

DIAGNÓSTICO DEL RECURSO HÍDRICO EN CONTEXTO DE SEQUÍA Y DEPENDENCIA AGRÍCOLA. CUENCA DEL LIMARÍ, COQUIMBO. PERIODO 2000-2011

Diagnosis of water resources in context of agricultural drought and dependence basin limarí, coquimbo. Period 2000-2011

Pablo Olivares Castillo

Pontificia Universidad Católica de Chile

Centro de Inteligencia Territorial, Universidad Adolfo Ibáñez

pablo.olivaresc@uai.cl

John Treimun Ríos

Pontificia Universidad Católica de Chile

Centro de Inteligencia Territorial, Universidad Adolfo Ibáñez

john.treimun@uai.cl

RESUMEN El modelo de desarrollo chileno, basado principalmente en la explotación y exportación de recursos naturales, ha producido una serie de desigualdades productivas y territoriales. En el caso de la cuenca del Limarí, localizada en la zona semidesértica del país, la producción es principalmente agrícola, cuya expansión e intensificación en los últimos 30 años ha generado una serie de problemas socio-territoriales. Alcanzar un equilibrio en el uso de los recursos hídricos en la zona, especialmente en periodos severos de sequía, es un desafío para el desarrollo de su población y la sustentabilidad del sistema productivo.

Esta problemática ya fue detectada en la región desde el siglo pasado y propició la construcción de grandes embalses de agua dulce, destinados a mantener los niveles y la subsistencia del recurso hídrico regional. A pesar de esto, el prolongado periodo de escasas lluvias en la zona, los efectos del cambio climático y la intensificación de la producción agrícola en las últimas décadas, dejan en evidencia un déficit hídrico al que los diferentes actores no han dado una respuesta satisfactoria.

Siguiendo la perspectiva de la ecología política para analizar las estructuras de poder detrás de las actividades productivas y las problemáticas socio ambientales que se plasman en el territorio; en el presente estudio se realiza un diagnóstico del recurso hídrico en la cuenca, mediante la integración de técnicas y métodos de percepción remota, buscando entrever las relaciones y las respuestas de los actores sociales a los desafíos del uso, el acceso, la gobernanza, la gestión y los conflictos sociales acerca del manejo del agua.

SUMMARY Chilean development model, based mainly on exploitation and exportation of natural resources, generates productive and territorial inequalities. In Limarí's basin, located in the semi-desert of Coquimbo's region, production it's mostly agricultural, and the expansion and increase of this primary activity over the past 30 years has generated socio-territorial problems. For example, to reach a balance over the use of water resources, especially in drought periods it's a constant challenge, not only for the basin's population, but also for the sustainability of the production system.

This problematic has already been detected in the region since last century, when a series of large reservoirs of fresh water. These reservoirs were meant to maintain the levels of water resources in Coquimbo's region. Unfortunately, long periods of drought and low rainfall, climate change effects, and the constant intensification of agricultural activities over the last two decades, led to water shortage, a serious problem that different actors still doesn't know how to fix.

Challenging the conventional understandings of environmental problems by following the approach of political ecology, and seeking to reveal certain power structures that underlies and reflects in the territory, the present study embarks in a diagnose of water resource in Limarí's basin, searching to comprehend the actors reactions to many of the challenges that involves the use, access, governance, management and social conflicts of water resource.

PALABRAS CLAVES: Recurso hídrico, Cambio Climático, Sequía, Expansión Agrícola, Percepción Remota.

KEY WORDS: Water resources, Climate Change, Drought, Agricultural Expansion, Remote Sensing,

INTRODUCCIÓN

Las dinámicas existentes en el espacio y los cambios acaecidos en la superficie del suelo parecieran ser inherentes al paso del tiempo y el sector rural-agrícola no es ajeno a esto, sobretodo en la medida que debe dar respuesta a la creciente demanda alimenticia de población. En el caso de Chile, esta relación y progresión "de desarrollo" se intensifica en gran medida por el modelo económico, basado principalmente en la explotación y exportación de recursos naturales, lo que ha producido una serie de desigualdades socioeconómicas y territoriales. Un parte importante de las desigualdades medioambientales tiene relación con las diferencias climáticas, la disponibilidad de suelos aptos y del recurso hídrico.

Producto del sistema de mercados de agua en Chile, el uso y la gestión del recurso hídrico son temas de vital importancia dada su demanda, sobre todo por parte de las industrias de exportación, particularmente la agricultura y la minería (Budds, 2012). En este contexto, el agua es entendido como un bienpreciado que no debe ser entendido ni distribuido como un mero recurso entre los usuarios, sino desde una concepción más compleja, la que contemple la integración de cada uno de los usuarios y la lucha que estos llevan para controlar y garantizar sus propios intereses (Budds, 2012), muy gráfico en una zona donde se conjugan intereses de producción y exportación agroindustriales con usos mucho más vitales, como es el sustento de agua potable rural.

La gestión de los recursos hídricos, en su condición de indispensable para la supervivencia de la humanidad, se debe plantear con

el máximo de rigor y eficiencia (Pérez, 2000). En el caso de la región de Coquimbo, el uso más eficiente pasó por mejorar el sistema de riego, dotando de canales que permitiesen tener un acceso más regulado y equitativo al agua (Ferrando, 2004). Sin embargo, no fue del todo efectivo, debido al desequilibrio entre la oferta y la demanda del recurso. Grynne (1996, en Ferrando 2004) plantea la existencia de una tensión entre el desarrollo económico y el recurso hídrico, relación que podría estar alcanzando "su máxima capacidad de uso", todo esto inserto en el semiárido del Norte Chico de Chile.

La agricultura históricamente se ha ubicado como una actividad de sustento, fuente de bienestar social, crecimiento y generación de excedentes de capital, sobre todo en los países desarrollados; añadiendo una función fundamental para el correcto funcionamiento de los países, la cual es la generación de empleo (Eiche & Witt, 1968). Sukel (1970) plantea que en Latinoamérica aquellas funciones se han presentado en forma lenta y discontinua, evidenciando quizá el subdesarrollo en el que se encuentra sumida la región, la que por medio de diversas medidas y tendencias gubernamentales (sustitución de importaciones-industrialización, reforma agraria, entre las más importantes) tendieron a cambiar este escenario. No obstante, es fundamental diferenciar el cambio existente en las últimas tres décadas en Chile, influenciado por las políticas neoliberales, diferenciándose de sus países vecinos en el gran rendimiento macroeconómico que estas han generado (Escalono & Ortiz, 2010). El impuso de la globalización ha dado paso a una agricultura que no solo abastece las necesidades nacionales, sino que también comienza a abastecer a otros países, generando una creciente transformación y artificialización del medio natural. Estos procesos provocan impactos en la actividad agrícola, fuertemente influenciados por las políticas de apertura económicas del Estado (INE, 2009).

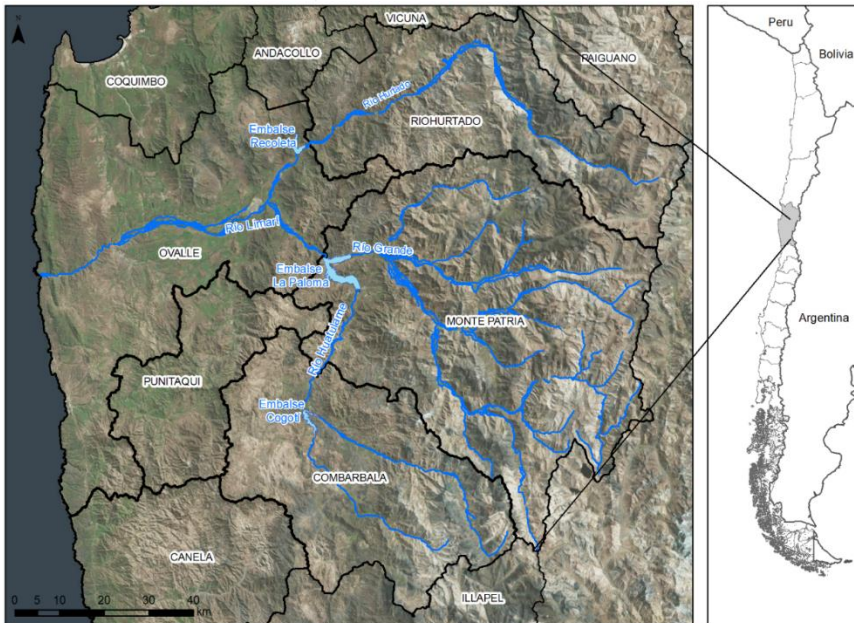
Asentados en todos estos antecedentes y siguiendo la perspectiva de la ecología política, en el sentido de cuestionar los entendimientos convencionales de los cambios y los problemas ambientales para revelar las estructuras de poder que los subyacen y plasman en el territorio, esta investigación tiene como objetivo realizar un diagnóstico cuantitativo del recurso hídrico en la cuenca del río Limarí, analizando espacialmente la capacidad del sistema hidrográfico. Esto con el fin de entrever las relaciones y las respuestas de los actores sociales a los desafíos del uso, el acceso, la gobernanza, la gestión y los conflictos sociales acerca del manejo del agua.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra definida por la cuenca hidrográfica del río Limarí, correspondiente al distrito provincial Limarí, en la Región de Coquimbo, Chile, abarcando las comunas de Combarbalá, Monte Patria, Ovalle, Punitaqui y Río Hurtado. Dado que la actividad agrícola depende fundamentalmente de la presencia de cursos de aguas, el análisis de las cuencas hidrográficas que alimentan al río Limarí constituye un marco de referencia de gran importancia a la hora de caracterizar las relaciones entre la actividad agrícola y el recurso hídrico.

La cuenca hidrográfica del río Limarí se encuentra ubicada entre los valles de los ríos Elqui por el norte y Choapa por el sur; extendiéndose aproximadamente entre los 30°15' y 31°20' de latitud sur, con una superficie aproximada de 11.800 km². La cuenca presenta un clima de tipo *semidesértico* (semiárido) o de *estepa*, en la cual las precipitaciones se distribuyen principalmente en las estaciones de invierno (MOP, Dirección General de Aguas, 2004). El régimen de los ríos que alimentan al río Limarí es nivopluvial, aunque se diferencian entre sí según las características geográficas de cada una de las cuencas hidrográficas (Río Hurtado, Río Grande y Río Huatulame).

Figura 1: Área de estudio



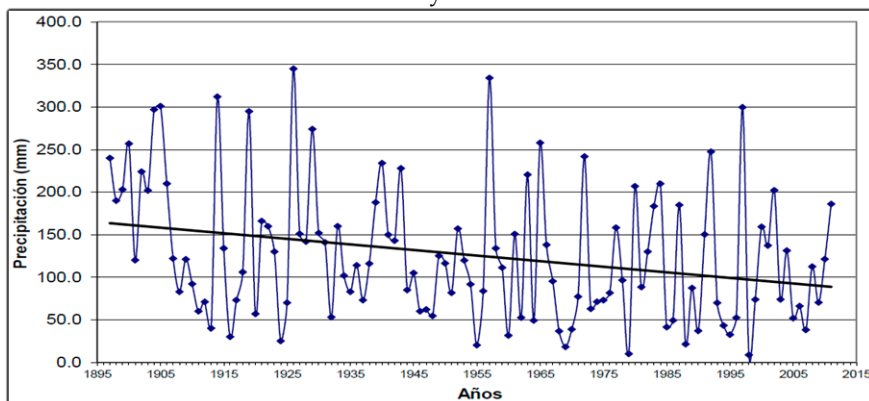
Fuente: Elaborado por los autores.

El valle del Limarí, debido a la disponibilidad de suelos y aguas de riego (embalses La Paloma, Puclaro y Cogotí), cuenta con una amplia

diversidad de cultivos. En este valle se presentan importantes superficies de praderas bajo riego, existiendo una abundante actividad hortícola, con alta especialización en cultivos de tomate y pimentón para primores, entre los más destacados, a los que se incorpora una alta tecnología de riego y de manejo, mediante el empleo de goteo, invernaderos y otros. El valle también presenta una importante superficie de viñas, orientada principalmente a la elaboración de pisco, aunque recientemente se ha producido una notable incorporación de vides para uva de mesa (MOP, Dirección General de Aguas, 2004).

La provincia del Limarí se encuentra en una zona con reducidas precipitaciones, lo que se observa en la Figura 2, la cual muestra las precipitaciones medias anuales en la ciudad de Ovalle (capital provincial del Limarí) en los últimos 100 años. En esta figura se aprecia la periodicidad de los años lluviosos y secos (Oscilación del Sur El Niño, ENSO), la justificación más importante para la construcción de los embalses de riego, sin embargo manifiesta una tendencia en forma patente de la baja sostenida de precipitaciones en la ciudad; todo esto es un antecedente de gran importancia a la hora de estimar los volúmenes de los embalses y la actividad agrícola en la zona, dado que se esperaría que estos se debiesen comportar con similares curvas de tendencias

Figura 2: Precipitaciones registradas en la ciudad de Ovalle entre los años 1895 y 2013.

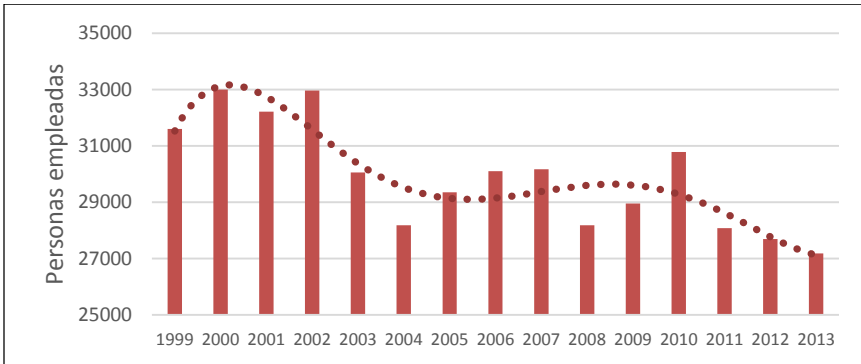


Fuente: Junta de Vigilancia del Río Grande, Limarí y sus afluentes, Diciembre 2013

En la Región de Coquimbo, la actividad agrícola tiene gran importancia, reflejándose en la producción frutal, que es la que más dividendo genera después de la minería (la que lidera a nivel nacional). La actividad agrícola, además de ser la segunda actividad que genera más exportaciones, en conjunto con la actividad ganadera, la caza y la silvicultura, es la segunda actividad que genera mayor cantidad de empleo, solo por debajo del comercio (INE, 2012). A su vez, en la región

destaca la mayor presencia de mujeres sobre el total de trabajadores estacionales, con un 36,3% del empleo asalariado estacional total. Este tipo de empleos presenta una gran variabilidad anual ligada a la producción vitivinícola (Bee, 2000). En la Figura 3 se puede apreciar la tendencia del empleo agrícola en la Provincia del Limarí, mostrando una clara disminución (4 mil empleos entre el periodo 2000-2011).

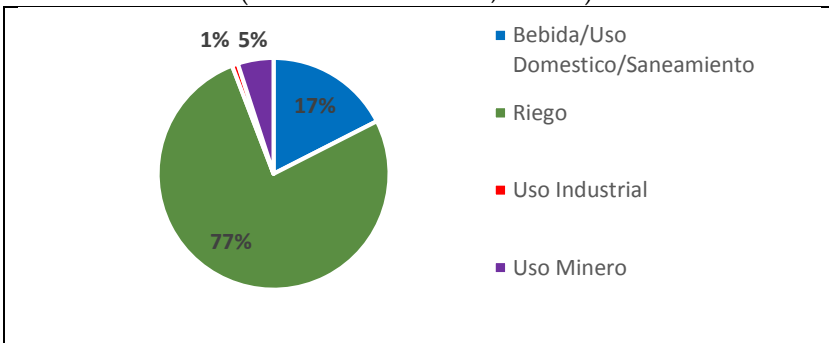
Figura 3: Empleo Agrícola en Provincia del Limarí, de acuerdo a cifras entre los años 1999-2013.



Fuente: Informe Empleo Sector Agrícola, Ganadería, Caza y Silvicultura, Región de Coquimbo, GORE Coquimbo, 2013.

Al tomar en consideración la distribución de los derechos de agua, concedidos por uso en la provincia del Limarí (Figura 4), se puede apreciar la existencia de un claro predominio del uso con fines de riego, con el resto de las actividades productivas (minería-industrias) en un 6%. Esto representa una oportunidad, por cuanto en la provincia del Limarí solo la actividad agrícola es la que en mayor medida utiliza el recurso, por lo que regulando a los grandes y medianos productores de frutas, en conjunto con una serie de medidas de compensaciones, se podría enfrentar la sobreexplotación del recurso hídrico.

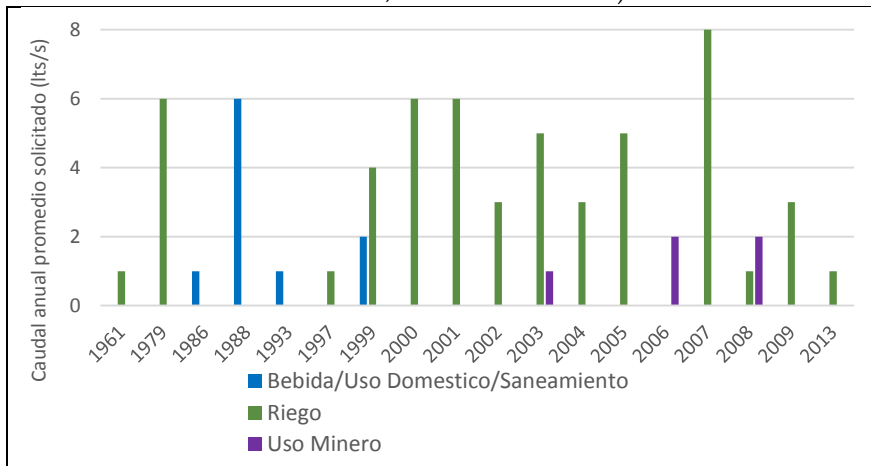
Figura 4: Distribución de Derechos de Agua Concedidos por uso (Derecho Consuntivo, Limarí).



Fuente: Junta de Vigilancia del Río Grande, Limarí y sus afluentes, Diciembre 2013.

De los derechos de agua con uso de riego solicitado estos se concentran en solo veinte dueños, compuestos por cooperativas y empresas privadas, los que poseen los mayores derechos de usufructuar de los cursos de agua superficiales. Entre ellos se concentra el 49,9% del caudal superficial disponible en la cuenca hidrográfica del Limarí, perteneciendo la gran mayoría a sociedades agrícolas, ganaderas o sociedades vitivinícolas. En conjunto con lo anterior, se puede realizar un seguimiento de los derechos de agua entregados por uso (Figura 5), en donde se observa que la gran mayoría de los derechos con uso de riego fueron entregados desde el año 1999 al 2007. En relación a los otros usos, solo el uso residencial experimenta un incremento en los años 1986-1993, relacionándose con la expansión de los centros urbanos en la zona.

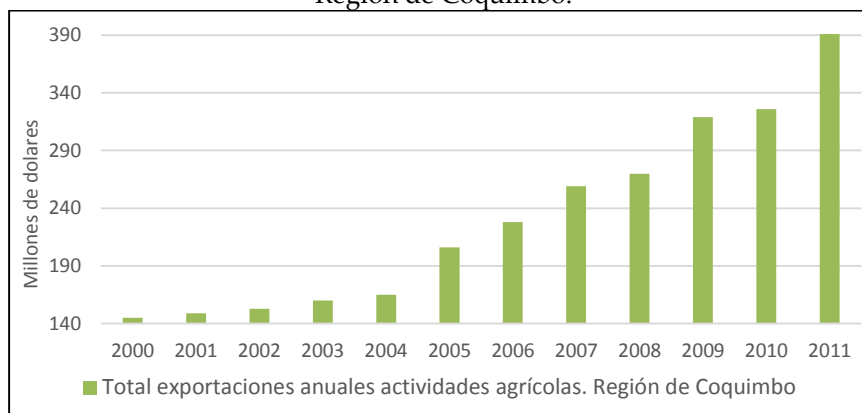
Figura 5: Evolución de entrega de Derechos de agua por uso (Derecho Consuntivo, Cuenca del Limarí).



Fuente: Junta de Vigilancia del Río Grande, Limarí y sus afluentes, Diciembre 2011.

El uso minero del recurso hídrico aparece en el escenario desde el año 2003, de forma esporádica y con menor importancia que el uso directo del recurso por parte de la población o el riego. La preponderancia del uso para el riego por la agricultura de exportación, reflejado en la extensión de las superficies plantadas y en el aumento en la producción agrícola, se refleja en el aumento de las exportaciones asociadas a la actividad agrícola de la región, registradas por el Servicio Nacional de Aduanas (Figura 6).

Figura 6: Evolución de las exportaciones asociadas al sector agrícola en la Región de Coquimbo.



Fuente: Servicio Nacional de Aduanas, 2014.

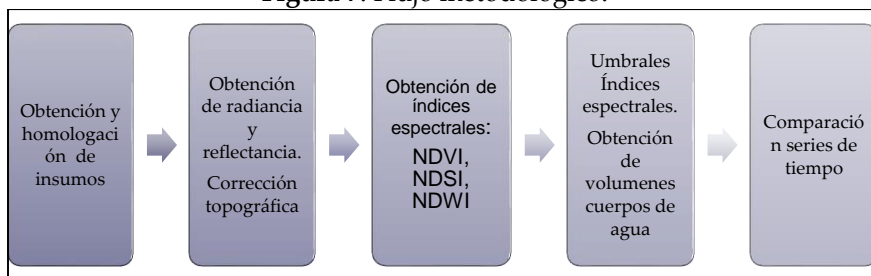
La gran cantidad de derechos de agua entregados desde el año 1999 hasta el año 2007, han provocado un impacto directo en el monto anual de exportaciones del sector agrícola en la región, casi triplicándose en un poco más de una década. Es evidente que este desarrollo económico ha causado mutaciones en el espacio rural, tensionando las relaciones entre los actores sociales que compiten por el recurso hídrico. Además, la intensificación de la actividad agrícola asociada al aumento de los montos exportados por el sector, no se reflejan en un aumento del empleo agrícola en la región, principalmente desde el año 2007. A continuación se desarrolla la metodología diseñada para caracterizar la evolución temporal de algunas variables directamente relacionadas con el comportamiento de las reservas y la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Limarí, integrándolas con la evolución de variables del ámbito socioeconómico en las que repercute la evolución del recurso hídrico.

MÉTODOS

Para realizar el diagnóstico del recurso hídrico en la cuenca del Limarí y generar información útil para resolver tensiones y conflictos entre los diferentes actores sociales, es necesario conocer el comportamiento de los diferentes afluentes que alimentan al sistema hidrográfico. Se consideró al caudal anual de los afluentes del río Limarí, el volumen de agua almacenada en los embalses del sistema hidrográfico y a las precipitaciones de Ovalle para caracterizar la evolución del recurso hídrico de la cuenca. De esta forma, el análisis multiescalar basado en técnicas de Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitió la generación de series de tiempo del ámbito geofísico, contrastables con series de tiempo del ámbito socioeconómico.

La metodología se encuentra basada en la imaginería satelital que ofrecen distintas plataformas virtuales en forma gratuita a la comunidad, junto a las series de caudales registrados por la Junta de Vigilancia del Río Grande, Limarí y sus afluentes. La estructura metodológica consta de cinco etapas, enfocadas en obtener las series de tiempo de las variables que influyen en el abastecimiento del recurso hídrico en la cuenca del Limarí. En la Figura 7 se sintetizan las etapas metodológicas seguidas en la presente investigación, las que a continuación son detalladas con mayor profundidad.

Figura 7: Flujo metodológico.



Fuente: Elaborado por los autores.

i. *Obtención y homologación de insumos*

Los insumos utilizados fueron obtenidos desde dos plataformas virtuales. La primera de ellas fue la plataforma de la *United States Geological Survey* (USGS), mientras que la segunda fuente fue el sitio web del proyecto ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM), el que pone a disposición del público un modelo digital de elevación (MDE) global de 30 metros de resolución espacial. El sitio web de la USGS provee de aplicaciones web que permiten descargar gratuitamente imágenes satelitales Landsat 5 y 7, provistas por los sensores *TM* y *ETM*. En total se consideraron 36 imágenes para el periodo 2000-2011. La resolución espacial de las imágenes utilizadas, centradas en la zona del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo medio y cercano, es de 30 metros. El software utilizado fue la versión 10.2 de ArcGis (ESRI), automatizando los procesos mediante la herramienta de programación gráfica *Model Builder*.

La homologación espacial de los insumos satelitales consistió en la siguiente secuencia de procesos:

- Homologación del sistema de referencia (WGS 1984, Huso 19 S, UTM)
- Corrección geométrica (*Shift*)
- Extracción de las celdas de cada cobertura pertenecientes al área de estudio.

- Extracción de los pixeles con valores cero y saturados.
- Generación de máscara raster auxiliar para realizar los cálculos en forma automatizada.

ii. *Obtención de la radiancia y la reflectancia espectral. Corrección topográfica*

La corrección radiométrica consistió en la transformación a radiancia y reflectancia de los valores digitales (DN) de cada imagen. Para la transformación de las imágenes provenientes de los satélites Landsat 5 y 7 se utilizaron las expresiones usadas por Chander *et al.* (2009).

Usando los valores del azimut y la elevación solar, junto a los valores de la pendiente del terreno y su orientación, obtenidas a través del procesamiento del MDE ASTER, fue posible encontrar el ángulo de incidencia de los rayos solares en la superficie. Esto se logró usando la expresión dada por Colbi (1991):

$$\text{Cos}(i) = \text{Cos}(\theta_s)\text{Cos}(\theta_n) + \text{Sen}(\theta_s)\text{Sen}(\theta_n)\text{Cos}(\phi_s - \phi_n) \tag{1}$$

Dónde:

$\text{Cos}(i)$ = Coseno ángulo de incidencia

θ_s = Ángulo cenital solar

θ_n = Pendiente de la superficie

ϕ_s = Azimut solar

ϕ_n = Orientación de la superficie

Considerando en la expresión (1) que la pendiente de la superficie es nula, entonces es posible aplicar el algoritmo de corrección topográfica C, propuesto por Teillet *et al.* (1982) a través de la expresión:

$$\rho'_{\lambda} = \rho_{\lambda} \left[\frac{\text{Cos}(v)+C}{\text{Cos}(i)+C} \right] \tag{2}$$

Con:

ρ'_{λ} = Reflectancia corregida topográficamente

ρ_{λ} = Reflectancia espectral

$\text{Cos}(v)$ = Coseno para una superficie horizontal

$C = \frac{b}{m}$ obtenido de la regresión lineal $\rho_{\lambda} = b + m\text{Cos}(i)$, usando mínimos cuadrados entre la reflectancia de cada banda espectral y el modelo de iluminación.

iii. *Obtención de índices espectrales*

Las superficies terrestres cubiertas con nieve, hielo o agua, presentan comportamientos diferenciados en relación a la reflectividad espectral que los caracteriza (firma espectral). Utilizando esta respuesta

espectral diferenciada según la longitud de onda de cada banda, se escogió un grupo de índices espectrales normalizados, cuyos valores se encuentran entre -1 y 1, para clasificar las superficies temáticas generadas.

El índice espectral utilizado para caracterizar la presencia de vegetación y cuerpos de agua fue el *Normalized Difference Vegetation Index* o NDVI. También resulta útil para la asistencia en la delimitación de cuerpos de agua y de nieve. El NDVI fue calculado usando la expresión:

$$NDVI = \frac{\rho'_{3} - \rho'_{4}}{\rho'_{3} + \rho'_{4}} \quad (3)$$

Siendo ρ'_{3} y ρ'_{4} las reflectividades corregidas topográficamente de las bandas 3 y 4 del sensor. Por su parte, el *Normalized Difference Snow Index* NDSI es un ratio comúnmente utilizado para detectar superficies de hielo y nieve. La expresión utilizada para calcular al NDSI fue:

$$NDSI = \frac{\rho'_{2} - \rho'_{5}}{\rho'_{2} + \rho'_{5}} \quad (4)$$

En donde ρ'_{2} y ρ'_{5} son las reflectividades corregidas topográficamente de las bandas 2 y 5. El tercer índice considerado fue el *Normalized Difference Water Index* o NDWI, estimado a partir de las bandas del infrarrojo cercano e infrarrojo medio, muestra sus valores más altos correlacionados con la presencia de agua. La expresión utilizada para su obtención fue:

$$NDWI = \frac{\rho'_{4} - \rho'_{5}}{\rho'_{4} + \rho'_{5}} \quad (5)$$

Considerando que ρ'_{4} es la reflectividad corregida topográficamente de la banda 4.

iv. Umbrales de índices espectrales y estimación del volumen

Una vez estimados los índices espectrales, se reclasificaron las superficies generadas utilizando los siguientes parámetros como umbrales referenciales:

- Para estimar la superficie cubierta con nieve se tomó como valores del NDSI al intervalo (0,4 – 1)
- Para estimar las láminas superficiales de los cuerpos de agua se utilizó el intervalo (0,5 – 1) del NDWI, junto a los valores menores que 0 del NDVI

Los intervalos considerados para cada índice espectral se ajustaron según fuese la estación del año en que se registró cada imagen satelital. Obtenidas y reclasificadas las superficies generadas, se procedió a estimar

las áreas cubiertas con nieve y las láminas de agua para estimar los volúmenes de los embalse.

Obtenidas las superficies reclasificadas se procedió a extraer las celdas de interés, para cada variable analizada. En el caso de la superficie de nieve, las celdas representantes del área nival fueron transformadas directamente a polígonos, registrando su superficie en kilómetros cuadrados en un nuevo atributo. De forma similar, las superficies con las láminas de agua fueron vectorizadas y utilizadas como planos referenciales para estimar el volumen de agua de cada embalse del sistema hídrico. Para lograrlo se utilizó la caja de herramientas *3D Analyst*, de ArcGIS, automatizando la serie de procesos con la ayuda de *Model Builder*.

v. Comparación de series de tiempo

Una vez creada la serie de tiempo de la superficie de nieve en las cuencas alimentadoras del río Limarí y la serie de tiempo del volumen de los embalses del área de estudio, se caracterizó a sus desfases temporales y tendencias generales con las curvas de tendencia sistematizadas a la fecha:

- Precipitaciones medias anuales de la ciudad de Ovalle
- Caudales totales de las cuencas que alimentan al río Limarí
- Superficie nival total de las mismas cuencas receptoras
- Volumen total del sistema de embalses que alimentan al río Limarí
- Curva de tendencia del empleo Sector Agrícola, Ganadería, Caza y Silvicultura
- Curva de tendencia de Exportaciones del Sector Agrícola en la Región de Coquimbo

La búsqueda de relaciones climáticas y la disponibilidad de agua para el riego, en términos de *time lag* y tendencias cíclicas en el periodo estudiado, se basó en la comparación de las tendencias de las variables alimentadoras del sistema de embalses (precipitaciones anuales, superficie nival total y caudal anual total) con la tendencia del volumen total de los embalses (variable almacenadora). El contraste con las series del ámbito socioeconómico (empleo y montos exportados por el sector agrícola) se realizó con el volumen total de agua almacenada por año en el sistema.

RESULTADOS

Se encontraron importantes relaciones entre las variables físicas obtenidas por teledetección y las series temporales de variables del ámbito socioeconómico en el área de estudio. Los resultados obtenidos de los

contrastes de las tendencias de esas variables son presentados en dos partes. En la primera parte se exponen las variaciones espacio-temporales de la superficie cubierta por nieve y el volumen de agua en los embalses, contrastadas con las series de los caudales anuales registrados en el periodo 2000-2011, por cada cuenca hidrológica que alimenta al río Limarí. En la segunda parte se presentan las series temporales de las variables físicas del sistema hidrológico contrastadas con las tendencias de las series temporales de la cantidad de personas empleadas y los montos exportados por el sector agrícola de la provincia y la región de Coquimbo.

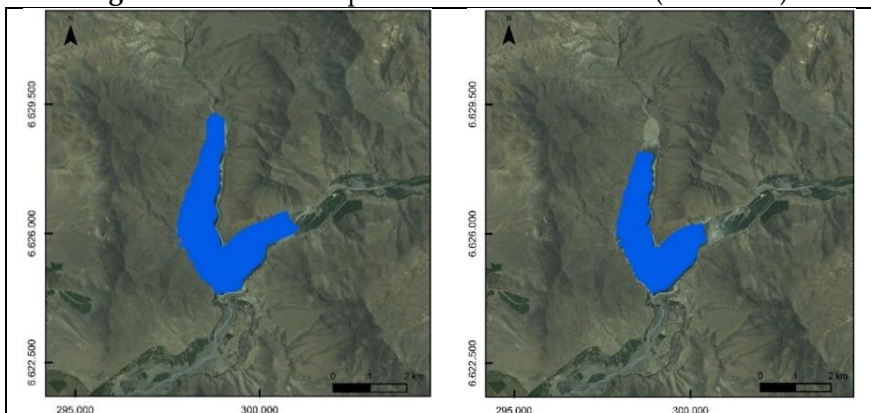
1. Variación de la superficie nival, el volumen de los embalses y el caudal anual por cuenca hidrológica

Los resultados se caracterizan mediante el embalse que representa a cada cuenca hidrológica que alimenta al sistema de la cuenca del río Limarí, exponiendo en términos espaciales la variación de la superficie de la lámina de agua de cada embalse, junto a las curvas de tendencia de la superficie nival y el volumen de agua almacenado. Estas curvas son contrastadas con la evolución del caudal anual recibido por cada cuerpo de agua y medido por las estaciones fluviométricas de la Junta de Vigilancia del Río Grande, Limarí y sus afluentes.

– Embalse Recoleta

En el sector norte del área de estudio, caracterizado por el Embalse Recoleta, se observa una disminución importante de la superficie cubierta por el agua (25%) y del volumen almacenado (26%), pasando de 1,9 millones de litros (ML), en el año 2000, a 1,4 ML en el año 2011 (Figura 8) constituyendo, a pesar de esta gran disminución, la menor caída de volumen en relación a los otros embalses analizados.

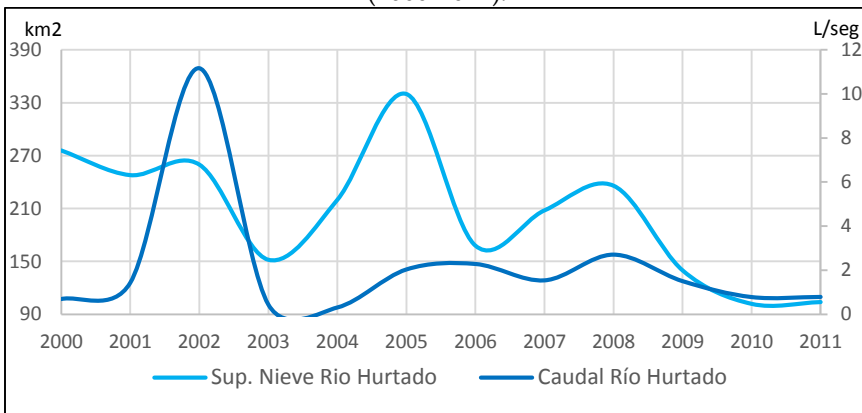
Figura 8: Variación Superficie Embalse Recoleta (2000-2011).



Fuente: Elaborado por los autores.

En cuanto a la evolución de la superficie nival en la cuenca, tal como se observa en la Figura 9, las fluctuaciones cíclicas no esconden la tendencia a la baja, disminuyendo un 13% en promedio entre el año 2000 y el 2011. Por otra parte, en el caudal del Río Hurtado se observa una disminución menos acentuada, salvo un evento durante el año 2002, el que corresponde a un año lluvioso (200 mm, en comparación a los 120 mm anuales promedio), revelando la alternancia temporal del protagonismo en el régimen nivopluvial del Río Hurtado. Desde el año 2003 se observa la entrada en fase de ambas curvas, primero con un *time lag* anual (2003-2007) y luego acopladas (2008-2011), indicando una tendencia a la fusión anual de la superficie nival de la cuenca, relacionada a una disminución del reservorio de nieve/hielo en la cuenca hidrológica del Río Hurtado. Esto se refleja en la disminución de la superficie nival del año 2003 y la drástica disminución del caudal anual en el año 2004.

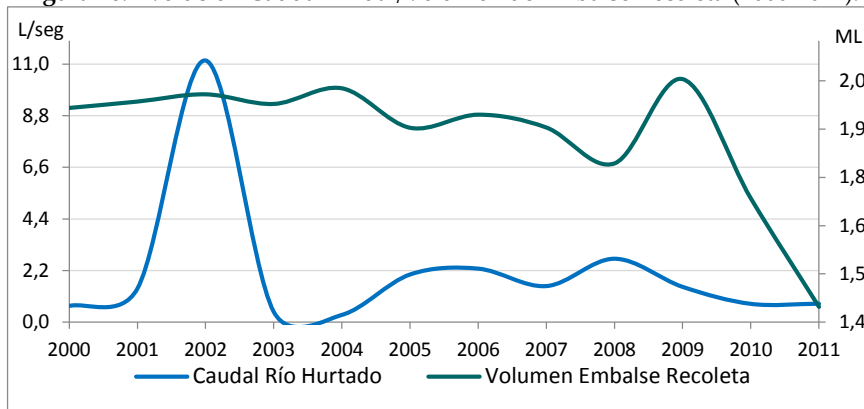
Figura 9: Evolución Superficie Nival/Caudal Anual Embalse Recoleta (2000-2011).



Fuente: Elaborado por los autores.

La evolución del caudal anual registrado y el volumen estimado del embalse Recoleta en el periodo analizado se presenta en la Figura 10. Se observa que el volumen almacenado en el embalse hasta el año 2004 se mantenía por sobre los 1,9 ML, a pesar de las fluctuaciones en las precipitaciones y la disminución de la superficie nival. Sin embargo, a partir del año 2005 hasta el año 2009 se aprecia la entrada en fase de ambas curvas, con un *time lag* de 1 año. Desde el año 2010 hasta el año 2011 se puede observar que la evolución de ambas variables deja de estar en fase, manteniéndose un caudal bajo, pero estable, en contraste con la abrupta caída en el agua almacenada en el embalse, relacionada con las disminuciones de las precipitaciones y la superficie nival, junto al aumento de la demanda por el recurso hídrico y la concesión de derechos de agua para uso de riego implementada hasta el año 2010.

Figura 10: Evolución Caudal Anual/Volumen de Embalse Recoleta (2000-2011).

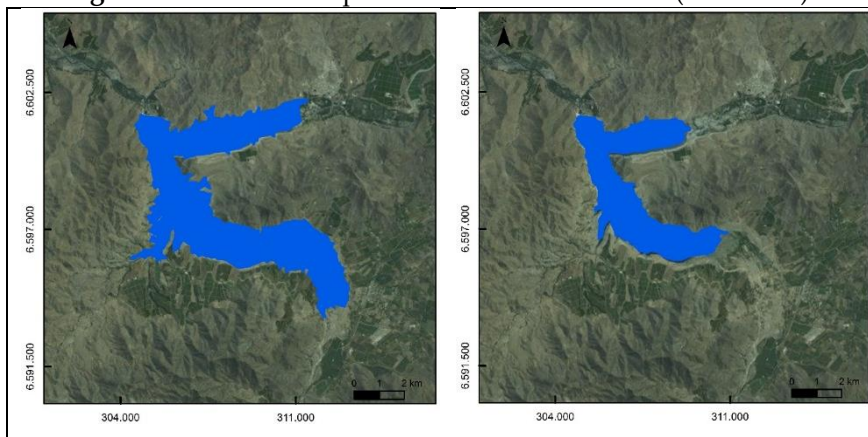


Fuente: Elaborado por los autores.

– **Embalse La Paloma**

En el embalse La Paloma, el segundo embalse de riego más grande de Sudamérica, se observa una disminución de su superficie del 49%, relacionándose con la disminución de volumen más notoria de los embalses estudiados en la presente investigación, pasando de 9,4 ML, en el año 2000, a 4,3 ML en el año 2011 (una caída del 54%) (Figura 11).

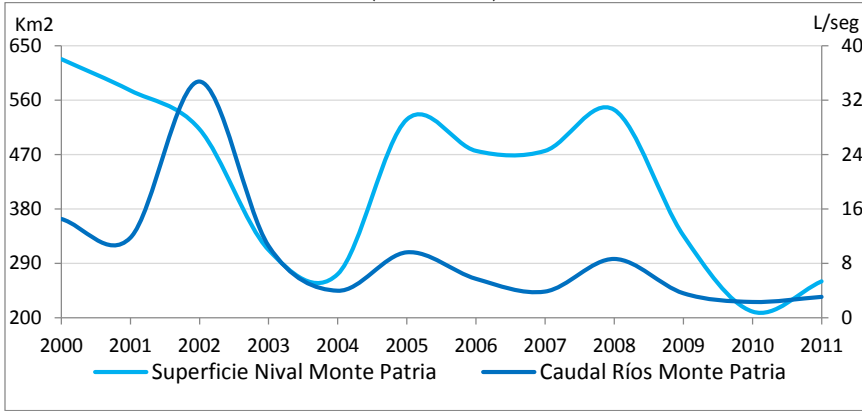
Figura 11: Variación Superficie Embalse La Paloma (2000-2011).



Fuente: Elaborado por los autores.

Si se realiza una comparación entre la superficie nival y el caudal anual, se observa la existencia de una tendencia global a la baja de ambas curvas en el periodo analizado (Figura 12). Se evidencia una mayor dependencia de la superficie nival por parte del caudal anual, manifestándose con importancia desde el año 2009. La disminución del caudal anual en el periodo analizado se relaciona con la disminución de la superficie nival (24%), revelando que las precipitaciones han mantenido el nivel base de caudal anual en la cuenca del río Grande desde el año 2009.

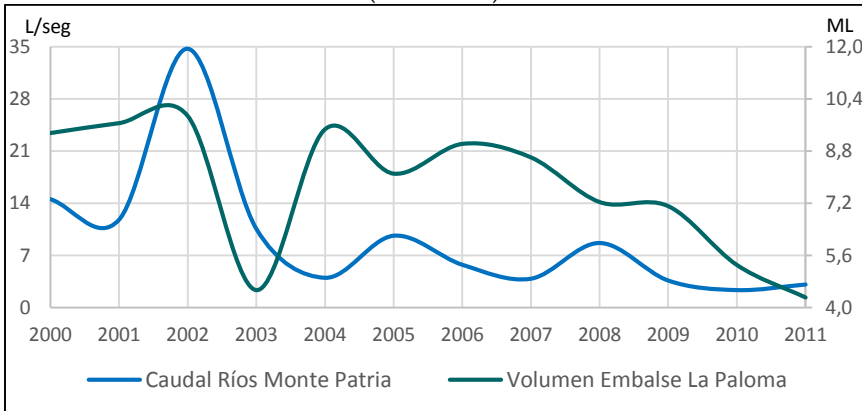
Figura 12: Evolución Superficie Nival/Caudal Anual Embalse La Paloma (2000-2011).



Fuente: Elaborado por los autores.

El volumen del embalse La Paloma experimenta fuertes variaciones entre el año 2000 y el 2004 (Figura 13), relacionándose con la fuerte disminución de la superficie nival y el caudal anual. El embalse solo recupera su nivel medio cuando se aumenta la superficie cubierta con nieve, mostrando una marcada dependencia del régimen del Río Grande con la variabilidad de precipitaciones solidas de la cuenca. Desde el año 2003 hasta el año 2009 se aprecia un *time lag* anual entre la variación en el caudal anual y el volumen de agua almacenada, el que pierde forma desde el año 2010, coincidiendo con la merma en la superficie nival.

Figura 13: Evolución Caudal Anual/Volumen de Embalse La Paloma (2000-2011).



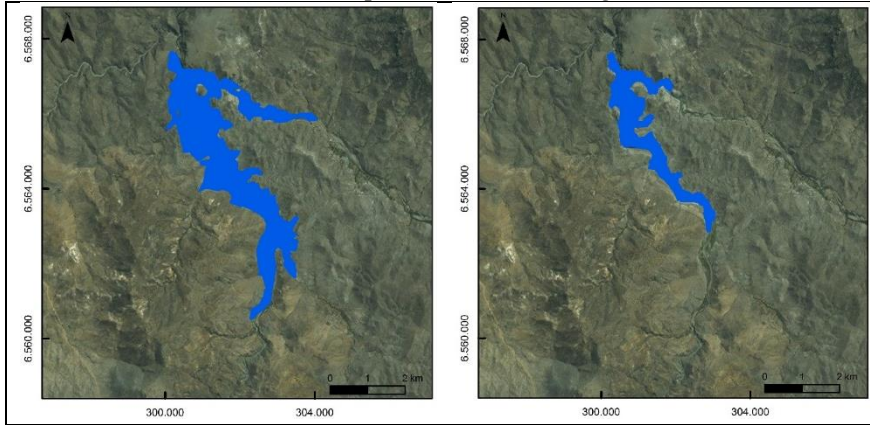
Fuente: Elaborado por los autores.

– **Embalse Cogotí**

El caso del Embalse Cogotí es el que presenta la situación más dramática de los tres estudiados, reduciendo su superficie en un 65% y

disminuyendo su volumen de 3,9 ML, en el año 2000, a solo 1,4 ML en el año 2011 (64% menos). En la Figura 14 se puede apreciar la drástica disminución de la lámina de agua del embalse.

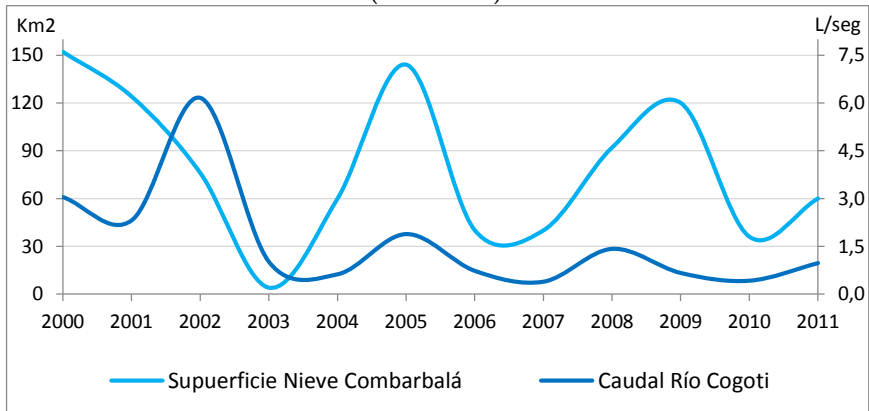
Figura 14: Variación Superficie Embalse Cogotí (2000-2011).



Fuente: Elaborado por los autores.

La superficie de nieve en la cuenca que alimenta al embalse Cogotí experimentó fuertes variaciones a lo largo de la década (Figura 15), reduciéndose fuertemente hasta el año 2003 y volviendo a ciclos normales hasta el año 2011. La curva del caudal anual entra en fase con la evolución de la superficie nival entre los años 2004 y 2010, coincidiendo con el periodo de mayor estabilidad en el ciclo de las precipitaciones sólidas. Se observa el mencionado aumento del caudal anual en el año 2002 relacionado con un año lluvioso en la región, como también la marcada disminución del flujo en el año 2003 influenciada por el retroceso de la superficie nival.

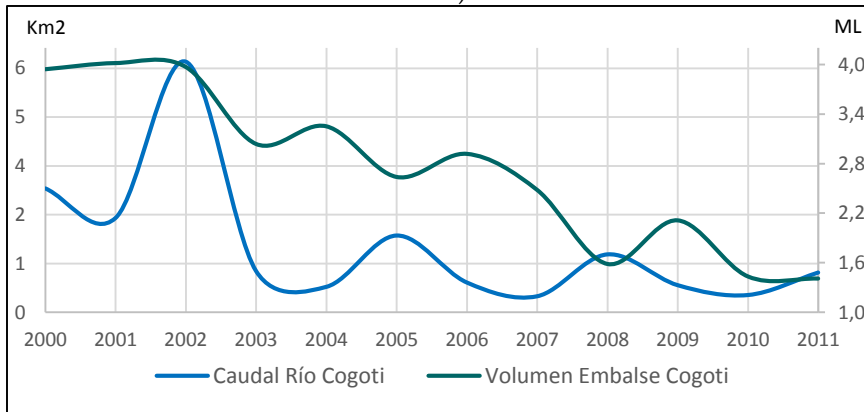
Figura 15: Evolución Superficie Nival/Caudal Anual Embalse Cogotí (2000-2011).



Fuente: Elaborado por los autores.

En cuanto al caudal de los ríos que alimentan el embalse, este ha disminuido un 4,3%, el mayor porcentaje de todas las cuencas alimentadoras estudiadas. El volumen del Embalse Cogotí experimenta una fuerte caída en el periodo analizado, lo cual se podría relacionar con la disminución de las precipitaciones y el aumento indiscriminado del recurso para el riego, ya que la disminución y las variaciones del caudal que ingresó y la superficie nival estimada no se relacionan con la disminución sostenida del volumen del embalse (Figura 16). Aunque el volumen del embalse presente una marcada tendencia a la baja, es posible distinguir un *time lag* anual (desde el año 2003) entre el caudal anual ingresado al embalse y el volumen estimado.

Figura 16: Evolución Caudal Anual/Volumen de Embalse Cogotí (2000-2011).



Fuente: Elaborado por los autores.

2. Contraste de las series hidrológicas de la cuenca del Limarí vs variables del ámbito socioeconómico

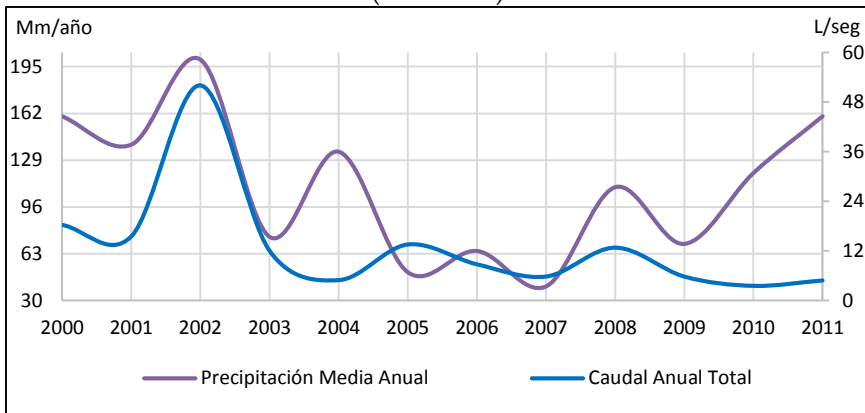
Sumando las superficies nivales, los caudales anuales y los volúmenes estimados para cada cuenca, se obtuvieron las series temporales que caracterizan el comportamiento de cada variable en el sistema hidrológico del río Limarí en el periodo analizado. Primero se presentan las comparaciones entre las series alimentadoras del sistema, compuestas por las precipitaciones medias anuales, la superficie nival total, el caudal anual total y el volumen total de agua almacenado. Luego se contrasta la evolución del volumen almacenado por la red de embalses con el comportamiento de los montos exportados y el empleo generado por el sector agrícola en la región.

- Comparación de series hidrológicas del sistema del río Limarí

Al realizar una comparación entre la información levantada del estudio y la obtenida por medio de técnicas de percepción remota, se

observa que la evolución de las precipitaciones en el periodo analizado es irregular (Figura 17), mostrando máximos en el inicio del periodo (sobre los 130 mm entre los años 2000 y 2002) y en la parte final (sobre los 100 mm desde el año 2009). Entre los años 2003 y 2008 se evidencia una alta variabilidad, oscilando alrededor de los 90 mm anuales. Los máximos de precipitaciones registrados entre los años 2000 y 2002 se relacionan con el máximo del caudal anual total (2002); sin embargo, el segundo periodo de altas precipitaciones no influyó de la misma forma en el caudal registrado en el sistema.

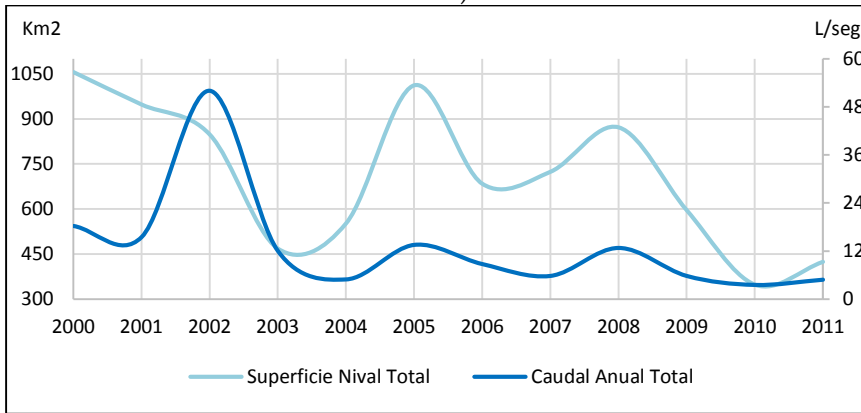
Figura 17: Evolución Precipitación Media Anual/Caudal Anual Total (2000-2011).



Fuente: Elaborado por los autores.

En la Figura 18 se aprecia la evolución de la superficie nival total y el caudal anual total. La superficie cubierta con nieve es alta hasta el año 2002 (sobre los 900 km²), coincidiendo con los altos montos de precipitaciones. Esta confluencia se tradujo en los altos caudales del inicio del periodo analizado, en contraste con la situación a partir del año 2009, en donde las precipitaciones tendieron a aumentar y la superficie nival bajó (a menos de 400 km²). Pese al repunte de las precipitaciones en el año 2004 (135 mm), la disminución de la superficie total cubierta con nieve los años 2003 y 2004 (menos de 550 km²), mantuvo bajos los caudales anuales totales registrados en el área de estudio hasta el año 2005. Entre los años 2004 y 2009 ambas curvas se aprecian en fase, en un ciclo de 3 años, reflejando la fuerte dependencia de las precipitaciones solidas en el régimen de los caudales del sistema. Desde el año 2009 ambas curvas se desacoplan, debido a la fuerte disminución de la superficie nival total y el aumento de las precipitaciones anuales.

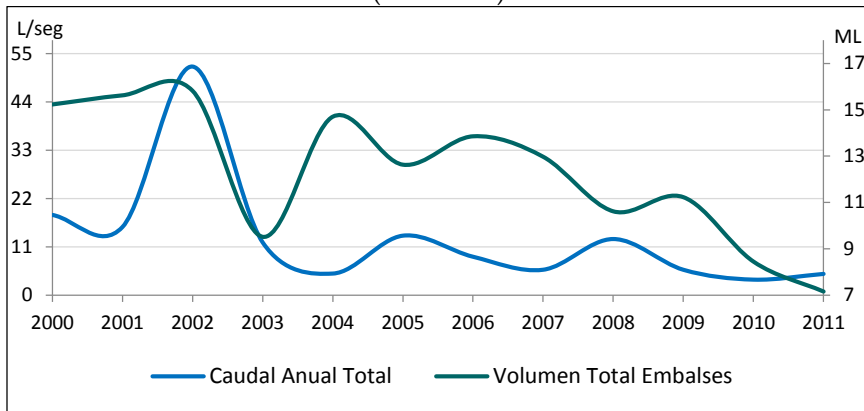
Figura 18: Evolución Superficie Nival Total/Caudal Anual Total (2000-2011).



Fuente: Elaborado por los autores.

La relación del caudal anual total que ingresó a los embalses del sistema y el volumen de agua almacenado por ellos, entre los años 2000 y 2009, presenta un claro *time lag* bianual en su evolución temporal (Figura 19). La fuerte disminución del caudal anual total del año 2001 repercutió en la disminución del volumen total almacenado en el año 2003 (de más de 40 ML a 10 ML). Sin embargo, el desfase temporal del aumento en el caudal anual total del año 2002 aumentó el volumen en el año 2004 a 40 ML. Entre el año 2005 y el año 2009 la superficie nival aumenta (por sobre los 600 km²), en contraposición a la disminución de las precipitaciones anuales. Esta situación provocó que el caudal anual se mantuviera bajo, en torno a los 10 L/seg manifestándose en la disminución del volumen almacenado hasta los 20 ML. Desde el año 2009 hasta el año 2011, la superficie nival retrocedió a menos de 450 km², mientras que las precipitaciones aumentaron por sobre los 100 mm, logrando mantener sobre cero al caudal anual (menos de 6 L/seg) e impactando directamente en la cantidad de agua almacenada (7 ML).

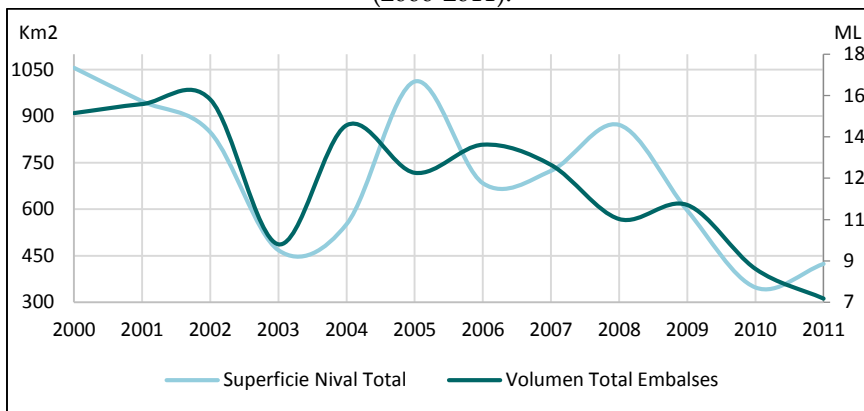
Figura 19: Evolución Caudal Anual Total/ Volumen Total Embalses (2000-2011).



Fuente: Elaborado por los autores.

En la Figura 20 se aprecia que las reservas del recurso hídrico con las que contaba el área de estudio bajan sustancialmente sus niveles en el periodo 2000-2011, sin que aumentos cíclicos de las precipitaciones o los caudales anuales contribuyan significativamente al almacenamiento de agua. La fuerte dependencia nival de los regímenes de los ríos afluentes al sistema hídrico de la cuenca del Limarí queda manifiesta con el acople de ambas curvas entre los años 2000 y 2003, produciéndose un time lag anual entre ambas variables desde el año 2005.

Figura 20: Evolución Volumen Total Embalses/Superficie Nival Total (2000-2011).



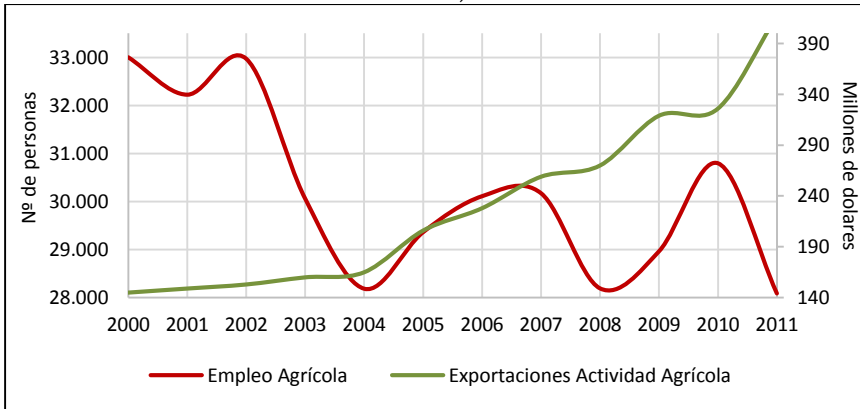
Fuente: Elaborado por los autores.

– **Contraste entre la evolución del volumen de agua almacenado, los montos exportados y los empleos generados por el sector agrícola**

Aunque la disminución de la superficie nival se relacionó directamente con la merma del caudal anual y, por ende, con la disminución del volumen de agua almacenado en el sistema, el aumento de las precipitaciones anuales mantuvo un caudal base que alimentó a los embalses de la zona. No obstante, la disminución del volumen almacenado en los últimos años del periodo analizado no se relaciona solamente con la disminución de precipitaciones sólidas en la región. El aumento de los derechos de agua cedidos para el riego es un forzante de importancia del sistema hídrico, impulsando el desarrollo económico de la actividad agrícola de la zona. De esta forma, se usaron las tendencias de dos series de tiempo de origen antrópico, el empleo y los montos exportados por el sector agrícola, directamente relacionadas con el uso del recurso hídrico de la cuenca del Limarí.

En la Figura 21 se observa que las exportaciones asociadas a la actividad agrícola han aumentado en los 11 años analizados, casi triplicando los montos exportados, contrastando con las fuertes fluctuaciones y la disminución del número de empleados en el sector agrícola.

Figura 21: Evolución Empleo Agrícola/Exportaciones Agrícolas (2000-2011).



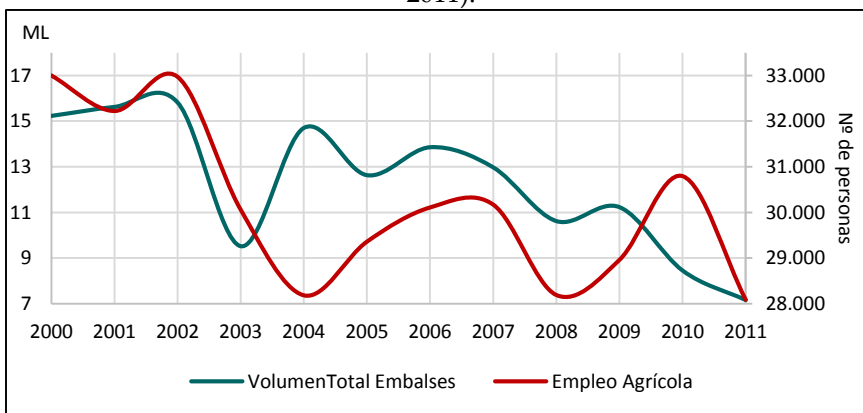
Fuente: Elaborado por los autores.

La principal caída en el empleo agrícola se encuentra entre los años 2000 y 2004, disminuyendo en 5 mil el número de empleados. La concesión de derechos de agua para el riego que se realizó hasta el año 2005 se refleja en el posterior aumento en el monto de las exportaciones (años 2005-2008), impulsando un repunte del empleo agrícola hasta el año 2007 a más de 30

mil empleados, pero volviendo a los bajos niveles al año siguiente. El nuevo aumento en la concesión de derechos de agua para el riego de los años 2007 y 2008, en particular el alto número de litros por segundo concedido el año 2007 (8 L/seg), fomenta un segundo aumento en las exportaciones del sector agrícola entre los años 2009 y 2011, relacionándose con el aumento del empleo agrícola solo entre los años 2008 y 2010.

Al contrastar la evolución del empleo agrícola con el volumen almacenado en la red de embalses (Figuras 22), se observa una clara relación entre el comportamiento de las reservas hídricas del sistema con la variabilidad del empleo agrícola. Con la excepción del año 2004 (135 mm de agua caída), se evidencia un *time lag* anual entre el volumen de los embalses y el comportamiento del empleo agrícola entre los años 2003 y 2005. Ambas curvas entran en fase entre los años 2006 y 2009, desacoplándose entre los años 2010 y 2011. Se puede observar que el aumento del empleo agrícola no tiene relación con el descenso de las reversas del recurso hídrico, sino más bien con el aumento en la provisión de agua para el riego de los años 2007 y 2008. Sin embargo, el efecto en el empleo agrícola por el aumento en la cesión de derechos de agua, aunque importante, es efímero cuando los niveles de agua almacenados son tan bajos (menores a 9 ML entre los años 2010 y 2011).

Figura 22: Evolución Volumen Total Embalses/Empleo Agrícola (2000-2011).

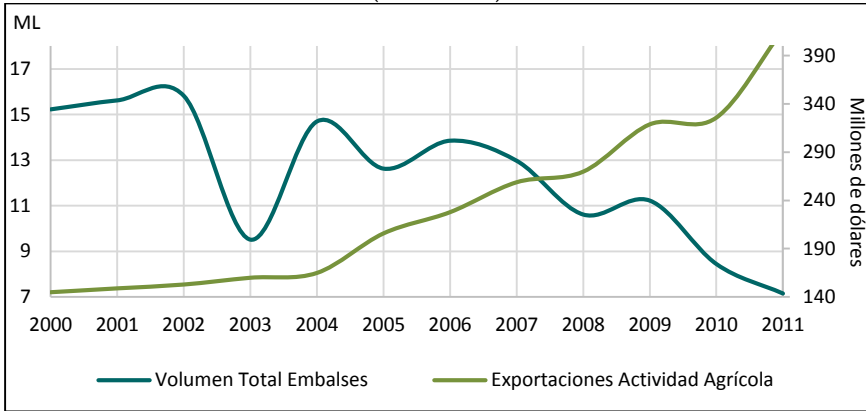


Fuente: Elaborado por los autores.

En la Figura 23 se puede apreciar la evolución de las reservas almacenadas en el sistema hídrico contrastadas con la evolución de las exportaciones del sector agrícola. Se observa que, salvo pequeñas fluctuaciones, la exportación agrícola no ha dejado de crecer, aumentando de 140 millones de dólares en el año 2000, a más de 390 millones de dólares en el año 2011. Entre los años 2003 y 2007 las fluctuaciones del volumen de

agua almacenado influyeron en los montos exportados con un *time lag* de 1 año; mientras que entre los años 2009 y 2011 ambas curvas se acoplan pero con tendencias inversas, alcanzando el máximo y el mínimo de las exportaciones y el volumen de agua almacenado, respectivamente, en el periodo analizado.

Figura 23: Evolución Volumen Total Embalses/Exportaciones Agrícolas (2000-2011).



Fuente: Elaborado por los autores.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten comprobar que en los últimos 11 años existe una disminución sistemática en los niveles de agua de los embalses del sistema hídrico del río Limarí, lo cual ha generado una serie de conflictos socioeconómicos y ambientales. La legislación vigente en el área de los derechos de agua, en la cual el mercado ejerce la tenencia y la distribución, no considera el uso racional y sustentable del recurso. Las dos etapas de cesiones de derechos de agua para el riego (2000-2005 y 2007-2008) determinaron dos fuertes incrementos en los montos exportados del sector agrícola (2004-2007 y 2008-2011), relacionándose con igual número de incrementos en el número de personas empleadas por la actividad. Sin embargo, el correspondiente aumento en la demanda del recurso hídrico para el riego y la disminución de los volúmenes de agua en los embalses que ha seguido a cada etapa de cesiones de derechos, ha provocado fuertes retrocesos en la cantidad de mano de obra empleada por la actividad agrícola de la cuenca del Limarí.

El análisis de la dependencia hídrica en la cuenca del Río Limarí pone de manifiesto la importancia de un manejo acotado y sustentable del recurso hídrico, el que debería incorporar diferentes puntos de vistas del medio natural, del productivo y del humano. Esta dependencia se

intensifica en una zona de transición climática, caracterizada por la relevancia de la actividad agrícola para el desarrollo de la población. La disminución de la superficie nival en las cuencas receptoras que alimentan al río Limarí (sobre el 50%), juega un rol importante en la disminución del caudal anual y en las reservas del sistema hídrico, aunque su influencia se vuelve más importante desde el año 2008. La tendencia decreciente de las precipitaciones presenta ciertas fluctuaciones de importancia que han permitido mantener un caudal anual estable en la zona. No obstante, las precipitaciones no contribuyeron al caudal de forma tan directa como la fusión de la superficie nival, la que se incorpora rápidamente a los cauces a través de la red de drenajes de las cuencas receptoras, por lo que la recuperación de las precipitaciones evidenciada al final del periodo 2000-2011 no fue suficiente para recuperar los niveles de agua almacenados por los embalses.

Por otro lado, y en medio de la inminente reforma del Código de Aguas¹, se debe someter a revisión de factibilidad de catalogar a los Derechos de Agua como un bien nacional de uso público, sobretudo en el actual contexto de sequía y dependencia agrícola, junto a un progresivo avance de la desertificación hacia la zona central del país. En la provincia del Limarí, donde abundan las comunidades agrícolas y pequeñas localidades rurales que viven con agua potable rural, la consideración de los cursos de agua como elementos vitales para la subsistencia del sistema humano es esencial para su desarrollo. Resulta vital evaluar las relaciones de poder establecidas mediante los Derechos de Agua, para evitar la sobreexplotación de los recursos hídricos. Es fundamental que los diagnósticos y las soluciones propuestas aseguren el abastecimiento de los agricultores más pequeños de la cuenca, los menos responsables en la sobreexplotación continua de la cuenca, como se reflejan en las cifras del sector agrícola y del volumen de agua almacenado.

Según los resultados del diagnóstico realizado en la cuenca del Limarí, se debería aumentar la seguridad de riego de la superficie destinada al cultivo en la actualidad más que el aumento de la superficie regada, como ha sido la tendencia del periodo. Esto debido a que las fluctuaciones de las variables alimentadoras del sistema hídrico presentan retardos o *time lag* no analizados previamente, los que determinan las variaciones anuales y bianuales registradas en los caudales anuales y volúmenes de agua almacenados en los embalses. Además, los comportamientos diferenciados del volumen en cada cuenca estudiada

¹ En el anuncio del 21 de mayo de 2014, la Presidenta Bachelet anunció modificaciones sustantivas al Código de Aguas de 1981.

reflejan que la gestión del recurso no ha considerado los diferentes escenarios geográficos en los que confluyen las variables climáticas (precipitaciones líquidas y sólidas). En la actualidad, existen diversos proyectos para solventar la escasez del recurso hídrico, como son la creación de embalses complementarios en algunas sub cuencas receptoras, la generación de proyectos que respeten efectivamente los derechos de aguas existentes y que incentiven el aumento de la productividad del agua.

Las evoluciones de las exportaciones y el volumen de agua almacenado llevan a la conclusión de que es importante una revisión de la matriz productiva del sector, ya que es insostenible la actual intensificación de la actividad agrícola en una zona caracterizada por la variabilidad climática y la escasez de precipitaciones. En esta línea, tomando en consideración las potencialidades naturales de la zona, la creación de parques eólicos y solares, el fomento de actividades turísticas (Parque Fray Jorge o la Reserva de Flora en Río Hurtado), patrimoniales y científicas (observatorio Cruz del Sur en Combarbalá) posibilitan una amplia gama de posibilidades de desarrollo en la provincia.

REFERENCIAS

BEE, A. (2000). Globalization, grapes and gender: Women's work in traditional and agro-export production in northern Chile. *The Geographical Journal*, 3, 255-265.

BUDDS, J. (2012). La demanda, evaluación y asignación del agua en el contexto de escasez: un análisis del ciclo hidrosocial del valle del río La Ligua, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 52, 167-184.

COLBY, J. D. (1991). Topographic Normalization in Rugged Terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(5), 531-537.

COMITÉ INTERAMERICANO DE DESARROLLO AGRÍCOLA CIDA. (1971). *Resúmenes sobre la tierra en países de América Latina*. Santiago: Universitaria.

CHANDLER, G. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113 (2009), 893-903.

EICHE, C., & WITT, L. (1968). *La agricultura en el desarrollo económico*. Ciudad de México: Limusa-Wiley.

ESCALONO, S., & ORTIZ, J. (2010). Desarrollo de la viticultura y servicios para la producción en el valle de Copiapó (Chile) en el contexto de la mundialización económica. *Revista de Geografía Norte Grande*, 67-84.

FERRANDO, F. (2004). Cuenca del Río Limarí, Chile Semiárido: Aspectors de la Oferta y Demanda de Agua. *Revista de Geografía Norte Grande*, 23-44.

GEORGE, P. (1974). *Geografía rural*. Barcelona : Ariel.

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR. (1983). *Geografía de Chile* (Vol. 25 IV Región de Coquimbo). Santiago, Chile: Instituto Geográfico Militar.

MOLINERO, F. (1990). *Los espacios rurales : agricultura y sociedad en el mundo*. Barcelona : Ariel.

PÉREZ, L. B. (2000). Gestión de recursos hídricos. *Ediciones UPC*, 472.

PUYOL, R. (1992). *Geografía humana*. Madrid: Pirámide.

TEILLET, P.M., GUINDON, B. & GOODENOUGH, D.G. (1982): On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(2), 1537-1540.