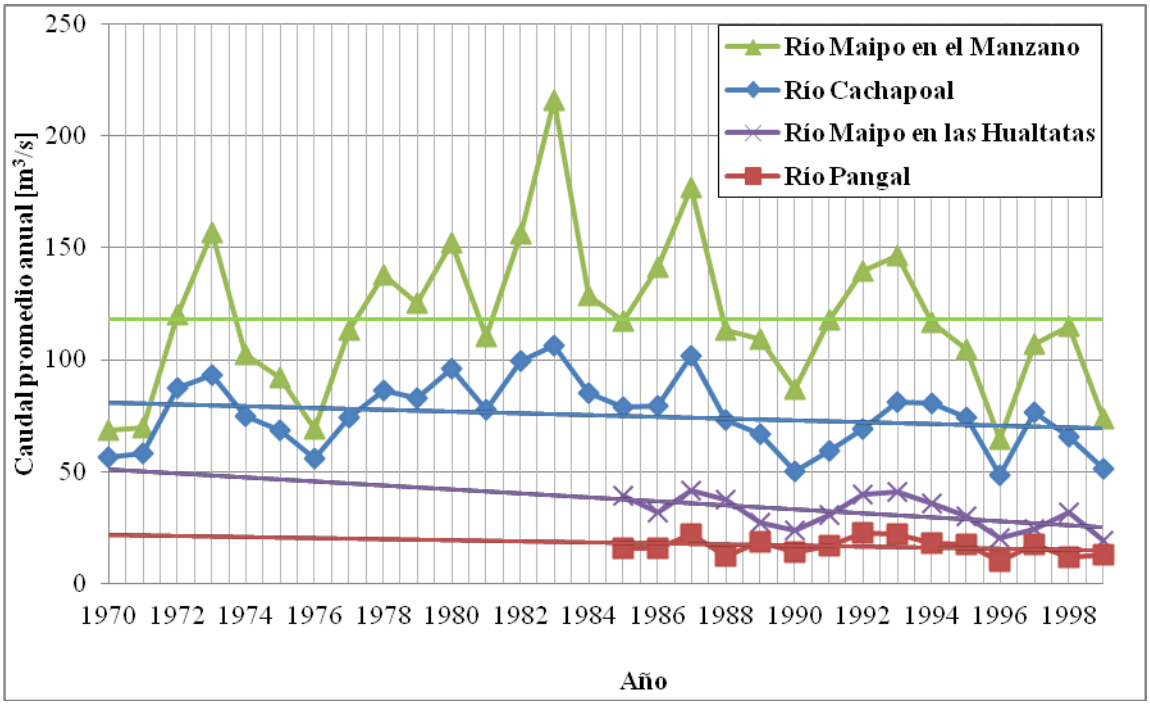

Figura 5-12: Caudal promedio anual de los ríos Cachapoal, Pangal y Maipo.

A pesar de que los ríos muestran una fluctuación temporal similar, se aprecian diferentes tendencias de caudal a largo plazo. Cuantitativamente la diferencia de caudal entre los ríos Cachapoal y Maipo que en la década de los 70 era aproximadamente del orden de 1:0,72, es decir que por cada m^3 de caudal del río Maipo corrían 0,72 m^3 en el río Cachapoal, disminuyó a lo largo del tiempo hasta aproximadamente una razón de 1:0,626 en la década de los 90, lo que significa una merma de caudal del río Cachapoal de aproximadamente 13% en 30 años, lo que es consistente con el valor obtenido del análisis anterior. Ahora si se introduce al análisis el período 2000 - 2003 la disminución a lo largo del tiempo es de 1:0,629, lo que implica una merma de caudal del río Cachapoal de solo un 12,6%.

En cuanto a la relación de caudales entre los ríos Pangal y Maipo, la diferencia que a fines de la década de los 80 era aproximadamente del orden de 1:0,49, es decir que por cada m^3 de caudal del río Maipo corrían 0,49 m^3 en el río Pangal, aumentó a lo largo del tiempo hasta aproximadamente una razón de 1:0,558 a fines de la década de los 90, lo que significa un aumento de caudal del río Pangal de aproximadamente 13,87% en 15 años, lo que no es consistente con el valor obtenido del análisis anterior.

Ahora se deben comparar las magnitudes de caudal de los ríos Cachapoal y Pangal en relación a los caudales del río Maipo. En la Tabla 5-10 se presentan las razones de caudal entre los ríos Cachapoal y Pangal frente al río Maipo año a año, de manera de determinar el comportamiento de estos independiente si los años fueron secos o lluviosos. Los años marcados en rojo corresponden a los registros realizados en el período del programa de estimulación de precipitación líquida y sólida en los ríos Cachapoal y Pangal.

En la Figuras 5-13 y 5-14 se presentan las razones de caudal entre los ríos Cachapoal y Maipo en el Manzano, y Pangal y Maipo en las Hualtatas con sus respectivas líneas de tendencia. Para el caso Cachapoal y Maipo en el Manzano existe una baja dispersión de los datos en relación a la línea de tendencia, no así para el caso Pangal y Maipo en las Hualtatas que presenta una gran dispersión, lo que no asegura obtener resultados confiables.

Tabla 5-10: Razones de caudal (Q) entre los ríos Cachapoal y Pangal frente al Maipo.

Año	Q Cachapoal [m^3/s]	Q Maipo en el Manzano [m^3/s]	Q Cachapoal / Q Maipo en el Manzano	Q Pangal [m^3/s]	Q Maipo en las Hualtatas [m^3/s]	Q Pangal / Q Maipo en las Hualtatas
1970	56,64	68,24	0,830	-	-	-
1971	58,11	69,48	0,836	-	-	-
1972	87,12	119,87	0,727	-	-	-
1973	92,90	157,02	0,592	-	-	-
1974	75,02	102,44	0,732	-	-	-
1975	68,56	92,16	0,744	-	-	-
1976	55,52	69,22	0,802	-	-	-
1977	74,44	113,10	0,658	-	-	-
1978	86,09	137,88	0,624	-	-	-
1979	82,57	125,19	0,660	-	-	-
1980	95,93	152,15	0,631	-	-	-
1981	77,89	110,24	0,707	-	-	-
1982	99,16	156,35	0,634	-	-	-
1983	106,07	216,00	0,491	-	-	-
1984	84,83	128,90	0,658	-	-	-
1985	78,82	117,28	0,672	15,49	39,06	0,396
1986	79,41	141,37	0,562	15,84	31,62	0,501
1987	101,75	176,87	0,575	22,13	41,55	0,532
1988	72,90	113,29	0,643	12,35	37,48	0,330
1989	66,61	109,34	0,609	18,42	27,18	0,677
1990	50,01	86,57	0,578	13,83	23,56	0,587
1991	59,11	117,75	0,502	16,59	30,57	0,543
1992	68,96	139,88	0,493	22,30	39,46	0,565
1993	81,20	146,30	0,555	22,16	40,80	0,543
1994	80,67	116,91	0,690	18,11	35,95	0,504
1995	74,09	104,57	0,708	17,25	29,93	0,576
1996	48,27	64,56	0,748	9,62	20,33	0,473
1997	76,21	106,78	0,714	17,56	24,47	0,717
1998	65,77	114,80	0,573	11,64	31,67	0,368
1999	51,41	73,52	0,699	12,48	19,05	0,655
2000	74,30	116,12	0,640	18,46	30,12	0,613
2001	91,44	148,57	0,615	19,78	35,09	0,564
2002	92,43	141,94	0,651	19,63	42,20	0,465
2003	81,38	139,46	0,584	17,87	43,01	0,416
2008	88,23	117,72	0,750	17,51	24,81	0,706
2009	77,54	104,82	0,740	11,89	20,99	0,566

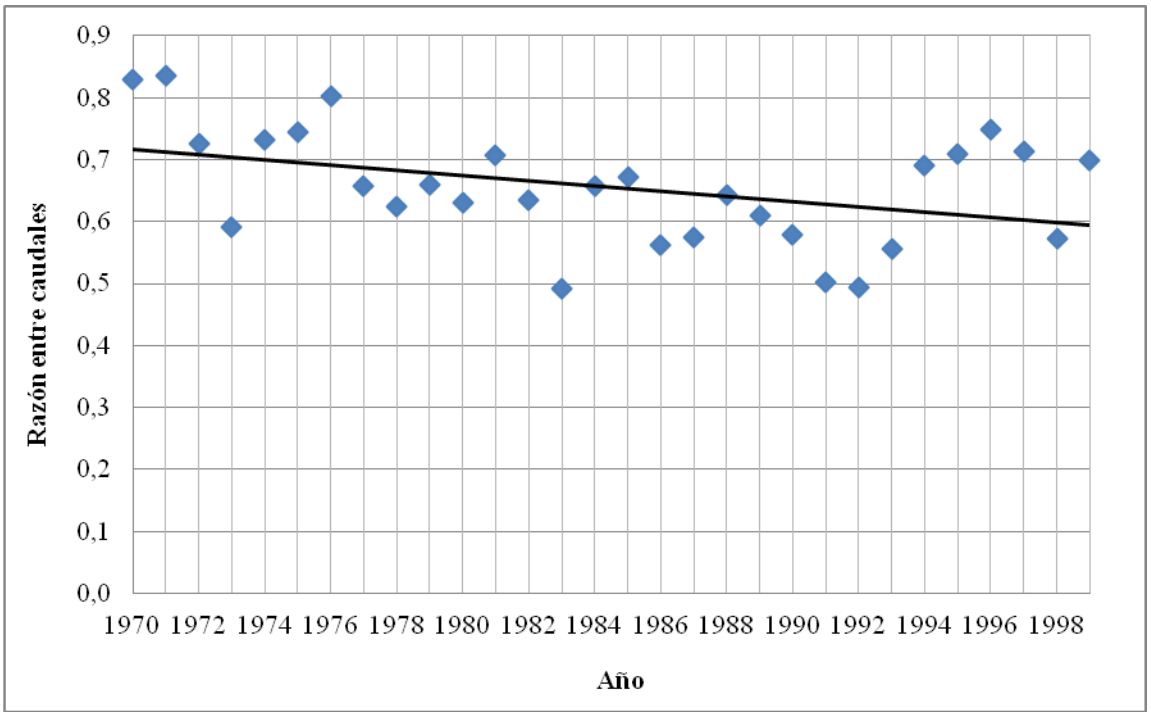

Figura 5-13: Tendencia de la razones de caudal entre los ríos Cachapoal y Maipo.

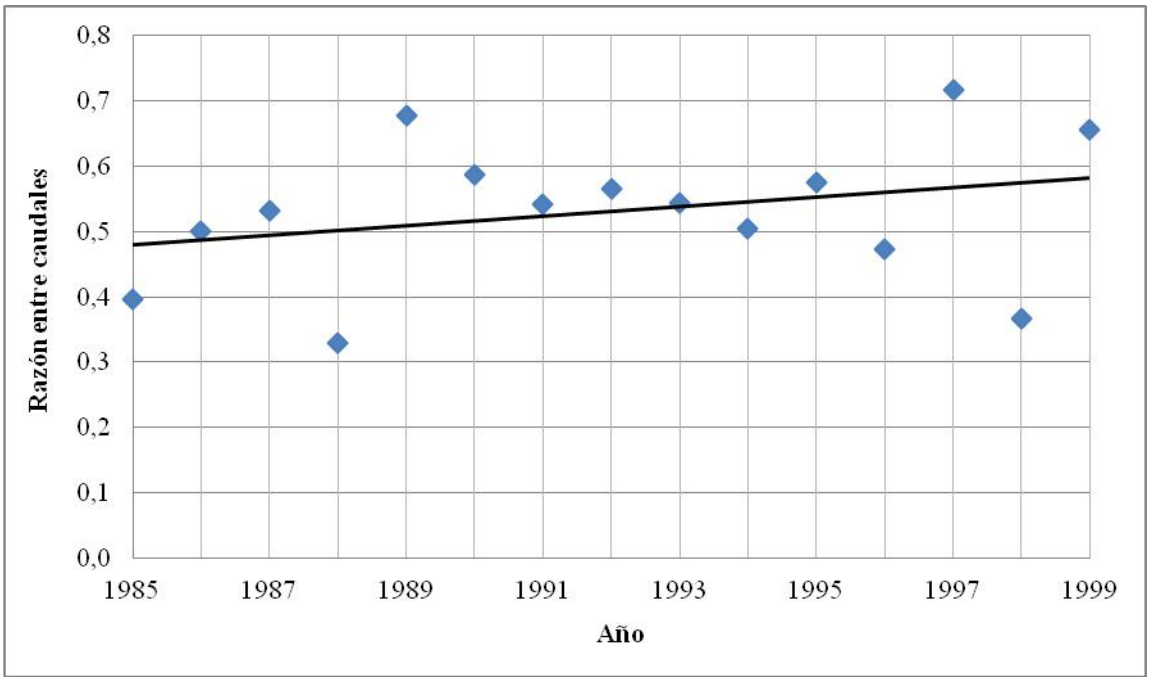

Figura 5-14: Tendencia de la razones de caudal entre los ríos Pangal y Maipo.

Las variaciones de caudal de los ríos Cachapoal y Pangal en relación al caudal del río Maipo en ambos programas de estimulación de precipitaciones se pueden apreciar en las Tablas 5-11 y 5-12.

Tabla 5-11: Variación de caudal (Q) del río Cachapoal en relación al caudal del río Maipo durante el programa de estimulación líquida y sólida.

Año	Q Cachapoal / Q Maipo Manzano		Variación Q Cachapoal	
	Real	Estimada	Anual (%)	Promedio
2000	0,640	0,590	8,38	**6,56%**
2001	0,615	0,586	4,99	
2002	0,651	0,582	11,89	
2003	0,584	0,578	0,99	
2008	0,750	0,557	34,70	**34,31%**
2009	0,740	0,553	33,91	

Se evidencia un aumento promedio de caudal del río Cachapoal en relación al caudal del río Maipo de aproximadamente un 6,56% durante el programa de estimulación líquida y de un 34,31% durante el programa de estimulación sólida.

Tabla 5-12: Variación de caudal (Q) del río Pangal en relación al caudal del río Maipo durante el programa de estimulación líquida y sólida.

Año	Q Pangal / Q Maipo Hualtatas		Variación Q Pangal	
	Real	Estimada	Anual (%)	Promedio
2000	0,613	0,590	3,93	**-14,2%**
2001	0,564	0,597	-5,58	
2002	0,465	0,604	-23,02	
2003	0,416	0,612	-32,06	
2008	0,706	0,648	8,91	**-2,34%**
2009	0,566	0,655	-13,58	

Se evidencia una disminución promedio de caudal del río Pangal en relación al caudal del río Maipo de aproximadamente un 14,2% durante el programa de estimulación líquida y de un 2,34% durante el programa de estimulación sólida.

5.3. EVALUACIÓN DE LOS PROGRAMAS DE ESTIMULACIÓN A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE CORRELACIÓN - REGRESIÓN

El análisis de correlación - regresión se utiliza para estimar como se habría comportado la variable meteorológica (caudal o precipitación) del área fijada como objetivo en relación a lo observado en el área control. La ecuación de regresión permite hacer una estimación de la variable meteorológica del área objetivo en su estado natural, para así compararla con lo realmente obtenido durante la estimulación, determinando el porcentaje de variación debido a esta. Las ecuaciones de regresión que relacionan las variables meteorológicas del área objetivo y control que presentan mayor correlación son:

$$P_i \text{ Sewell} = 0{,}9236 * P_i \text{ San José de Maipo} + 9{,}4994 \quad (1)$$

$$Q_i \text{ Cachapoal} = 0{,}5907 * Q_i \text{ Maipo en el Manzano} + 6{,}774 \quad (2)$$

$$Q_i \text{ Pangal} = 0{,}3922 * Q_i \text{ Tinguiririca} - 3{,}682 \quad (3)$$

Donde

P_i X = Precipitación en el mes i en la estación X (mm)

Q_i X = Caudal medio del mes i en la estación X (m^3/s)

En las Tablas 5-13 y 5-14 se presentan las estimaciones de las variables meteorológicas del área objetivo durante los períodos de estimulación de precipitación líquida y sólida, obtenidos a través de las ecuaciones 1 a 3, y los respectivos porcentajes de variación. Para el período de estimulación 2000 - 2003 se evalúan los meses de mayo a septiembre, debido a que en estos se estimuló precipitación líquida. Para el período de estimulación 2008 - 2011 se evalúan los meses de mayo a septiembre, debido a que los resultados se harán notar no en el momento mismo de la estimulación, sino cuando comienzan los deshielos de toda la nieve acumulada, es decir en el mes de octubre continuando con máximos en los meses de noviembre, diciembre y enero, para comenzar a declinar en febrero.

Tabla 5-13: Variación de la precipitación mensual en la estación Sewell durante el programa de estimulación líquida.

Año	Mes	Precipitación Sewell		% de Variación	Variación Promedio
		Real (mm)	Estimada (mm)		
2000	Mayo	40,3	33,51	20,25	11,72%
	Junio	248,8	195,52	27,25	
	Julio	25,8	52,45	-50,81	
	Agosto	7,2	13,19	-45,43	
	Septiembre	76,6	123,10	-37,78	
2001	Mayo	121,2	63,99	89,40	
	Junio	42,1	18,74	124,71	
	Julio	266,5	269,03	-0,94	
	Agosto	182,3	110,17	65,47	
	Septiembre	35,6	32,59	9,24	
2002	Mayo	209,7	207,15	1,23	
	Junio	64,6	266,72	-75,78	
	Julio	68,4	124,03	-44,85	
	Agosto	292,6	173,90	68,26	
	Septiembre	52,6	54,76	-3,94	
2003	Mayo	88,1	64,45	36,69	
	Junio	131,2	87,08	50,66	
	Julio	55,5	108,32	-48,77	
	Agosto	13,9	12,73	9,17	
	Septiembre	64,5	45,98	40,27	

Tabla 5-14: Variación de los caudales medios mensuales del río Cachapoal y Pangal durante los programas de estimulación líquida y sólida.

Año	Mes	Caudal río Cachapoal		% de Variación	Variación Promedio	Caudal río Pangal		% de Variación	Variación Promedio
		Real (m^3/s)	Estimado (m^3/s)			Real (m^3/s)	Estimado (m^3/s)		
2000	Mayo	22,57	37,58	-39,93	5,95%	2,96	0,87	239,67	-11,94%
	Junio	54,14	55,15	-1,82		8,6	18,10	-52,50	
	Julio	66,25	52,18	26,98		8,82	8,50	3,82	
	Agosto	49,19	47,56	3,43		8,28	9,53	-13,09	
	Septiembre	60,06	50,10	19,87		10,09	18,04	-44,07	
2001	Mayo	41,93	50,11	-16,33		6,26	6,52	-4,03	
	Junio	46,57	43,08	8,08		6,22	12,62	-50,70	
	Julio	59,36	54,38	9,15		8,14	25,26	-67,78	
	Agosto	75,71	59,57	27,09		11,6	23,29	-50,19	
	Septiembre	72,33	56,09	28,97		13,17	13,93	-5,44	
2002	Mayo	43,97	43,88	0,21		7,62	10,60	-28,10	
	Junio	56,46	54,98	2,70		8,59	16,32	-47,37	
	Julio	50,80	45,65	11,28		8,54	13,45	-36,52	
	Agosto	120,57	67,99	77,32		16,78	41,68	-59,74	
	Septiembre	80,07	70,86	13,00		12,34	25,31	-51,24	
2003	Mayo	35,89	49,74	-27,84		5,75	5,51	4,33	
	Junio	49,51	50,17	-1,31		8,35	19,80	-57,82	
	Julio	45,25	48,89	-7,43		7,03	9,39	-25,10	
	Agosto	36,77	41,39	-11,18		5,97	2,94	103,18	
	Septiembre	46,27	47,87	-3,34		8,02	7,72	3,84	
2008	Octubre	98,57	75,58	30,42	20,10%	17,62	21,15	-16,68	-2,83%
	Noviembre	180,65	154,73	16,75		37,79	41,77	-9,54	
	Diciembre	200,50	175,11	14,50		36,11	44,90	-19,58	
2009	Enero	161,84	123,62	30,92		21,61	34,96	-38,19	
	Febrero	120,04	92,47	29,81		16,56	14,34	15,52	
	Octubre	65,68	56,27	16,71		10,90	12,81	-14,91	
	Noviembre	89,40	78,77	13,50		20,10	14,28	40,79	
	Diciembre	156,29	125,45	24,59		33,03	27,53	19,96	
2010	Enero	154,29	122,91	25,53					
	Febrero	93,26	94,91	-1,74					

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para tener una mejor visión de la efectividad de los programas de estimulación, se presenta en la Tabla 6-1 un resumen de los resultados obtenidos a través de las dos metodologías de análisis.

Tabla 6-1: Resumen de resultados obtenidos de la evaluación de los programas de estimulación líquida y sólida.

			Programa 2000 - 2003	**Programa 2008 - 2011**
Análisis Gráfico de Comportamiento Histórico	**Pluviométrico**	Sewell - San José de Maipo	**11,02%**	**-**
	Fluviométrico	Cachapoal - Tinguiririca	**1,1%**	**21,31%***
		Pangal - Tinguiririca	**4,37%**	**16,35%***
		Cachapoal - Maipo	**6,56%**	**34,31%****
		Pangal - Maipo	**-14,2%**	**-2,34%****
Análisis de Correlación - Regresión	**Pluviométrico**	Sewell - San José de Maipo	**11,72%**	**-**
	Fluviométrico	Cachapoal - Maipo	**5,95%**	**20,1%*****
		Pangal - Tinguiririca	**-11,94%**	**-2,83%****

* Se analizó año 2008.
** Se analizó años 2008 y 2009.
*** Se analizó años 2008, 2009 y 2010.

Los resultados obtenidos a través del análisis de comportamiento histórico para el caso de las precipitaciones registradas en la estación Sewell evidencian un incremento promedio que se encuentra en el rango aceptado mundialmente del 10 a 15%, aunque la confiabilidad es baja debido a la gran dispersión que presentan los datos (ver Figura 5-8) y a que la estación Sewell no representa el total de la zona estimulada por encontrarse a mayor altura en zona cordillerana. En cuanto al análisis de los caudales los resultados que presentan mayor confiabilidad son los obtenidos entre los ríos del área objetivo y control que presentan mejor correlación, es decir entre Cachapoal y Maipo y Pangal y Tinguiririca. Los incrementos promedio de caudal de los ríos Cachapoal y Pangal para el programa de estimulación líquida se encuentran por debajo del rango aceptado mundialmente, no así los obtenidos para el programa de estimulación sólida que evidencian un incremento por sobre el 20% para el caso del río Cachapoal. Se debe considerar que para el análisis de los caudales la dispersión de los datos es alta lo que hace que los resultados no sean del todo confiables (ver

Figuras 5-11 y 5-13). La utilización de una serie de datos de 30 años para el análisis de comportamiento histórico de los caudales del río Cachapoal contribuye a la confiabilidad de los resultados, debido a que absorbe la variabilidad natural que presentan los caudales.

Los resultados obtenidos a través del análisis de correlación - regresión para el caso de las precipitaciones registradas en la estación Sewell evidencian un incremento promedio del 11,72%, consistente con el valor estimado a través de la metodología de comportamiento histórico, sin embargo en las variaciones mes a mes se observa una gran dispersión (ver Tabla 5-14) y muchos de estos valores no reflejan los efectos de la estimulación, lo que puede deberse a que la correlación entre la estación Sewell y San José de Maipo no es tan fuerte ya que no se mantiene del todo la proporcionalidad entre las series y a posibles fallas en el sistema implementado, como lo son la poca accesibilidad a los generadores terrestres ubicados en zona cordillerana durante los eventos de mal tiempo, la no estimulación de todos los eventos tormentosos, entre otras. En cuanto a los caudales, el comportamiento de las variaciones de caudal de los ríos Cachapoal y Pangal no es consistente, ya que el efecto de la estimulación de precipitaciones no se ve reflejado en la estación del río Pangal y sí en la del río Cachapoal (ver Tabla 5-13). Esta inconsistencia puede deberse a que la estación fluviométrica Cachapoal en Puente Termas posee un área tributaria de 2367 km^2 capaz de abarcar toda la zona estimulada, a diferencia de la estación Pangal en Pangal que solo posee un área tributaria de 572 km^2 (DGA, 1977). Además para la obtención de la ecuación de regresión para los caudales del río Pangal se utilizó solo 15 años de período de histórico, siendo recomendable utilizar períodos más largos. Para el caso del río Cachapoal se puede apreciar que las variaciones de caudal durante el período de estimulación de precipitación líquida presentan una gran dispersión, a diferencia del período de estimulación de precipitación sólida en que las variaciones son positivas y con baja dispersión (ver Tabla 5-13).

En comparación con el análisis gráfico de comportamiento histórico, se consideran más representativos los resultados obtenidos a través del análisis de correlación - regresión debido a que se estudia específicamente el período en que tienen efecto los programas de estimulación, dejando fuera posibles fenómenos naturales que puedan afectar las estadísticas que se manejan en estos análisis.

Los valores obtenidos en este trabajo difieren de los estimados por Hidromet (ver Anexo A), ya que el incremento promedio de caudal del río Cachapoal fue menor que el estimado por Hidromet para el programa estimulación líquida a través del análisis gráfico de comportamiento histórico, lo que se debe principalmente a la forma en que se aplicó la metodología. Hidromet simplemente desecho los años que poseían más de 3 meses sin información, perdiendo bastantes datos de utilidad. Además agrupó las razones de caudal cada 5 años (quinquenio), absorbiendo la variabilidad de los datos, lo que provocó un cambio en la línea de tendencia y por ende en los resultados obtenidos. A través del análisis de correlación - regresión se obtuvo un incremento promedio de caudal del río Cachapoal para el programa de estimulación sólida mayor al estimado por Hidromet, siendo más confiable el precisado en este trabajo, ya que la que ecuación de regresión utilizada se encuentra asociada a un coeficiente de correlación de Pearson (r) mayor al obtenido por Hidromet.

7. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

Los análisis realizados indican que el incremento promedio de la precipitación registrada en la estación Sewell fue aproximadamente del 11% durante el programa de estimulación de precipitación líquida (período 2000 - 2003), valor que se encuentra dentro del rango promedio establecido mundialmente. Sin embargo, los resultados año a año y mes a mes durante la estimulación son más dispersos, presentándose varios casos en los que no se presenció el efecto de la estimulación. Esto puede deberse a que la correlación existente entre la estación Sewell y San José de Maipo no es tan fuerte, provocando que las estimaciones de precipitación del área objetivo estén asociadas a errores más altos, aunque fueron seleccionadas por presentar la correlación más alta entre las diferentes estaciones pluviométricas consideradas en este estudio. También se debe tener presente que los datos registrados en la estación Sewell no representan la totalidad del área estimulada, sin embargo es la única estación pluviométrica ubicada dentro del área objetivo. Adicionalmente, se puede atribuir a posibles fallas en la operación de la red de generadores o al número de eventos estimulados.

Para el caso de los caudales, el incremento promedio obtenido para el programa de estimulación 2000 - 2003 se encuentra por debajo del 10 a 15% aceptado mundialmente, y de lo obtenido con las precipitaciones, contrario al programa de estimulación de precipitación sólida (período 2008 - 2011) en que los caudales del río Cachapoal presentaron un incremento mayor al 20%. Los resultados obtenidos para el río Pangal, en su mayoría no reflejan ningún efecto de los programas de estimulación, además no son consistentes los resultados obtenidos a través de una metodología y otra. Esto puede deberse a que la longitud de las series empleadas para estos análisis no es la adecuada, y a la cobertura de los generadores terrestres durante los sistemas de mal tiempo, que depende de la fuerza y dirección de los vientos. Se requiere de los registros de los últimos años de las estaciones fluviométricas empleadas en este estudio para evaluar completamente el efecto que ha tenido el programa de estimulación de precipitación sólida.

En general para la realización de un análisis más minucioso de los programas de estimulación se requiere de un conocimiento más detallado de los eventos de mal

tiempo estimulados o el número de veces que operaron los generadores terrestres, de manera analizar esta vez no los meses en que se estimuló precipitaciones, sino que el día mismo en que se aplicó esta. Esto aumentaría la confiabilidad de los resultados ya que se dejaría fuera los días dentro del mes en que no se aplicó la estimulación. Las evaluaciones estadísticas para cuantificar la efectividad del programa de estimulación sólida, podrían reforzarse llevando a cabo evaluaciones químicas del contenido de plata presentes en muestras de nieve provenientes de tormentas sin estimular y estimuladas, de manera de comparar ambas y determinar qué cantidad de yoduro de plata está ingresando a la nubosidad.

De acuerdo a los resultados obtenidos y análisis realizados en este estudio no es posible afirmar con exactitud el grado de efectividad de los programas de estimulación de precipitaciones desarrollados en la cuenca del río Cachapoal, se requieren de más datos y análisis. Sin embargo, hay evidencia de un aumento en los caudales del río Cachapoal durante el programa de estimulación sólida, en el cual se favorece el almacenamiento de agua en las altas cumbres y glaciares, lo cual alienta a seguir con este programa, ya que el caudal del río Cachapoal es la principal fuente de abastecimiento del recurso hídrico para las diversas actividades económicas de la zona.

8. BIBLIOGRAFÍA

CADE - IDEPE CONSULTORES EN INGENIERÍA. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad cuenca del río Rapel.

DENNIS, A. 1980. Weather Modification by Cloud Seeding. Academic Press, New York, 267 pp.

DGA, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 1977. Hoya del río Rapel, Estudio de la red fluviométrica.

DGA, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 1985. Análisis de la red hidrometeorológica nacional, regiones: V, Metropolitana, VI y VII. Tomo II.

DGA, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 1989. Mapa hidrogeológico de Chile. Esc. 1:1.000.000.

DGA, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 1990. Estaciones fluviométricas hoya del río Maipo.

DGA, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 1991. Estudio de síntesis de catastros de usuarios de agua e infraestructura de aprovechamiento.

DGA, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 1996. Análisis uso actual y futuro de los recursos hídricos de Chile.

DGA, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 2003. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la VI Región.

FEDERACIÓN DE JUNTAS DE VIGILANCIA DE RÍOS Y ESTEROS DE LA SEXTA REGIÓN [en línea] <http://www.federacionjuntas.cl/> [consulta: 24 Mayo 2011].

GRIFFITH A. et al., 1997. Programa de Sembrado de Nubes para Mejorar la Producción de Energía Hidroeléctrica en el Área Colectora El Cajón, Honduras.

HIDROMET S.A. 1998. Estimulación de precipitaciones [en línea] <http://www.hidromet.cl> [consulta: 30 Julio 2010].

HIDROMET S.A. 2004. Programa de estimulación de precipitaciones cuenca del río Cachapoal: Informe del programa 2000 - 2003.

HIDROMET S.A. 2010. Programa de estimulación de precipitaciones cuenca del río Cachapoal: Evaluación temporadas 2008 y 2009.

HIDROMET S.A. 2011a. Empresa asesora en servicios hídricos y meteorológicos y sus programas de incremento de las precipitaciones.

HIDROMET S.A. 2011b. Fundamentos físicos de la siembra de nubes.

HILLIARD, R. y ROMEU, M. 2009. Concesiones de Mercedes de Aguas Superficiales, Consuntivas, Permanentes y Continuas otorgadas en la sub-cuenca del río Cachapoal 1ª Sección a partir del año 1872 hasta el año 2008.

INE, INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. 2002a. Censo poblacional y de vivienda 2002.

INE, INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. 2002b. Superficie de las explotaciones agropecuarias y forestales con tierra por uso del suelo, provincia y comuna región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

INE, INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. 2007. VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal. Superficie Total Sembrada o Plantada por grupo de cultivos, según región, provincia y comuna.

INIA, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS. 1998. Programa de Estimulación e Inducción de Precipitaciones en la Hoya Hidrográfica del río Copiapó, Región de Atacama.

OMM, ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL [en línea] <http://www.wmo.int> [consulta: 10 Abril 2011].

ORREGO, J. 2002. El estado de las aguas terrestres en Chile: Cursos y Aguas Subterráneas.

PALMA, J. 2004. Objetivos estratégicos del sector forestal de la sexta región. Memoria de Ingeniero Forestal. Talca, Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales.

SERNAGEOMIN, SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. 2003. Mapa geológico de Chile: versión digital. Esc. 1:1.000.000.

SEPÚLVEDA, G. y ORMAZÁBAL, B. 2001. Tema: Inducción de lluvias. "Experiencias del Ministerio de Agricultura en inducción de lluvias empleando Yoduro de Plata con

fuentes fijas y aéreas". En: III ENCUENTRO de las aguas. Octubre de 2001, Santiago de Chile.

UNIVERSIDAD DE CHILE. 1999. Informe País, Estado del Medio Ambiente en Chile.

UNIVERSIDAD DE CHILE. 2008. Informe País, Estado del Medio Ambiente en Chile.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN. 2005. Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y algunas experiencias de organizaciones de usuarios del agua.

VILA, A. y SEDANO, M. 2005. Correlación lineal y análisis de regresión.

WIKIPEDIA LA ENCICLOPEDIA LIBRE [en línea] <http://www.wikipedia.org/> [consulta: 18 Agosto 2010].

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ANEXO A: ANÁLISIS DE EFECTIVIDAD REALIZADO POR HIDROMET PARA LOS PROGRAMAS DE ESTIMULACIÓN DE PRECIPITACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL

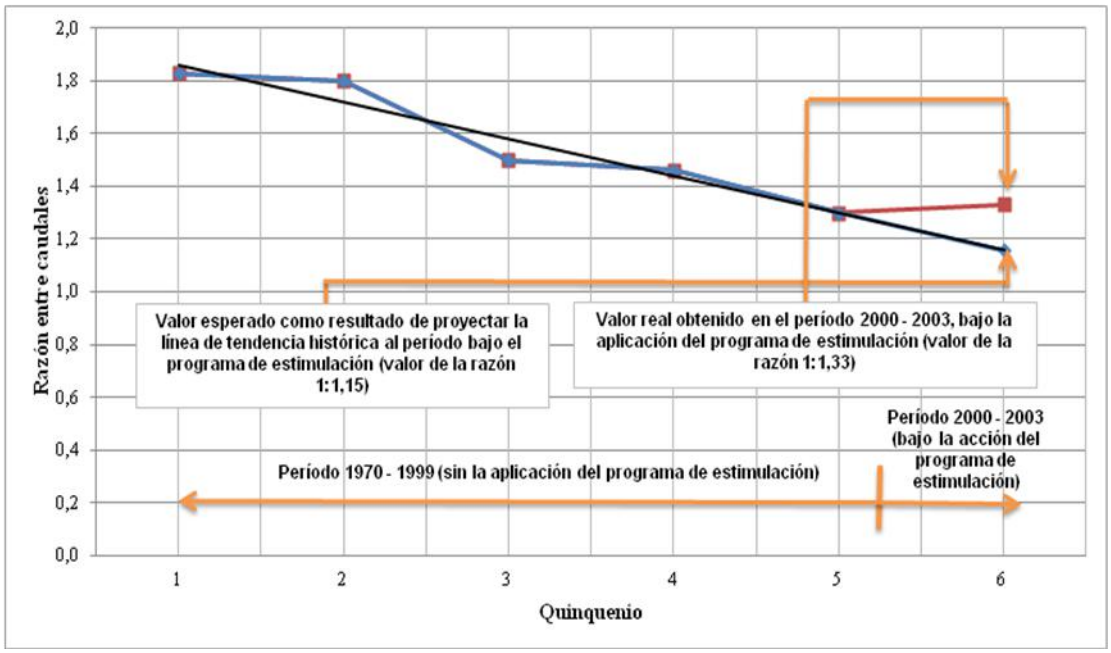

Figura A1. Análisis de efectividad realizado por Hidromet para el programa de estimulación de precipitaciones 2000 - 2003 (Hidromet, 2004).

Tabla A1. Análisis de efectividad realizado por Hidromet para el programa de estimulación de precipitaciones 2008 - 2011 (Hidromet, 2010).

Año	Mes	% de Variación	Variación Promedio
2008	Octubre	28,2	**18,6%**
	Noviembre	27	
	Diciembre	26	
2009	Enero	38,6	
	Febrero	21,6	
	Octubre	4,3	
	Noviembre	7,5	
	Diciembre	19,7	
2010	Enero	24,1	
	Febrero	-11	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ANEXO B: PRECIPITACIÓN ANUAL Y CAUDAL PROMEDIO ANUAL DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y FLUVIOMÉTRICAS DEL ÁREA OBJETIVO Y CONTROL

Tabla B1. Precipitación anual y caudal promedio anual de las estaciones pluviométricas y fluviométricas del área objetivo y control.

Año	Q río Cachapoal en Puente Termas [m^3/s]	Q río Pangal en Pangal [m^3/s]	Q Tinguiririca en Bajo Briones [m^3/s]	Q Maipo en el Manzano [m^3/s]	Q Maipo en las Hualtatas [m^3/s]	P Sewell [mm]	P San José de Maipo Subcomisaría [mm]
1970	56,64	-	33,43	68,24	-	852,5	-
1971	58,11	-	41,41	69,48	-	1054,7	-
1972	87,12	-	73,29	119,87	-	1492,7	-
1973	92,90	-	54,31	157,02	-	642,2	-
1974	75,02	-	50,08	102,44	-	808,4	-
1975	68,56	-	46,20	92,16	-	512,6	-
1976	55,52	-	43,78	69,22	-	754,1	-
1977	74,44	-	58,43	113,10	-	1138,7	-
1978	86,09	-	58,65	137,88	-	1080,3	-
1979	82,57	-	49,27	125,19	34,22	1056,9	-
1980	95,93	-	65,93	152,15	53	1189,2	600
1981	77,89	-	49,10	110,24	35,85	567,8	403
1982	99,16	-	65,30	156,35	31,87	955,9	724,3
1983	106,07	-	71,31	216	49,09	350,1	480,5
1984	84,83	-	57,54	128,90	33,85	467,2	565,5
1985	78,82	15,49	46,57	117,28	39,06	428,5	365
1986	79,41	15,84	49,55	141,37	31,62	730	643,7
1987	101,75	22,13	67,50	176,87	41,55	766,4	1007,5
1988	72,90	12,35	46,04	113,29	37,48	300,3	262
1989	66,61	18,42	45,53	109,34	27,18	309,9	443
1990	50,01	13,83	36,58	86,57	23,56	431,4	231,1
1991	59,11	16,59	45,49	117,75	30,57	879,7	736,5
1992	68,96	22,30	64,83	139,88	39,46	425,6	583
1993	81,20	22,16	63,95	146,30	40,80	640,3	500,5
1994	80,67	18,11	60,16	116,91	35,95	422,8	444,5
1995	74,09	17,25	60,19	104,57	29,93	368,1	334,8
1996	48,27	9,62	39,86	64,56	20,33	376,8	213
1997	76,21	17,56	67,31	106,78	24,47	1576,8	1022
1998	65,77	11,64	39,03	114,80	31,67	590,8	462,4
1999	51,41	12,48	35,62	73,52	19,05	260,4	380
2000	74,30	18,46	51,84	116,12	30,12	591,92	464,9
2001	91,44	19,78	65,43	148,57	35,09	728,7	530,5
2002	92,43	19,63	73,65	141,94	42,20	813,5	889
2003	81,38	17,87	63,94	139,46	43,01	482,6	344
2004	67,57	12,15	43,89	88,41	24,71	609,3	465,5
2005	111,54	19,73	54,95	135,91	32,69	910,4	738,5
2006	123,47	18,67	65,16	172,35	52,79	396,1	462
2007	66,44	11,40	41,09	94,42	28,33	188,3	-
2008	88,23	17,51	56,71	117,72	24,81	687,9	703,5
2009	77,54	11,89	-	104,82	20,99	407,1	533