



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ciencias Ambientales -Programa de Doctorado en Ciencias
Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos Continentales

Huella hídrica de la cuenca del río Cachapoal para la evaluación de la sostenibilidad ambiental.

Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales con
mención en Sistemas Acuáticos Continentales

VANESSA ALEJANDRA NOVOA FERNÁNDEZ
CONCEPCIÓN-CHILE
2016

Profesor Guía: Dr. José Luis Arumí Ribera
Facultad de Ingeniería Agrícola
Departamento de Recursos Hídricos
Facultad de Ciencias Ambientales y centro EULA-Chile
Universidad de Concepción

Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado

La Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales con Mención en Sistemas Acuáticos continentales titulada “Huella hídrica de la cuenca del río Cachapoal para la evaluación de la sostenibilidad ambiental.”, de la Srta. Vanessa Alejandra Novoa Fernández y realizada bajo la Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción, ha sido aprobada por la siguiente comisión de evaluación:

Dr. José Luis Arumí Ribera
Profesora Guía
Facultad de Ingeniería Agrícola.
Facultad de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción



Dr. Roberto Urrutia Pérez
Miembro Comité de Tesis
Facultad de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción

Dr. Ricardo Figueroa Jara
Miembro Comité de Tesis
Facultad de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción

Dr. Hamil Uribe Cifuentes
Evaluador Externo
Instituto de Investigaciones Agropecuarias

Concepción – Chile
2016



A mis hijos, madre, suegros y compañero de vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al programa de Doctorado en Ciencias ambientales, en su selección de ingreso, me otorgo la posibilidad de realizar esta especialización que ha contribuido de manera significativa a aumentar mis conocimientos, a nutrir con bases sólidas las materias medio ambientales que nuestro País tanto necesita. Agradecer además, a todos los profesores que dictaron cada uno de los cursos, pues formaron y consolidaron con su experiencia mi vocación profesional. Por contribuir continuamente, producto de sus abnegados trabajos, al progreso de las ciencias ambientales y hacernos sentir tan orgullosos de ser parte de este programa.

Agradezco al profesor Dr. José Luis Arumí, profesor guía de esta tesis, por sus consejos, ayuda, tiempo, experiencia. Le agradezco su confianza, su fundamental apoyo en los momentos cruciales en el desarrollo personal y profesional. Jamás dejo de tener consideración por mi situación de madre, de tener hijos, o en mis periodos de embarazos, al contrario motivaba el término de mi meta, de esta tesis. Agradezco su respaldo, su contribución, su objetividad, de dar valor a mis logros, a mí esfuerzo, por enseñarme sobre temas de las ciencias ambientales, hidrológicas y también del valor de la familia. Le agradezco por haber canalizado mis dudas, haber facilitado esta difícil etapa, por plantearme desafíos, por ser un gran maestro.

Agradezco también a los profesores miembros de la comisión, quienes brindaron su colaboración, tiempo y consejos en el desarrollo del presente trabajo.

Agradezco en especial al Dr. Octavio Rojas, por su gran contribución en los análisis hidrográficos. Agradezco sus comentarios, tiempo, conocimientos, que materializaron este trabajo de tesis, su ayuda fue crucial para el término de este proceso. Además de entregar su amistad durante la etapa de doctorado, apoyando en todo momento para salir adelante, animando continuamente a lograr mis objetivos pese al cansancio. Un gran amigo, una gran persona y un gran profesor.

A la Dra. Katia Sáez del Departamento de Estadística, por sus valiosos consejos, tiempo y ayuda en los análisis realizados.

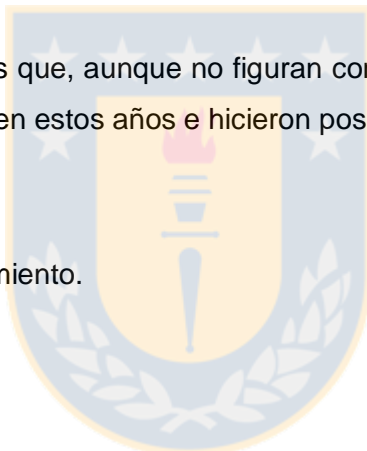
A mi familia, a mi madre que cuidó de mis hijos para poder realizar este trabajo, apoyo fundamental durante estos años de estudio, sin ella todo sería imposible. A mis suegros los cuales no solo han sido el apoyo y ayuda, también han inspirado este amor a la investigación, al esfuerzo, a ser mejor día a día, a crecer. Esta admiración ha originado el seguir sus pasos, a tener la pasión para mejorar, unos grandes referentes en mi vida.

A mi gran compañero de viaje, de vida, de doctorado, de pregrado agradezco a Ramón Ahumada, por su apoyo, ayuda, consejos, compañía, de su mano todo es más fácil.

A las entidades financiadores del doctorado Programa BECAS DOC-NACIONAL de la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología CONICYT del Gobierno de Chile.

A todas las personas que, aunque no figuran con sus nombres aquí, estuvieron presentes de alguna forma en estos años e hicieron posible que este trabajo concluya.

A todos mi eterno agradecimiento.



Índice de Contenidos

Agradecimientos	IV
Índice de Contenidos	VI
Índice de Tablas	IX
Índice de Ilustraciones	X
Reseña Currículum Vitae	XII
Resumen	XV
Abstract	XVI
1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1 Huella hídrica	3
1.2 Evaluación de la sostenibilidad	5
1.3 Recursos hídricos en Chile	7
2.- HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	10
2.1 Hipótesis	10
2.2 Objetivo general	10
2.3 Objetivos específicos	12
3.- MATERIALES Y MÉTODOS	12
3.1 Área de estudio	13
3.2 Determinación de la variabilidad climática	14
3.3 Estimación de la huella hídrica agrícola	15
3.4 Evaluación de la sostenibilidad hídrica del consumo agrícola de la huella hídrica azul	17
3.5 Evaluación de la sostenibilidad hídrica del consumo agrícola de la huella hídrica gris	18
4.- RESULTADOS	20
4.1.- Capítulo 1. Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile	20
Resumen	20
Abstract	21
Introducción	21
Metodología	24
Área de estudio	24
Determinación de la variabilidad climática	25
Calculo de la huella hídrica del cultivo de cereales	26
Estimación de la evapotranspiración (verde y azul) del cultivo (E_t_c)	27
Requerimiento de riego (Req de riego)	28
Calculo de la evapotranspiración (E_{t_0})	28
Calculo del agua virtual	28
Productividad aparente del agua	29
Análisis estadísticos	29

Resultados	29
Comportamiento climático de la cuenca del Cachapoal	29
Huella hídrica del cultivo de cereales	30
Agua virtual (AV)	34
Productividad aparente del agua (PAA)	34
Discusión	35
Agradecimientos	37
Referencias	37
4.2.- Capítulo 2. Huella hídrica agrícola de la cuenca del río Cachapoal, Chile	44
Resumen	44
Introducción	44
Materiales y métodos	47
Área de estudio	47
Variabilidad climática	49
Calculo de la huella hídrica agrícola ($HH_{agrícola}$)	49
Estimación de rendimientos de cultivos (Y)	50
Calculo de uso del agua de los cultivos (UAC) (m^3/ha)	50
Estimación de evapotranspiración (verde y azul) de los cultivos (ET_c)	50
Requerimiento de riego	51
Calculo de la evapotranspiración	51
Calculo de la huella hídrica gris de los cultivos (HH_{gris})	51
Análisis estadísticos	51
Resultados	52
Huella hídrica de los cultivos agrícolas ($HH_{cultivos}$)	52
Discusión	58
Agradecimientos	60
Bibliografía	60
4.3.- Capítulo 3. Evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica agrícola en la cuenca del río Cachapoal, Chile.	67
Resumen	67
Introducción	67
Metodología	71
Área de estudio	71
Cálculo del índice de sostenibilidad de la huella hídrica azul de la agricultura (HHS_{azul})	73
Cálculo del índice de sostenibilidad de la huella hídrica gris de la agricultura (HHS_{gris})	73
Análisis estadísticos	74
Resultados	74
Sostenibilidad de la huella hídrica azul de la agricultura (HH_{azul})	74
Sostenibilidad de la huella hídrica gris de la agricultura (HH_{gris})	78
Discusión	80
Referencias	83

5.- DISCUSIÓN GENERAL	92
Evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica	96
6.- CONCLUSIONES	101
7.- REFERENCIAS GENERALES	103



Índice de Tablas

Tabla 3.1 Superficie cultivada (ha) y los diferentes tipos de cultivos, superficie regada y técnicas de riego utilizadas en las diferentes secciones de la cuenca del río Cachapoal.....	12
Tabla 3.2 Estación meteorológica, precipitación anual (Prec.), evapotranspiración de referencia (ET _o), precipitación efectiva (Prec. Efec.) en los años 2005, 2006 y 2007 de las distintas secciones del río Cachapoal.....	14
Tabla 4.1.1 Localización de las estaciones meteorológicas en cada sección analizada, superficie sembrada (Sup. Cult.), producción (Prod.), rendimiento de cereales (Rend.) y técnicas de riego (Gravit., Mecán., Micro. riego) utilizadas por superficie regada en la cuenca del río Cachapoal. Fuente: Censo agrícola 2007, (DGA, 2012).....	25
Tabla 4.1.2 Estación meteorológica, precipitación anual (Prec.), evapotranspiración de referencia (Et _o), precipitación efectiva (Prec. Efec), evapotranspiración del cultivo de cereales (Et _c) y requerimiento de riego (Re de riego), en los años 2005, 2006 y 2007 en las distintas secciones del río Cachapoal.....	25
Tabla 4.1.3 Cálculo de evapotranspiración para el periodo de crecimiento (ET _c), uso del agua del cultivo (UAC) y huella hídrica (HH) para el cultivo de cereales en los años 2005, 2006 y 2007 en las distintas secciones del río Cachapoal, bajo condiciones de rendimiento constante (a) y el supuesto de una disminución de 20% en el rendimiento (b).....	32
Tabla 4.1.4 Resumen de los resultados obtenidos de la aplicación de análisis estadístico para los factores años y secciones en la evaluación de la huella hídrica para un rendimiento constante (a) y una disminución (20%) en el rendimiento (b).....	33
Tabla 4.2.1 Superficie cultivada (ha) y los diferentes tipos de cultivos, superficie regada y técnicas de riego utilizadas en las diferentes secciones de la cuenca del río Cachapoal.....	49
Tabla 4.2.2 Rendimientos de referencia y porcentaje de disminución del rendimiento según variables climáticas, estimados para los cultivos en la cuenca del río Cachapoal.....	55
Tabla 4.3.1 Resumen de información sobre la actividad agrícola: tipos de cultivos, superficie cultivada y técnicas de riego en las de las secciones de la cuenca del río Cachapoal.....	71
Tabla 5.1 Sostenibilidad de la huella hídrica gris en la cuenca del río Cachapoal.....	96
Tabla 5.2 Sostenibilidad de la huella hídrica azul de la superficie agrícola de cuenca del río Cachapoal.....	98

Índice de Ilustraciones

Figura 1 Huella hídrica (verde, azul y gris) en relación a los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica.....	5
Figura 3.1 Cuenca del río Cachapoal.....	13
Figura 4.1.1 Cuenca del río Cachapoal. Se identificó para éste estudio, de derecha a izquierda, con distinta coloración las secciones de su cuenca i.e., primera, segunda y tercera.....	24
Figura 4.1.2 Esquema de los componentes de la huella hídrica agrícola.....	27
Figura 4.1.3 Boxplots de la precipitación mensual, para un período de 34 años en la cuenca del Cachapoal (mm). (a) 1°sección, estación La Rufina, (b) 2°sección, estación Coltauco, (c) 3°sección, estación Pichidegua. La línea horizontal y el cuadrado dentro de la caja indican la mediana y la media. El extremo inferior y superior de la caja corresponde al cuantil 0,25 y 0,75. Bigotes inferior y superior cuantil 0,05 y 0,95 respectivamente.....	30
Figura 4.1.4 Etapas y coeficientes estimados para el cultivo (K_c) de maíz.....	31
Figura 4.1.5 Estimación del contenido de agua virtual exportada (AV_{exp}) y productividad aparente del agua (PAA) en la producción de cereales, en un año húmedo (2005), normal (2006) y seco (2007), en la cuenca del río Cachapoal.....	34
Figura 4.2.1 Cuenca del río Cachapoal con secciones administrativas de recursos hídricos. Se indican estaciones fluviométricas utilizadas en el análisis de caudal ambiental.....	48
Figura 4.2.2 Huella hídrica agrícola acumulada de la cuenca del río Cachapoal. Se indica la precipitación anual (Prec.), evapotranspiración de referencia (ET _o), precipitación efectiva (Prec. Efec.), evapotranspiración de los cultivos (ET _c), requerimientos de riego (Req. Riego), en los años 2005, 2006 y 2007, para las distintas secciones del río Cachapoal.....	53
Figura 4.2.3 Huellas hídricas promedio (\pm e.e) establecidas en el río Cachapoal para los años (a): húmedo (2005), normal (2006), seco (2007) y las secciones (b) 1°(alta), 2°(media) y 3°(baja).....	54
Figura 4.2.4 Etapas y coeficientes (k_c) estimados para los cultivos agrícolas de la cuenca del río Cachapoal.....	56
Figura 4.2.5 Huella hídrica agrícola de los cultivos según la variabilidad climática de cuenca del río Cachapoal a) 1° sección, b) 2° sección y c) 3° sección.....	57
Figura 4.3.1 Cuenca del río Cachapoal. Se indican estaciones fluviométricas utilizadas en el análisis de caudal ambiental.....	72
Figura 4.3.2. Índice de sostenibilidad de la huella hídrica azul (HHS_{azul}) de la cuenca del río Cachapoal: a) 1°sección (alta), b) 3°sección (baja).....	75

Figura 4.3.3 Componente estacional de QD_{azul} en la cuenca del río Cachapoal.....	76
Figura 4.3.4 Componente de tendencia (Tt) y serie desestacionalizada (St) del consumo de QD_{azul} de la cuenca del río Cachapoal: a) 1°sección (alta), b) 3°sección (baja).....	76
Figura 4.3.5 Componente estacional del consumo de HH_{azul} (St) para la cuenca del río Cachapoal. Estimado independiente de la condición de año: húmedo, normal y seco.....	77
Figura 4.3.6 Componente de tendencia (Tt) y serie desestacionalizada del consumo de HH_{azul} de la cuenca del río Cachapoal: a) 1°sección (alta), b) 3°sección (baja).....	78
Figura 4.3.7 Sostenibilidad de la huella hídrica gris (HHS_{gris}) de la cuenca del río Cachapoal: a) 1°sección (alta), b) 3°sección (baja).....	79
Figura 5.1 Resumen de la Huella hídrica de la agricultura en la cuenca del río Cachapoal.....	95



Reseña Currículum Vitae

Vanessa Alejandra Novoa Fernández

2001-2008: Licenciatura en Ciencias, Título Profesional de Biólogo Marino, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.

2009-2011: Magister en Gestión Integrada: Medio Ambiente, Riesgo Laboral y Responsabilidad Social Empresarial, Universidad de Concepción, Chile.

2011-2014: Candidato a Doctor en Ciencias Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos Continentales

Publicaciones

ISI- Relacionadas directamente con el proyecto de tesis

Novoa, V., Rojas, O., Arumí, J. L., Ulloa, C., Urrutia, R., & Rudolph, A. (2016). Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile. *Tecnología y ciencias del agua*, 2 (2), pp. 35-50.

Novoa, V., Rojas, O., Arumí, J. L., Sáez, K., & Rudolph, A. (Manuscrito enviado y sometido a revisión). Huella hídrica de la cuenca del río Cachapoal para la evaluación de la sostenibilidad hídrica. *Revista Agrociencia*.

Otras publicaciones ISI del período

Lermenda, M. P., Urrutia, C., Novoa, V., & Rudolph, A. (2009). Efecto del EDTA sobre la capacidad polutante del cromo (VI) en el desarrollo larval de *Petrolisthes laevigatus* (Guérin, 1835). *Revista Biología Marina y Oceanografía*, 44 (2), pp. 441-446.

Suwalsky, M., Novoa, V., Villena, F., Sotomayor, C., Aguilar, L., Ronowska, A., & Szutowicz, A. (2009). Structural effects of Zn (2+) on cell membranes and molecular models. *Journal of inorganic biochemistry*, 5 (1), pp 103-112.

Rudolph, A., Medina, P., Ahumada, R., & Novoa, V. (2011). Calidad ecotoxicológica de los sedimentos en fiordos del Sur de Chile. Ecotoxicological quality of sediments in fiords in Southern Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 1(1), pp. 79-84.

Rudolph, A., Novoa, V., Ahumada, R., Sáez, K. & Silva, N. (2014). Calidad de los sedimentos marinos entre el Estrecho de Magallanes y el Cabo de Hornos (Patagonia chilena) en función de pruebas de toxicidad. *Revista biología marina y Oceanografía*, 49 (1), pp. 7-16. Proyecto ConA-C14F 08-11.

Ahumada-Rudolph, R., Novoa, V., Sáez, K., Rudolph, A., Martínez, M., Torres-Díaz, C., & Becerra, J. (2016). Marine fungi isolated from Chilean fjord sediments can degrade oxytetracycline. *Environmental Monitoring and Assessment*. 188:468 DOI: 10.1007/s10661-016-5475-0

Ahumada-Rudolph, R., Rudolph, A., Novoa, V., & Becerra, J. (Sometido a Comité Editor). Adaptive modifications of the cell wall of the marine fungus *Epicoccum nigrum* in response to salinity, temperature and pH changes. *Journal Mycoscience*.

Ahumada-Rudolph, R., Novoa, V., Rudolph, A., Martínez, M., Torres-Díaz, C., & Becerra, J. (2016). Hongos aislados desde sedimentos marinos: Posibles degradadores de oxitetraciclina? (Aceptado en la *Revista de Biología Marina y Oceanografía*).

Publicaciones NO-ISI

Novoa, V., Rudolph, A., & Ahumada-Rudolph, R. (2007). Utilización de bivalvos como método para determinar contaminaciones marinas. *Ciencias Ahora*. 20 (5). <http://www.ciencia-ahora.cl/Revista20/04UtilizacionBivalvos.pdf>

Rudolph, A., Medina, P., Novoa, V., Ahumada, R., & Cortes, I. (2010). Calidad ecotoxicológica de sedimentos en sectores del mar interior de Chiloé, campaña CIMAR 12 Fiordos. *Ciencia y Tecnología del Mar*. 1(33).

Rudolph, A., Novoa, V., & Ahumada, R. (2012). Evaluación de la calidad de los sedimentos en la zona de fiordos de campos de hielo sur (Bahía San Quitín – Canal Wide) (46° 50' - 49° 58' S). *Revista Ciencia y Tecnología del Mar*. 35 (3) 19-31. Proyecto ConA-C14F 08-11.

ÁREAS DE INVESTIGACIÓN

Principal: Gestión Ambiental

Secundaria: Calidad ambiental,

BECAS Y RECONOCIMIENTOS

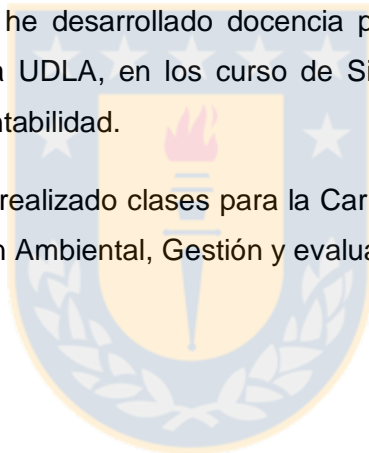
2011: Beca Doctorado Nacional CONICYT

EXPERIENCIA DOCENTE

Desde el año 2011 he trabajado en docencia para las carreras de Química Ambiental y Biología Marina en la UCSC, en las asignaturas de Contaminación Ambiental, Fundamentos de contaminación Marina, Evaluación de impacto ambiental.

Desde el 2013 a la fecha he desarrollado docencia para las carreras de ingeniería industrial y comercial de la UDLA, en los cursos de Sistemas integrados de gestión, Gestión de calidad y Sustentabilidad.

El año 2016 me encuentro realizando clases para la Carrera de Geografía en la UDEC, en los cursos de Legislación Ambiental, Gestión y evaluación de impacto ambiental.



Resumen

Se evaluó el consumo y sostenibilidad de la huella hídrica de la agricultura ($HH_{\text{agrícola}}$) desarrollada en la cuenca del río Cachapoal, dividida en tres secciones: alta, media y baja. Se utilizó como indicadores la huella hídrica azul (HH_{azul}) y verde (HH_{verde}), correspondiente al agua consumida como requerimiento de riego y humedad del suelo por los principales cultivos, y la huella hídrica gris (HH_{gris}), agua necesaria para asimilar la lixiviación del nitrógeno aplicado como fertilizante. Se utilizó además, el índice de sostenibilidad de la huella hídrica azul (HHS_{azul}) y gris (HHS_{gris}) para estimar los límites en el consumo y calidad de agua. Para evaluar el efecto de la variabilidad climática en los índices de sostenibilidad hídrica, se seleccionó como representativos de los escenarios de precipitación un año húmedo (2005), año normal (2006) y año seco (2007), utilizando el análisis hidrológico de percentiles. En la cuenca se estableció una $HH_{\text{agrícola}}$ de $15.902 \text{ m}^3/\text{ton}$ para el año húmedo, $14.091 \text{ m}^3/\text{ton}$ para el año normal y $18.221 \text{ m}^3/\text{ton}$ para año seco, con un consumo mayor en el año en la condición de sequía. Los mayores consumos de la HH_{azul} y HH_{gris} se observaron en el año seco con $12.000 \text{ m}^3/\text{ton}$ y $4.934 \text{ m}^3/\text{ton}$ respectivamente, la mayor HH_{verde} fue estimada para un año normal en $2.000 \text{ m}^3/\text{ton}$. Los cultivos con mayores consumos de agua fueron los paltos, olivos, maíz y viñas y con menor consumo el cultivo de cebollas. En relación al indicador de HHS_{azul} en la sección alta de la cuenca, en el años seco y húmedo, se estimó una escasez de agua severa y significativa, como resultado del aumento del consumo de HH_{azul} y la disminución del caudal disponible (QD_{azul}), lo que se tradujo en un incumplimiento del caudal ecológico y en la capacidad de carga. Este escenario fue contrario a lo evaluado en la 3ª sección, donde no se estimó insostenibilidad o escasez hídrica, debido a que el volumen del caudal medio anual (QMM) fue más del doble y el consumo de HH_{azul} se mantuvo constante en el tiempo. El indicador de HHS_{gris} , mostró en la 1ª sección para el año seco, un mayor número de meses insostenibles ambientalmente, con una capacidad de asimilación consumida en meses invernales y en que se superó las Normas de Calidad secundaria en meses estivales. Es importante destacar que la estimación y monitoreo permanente de indicadores como la huella hídrica, hace posible caracterizar geográfica y temporalmente la sostenibilidad hídrica de una cuenca, contribuyendo a sensibilizar, valorizar y gestionar el uso eficiente del

recurso hídrico en la agricultura, una actividad fundamental por su aporte en alimentos y fuente de trabajo para la población.

Palabras claves: Gestión hídrica, Caudal ecológico, Disponibilidad, Indicador.

Abstract

Consumption and sustainability of the water footprint from agriculture (HH_{agri}) carried out in the Cachapoal river basin, divided into three sections 1st section (high), 2nd section (medium) and 3rd section (low). As indicators of the water footprint, the indicators blue (HH_{blue}) and green (HH_{green}), were used, corresponding to water consumed as an irrigation requirement and the soil humidity for principal crops. Also, the water footprint gray (HH_{gray}) was used, which was water necessary to assimilate the nitrogen lixiviation used as fertilizer. Furthermore, the sustainability index was used for the water footprint blue (HH_{blue}) and gray (HH_{gray}), in order to estimate limits in consumption and water quality. To evaluate the effect of climate variability, different representative precipitation scenarios were used: a wet year (2005); a normal year (2006) and a dry year (2007), using percentile hydrologic analysis. In the basin, a $HH_{agriculture}$ was established of 15.902 m³/ton for the wet year, 14.091 m³/ton for the normal year and 18.221 m³/ton for the dry year, showing a clear increase in consumption in the dry year. The highest consumption of HH_{blue} and HH_{gray} were observed in the dry year with 12.000 m³/ton and 4.934 m³/ton, respectively. The highest HH_{green} was estimated for a normal year at 2.000 m³/ton. Crops with the highest water consumption were avocados, olives, corn and grapes. The lowest water use was registered for onions. In relation to the HHS_{blue} indicator in the high section of the basin (1st), in the dry and wet years, a severe and significant drought was detected, as a result from the increase in consumption of HHS_{blue} and the decrease of available flow (QD_{blue}), which translated into the incapacity of the ecological flow and in the load capacity. This scenario contradicted what was evaluated in the low (3rd) section, where neither unsustainability nor drought was estimated, due to the mean flow volume (QMM) that was more than double the consumption of HH_{blue} , and was maintained over time. The indicator HHS_{gray} showed for the 1st section in the dry year, a higher number of unsustainable months, with a consumed assimilation capacity in winter months, and

which also surpassed the environmental quality standards for the summer months. It is important to underline that permanent estimation and monitoring of indicators such as the water footprint aids in the geographic and temporal characterization of the hydrologic sustainability in a basin. This also contributes to sensitize, valorize and manage the efficient use of the water resources in agriculture, a fundamental activity for food production and a source work for the population.

Keywords: Water management, ecological flow, availability, indicator.



1.- INTRODUCCIÓN

El agua es el eje principal para el desarrollo sostenible (Malghan, 2010; Gao, 2014), gracias a los recursos hídricos y la gama de servicios ecosistémicos que provee, se asegura la reducción de la pobreza, el crecimiento económico y la protección ambiental (WWAP, 2015; Zhineng *et al.*, 2016). El agua es un recurso natural, que cubre aproximadamente tres cuartas partes de la superficie de la tierra, dejando menos del 1% de los recursos hídricos mundiales como agua dulce, accesible para satisfacer las necesidades humanas (Jianguo *et al.*, 2015; UNEP, 2015).

Afortunadamente, el agua es un recurso renovable, pero esto no significa que su oferta sea ilimitada (Stoeglehner *et al.*, 2011). La cantidad de agua está restringida principalmente por la tasa de reposición o recambio, dependiente de la situación, periodo y comportamiento del ciclo hidrológico (Gleick, 2015; de Miguel *et al.*, 2015).

El ciclo hidrológico corresponde a transferencias de aguas como consecuencia de un flujo energético continuo (Iglesias & Garrote, 2015). Este ciclo conserva la continuidad natural, producto del sol y la gravedad terrestre. En el primer caso, la energía se asocia con cambios de estado del agua, que implican tanto absorción, evaporación, disipación y condensación (Gleick, 2010). Los flujos de agua en función de la gravedad terrestre, involucran movimientos de escorrentía y circulación superficial, así como de percolación a diferentes profundidades de la corteza terrestre y su consecuente circulación subterránea (Bettina, 2012; Bértola & Ocampo, 2013).

El agua por lo tanto, circula a través de los océanos, la atmósfera y los ecosistemas continentales en diferentes velocidades, en algunos casos horas, días, meses y en otros, se almacena por años e incluso milenios (Duarte *et al.*, 2006; Pulido-Calvo *et al.*, 2007). El ciclo hidrológico proporciona anualmente 110.000 Km³ en forma de precipitaciones. Globalmente el 37 % de esas precipitaciones se destina a alimentar ríos, acuíferos, lagos y otros sistemas acuáticos, mientras que el 63 % restante se almacena como reserva de agua del suelo y/o subterránea. En promedio, el 40 % de la precipitación proviene de reciclar la evaporación del agua desde la superficie de tierra (Keys *et al.*, 2016).

Aunque el flujo del agua pareciera ser constante, la intervención antrópica ha alterado el ciclo global del agua, modificando sus velocidades y tiempos de residencia en los diferentes reservorios (Nilsson & Pettersson, 2015; Hanasaki *et al.*, 2013; Haddeland *et al.*, 2014). El volumen de agua que actualmente se extrae de los sistemas acuáticos para uso humano, varía entre 3.100 y 4.400 Km³, representando del 31 al 44 % del total (Falkenmark & Rockström, 2004; Oki & Kanae 2006). Una de las razones de estas extracciones es principalmente para la producción de alimentos (Konar *et al.*, 2011). Las extracciones agrícolas representan alrededor del 70 % del total de agua en forma directa y el 90 % del consumo es indirecto (agua evapotranspirada y no devuelta al sistema), afectando a la evaporación, las tasas de infiltración, los patrones de humedad del suelo y la generación de escorrentía (WWAP, 2015). Se proyecta que para el año 2050 la demanda de agua para la agricultura se incremente en un 55 %, particularmente en economías emergentes y países en desarrollo, que ya se encuentran bajo estrés hídrico (Grey & Sadoff, 2007; Wang *et al.*, 2016).

La agricultura a su vez es extremadamente vulnerable a fenómenos de cambio climático (Rost *et al.*, 2008; Wheeler & von Braun, 2013). El aumento de la temperatura reduce la producción de los cultivos (Zwiers *et al.*, 2011; Schlenker & Roberts, 2009; Challinor *et al.*, 2014). Los cambios en los regímenes de lluvias, amplían las probabilidades de riesgo en las cosechas (Min *et al.*, 2011), junto a los periodos de sequías (Porter *et al.*, 2014) y heladas (Rosenzweig *et al.*, 2002). La intensificación de la variabilidad climática es a menudo un factor determinante de la escasez hídrica (Pfister *et al.*, 2009; 2011; Mubako & Lant, 2013). La relación entre el aprovechamiento o la demanda de agua, respecto a su disponibilidad potencial en cada país o región, determina el grado de presión sobre los recursos hídricos, circunstancia que abrirá una importante brecha hídrica en muchas regiones (Poff *et al.*, 2003; Palmer *et al.*, 2008; Poff *et al.*, 2010).

Uno de los principales desafíos a nivel global es alcanzar la sostenibilidad hídrica, entendida como la satisfacción de la demanda actual de agua, para todos los usuarios, sin perjudicar el suministro futuro, además de, contribuir en los propósitos de la sociedad manteniendo la integridad ecológica, ambiental e hidrológica (Gleick, 1996; Ecosystems & Human Well-Being, 2005; Mays, 2016). La sostenibilidad hídrica asegura un suministro adecuado en cantidad y calidad, de manera equitativa y eficiente del

recurso en el tiempo, preservando las funciones hidrológicas, biológicas y químicas de los ecosistemas; adaptando las actividades productivas dentro de los límites de capacidad ambiental (Foladori & Tommasino, 2000; Mihelcic *et al.*, 2003; Russo *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2016). Por lo tanto, para alcanzar niveles sostenibles del consumo del agua en la agricultura, la apropiación del recurso hídrico, no debe ser superior a la tasa de reposición natural, siendo necesario considerar el balance hídrico y la capacidad de carga en el área de influencia (FAO, 2011; Chartzoulakisa *et al.*, 2015). Esto en función a que, los objetivos de la sostenibilidad del agua agrícola incluyen la obtención de la seguridad alimentaria y la maximización de la productividad del agua en los alimentos de secano y de regadío (Khan & Hanjra, 2009; WWAP, 2015).

El riego proporciona un buffer de suministro de agua durante los períodos secos, lo que reduce los riesgos para la agricultura (Hunter *et al.*, 2015). Aunque en las últimas décadas, el riego ha dado paso a notables aumentos de la producción de los cultivos, esto genera una mayor dependencia de los recursos hídricos locales, ya que se utilizan en algunos casos más del 100 % de los recursos hídricos disponibles (Herath *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2013; Russo *et al.*, 2014).

En estas regiones es prioritario implementar una política hídrica consensuada, la falta de manejo junto con la expansión de la agricultura de riego y el cambio climático, han deteriorado significativamente el recurso hídrico (Fulton *et al.*, 2014; Zhineng *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016), siendo necesario la evaluación del recurso a través de indicadores que reflejen dicha variabilidad natural y los flujos de captación del recurso, como lo considera la huella hídrica (Martínez-Austria, 2013; De Miguel *et al.*, 2015a; Hoekstra *et al.*, 2016).

1.1 Huella hídrica (HH)

El concepto de HH fue introducido por Hoekstra & Hung en el año 2002 y representa un indicador útil para estimar de manera fiable el consumo de agua invertido en la producción de bienes o asociado a los distintos sectores de la actividad económica (Hoekstra & Hung, 2005; Allan, 2006). Se ha propuesto como una herramienta que identifica los efectos de la producción agrícola, proporcionando información y posibles soluciones para la toma de decisiones, contribuyendo de esta forma a gestionar eficientemente los recursos hídricos (Hoekstra, 2010ab; Hoekstra, 2013, Cazcarro *et al.*, 2015).

La HH como indicador integral del uso directo e indirecto de los recursos de agua dulce, relaciona la capacidad de transporte, características climáticas, flujos naturales vinculados a una zona, las variaciones espaciales y estacionales de suministro basados en balances hídricos, reconociendo la importancia del rol de las aguas dulces superficiales y subterráneas, como componentes principales del medio ambiente y la sociedad (Falkenmark & Rockström 2004;2006; Chapagain & Orr, 2009; Rodríguez-Casado *et al.*, 2009). Puede ser calculado y aplicado para un proceso, producto, consumidor, en un país, cuenca o área geográfica, medido en términos de volumen de agua empleada y/o contaminada (Hoekstra *et al.*, 2016).

La importancia de establecer la HH de la agricultura a escala de cuenca hidrográfica, radica en que parte de las sustracciones de agua vuelven al sistema y quedaría aprovechable para su uso aguas abajo, haciendo posible distinguir el destino de los retornos (Aldaya & Llamas, 2009; Hoekstra, 2012). La HH contribuye a conocer el ciclo hidrológico y a predecir cambios en el régimen de los ríos y acuíferos (Chapagain & Hoekstra, 2004; Brown *et al.*, 2009). Sin embargo, existen pocos estudios que aborden la evaluación de la HH a escala de cuenca hidrográfica, especialmente en el caso de regiones mediterráneas, que requieren agricultura de regadío para compensar los periodos de sequía. En estas áreas la disponibilidad de agua es variable, precisamente por la irregularidad pluviométrica (Ercin *et al.*, 2013). Son ejemplos, España (Sotelo *et al.*, 2011), Suiza (Hoekstra, 2015), México (Ríos *et al.*, 2015), Francia (UNEP, 2014), Roma (WWF, 2014) y California (Fulton *et al.*, 2012).

En una cuenca hidrográfica la suma de los consumos de agua de cada cultivo determinarían la $HH_{\text{agrícola}}$. En los cultivos la $HH_{\text{agrícola}}$ se define como el agua consumida producto de la evapotranspiración, los requerimientos de riego y los fertilizantes aplicados durante el periodo de crecimiento (de Miguel *et al.*, 2015b), en función del clima, suelo y parámetros de los cultivos (Nana *et al.*, 2014; Schyns *et al.*, 2015). Esto permite la comparación entre siembras en función de la productividad (Bulsink *et al.*, 2010; Mekonnen & Hoekstra, 2011; Montesinos *et al.*, 2011).

La $HH_{\text{agrícola}}$ en una cuenca, incluye la escorrentía a través de los ríos y la infiltración de las aguas subterráneas, denominándola flujo de agua azul. El flujo de agua verde corresponde a la precipitación que se almacena temporalmente en el suelo, en la zona no saturada y que retorna a la atmósfera como evaporación. Finalmente, se considera como flujo de agua gris, el recurso necesario para reponer la capacidad de

carga ambiental luego de una intervención antrópica (Martínez-Austria, 2013; Hoekstra, 2014). A nivel global, se estima que alrededor de tres quintas partes de la precipitación caída toma la vía verde y dos quintos la azul (Oki & Kanae, 2006).

Así, $HH_{\text{agrícola}}$ evalúa tres componentes: 1) HH_{azul} , que corresponde volumen de agua de flujo azul captado para fines productivos o de riego en la agricultura. 2) HH_{verde} , correspondiente al consumo de agua de flujo verde que sustenta la producción de cultivos, tierras de pastoreo, la silvicultura y ecosistemas. 3) HH_{gris} , que corresponde al volumen de agua que se requiere para asimilar el ingreso de contaminantes o fertilizantes (Hoekstra *et al.*, 2016). La HH_{gris} podría ser considerada como un indicador de contaminación puntual o difusa; ya que, cuando un producto químico es aplicado sobre el suelo, *e.i.*, residuos sólidos, fertilizantes o pesticidas, sólo una fracción se infiltra o escurre a una corriente de agua superficial (Dabrowski *et al.*, 2009; Bulsink *et al.*, 2009; Van Oel *et al.*, 2009; Aldaya *et al.*, 2010) (Fig. 1).

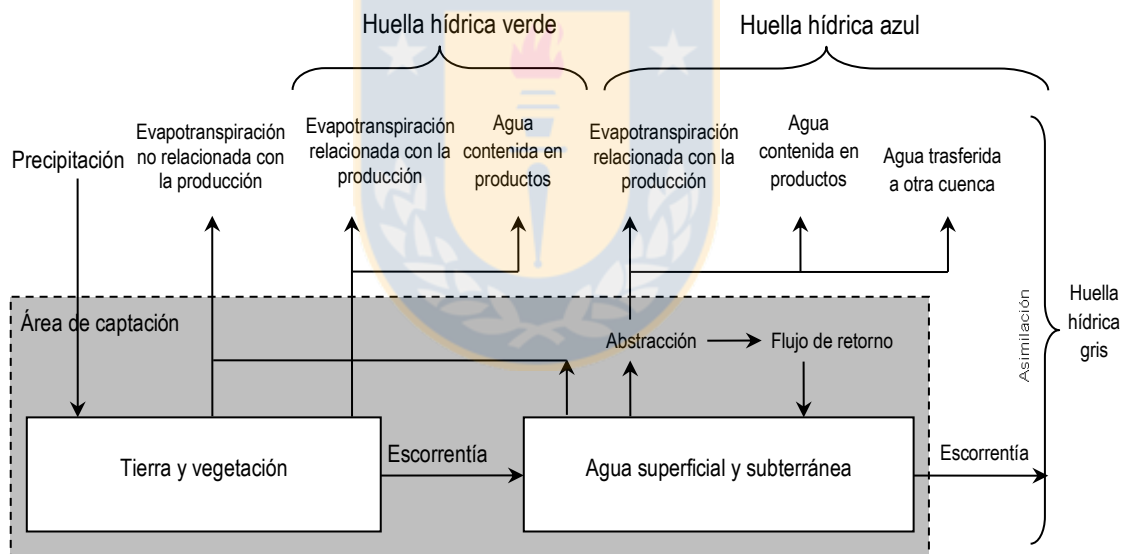


Figura 1 Huella hídrica (verde, azul y gris) en relación a los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica. Fuente: Hoekstra *et al.*, (2011).

1.2 Evaluación de la sostenibilidad

La HH como evaluador de la sostenibilidad de los recursos hídricos (HHS) en una cuenca presenta ventajas sustanciales respecto a otros múltiples indicadores. Por una parte, cuantifica el uso consuntivo y no consuntivo que se requiere en el desarrollo de una actividad e integra las distintas procedencias o fuentes de agua (HH_{azul} , HH_{verde}

y/o HH_{gris}), a diferencia del Índice de estrés hídrico (Falkenmark, 2003), Índice de escasez de agua (Costa *et al.*, 2005), Índice de disponibilidad de agua (Sánchez-Ortiz *et al.*, 2013) o el Índice de explotación de recursos hídricos (Martínez, 2012), que sólo evalúan la existencia del déficit de los recursos disponibles.

Tradicionalmente, la huella hídrica como indicador de sostenibilidad se calculaba utilizando los mismos valores de entrada, independiente de la extensión del área o de su variabilidad estacional (Hoekstra & Hung, 2005). Sin embargo, estudios recientes incluyen mayor complejidad en los modelos geográficos, al estimar los límites en el consumo de agua (Mekonnen *et al.*, 2011; Nana *et al.*, 2014). Para calcular las necesidades hídricas se utilizan variables de balance de agua en diferentes resoluciones de tiempo y escalas espaciales, por lo que varían en complejidad y en la entrada de datos (Liu, 2009; Siebert & Döll, 2010; Mekonnen *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2012); identificando de esta manera la sobre extracción del recurso (Zhao *et al.*, 2009; Aldaya *et al.*, 2010; Gerten *et al.*, 2011).

En una cuenca hidrográfica los criterios para la identificación de los puntos críticos de sostenibilidad ambiental de la $HH_{agricultura}$ consideran el período de tiempo en que se necesita de agua verde, azul o gris para la producción de alimentos (Smakhtin *et al.*, 2004b; Aldaya *et al.*, 2010), basado en que el consumo de la $HH_{agrícola}$ es significativo según las características del área, época del año y problemas de suministro de agua (escasez o sequía) (Smakhtin *et al.*, 2004a, Poff *et al.*, 2010; Richter *et al.*, 2012; Chen & Chen, 2013).

En el caso de la sostenibilidad de la huella hídrica azul (HHS_{azul}), se identifica un punto de inflexión ambiental cuando se excede el consumo de la disponibilidad de agua superficial, al sobrepasarse el requisito de caudal ambiental necesario para mantener el ecosistema (Zeng *et al.*, 2012; De Miguel *et al.*, 2015). La insostenibilidad de la huella hídrica verde (HHS_{verde}) se genera cuando en la zona de captación existe un grado de sustitución del flujo de evaporación de la vegetación natural por la vegetación productiva. La huella total de agua verde en un área de captación es significativa en función de la cantidad de agua verde disponible (Hoekstra *et al.*, 2012; 2016; Zhuo *et al.*, 2016). La insostenibilidad de la huella gris (HHS_{gris}) se genera cuando se superan los límites en la aplicación, por ejemplo de fertilizantes. Lo que deriva en un problema de contaminación cuando las normas ambientales de calidad

del agua en la cuenca son violadas (Arthington *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2012; Aldaya *et al.*, 2010; Konar *et al.*, 2011).

1.3 Recursos hídricos en Chile

En Chile la insostenibilidad hídrica se relaciona con instrumentos de protección ambiental, como la Declaración de zonas con agotamiento de aguas superficiales, Decreto de reserva y áreas de restricción y/o Prohibición para la extracción de aguas subterráneas (DGA, 2016). Sin embargo, estas medidas han sido insuficientes, ya que desde el 2015 a la fecha, se han decretado con serios problemas de escases hídrica a las regiones de Atacama, Coquimbo, Valparaíso y O'Higgins (Cabrales *et al.*, 2014; DGA, 2016).

Esta situación se produce en Chile, debido a que en su larga extensión, presenta una gran variabilidad de sistemas hidrográficos, con un amplio rango de variación en sus precipitaciones, regímenes y periodos de caudales máximos (Brown *et al.*, 2009), lo que genera un gradiente en la oferta de recursos hídricos superficiales (Arumí *et al.*, 2005). La disponibilidad hídrica promedio del país se ha estimado en 53.000 m³/hab/año un valor considerablemente más alto que el promedio mundial (6.600 m³/hab/año). Sin embargo, en algunas regiones existe una creciente escasez de recursos hídricos con valores inferiores a 1.000 m³/hab/año (Banco Mundial, 2010).

En nuestro País la agricultura es el mayor consumidor de este recurso, representa un 80 % de las extracciones, lo que ha permitido el riego de más de 1,1 millones de hectáreas, con un aumento sostenido estimado en un 4 % entre 1997-2007 (Odepa, 2010; 2012; Donoso *et al.*, 2014; DGA, 2016). La tecnificación del riego ha permitido la expansión de los cultivos en áreas antes no explotadas (Billib *et al.*, 2009; Donoso, 2012; Delgado *et al.*, 2015).

A sin mismo, las tendencias del cambio climático en nuestro país producirán una mayor vulnerabilidad para satisfacer la demanda creciente del agua, ya que las proyecciones al año 2040 indican una reducción hídrica generalizada en las zonas del centro de Chile, que concentran un alta superficie agrícola (Gayoso & Gayoso, 2005; Abraham & Fernández, 2008). En los últimos 100 años se ha observado un claro retroceso glaciar y un ascenso en la isoterma cero (Carrasco *et al.*, 2005; Bown *et al.*, 2008), aspecto importante a considerando ya la disponibilidad nival-glaciar contribuye

con un 67 % de la escorrentía superficial durante los períodos secos asociados a La Niña (variabilidad climática) (Peña & Nazarala, 1987; Cabrales & Néspolo, 2014).

Esta situación, en nuestro país, se suma al periodo de sequía iniciado hace más de siete años entre las regiones de Coquimbo (30°S) a la Araucanía (37°S) con un déficit de precipitaciones de un 30 % y aumento de la temperatura entre 0,5 °C y 1,5 °C sobre el promedio histórico (Núñez *et al.*, 2013; Arumí *et al.*, 2014; Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015; Pino *et al.*, 2015; Valdes-Pineda *et al.*, 2016). De acuerdo a las tendencias presentadas se estima que la oferta de agua disminuirá en un 40 % al año 2016 (DGA, 2012; Pizarro *et al.*, 2013), que se contrapone con un aumento estimado de la necesidad de riego en 4 mil millones de m³ adicionales en los próximos 40 años (Neuenschwander, 2010). Lo anterior plantea la necesidad de reformular y diseñar políticas públicas que aseguren la eficiencia y equidad del recurso hídrico (Cabrales & Néspolo, 2014).

En Chile, la manera en que se gestiona el agua lo define el Código de Aguas (DFL 1.122). Básicamente es un sistema de reparto, en el que se concede derechos de uso transferibles libremente (Retamal *et al.*, 2012; Hearne & Donoso, 2014). Esta asignación reflejaría un sistema jurídico unitario, independiente del ecosistema local y de la abundancia actual de los recursos naturales (Rivera *et al.*, 2016); lo cual tampoco es real (Política hídrica, 2015).

Esto último ha llevado a que gran parte de las regiones con vocación agrícola, como la Región de O'Higgins (34°S), deban necesariamente condicionar el suministro de agua a la producción de alimentos (Oyarzun *et al.*, 2008; Rojas *et al.*, 2014; DGA, 2016). La cuenca del río Cachapoal utiliza el 78 % del suelo agrícola de la región de O'Higgins (34°S) y un 12,4 % de la superficie cultivable del país, contribuyendo al 4 % del PIBR (INE, 2007; Antúnez & Felmer, 2009; Pizarro *et al.*, 2010). Desde 1955, se ha observado una reducción de la superficie dedicada a los cereales y un aumento significativo en la tierra dedicada a la silvicultura y la fruta (Arumí *et al.*, 2008; Donoso *et al.*, 2014).

En relación a la disponibilidad del agua, las precipitaciones registradas en la cuenca en el año 2014 alcanzaron sólo 402 mm, comparadas con el promedio del periodo 1981-2010 que fueron estimadas en 935 mm evidenciando la disminución de al

menos un 42 % (DGA, 2016), complejizados por su régimen mediterráneo y las variaciones por efecto de la topografía local (Ferrando, 1994).

En la cuenca del río Cachapoal la mayor utilización del agua, es realizada por la agricultura con un uso de riego del 84 %, en comparación a la minería 11 %, forestal 2 % y agua potable 3 %, de un total de 64,6 m³/s (CENMA, 2010). Se han reportado áreas del secano interior y de depresión intermedia con déficit hídrico, lo que ha llevado a restringir el uso de riego y la disponibilidad del agua (Sánchez & Carvacho, 2013; Cabrales *et al.*, 2014). Agravantes a esta situación son el sobre-otorgamiento de derechos de aguas (MOP, 2013), un severo estado erosionado de sus suelo (CIREN, 2010). Por otra parte, el uso intensivo de fertilizantes como el nitrógeno, necesario para hacer rentable los cultivos por la calidad del suelo favorecen la degradación de sus aguas (González *et al.*, 2003; Cortés *et al.*, 2012).

Las prácticas actuales de la gestión hídrica a nivel de cuenca en nuestro país condicionan la agricultura a la dependencia del tipo de riego y las características climáticas y por ello surgen preguntas respecto de:

¿Por qué componente de la HH (HH_{azul} , HH_{verde} , HH_{gris}) se explica el mayor consumo de agua?

Obteniendo esta información, se plantea lo siguientes:

¿Es sostenible el consumo de la HH_{azul} de los cultivos considerando la disponibilidad de agua superficial y la variabilidad climática en la cuenca del río Cachapoal?

¿En qué periodos y secciones se hace insostenible el consumo de la HH_{azul} en la agricultura?

¿La variabilidad climática afecta a la sostenibilidad de la calidad de las aguas superficiales?

¿Se ve afectada la sostenibilidad de la HH_{gris} y HH_{azul} de los cultivos según el área de influencia de las prácticas agrícolas?

2.-HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1 Hipótesis

H1. Reconociendo que la sostenibilidad del uso de agua para la agricultura no sólo depende de la esorrentía y disponibilidad de agua superficial en un área, sino también, del volumen de consumo y calidad del agua, influenciados por la variabilidad climática, existirán periodos de insostenibilidad hídrica en la cuenca mediterránea del río Cachapoal.

H3. La cuenca del río Cachapoal tiene distintos niveles temporales y espaciales de disponibilidad, extracción, consumos del agua y asimilación de contaminantes; lo cual hace posible caracterizar la sostenibilidad hídrica mediante la aplicación del cálculo de la huella del agua.

2.2 Objetivo general

Evaluar la sostenibilidad de los recursos hídricos estableciendo la vinculación entre el consumo de agua para la producción agrícola ($HH_{\text{agrícola}}$) y la disponibilidad del agua para mantener los caudales ecológicos y calidad del agua de la cuenca del río Cachapoal, a través de la valoración de los indicadores de sostenibilidad de la huella hídrica azul (HHS_{azul}) y gris (HHS_{gris}).

2.3 Objetivos específicos

- 1.- Caracterizar y determinar los años representativos de la variabilidad climática (año húmedo, normal, seco) para cada sección de la cuenca del río Cachapoal.
- 2.- Estimar el indicador de huella hídrica de la agricultura $HH_{\text{agrícola}}$ con sus componentes HH_{azul} , HH_{verde} y HH_{gris} de los principales cultivos, evaluada según la variabilidad climática (año húmedo, normal, seco) en cada sección de la cuenca del río Cachapoal.

3.- Evaluar y valorar la sostenibilidad hídrica del consumo agrícola de huella hídrica azul (HHS_{azul}) y de la huella hídrica gris (HHS_{gris}) en la cuenca del río Cachapoal, según la variabilidad climática (año húmedo, normal, seco) de la cuenca del río Cachapoal.



3.-MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

La cuenca del río Cachapoal (34°S 70°O), corresponde a una de las zonas agrícolas más productivas del centro-sur de Chile, abarca un 38 % de la superficie de la Región de O'Higgins, con 637.000 ha y 170 Km de longitud. La población de la cuenca es de aproximadamente 540.000 habitantes, de ellas el 30% se desempeña en actividades relacionadas con la agricultura. Posee un clima templado con variaciones por efecto de la topografía, en que el ascenso del relieve genera modificaciones térmicas y pluviométricas. Sobre los 3.500 m, la rigurosidad climática se acentúa hasta alcanzar condiciones glaciales (MOP, 2013) (Fig. 1).

Tabla 3.1 Superficie cultivada (ha) y los diferentes tipos de cultivos, superficie regada y técnicas de riego utilizadas en las diferentes secciones de la cuenca del río Cachapoal. Fuente: Censo agrícola 2007, DGA, 2012.

	Cultivo	Familia	Especie	1°	2°	3°
				Sección	Sección	Sección
				34°45' S	34°17' S	34°17' S
				70°45' O	71°04' O	71°24' O
Superficie cultivada (ha)	Hortalizas	Solanáceas	Tomate indust.	934,2	428,2	271,8
			Tomate	145,2	590,8	218,7
		Cucurbitáceas	Melón	18,8	847,6	467,1
		Amarilidáceas	Cebollas	29,7	947,6	88,4
	Árboles Frutales	Rutáceas	Cítricos	194	1023,6	2441,3
		Rosáceas	Manzana	4758,4	1639,5	39,9
		Rosáceas	Durazno	7068,4	2730,7	914,6
		Lauráceas	Palto	62,9	873,4	1724,1
		Vitácea	Vid	5204,1	1434,5	4178,5
		Oleáceae	Olivos	222,1	207	16,1
Cereales	Poáceae	Maíz	7473,4	12263,8	9975,3	
Superficie regada	Riego gravit.			75,7	82,6	62,8
	Riego mecánico			0,4	0,8	1,2
	Micro-riego			24	16,7	36,4

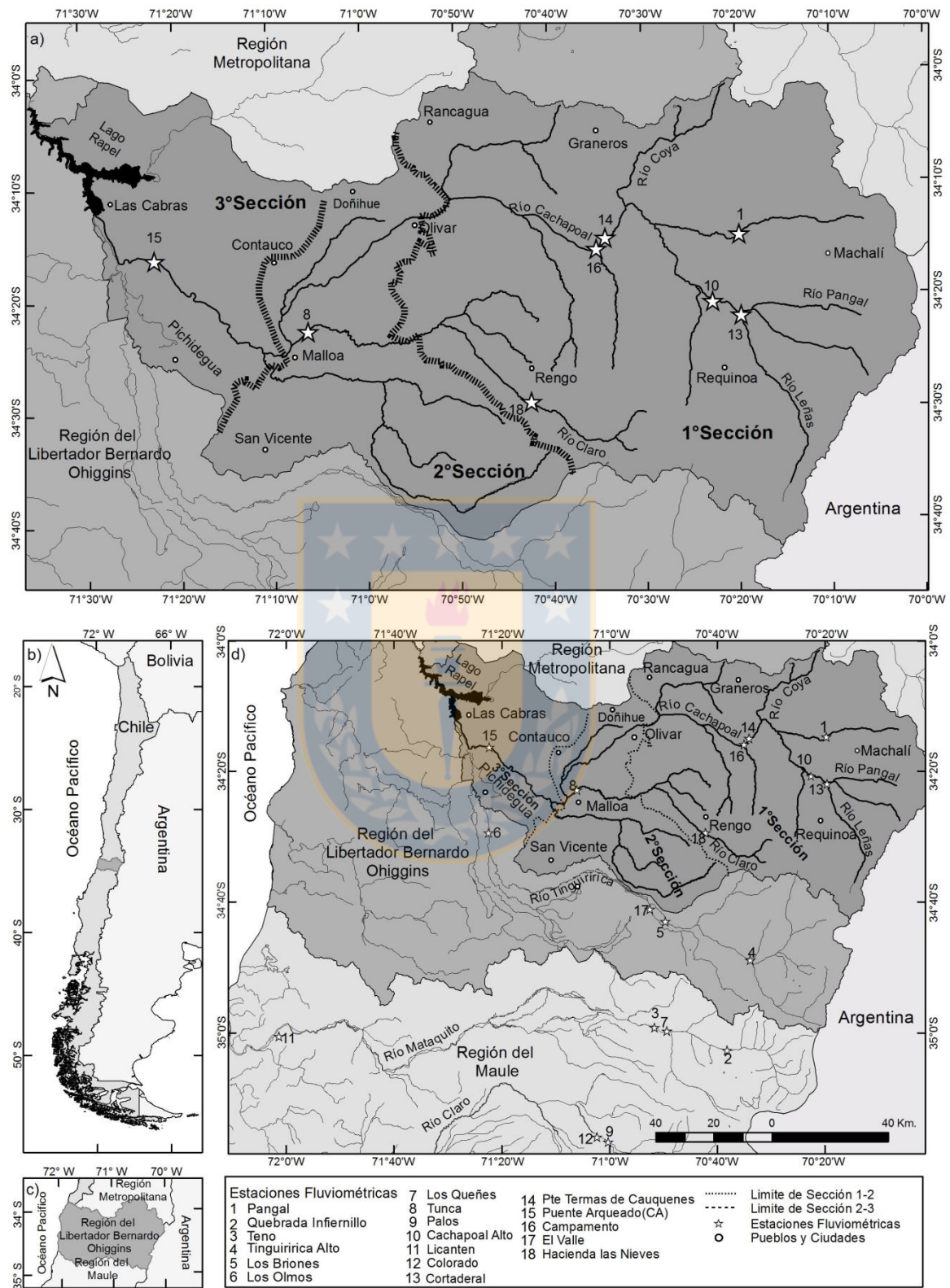


Figura 3.1 Cuenca del río Cachapoal.

El análisis se realizó separando la cuenca del río Cachapoal en diferentes secciones, que corresponden a la división administrativa de los recursos hídricos de dicho río, conforme a la práctica Chilena i.e., 1°, 2° y 3°sección (Fig. 1). Además fue necesario la utilización de datos agrícolas como: superficie cultivada, tipo de cultivo, rendimiento, técnicas de riego en las distintas secciones de la cuenca del Cachapoal (INE, 2007) (Tabla 1).

3.2 Determinación de la variabilidad climática. Los datos meteorológicos de entrada fueron seleccionados de 9 estaciones meteorológicas y pluviométricas, que mantiene la Dirección General de Aguas (DGA) con una data de 34 años. Se trabajó para este estudio con la información de la estación más representativa en cada sección de la cuenca (Tabla 2). El estudio y corrección de la estadística pluviométrica mensual para cada sección se efectuó mediante el método de las curvas másicas.

Tabla 3.2 Estación meteorológica, precipitación anual (Prec.), evapotranspiración de referencia (ETo), precipitación efectiva (Prec. Efec). en los años 2005, 2006 y 2007 de las distintas secciones del río Cachapoal.

Años	Sección	Estación representativa	Prec. (mm)	ETo (mm/día)	Prec. Efec (mm)
2005	1°sección	La Rufina	1405	2,84	715,7
	2°sección	Contaulco	822	2,81	546,7
	3°sección	Pichidegua	680	2,79	518,8
2006	1°sección	La Rufina	1212	2,82	672,1
	2°sección	Contaulco	704	2,78	531,6
	3°sección	Pichidegua	597	2,67	464,7
2007	1°sección	La Rufina	488	2,68	400,0
	2°sección	Contaulco	318	2,73	279,9
	3°sección	Pichidegua	366	2,63	309,9

El análisis del comportamiento de las precipitaciones se realizó mediante boxplots, que entrega información sobre el comportamiento de ciclos estacionales y valores extremos en las observaciones (Guenni *et al.*, 2008). La clasificación de años

secos, normales y húmedos se realizó utilizando el método de los percentiles que define 5 categorías: muy seco (percentil 0-20), seco (percentil 20-40), normal (percentil 40-60), húmedo (60-80) y muy húmedo (80-100) (Valiente, 2001).

3.3 Estimación de la huella hídrica agrícola ($HH_{\text{agrícola}}$). Para el cálculo de la huella hídrica agrícola, se empleó la metodología propuesta por Hoekstra *et al.* (2011), considerando éste, como la suma de sus componentes, verde, azul y gris de los cultivos agrícolas calculados:

$$HH_{\text{agrícola}} (\text{m}^3/\text{ton}) = \sum HH_{\text{Cultivos}} \quad (1)$$

$$HH_{\text{Cultivos}} (\text{m}^3/\text{ton}) = \sum HH_{\text{Verde}} + HH_{\text{Azul}} + HH_{\text{gris}} \quad (2)$$

Estimación de la huella hídrica verde (HH_{verde}) y azul (HH_{azul}). Ambos componentes, HH_{verde} y HH_{azul} de los cultivos, se determinaron a partir de las siguientes ecuaciones:

$$HH_{\text{Verde}} = \frac{\text{UAC verde}}{Y} (\text{m}^3/\text{ton}) \quad (3)$$

$$HH_{\text{Azul}} = \frac{\text{UAC azul}}{Y} (\text{m}^3/\text{ton}) \quad (4)$$

Dónde: Y (ton/ha) = rendimiento del cultivo (cuadro 1), UAC = uso de agua del cultivo verde y azul, según su fuente (precipitación o riego), expresada en m^3/ha .

Estimación de rendimientos de cultivos (Y). Los cultivos agrícolas analizados se ajustaron mediante el software CROPWAT (FAO, 2010), que relacionó la reducción de evapotranspiración a un porcentaje de disminución del rendimiento, a través del siguiente cálculo:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_{\text{caj}}}{ET_c}\right) \quad (5)$$

Donde K_y es el factor de respuesta a la productividad, ET_{caj} es la evapotranspiración ajustada (real) del cultivo (mm/día), ET_c la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (sin estrés hídrico), los rendimientos reales obtenidos o ajustados del cultivo (ton/ha) y los rendimientos esperados (ton/ha) (FAO, 2011).

Cálculo de uso del agua del cultivo (UAC) (m^3/ha). Se utilizaron las siguientes relaciones:

$$UAC_{Verde} = 10 \times \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{Verde} \text{ [volumen/área]} \text{ (6)}$$

$$UAC_{Azul} = 10 \times \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{Azul} \text{ [volumen/área]} \text{ (7)}$$

Dónde: Σ = ciclo de crecimiento del cultivo, es decir, desde la siembra (día 1) hasta la cosecha, l_{gp} = longitud, días que cada etapa del ciclo. ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm/día).

Estimación de evapotranspiración (verde y azul) de los cultivos (ET_c). Se determinó la demanda hídrica del cultivo de cereales, a partir del requerimiento de agua del cultivo (RAC), utilizando el software CROPWAT 8.0. Bajo condiciones de crecimiento ideales, la ET_c se consideró igual al RAC y correspondería al agua de evapotranspiración. El cálculo de ET_c se realizó, en relación a la eficiencia de riego. Esta metodología asume que las pérdidas por producto del riego permanecen y retornan a la cuenca.

$$ET_c \text{ [mm/día]} = Kc * ET_o \text{ (8)}$$

$$ET_c \text{ [mm/año]} = ET_c \text{ [mm/día]} * \text{días en cada año} \text{ (9)}$$

Donde, Kc = coeficiente de cultivo, ET_o = evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}).

La estimación de la ET_{verde} , se realizó:

$$ET_{verde} \text{ [mm/año]} = ET_c \text{ [mm/año]} - \text{Req riego [mm/año]} \text{ (10)}$$

Requerimiento de riego (Req de riego). Donde:

$$\text{Req riego [mm/año]} = ET_c \text{ [mm/año]} - Peff \text{ [mm/año]} \text{ (11)}$$

Precipitación efectiva ($Peff$) calculada por el programa. La estimación de ET_{azul} , se realizó a partir de:

$$ET_{azul} \text{ [mm/año]} = \text{Req de riego [mm/año]} \text{ (12)}$$

La suma de ambas ET_{azul} (mm/año) y ET_{verde} (mm/año), es igual a ET_c (mm/año).

Cálculo de la evapotranspiración (ET_o). Se utilizó el método de Penman-Monteith y el programa CROPWAT 8.0. Los datos climáticos, en función de la latitud y del período,

fueron tomados de la DGA. Con fines comparativos, se trabajó además utilizando la ET_0 calculada por AGROMET para el año 2015 (www.agromet.inia.cl/estaciones.php).

Estimación huella hídrica gris (HH_{gris}). Se midió en términos de volumen por unidad de masa del producto (m^3/ton), definida como la cantidad de agua necesaria para asimilar los residuos y diluirlos hasta el punto que su concentración se mantenga dentro de los rangos de calidad, según la norma de emisión (Hoekstra *et al.*, 2014):

$$HH_{gris} = \frac{(\alpha \cdot AR)}{(C_{max} - C_{nat})} \cdot Y \quad (m^3/ton) \quad (13)$$

Donde AR corresponde a la cantidad aplicada del fertilizante, α representa la fracción de lixiviación y escorrentía del producto expresada en porcentaje, C_{max} concentración máxima aceptable definida por estándares de calidad (mg/L), C_{nat} concentración natural del contaminante (mg/L), Y rendimiento de la producción agrícola. El agente utilizado para medir la HH_{gris} fue el nitrógeno (AR), corresponde a la dosis de referencia de nitrógeno para cada cultivo agrícola de la región, extraído de ODEPA (2013b). La fracción de lixiviación para este agente fue del 10% y la C_{max} fue de 15 mg/L, basada en el DS. 90 de la Norma de Emisión (Ministerio Secretaria General de la Presidencia, 2001). La C_{nat} de la cuenca del río Cachapoal se estableció en 0,01 mg/L evaluando el mejor escenario, según la metodología de Hoekstra *et al.* (2011).

Análisis estadísticos. Se realizaron análisis de correlación de las variables climáticas, según el coeficiente de correlación de Pearson, a través del programa ESTADISTICA 8.0.

3.4 Evaluación de la sostenibilidad hídrica del consumo agrícola de la huella hídrica azul (HHS_{azul}). La estimación se estableció como la relación entre la ΣHH_{azul} de los cultivos analizados en la cuenca y la disponibilidad de agua azul (QD_{azul}) (Hoekstra *et al.*, 2012). Según la siguiente ecuación:

$$HHS_{azul} [x, t] = \frac{\Sigma HH_{azul}[x,t]}{QD_{azul} [x,t]} [-] \quad (14)$$

La ΣHH_{azul} (m^3/mes) se realizó con la sumatoria de volúmenes mensuales consumidos por los principales cultivos, analizados en la cuenca del río Cachapoal (ha). La QD_{azul} (disponibilidad de agua azul) se estimó mediante la siguiente expresión:

$$QD_{azul}[x, t] = QMM[x, t] - Q_{ecológico}[x, t] \text{ [volumen/tiempo]} \quad (15)$$

Donde QMM (m³/mes) corresponde a esorrentía o caudal natural de la cuenca y Q_{ecológico} requisito de caudal ambiental (m³/mes)

Cálculo del caudal ecológico (Q_{ecológico}). Se estimó considerando el valor mínimo para cada mes entre los siguientes casos: 50% del caudal con 95% de probabilidad de excedencia y el 20% del caudal medio anual. Se utilizó una data de 25 años y la metodología elaborada por la DGA (Decreto 14 letra b). Los valores faltantes de la zona alta y baja se estimaron a través de la transposición de cuencas, con el 95% de excedencia.

El índice de sostenibilidad HHS_{azul} se clasificó en cuatro niveles: <1 como bajo, entre 1-1,5 como moderado, entre 1,5 – 2 como significativo y >2 como severo, de escasez de agua. Además, se estimó el número de meses en que el HH_{azul} excede la disponibilidad de agua. Se valoró para las secciones 1° y 3° de la cuenca utilizando la data de estaciones representativas de cada una. En la sección 2° no existe una estación aforada, por lo que no pudieron ser estimados.

3.5 Evaluación de la sostenibilidad hídrica del consumo agrícola de la huella hídrica gris (HHS_{gris}). El cálculo del índice mensual de contaminación de las aguas (HHS_{gris}) fue establecido como la capacidad de asimilación de desechos consumidos, según la siguiente ecuación:

$$HHS_{gris}[x, t] = \frac{\sum HH_{gris}[x, t]}{QMM[x, t]} \quad [-]$$

Donde (ΣHH_{gris}) (m³/mes) corresponde a la sumatoria de las HH_{gris} de los cultivos desarrollados en la cuenca, evaluados según el aporte de nitrógeno y QMM corresponde a esorrentía o caudal natural de la cuenca (m³/mes) (Hoekstra *et al.*, 2012).

El índice de sostenibilidad HHS_{gris} se clasificó en dos niveles: entre 1 – 2 su capacidad asimilación ha sido totalmente consumida y >2 cuando se ha superado la normas de calidad ambiental del agua. Ambos índices se calcularon para las secciones 1° y 3° de la cuenca utilizando la data de estaciones representativas de cada una. En la sección 2° no existe una estación aforada, por lo que no pudieron ser estimados. Esto

es, estación Cachapoal en puente termas de Cauquenes a 700m de altura ($34^{\circ}16'S$, $70^{\circ}34' O$), representativa para la 1ª sección y la estación Cachapoal en puente arqueado a 115m de altura ($34^{\circ} 16'S$, $70^{\circ} 22' O$) representativa para la 3ª sección, que mantiene la Dirección General de Aguas (DGA).

Análisis estadísticos. Se realizaron análisis de correlación para las variables hidrológicas, según el coeficiente de correlación de Pearson, a través del programa STATISTICA 8.0. Para establecer la tendencia de HH_{azul} y QD_{azul} a lo largo de los años se realizó un análisis de descomposición de series temporales, en componente estacional (S_t) y componente de tendencia (T_t).



4.-RESULTADOS

4.1.- Capítulo 1. Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile

Novoa, V., Rojas, O., Arumí, J. L., Ulloa, C., Urrutia, R. & Rudolph, A. (2016). Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile. *Tecnología y Ciencias del agua*, 2 (2), pp. 35-50.

Resumen

Se evaluó los efectos de la variabilidad climática en el consumo de agua para la producción agrícola de cereales, a través del cálculo de la huella hídrica, metodología que consideró tres escenarios de precipitación: (i) año húmedo, (ii) año normal y (iii) año seco, y bajo dos condiciones de rendimiento (constante y disminución del 20 %, proyectando el efecto de cambio climático), en tres secciones de la cuenca del río Cachapoal. Además, se calculó el agua virtual y la productividad aparente del agua para evidenciar el efecto de la variabilidad climática en la productividad del consumo del agua, en el cultivo de cereales. El análisis de percentiles determinó que el año 2005 correspondió a húmedo, 2006 normal y 2007 seco. La huella hídrica de los cereales, bajo un rendimiento constante, fue mayor en el año húmedo con 1.064 m³/ton, en cambio, con una disminución del rendimiento fue mayor en el año seco (1.633,9 m³/ton). Para ambas condiciones la mayor huella hídrica azul se estimó en un año seco y la mayor huella hídrica verde en un año húmedo. Sin embargo, no se observaron diferencias entre las secciones de la cuenca. En un año húmedo se habría exportado la mayor cantidad de agua virtual con 14.325.000 m³/año, y se habría producido la menor productividad aparente del agua 92,8 \$/m³, información fundamental para determinar sistemas agrícolas sustentables.

Palabras claves: Huella hídrica, precipitación, variabilidad climática, rendimiento.

Abstract

The effects of climate change on water consumption for cereal crop production were evaluated using the water footprint calculation. The methodology included three precipitation patterns (rainy, normal, and dry year) under two yielding conditions (constant and 20% reduction, considering the effect of climate change) in three sections of the Cachapoal river basin. In addition, virtual water and apparent water use productivity were calculated to assess the effect of climate change on the productivity of water consumption for crop production. Analyses of percentiles showed that 2005 was a rainy year, 2006 a normal year, and 2007 a dry year. The water footprint of cereals, under constant yield, was greater in a rainy year (1064 m³/ton), conversely, under reduced yield it was greater in a dry year (1633,9 m³/ton). For both conditions the greatest blue water footprint was observed in a dry year, and the greatest green water footprint was observed in a rainy year. However, no differences were observed in the different sections of the river basin. In a rainy year, the greatest amount of virtual water that would have been exported was 14.325.000 m³/year, the least apparent water productivity that would have been produced was 92,8 \$/m³. This information is considered crucial to determine sustainable crop systems.

Keywords: water footprint, precipitation, climate change, yielding.

Introducción

Uno de los principales desafíos de la sustentabilidad de los recursos hídricos a nivel global, está relacionado con el aumento inexorable de la demanda de agua necesaria para satisfacer las crecientes necesidades de la población; se estima que a nivel global un 70% del agua se destina para uso agrícola, un 22% para uso industrial y un 8% para uso doméstico (Strzepek & Boehlert, 2010; Konar *et al.*, 2011,). En países de ingresos medios y bajos, las extracciones de agua destinadas para uso agrícola ascienden al 82% (Pfister *et al.*, 2011; Mubako & Lant, 2013).

La evaluación de la disponibilidad del agua en una cuenca, es un desafío complejo, ya que depende de las características geográficas del lugar, de su uso y el comportamiento del ciclo hidrológico, que es afectado por procesos de variabilidad y cambio climático (Gleick, 2010). La agricultura depende de las condiciones climáticas, ya que las fluctuaciones o variabilidades ejercen un significativo efecto en el

rendimiento de los cultivos (Costanzo *et al.*, 2009). Por lo tanto, la evaluación de la utilización del recurso agua, durante el proceso de producción agrícola, considerando la variabilidad climática, contribuiría a incentivar una mejor gestión en las prácticas de manejo del agua en un área (FAO, 2011; Herath *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2013;). En este contexto, la huella hídrica se ha propuesto como una herramienta que identifica el uso del agua y los efectos de la producción agrícola, proporcionando información para la toma de decisiones.

Esta metodología es capaz de distinguir las fuentes necesarias de agua para los cultivos, permitiendo la comparación entre siembras en función de la productividad, eficiencia y vulnerabilidad de la disponibilidad del agua a escala local, nacional o global, considerando además la heterogeneidad existentes entre países o áreas geográficas (Bulsink *et al.*, 2010; Mekonnen & Hoekstra, 2011; Montesinos *et al.*, 2011). Considera en su análisis variables como el tiempo de cultivo, eficiencia de riego, rendimiento a nivel de cuenca hidrográfica, incluyendo las características de variabilidad climática regional a escala mensual (Hoekstra, 2014).

La huella hídrica identifica tres componentes 1) la huella hídrica verde, que corresponde al volumen de agua que se consume en el proceso de producción, *e.i.*, el agua que se encuentra como humedad del suelo en la zona no saturada, formada por la precipitación y disponible para las plantas; 2) huella hídrica azul, correspondiente al agua de riego, comprende al volumen de aguas superficial (ríos, lagos, humedales) o subterráneas (acuíferos) que se consume en el proceso de producción; considera las salidas del sistema por evaporación de los cultivos y 3) la huella hídrica gris, que corresponde a aquella que se requiere para asimilar los contaminantes generados durante el proceso de producción de cultivos (Hoekstra, 2013; Vanham & Bidoglio, 2013).

La agricultura convencional hasta ahora, ha puesto énfasis en la gestión del agua de uso consuntivo (Mekonnen & Hoekstra, 2014). Sin embargo, la agricultura recibe tanto agua azul (de regadío), como agua verde (humedad del suelo), siendo necesario incluir todos los componentes del ciclo del agua (Willaarts *et al.*, 2012), además de los flujos hidrológicos, las salidas y los cambios de almacenamiento (Deurer *et al.*, 2011) e indicar el impacto agrícola sobre los recursos hídricos (Ridoutt & Pfister, 2010).

Chile, en su larga extensión latitudinal (17° S y 56° S), presenta una gran diversidad de sistemas hidrográficos, con un amplio rango de variación en las precipitaciones, regímenes y períodos de caudales máximos (Oyarzún *et al.*, 2008). Estas condiciones climáticas determinan que un 45% de total de la producción agrícola nacional se realice entre los ríos Aconcagua (32° S) y Maule (35° S), ubicados en Chile central, siendo un núcleo de cultivo donde coexisten sistemas de riego y de secano. Se estima que entre los usos consuntivos, el riego representa el 84,5 % de uso del recurso a nivel nacional, con un caudal medio de 546 m³/s, aplicados en aproximadamente 2 millones de hectáreas (Gleick, 2010; Donoso *et al.*, 2012)

A raíz del cambio climático global y sus proyecciones, entre los 30° S y 40° S (modelo HadCM3 escenario GEI A2) se evidencia una señal robusta de disminución de la precipitación entre de un 5 al 10% en una ventana temprana y entre un 20 a 30% en un escenario tardío (CEPAL, 2012). En los ríos de la zona central, se ha observado un ascenso en la isoterma cero, registrando durante los últimos 100 años, un claro retroceso glaciar (Carrasco *et al.*, 2005; Bown *et al.*, 2008); aspecto importante considerando que la disponibilidad nival-glaciar contribuye con un 67% de la escorrentía superficial durante períodos secos asociados a La Niña (variabilidad climática) (Peña & Nazarala, 1978). De acuerdo a las tendencias presentadas se estima que la oferta de agua disminuirá en un 40 % al año 2016 (DGA, 2012; Pizarro *et al.*, 2013); que se contrapone con un aumento estimado de la necesidad de riego en 4 mil millones de m³ adicionales en los próximos 40 años (Neuenschwander, 2010).

En este estudio se evaluó la huella hídrica para la producción agrícola en la cuenca del río Cachapoal (34°), que cubre aproximadamente 161.500 ha, de las cuales 29.713 ha se destinan al cultivo de cereales *e.i.* maíz y leguminosas, lo que representa el 73 % de la producción nacional. En esta cuenca el patrón de uso del agua está determinado por la superficie de riego: gravitacional por surco, microriego por goteo y riego mecánico por aspersión tradicional (Censo Agrícola, 2007). En relación a la disponibilidad del agua en la cuenca, se informan áreas del secano interior y depresión intermedia con déficit hídrico o sequedad del suelo y una correlación negativa entre éstos índices y las precipitaciones, restringiendo el uso de riego (DGA, 2012; Sánchez & Carvacho, 2013).

Por ello, se evaluaron los efectos de la variabilidad climática en el consumo de agua para la producción agrícola, a través del cálculo de la huella hídrica,

considerando tres escenarios de precipitación: (i) año húmedo, (ii) año normal y (iii) año seco, seleccionados a través de una data de 34 años de precipitaciones y bajo dos condiciones de rendimiento (normal y proyectado el efecto de cambio climático). La huella hídrica fue cuantificada por indicadores capaces de diferenciar entre las fuentes de agua verde y azul, en las tres secciones de la cuenca del río Cachapoal. Además, se calculó el agua virtual y la productividad aparente, para determinar el efecto de la variabilidad climática en la productividad del consumo del agua en la producción de cereales.

Metodología

Área de estudio. La cuenca del río Cachapoal (34°S 70°O), corresponde a una de las zonas agrícolas más productivas del centro-sur de Chile, abarca un 38 % de la superficie de la VI Región, con 6.370 km^2 . La población de la cuenca asciende a 542.901 habitantes, de ellas el 30% se desempeña en actividades relacionadas con la agricultura. Posee un clima templado con variaciones por efecto de la topografía, en que el ascenso del relieve genera modificaciones térmicas y pluviométricas. Sobre los 3.500 m, la rigurosidad climática se acentúa hasta alcanzar condiciones glaciales (MOP, 2013).

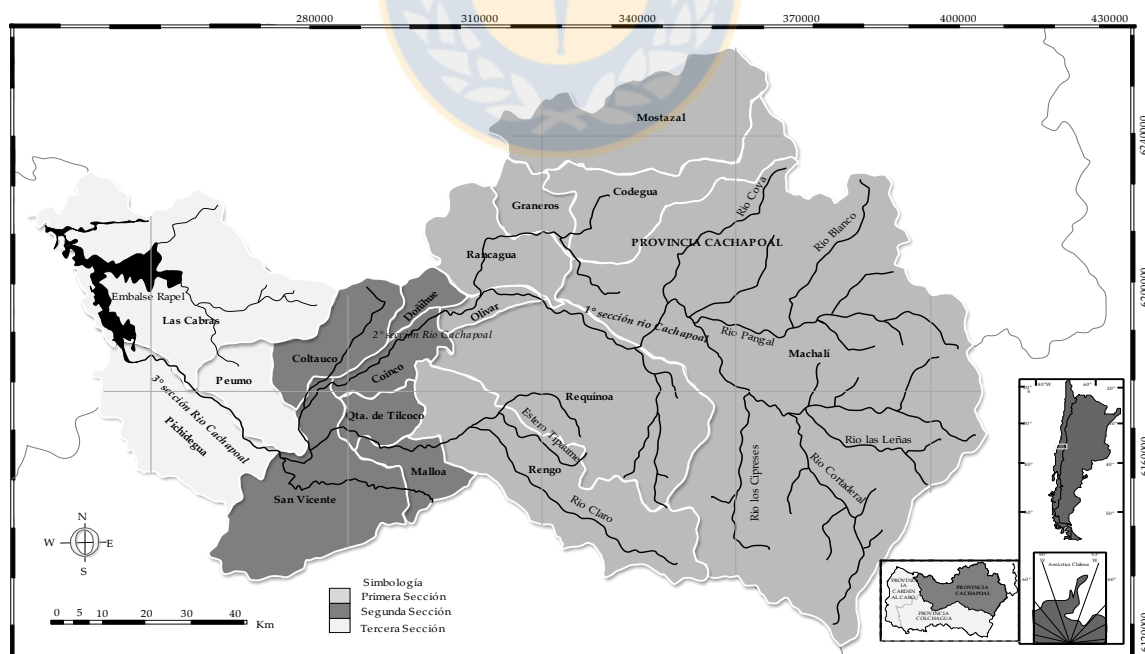


Figura 4.1.1 Cuenca del río Cachapoal. Se identificó para éste estudio, de derecha a izquierda, con distinta coloración las secciones de su cuenca *i.e.*, primera, segunda y tercera.

El análisis se realizó separando la cuenca del río Cachapoal en diferentes secciones, según sus variaciones altitudinales *i.e.*, 1°, 2° y 3°sección (figura 1), además fue necesario la utilización de datos agrícolas como: superficie cultivada, rendimiento, técnicas de riego en las distintas secciones de la cuenca del Cachapoal (INE, 2007) (cuadro 1).

Tabla 4.1.1 Localización de las estaciones meteorológicas en cada sección analizada, superficie sembrada (Sup. Cult.), producción (Prod.), rendimiento de cereales (Rend.) y técnicas de riego (Gravit., Mecán., Micro. riego) utilizadas por superficie regada en la cuenca del río Cachapoal. Fuente: Censo agrícola 2007, (DGA, 2012).

Cuenca	Localización	Sup. Cult. (ha)	Prod. (qmm)	Rend. (ton/ha)	Superficie regada (%)		
					Gravit.	Mecán.	Micro
1°sección	34°45'S-70°45'O	7473	775333	10,37	75,7	0,4	24
2°sección	34°17'S-71°04'O	12263	1518158	12,38	82,6	0,8	16,7
3°sección	34°17'S-71°24'O	9975	1170822	11,74	62,8	1,2	36,4

Determinación de la variabilidad climática. Los datos meteorológicos de entrada fueron seleccionados de 9 estaciones meteorológicas y pluviométricas, que mantiene la Dirección General de Aguas (DGA) con una data de 34 años. Se trabajó para este estudio con la información de la estación más representativa en cada sección de la cuenca (cuadro 2). El estudio y corrección de la estadística pluviométrica mensual para cada sección se efectuó mediante el método de las curvas másicas.

Tabla 4.1.2 Estación meteorológica, precipitación anual (Prec.), evapotranspiración de referencia (ETo), precipitación efectiva (Prec. Efec), evapotranspiración del cultivo de cereales (ETc) y requerimiento de riego, en los años y secciones del río Cachapoal.

Años	Sección	Estación representativa	Prec. (mm)	ETo (mm/día)	Prec. Efec (mm)	ETc (mm/dec)	Req riego (mm/dec)
2005	1°sección	La Rufina	1405	2,84	715,7	398,0	246,2
	2°sección	Contaulco	822	2,81	546,7	395,6	264,0
	3°sección	Pichidegua	680	2,79	518,8	423,7	285,7
2006	1°sección	La Rufina	1212	2,82	672,1	390,2	310,6
	2°sección	Contaulco	704	2,78	531,6	384,7	343,8
	3°sección	Pichidegua	597	2,67	464,7	384,7	315,8
2007	1°sección	La Rufina	488	2,68	400,0	401,7	395,4
	2°sección	Contaulco	318	2,73	279,9	396,7	396,6
	3°sección	Pichidegua	366	2,63	309,9	396,2	395,0

El análisis del comportamiento de las precipitaciones se realizó mediante boxplots, que entrega información sobre el comportamiento de ciclos estacionales y valores extremos en las observaciones (Guenni *et al.*, 2008). La clasificación de años secos, normales y húmedos se realizó utilizando el método de los percentiles que define 5 categorías: muy seco (percentil 0-20), seco (percentil 20-40), normal (percentil 40-60), húmedo (60-80) y muy húmedo (80-100) (Valiente, 2001).

Cálculo de la huella hídrica del cultivo de cereales (HH_{cultivo}). La evaluación de la huella hídrica se realizó para cada una de las tres secciones de la cuenca, en condiciones de climáticas año húmedo, seco y normal, definidas según el análisis climático. Se trabajó bajo dos condiciones de rendimiento de cultivos: rendimiento constante de las secciones (1°, 2° y 3°) de 10,4; 12,4 y 11,7 ton/ha, respectivamente (ODEPA, 2014) y para una disminución de un 20% en el rendimiento entre cada año, según lo proyectado en un escenario A2 de cambio climático para el cultivo de cereales (CEPAL, 2012).

Para el cálculo de la huella hídrica, se empleó la metodología propuesta por Hoekstra *et al.* (2011), considerando éste, como la suma de sus componentes, verde y azul (figura 2):

$$HH_{\text{cultivo}} (\text{m}^3/\text{ton}) = HH_{\text{verde}} + HH_{\text{azul}} \quad (1)$$

Ambos componentes se determinaron a partir de las siguientes ecuaciones:

$$HH_{\text{verde}} = \frac{UAC_{\text{verde}}}{Y} (\text{m}^3/\text{ton}) \quad (2)$$

$$HH_{\text{azul}} = \frac{UAC_{\text{azul}}}{Y} (\text{m}^3/\text{ton}) \quad (3)$$

Dónde: Y (ton/ha) = rendimiento del cultivo (cuadro 1), UAC = uso de agua del cultivo verde y azul, según su fuente (precipitación o riego), expresada en m^3/ha (Allen *et al.*, 1998).

Cálculo de uso del agua del cultivo (UAC) (m^3/ha). Se utilizó las siguientes relaciones

$$UAC_{\text{verde}} = 10 \times \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{\text{verde}} [\text{volumen}/\text{área}] \quad (4)$$

$$UAC_{\text{azul}} = 10 \times \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{\text{azul}} [\text{volumen}/\text{área}] \quad (5)$$

Dónde: Σ = ciclo de crecimiento del cultivo, es decir, desde la siembra (día 1) hasta la cosecha, l_{gp} = longitud, días que cada etapa del ciclo. ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm/día).

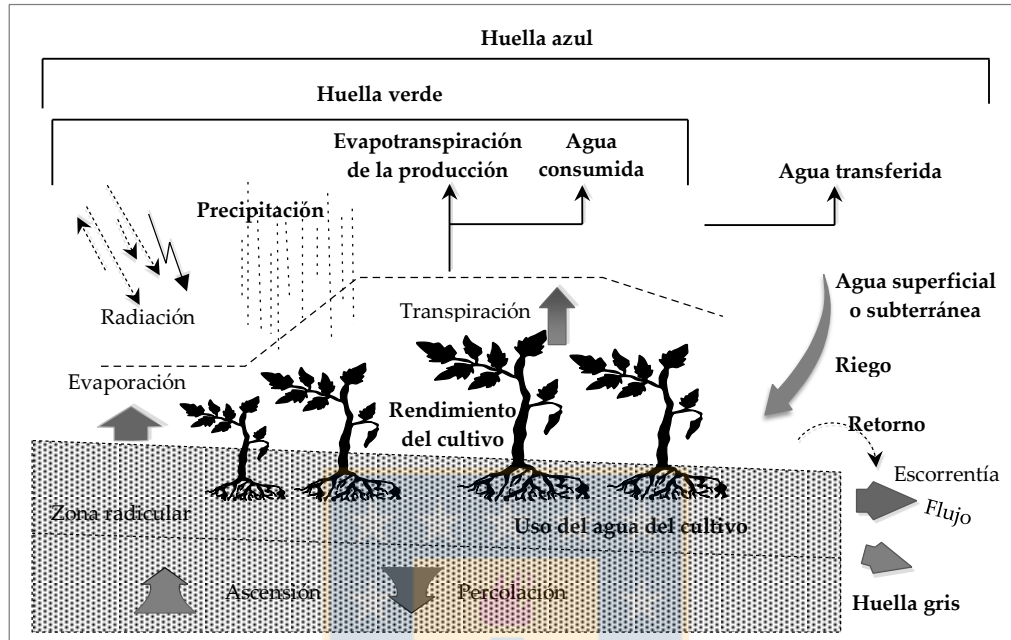


Figura 4.1.2 Esquema de los componentes de la huella hídrica agrícola.

Estimación de evapotranspiración (verde y azul) del cultivo (ET_c). Se determinó la demanda hídrica del cultivo de cereales, a partir del requerimiento de agua del cultivo (RAC), utilizando el software CROPWAT 8.0. Bajo condiciones de crecimiento ideales, la ET_c se considera igual al RAC y correspondería al agua de evapotranspiración. El cálculo de ET_c se realizó en valores decadiarios (dec), en relación a la eficiencia de riego, esta metodología asume que las pérdidas por producto del riego permanecen y retornan a la cuenca.

$$ET_c \text{ [mm/día]} = K_c * ET_o \text{ (6)}$$

$$ET_c \text{ [mm/dec]} = ET_c \text{ [mm/día]} * \text{días en cada década} \text{ (7)}$$

Donde, K_c = coeficiente de cultivo, ET_o = evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).

La estimación de la ET_{verde} , se realizó:

$$ET_{\text{verde}} \text{ [mm/dec]} = ET_c \text{ [mm/dec]} - \text{Req riego [mm/dec]} \text{ (8)}$$

Requerimiento de riego (Req de riego). Donde:

$$\text{Req riego [mm/dec]} = \text{ET}_C \text{ [mm/dec]} - \text{Peff [mm/dec]} \quad (9)$$

Precipitación efectiva (Peff) calculada por el programa.

La estimación de ET_{azul} , se realizó a partir de:

$$\text{ET}_{\text{azul}} \text{ [mm/dec]} = \text{Req de riego [mm/dec]} \quad (10)$$

La suma de ambas ET_{azul} (mm/dec) y verde (mm/dec), es igual a ET_c (mm/dec).

Cálculo de la evapotranspiración (ET_0). Se utilizó el método de Penman-Monteith y el programa CROPWAT 8.0. Los datos climáticos, en función de la latitud y del período, fueron tomados de la DGA. La información fue geo referenciada utilizando el programa CLIMWAT 2.0. Dónde:

$$\text{ET}_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34u)} \quad (11)$$

ET_0 = evapotranspiración de referencia (mm dia^{-1}); R_n = radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); R_a = radiación extraterrestre (mm dia^{-1}); G = flujo de calor de suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); T = temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$); u = velocidad del viento (ms^{-1}); e_s = presión de vapor de saturación (kPa); e_a = presión real de vapor (kPa); $e_s - e_a$ = déficit de presión de vapor (KPa); Δ = pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); Γ = constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Cálculo del agua virtual (AV). Corresponde al volumen de agua contenida en un producto y que fue empleado en su producción, en un contexto de flujo de agua exportada (Hoekstra, 2014). Su cálculo se realizó a través de la ecuación descrita por Salmoral *et al.* (2011):

$$\text{AV}_{\text{exp}} = \text{HH} (\text{m}^3/\text{ton}) \times E \quad (12)$$

Dónde: AV_{exp} = agua virtual exportado ($\text{m}^3/\text{año}$), E = cantidades de productos exportados (ton/año). La cantidad exportada (E) fue extraída del Informe regional de exportaciones silvoagropecuarias (ODEPA, 2013).

Productividad aparente del agua (PAA). Según Salmoral *et al.* (2011), corresponde al valor económico de la producción agraria por metro cúbico de agua utilizado. Se calculó a partir de:

$$PAA = \frac{\sum (Pr \times T_i)}{HH} \quad (13)$$

Dónde: PAA = productividad aparente del agua (\$/m³) en Chile para los años analizados, $\sum (Pr \times T)$ = precio de mercado (\$/ton) del producto agrícola, HH = huella hídrica del producto agrícola (m³/ton). Los valores de la PAA en Chile para los años estudiados fueron tomados de Informe regional de exportaciones (ODEPA, 2014).

Análisis estadísticos. En la evaluación de la huella hídrica, el análisis de normalidad de los datos, se realizó a través del test de Shapiro-Wilk. La factibilidad de utilizar un modelo aditivo se analizó aplicando el test de no aditividad de Tukey. Se realizó un análisis de varianza de dos vías, para la comparación entre factores *e.i.*, años (tres niveles, 2005, 2006, 2007) y secciones (tres niveles, 1°, 2°, 3°) y se aplicó la prueba *a posteriori* de Tukey. Para el análisis de los resultados del agua virtual y productividad aparente del agua, se aplicó un análisis de la varianza de una vía. Se utilizó el programa computacional STATISTICA versión 6.0 (StatSoft. Inc. 2001).

Resultados

Comportamiento climático de la cuenca del Cachapoal. La Figura 3 muestra la variación espacial de la precipitación en la cuenca del Cachapoal, para los 34 años analizados en las estaciones meteorológicas seleccionadas como referencia. La 1ª sección (sección cordillerana) fue la que presentó la mayor precipitación, con una media de 1.119 ± 409 mm ($R^2 = 0,999$; c.v.= 36,5) con un mínimo de 311 mm durante años muy secos y un máximo de 2.082 mm durante años muy húmedos. La 2ª sección, presentó una precipitación media de 649 ± 293 mm ($R^2 = 0,997$; c.v.= 45), el mínimo de 117 mm y máximo de 1.517 mm. La 3ª sección (con influencia costera) presentó las menores precipitaciones anuales con 549 ± 230 mm ($R^2 = 0,998$; c.v.= 41), con mínimas de 145 mm y máximas de 1.022 mm. A nivel intranual, la mayor variabilidad de los montos pluviométricos se registró durante el invierno.

Según el análisis de percentiles, las condiciones extremas fueron observadas en los años 2005 y 2007 (cuadro 2). El año 2005 fue característico de un año húmedo,

con una precipitación media de 969 mm, mientras que el año 2007 representó una condición seca, con 391 mm. Para una condición de pluviosidad normal se seleccionó el año 2006 (ver cuadro 2), con una precipitación media de 838 mm.

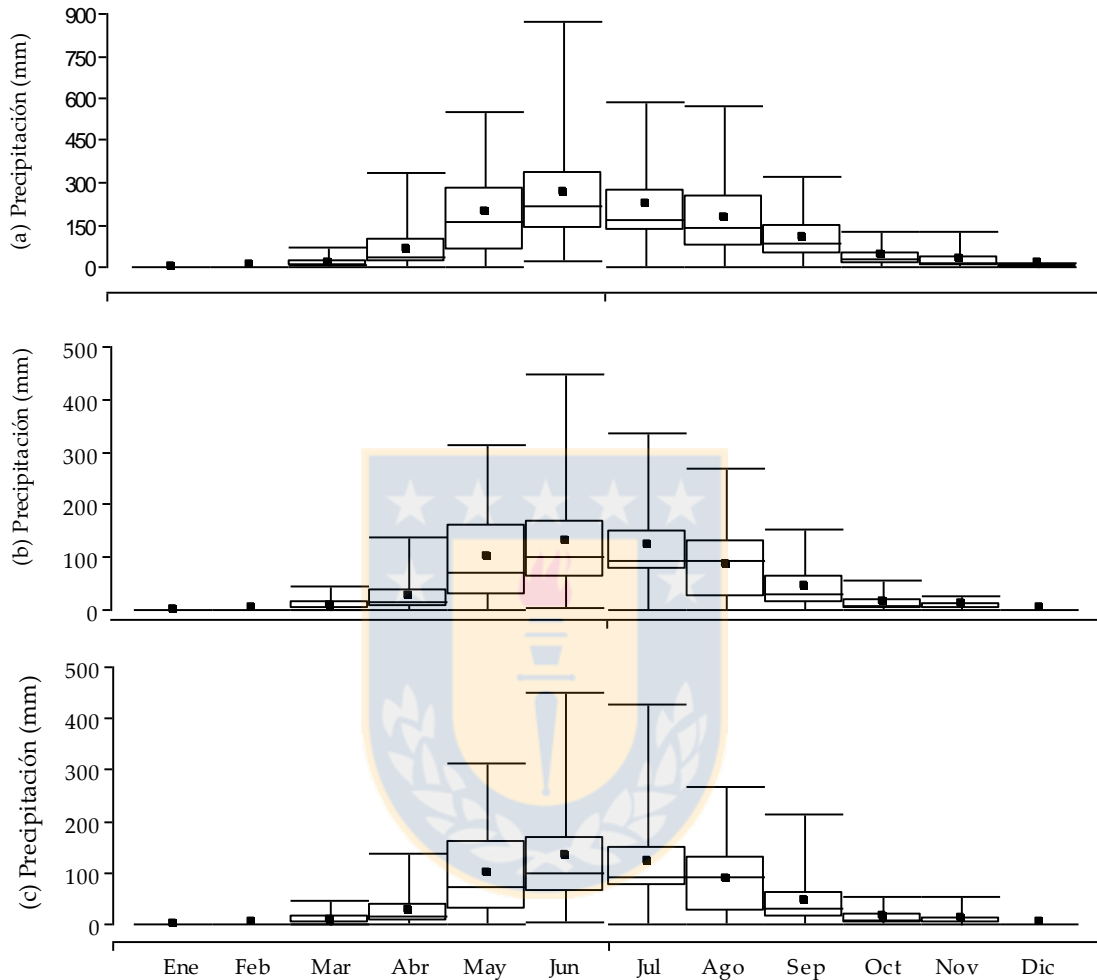


Figura 4.1.3 Boxplots de la precipitación mensual, para un período de 34 años en la cuenca del Cachapoal (mm). (a) 1ªsección, estación La Rufina, (b) 2ªsección, estación Coltauco, (c) 3ªsección, estación Pichidegua. La línea horizontal y el cuadrado dentro de la caja indican la mediana y la media. El extremo inferior y superior de la caja corresponde al cuantil 0,25 y 0,75. Bigotes inferior y superior cuantil 0,05 y 0,95 respectivamente.

Huella hídrica del cultivo de cereales ($HH_{cultivo}$). El cuadro 2 resume para cada sección de la cuenca del Cachapoal, la información requerida para el cálculo de la huella hídrica. Se comprueba que para el año 2005 (año húmedo) fue mayor la ET_o , ET_c y la precipitación efectiva, y para el año 2007 (año seco) fue mayor el requerimiento de riego.

El ciclo de cultivo para el maíz se estimó en 125 días, con las siguientes etapas: inicial 20 días, desarrollo 35 días, madurez 40 días y senescencia 30 días y tres valores de coeficiente de cultivo (Kc): 0,30 inicial, 1,20 en la etapa media y 0,35 final para el período septiembre – diciembre (figura 4).

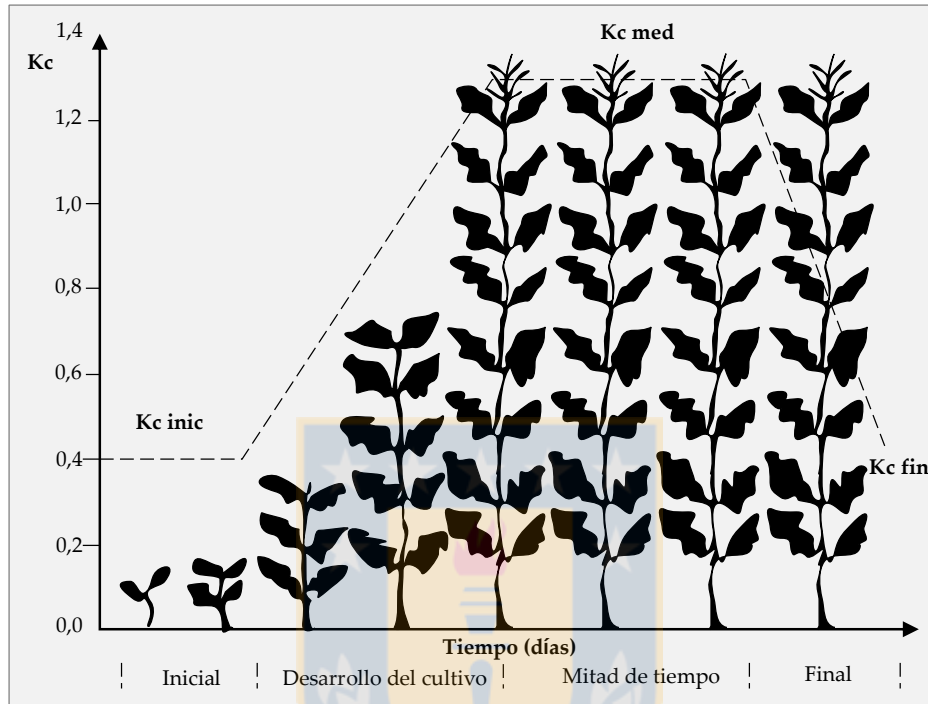


Figura 4.1.4 Etapas y coeficientes estimados para el cultivo (kc) de maíz

Se consideró para el análisis estadístico un modelo aditivo, ya que no se encontró evidencia significativa ($P > 0,05$) al aplicar el test de no aditividad de Tukey. Además, no se encontró evidencia en contra de la hipótesis de normalidad, cumpliendo así el supuesto de distribución normal ($P > 0,05$), de acuerdo al test de Shapiro-Wilk (cuadro 4).

Como se observa en el cuadro 3, la huella hídrica total del cultivo de los cereales, bajo el supuesto de un rendimiento constante, fue estimada en $1064,6 \text{ m}^3/\text{ton}$ para el año húmedo (2005), $1015,1 \text{ m}^3/\text{ton}$ para el año normal (2006) y $1045,4 \text{ m}^3/\text{ton}$ para el año seco (2007). Respecto de un año normal, el consumo en un año húmedo fue mayor en $49,5 \text{ m}^3/\text{ton}$ y en un año seco sólo en $30,3 \text{ m}^3/\text{ton}$, observándose diferencias significativas entre los años analizados. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en la huella hídrica total entre las secciones (1°, 2° y 3°) (ver cuadro 4).

Tabla 4.1.3 Cálculo de evapotranspiración para el período de crecimiento (ET_c), uso del agua del cultivo (UAC) y huella hídrica (HH) para el cultivo de cereales en los años 2005, 2006 y 2007 en las distintas secciones del río Cachapoal, bajo condiciones de rendimiento constante (a) y supuesto de disminución del 20% en el rendimiento (b).

(Y)	Años	Sección	ET _c (mm/período crecimiento)		UAC (m ³ /ha)			Huella hídrica (m ³ /ton)		
			verde	azul	verde	azul	total	verde	azul	total
Rendimiento constante (a)	2005	1°sección	151	246	1518	2462	3980	146,4	237,4	383,8
		2°sección	131	264	1316	2640	3956	106,4	213,4	319,8
		3°sección	138	285	1380	2857	4237	117,6	243,4	361
		Total						370,3	694,3	1064,6
	2006	1°sección	79	310	796	3106	3902	76,8	299,6	376,3
		2°sección	40	343	409	3438	3847	33,1	277,9	311
		3°sección	68	315	689	3158	3847	58,7	269,1	327,8
		Total						168,5	846,6	1015,1
	2007	1°sección	6,3	395	63	3954	4017	6,1	380,19	386,3
		2°sección	0,1	396	1	3966	3967	0,1	320,5	320,5
		3°sección	1,2	395	12	3950	3962	1	337,6	338,6
		Total						7,2	1038,3	1045,4
Disminución del rendimiento (20%) (b)	2005	1°sección	151	246	1518	2462	3980	146,4	237,4	383,8
		2°sección	131	264	1316	2640	3956	106,4	213,4	319,8
		3°sección	138	285	1380	2857	4237	117,6	243,4	361
		Total						370,3	694,3	1064,6
	2006	1°sección	79	310	796	3106	3902	95,9	374,4	470,4
		2°sección	40	343	409	3438	3847	41,3	347,4	388,7
		3°sección	68	315	689	3158	3847	73,4	336,3	409,7
		Total						210,7	1058,2	1268,8
	2007	1°sección	6,3	395	63	3954	4017	9,5	595,8	605,3
		2°sección	0,1	396	1	3966	3967	0,1	501,1	501,2
		3°sección	1,2	395	12	3950	3962	1,6	525,8	527,4
		Total						11,2	1622,7	1633,9

La mayor huella hídrica azul se observó en el año 2007 (año seco), con 1038,3 m³/ton correspondiente a agua de riego (cuadro 3). El test de Tukey mostró diferencias significativas entre un año húmedo, normal y seco; sin embargo, no observó diferencias significativas entre las secciones (1°, 2° y 3°) (ver cuadro 4). La mayor huella hídrica verde, se observó en el año 2005 (año húmedo) con 370,3 m³/ton (ver cuadro 3). El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre un año húmedo, normal y seco. Sin embargo, no mostró diferencias significativas entre las secciones (1°, 2° y 3°) (cuadro 4).

Tabla 4.1.4 Resumen de los resultados obtenidos de la aplicación de análisis estadísticos para los factores años y secciones en la evaluación de la huella hídrica para un rendimiento constante y una disminución (20%) en el rendimiento.

		Huella verde		Huella azul		Huella total		
F.V.		gl	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor
Rendimiento constante (a)	Año	2	91,1473	0,0005	40,0632	0,0023	48,0072	0,0016
	Sección	2	5,5836	0,0696	3,8352	0,1175	3,0923	0,1543
	Test							
	NoAditividad Tukey		0,1438		0,2196		0,1543	
	Shapiro-Wilk		0,9587		0,117		0,0764	
Disminución del rend. (20%) (b)	Año	2	72,6504	0,0007	123,1527	0,0003	127,1361	0,0002
	Sección	2	6,1044	0,0609	3,1464	0,151	24,5216	0,0057
	Test							
	NoAditividad Tukey		0,2082		0,0697		0,1249	
	Shapiro-Wilk		0,5855		0,5243		0,7036	

La tendencia observada entre las huellas hídricas azul y verde (ver cuadro 3), en un año húmedo, normal y seco, muestran que la huella azul incrementa (694,3 - 1038,3 m³/ton) mientras que la huella verde disminuye (370,3 - 7,2 m³/ton).

La huella hídrica total, bajo la condición de una disminución de un 20 % en el rendimiento de los cultivos, fue estimada en 1064 m³/ton para el año húmedo, 1268,8 m³/ton para un año normal y 1633,9 m³/ton para un año seco (ver cuadro 3). Respecto de un año normal, el consumo en un año seco fue mayor en 365,1 m³/ton, no así en un año húmedo, en que el consumo fue menor en 204,2 m³/ton, observándose diferencias significativas entre los años analizados. Además el análisis estadístico mostró diferencias significativas entre las secciones; donde la huella hídrica de la 1°sección, fue mayor en los distintos años analizados (ver cuadro 4).

Bajo el supuesto de una disminución de un 20 % del rendimiento de los cultivos (ver cuadro 3), la mayor huella hídrica azul, se observó también en un año seco con 1622,7 m³/ton de agua de riego, observándose diferencias significativas entre el año húmedo, normal y seco. Sin embargo, las secciones de la cuenca no presentaron diferencias significativas. La mayor huella hídrica verde, se observó también en el año húmedo con 370 m³/ton, observándose diferencias significativas entre un año húmedo,

normal y seco. El análisis estadístico no mostró diferencias significativas entre las secciones (ver cuadros 4). Para esta condición el incremento en la huella azul fue inverso a la huella verde, una tendencia semejante fue observada en el supuesto anterior.

Agua virtual (AV). En un año húmedo habría sido exportada la mayor cantidad de agua virtual total, con diferencias significativas respecto de un año seco (ANOVA $F_{(2,4)} = 6293$; $P = 0,0001$). Esta mayor cantidad de agua virtual total correspondería al agua verde, proporcionada por las precipitaciones, con significativas diferencias entre los años analizados (ANOVA $F_{(2,4)} = 2347$; $P = 0,0001$). En un año seco habría sido exportada la mayor cantidad de agua azul que correspondería al agua agregada como riego con diferencias significativas entre los años analizados (ANOVA $F_{(2,4)} = 3215$; $P = 0,0001$) (figura 5).

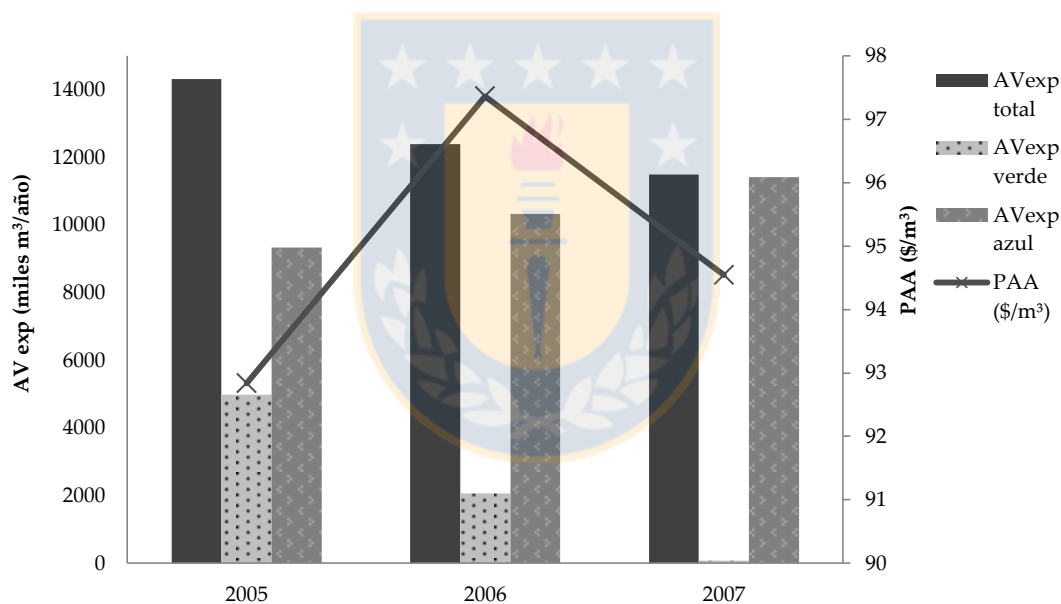


Figura 4.1.5 Estimación del contenido de agua virtual exportada (AVexp) y productividad aparente del agua (PAA) en la producción de cereales, en un año húmedo (2005), normal (2006) y seco (2007) en la cuenca del río Cachapoal.

Productividad aparente del agua (PAA). La PAA en el período estudiado fluctuó en relación a los precios del mercado. La productividad aparente del agua en relación a la huella hídrica de cereales habría sido menor un año húmedo (2005), calculado en 92,8 $\$/m^3$ y mayor en un año normal 2006 (97,4 $\$/m^3$); observándose diferencias significativas entre los años estudiados 2005, 2006 y 2007 (94,5 $\$/m^3$) (ANOVA $F_{(2,4)} = 39,02$; $P = 0,0004$) (ver figura 5).

Discusión

En una cuenca hidrográfica es primordial considerar, que la agricultura es la actividad productiva y económica que presenta la mayor dependencia respecto de las condiciones climáticas locales, siendo ésta la principal responsable por la variación en la producción anual de los cultivos (Gil *et al.*, 2012). Dentro de los elementos del clima, la precipitación es la principal causante de la alternancia periódica de los rendimientos; en condiciones de agricultura de secano y riego, como las observadas en la cuenca del río Cachapoal, su influencia es aún mayor.

El análisis de la data de 34 años de precipitaciones en el área demostró que la cuenca del río Cachapoal presenta una condición climática asimilable a un clima mediterráneo, con lluvias durante la estación fría (mayo-agosto) y un período seco durante la estación cálida (noviembre-febrero) (figura 3). Además, de marcadas variaciones hídricas entre la 1ª sección, zona andina (con las más altas precipitaciones) y la 3ª sección, con las menores precipitaciones (52% de disminución) correspondiente al sector en que el cauce drena la Cordillera de la Costa. Del mismo modo, permitió agrupar el comportamiento hídrico de la cuenca en años húmedos, normales y secos, que fluctuaron entre 117 y 1.517 mm. Esta región contribuye con un 73,2 % a la producción chilena de cereales, lo que se atribuye a un conjunto de factores, entre los cuales se destacan las condiciones de suelo (aluviales) y de clima (Osorio, 2013).

Para evidenciar el efecto del clima sobre la huella hídrica de los cultivos, el supuesto de un rendimiento constante, permitió observar que en condiciones climáticas extremas e.i., año húmedo y seco, la huella hídrica fue mayor 1.064 y 1.045 m³/ton respectivamente, en comparación a un año normal 1.015 m³/ton (ver cuadro 3). Los resultados de la variación entre año húmedo, normal y seco, observados en este estudio, fue similar a lo descrito por Rodríguez-Casado *et al.* (2008) para una cuenca española, en que la condición de año húmedo fue superior a la de un año normal.

Bajo el supuesto de una disminución del 20% en el rendimiento de los cultivos (situación proyectada ante un cambio climático), se observó que el uso del agua resulta menos productiva, ya que por tonelada de producto generado el consumo de agua fue mayor (mayor huella hídrica) (cuadro 3), demostrando que la sostenibilidad de la huella hídrica en un cultivo de cereales, debe considerar tanto la eficiencia del recurso agua como la situación climática.

Para ambos supuestos de rendimiento i.e., constante y una disminución del 20%, un año seco mostró una mayor huella hídrica azul (mayor aporte de riego), en cambio, en un año húmedo se observó una mayor huella hídrica verde (mayor precipitación), indicando que la disponibilidad y la fuente del agua, es un factor clave para la sustentabilidad. El agua para riego está influenciada por (i) cambios en los regímenes hidrológicos (e.i., variación en las precipitaciones, evaporación potencial y real y/o escorrentía en la escala de cuenca), (ii) el aumento de la competencia entre los usuarios por el agua (Schmidhuber & Tubiello, 2007) y (iii) el período de siembra, de crecimiento y el métodos de cultivo (Xiong et al., 2010), estimado en este estudio en 120 días (figura 4).

En la agricultura, alrededor del 40% de las extracciones de agua retorna a los ríos y/o acuíferos locales, convirtiéndose en reutilizable, de modo que, el cálculo del volumen de agua consumido, proporciona una base sólida para estimar la extracción del recurso (Hoekstra et al., 2012). De allí que, la estimación del agua virtual es fundamental en períodos de sequía, ya que permite estimar como la demanda de productos exportables puede afectar a los sistemas hidrológicos en las regiones exportadoras (Chen & Chen, 2013).

En este estudio se observó que la mayor cantidad de agua virtual total (AVexp) habría sido exportada en el año húmedo (2006) y la menor cantidad en un año seco (2007), debido al mínimo aporte de agua virtual verde, del mismo modo en un año seco es mayor la cantidad de agua virtual azul exportada, lo que se compensa a través del riego. Particularmente en el 2007 (año seco), en la zona centro norte del país se registró una fuerte helada en la segunda semana de julio, que afectó a la cuenca del Cachapoal con un periodo de bajas temperaturas que comprometió gravemente la producción agrícola (Odepa, 2013), situación que fue compensada con aumento de riego, lo que se refleja en este indicador (figura 5).

En este estudio se observó que en los valores de productividad aparente del agua (PAA) no evidencian el efecto de la condición climática, ya que para un año húmedo como el 2005, el valor de PAA fue menor, a pesar que la exportación de cereales comprometió un mayor contenido de agua virtual (figura 5). Donoso *et al.* (2012) plantea que en Chile, los sectores económicos con mayor uso de agua, como es el caso de la agricultura, serían los que obtienen una menor PAA. Estima a nivel

nacional en 110 \$/m³ la productividad aparente del cultivo de cereales, valor similar a lo calculado en este análisis para la cuenca del río Cachapoal.

La mayor huella hídrica a nivel nacional del sector agrícola se concentra en las regiones de O'Higgins hasta la Araucanía (Hadjigeorgalis & Riquelme, 2002). En estas regiones el volumen de agua utilizada es de 6.676,74 millones de m³/año, que corresponde al 70,2% del volumen de agua total utilizada en el sector agrícola (Donoso *et al.*, 2012). Mejorar la eficiencia del uso del agua en Chile es un desafío, debido a los bajos rendimientos agrícolas. Impulsado por la promulgación de la ley 18.450, la región de O'Higgins está incorporando métodos de riego con mayor tecnología, en productos de exportación de alto valor. Se registra una modificación en los tipos de riego, e.i., gravitacional - 41%, mecánico - 8, y un aumento en el micro-riego de 75%. Sin embargo, este esfuerzo no se ve reflejado en un menor consumo del recurso agua. Por lo tanto, la optimización de la productividad del recurso hídrico, es un aspecto que debe ser considerado en el desarrollo de sistemas agrícolas sustentables (Postle *et al.*, 2012), ya que es el agua el recurso que enlaza las actividades productivas y las variaciones de las condiciones ambientales. Un componente esencial para la atención de los retos de la seguridad hídrica es la generación de conocimiento y la innovación: "es indispensable un mejor conocimiento de los procesos naturales y sociales involucrados en la ocurrencia y gestión del agua, así como de los procesos antropogénicos involucrados" (Martínez-Austria, 2013). Asimismo se requiere en Chile de mayor innovación tanto tecnológica, como de metodologías de gestión del agua, creación de capacidades, organización social, marcos legales adecuados y desarrollo de instituciones como la Superintendencia del agua, propuesta por el actual gobierno en el contexto de la Política Nacional para los Recursos hídricos 2015.

Agradecimientos. Los autores expresan su agradecimiento a Conicyt por el financiamiento dado a través del proyecto CRHIAM Conicyt/Fondap/15130015 y al Programa de Capital Humano Avanzado CONICYT Gobierno de Chile, Beca de Doctorado Nacional-2011.

Referencias

Allen, R. G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization, 56, 328.

Bown, F., Rivera, A., & Acuña, C. (2008). Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, 48, 40-48.

Bulsink, F. A., Hoekstra, Y., & Booij, M. J. (2010). The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 119-128.

Carrasco, J. F., Casassa, G., & Quintana, J. (2005). Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 933–948.

CEPAL. (2012). *La Economía del Cambio Climático en Chile*. Santiago: Naciones Unidas, 367. http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/35372/S2012058_es.pdf?sequence=1.

Chen, Z. M., & Chen, G. Q. (2013). Virtual water accounting for the globalized world economy: National water footprint and international virtual water trade. *Ecological Indicators*, 28, 142–149.

Costanzo, M., Bonel, B., & Montico, S. (2009). Efecto de la variabilidad climática sobre la producción de bioenergía a partir de maíz (*Zea mays*, L.). *Revista de investigaciones de la facultad de ciencias agrarias*, xv.

Deurer, M., Green, S. R., Clothier, B. E., & Mowat, A. (2011). Can product water footprints indicate the hydrological impact of primary production? A case study of New Zealand kiwifruit. *Journal of Hydrology*, 408, 246-256.

DGA, Dirección General de Agua. (2012). Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. División de Hidrología. Dirección general de Aguas Ministerio de Obras Públicas, Chile, 384, 32. Recuperado de <http://www.dga.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Informacin%20Mensual/buletin012012.pdf>.

Donoso, G., Blanco, E., Foster, W., Franco, G., & Lira, J. (2012). Seguridad hídrica y alimentaria en América Latina y España: el caso de Chile. *Pontificia Universidad Católica*, 463.

FAO. (2011). Climate change, water and food security. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Land and Water Development Division, Rome. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i2096e.pdf>.

Gil, J. A., Lozada, B. I., López, N., Marquez, L., & Salazar, G. (2012). Climatic variability and changes evidences at Maturín, Monagas State, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12 (2), 389-399.

Gleick, P. H. (2010). Climate Change and the Integrity of Science. *Science*, 328, 689-690.

Guenni, L., Degryze, E., & Alvarado, K. (2008). Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela. *Revista Colombiana de Estadística*, 31 (1), 41-65.

Hadjigeorgalis, E., & Riquelme, C. (2002). Análisis de los precios de los derechos de aprovechamiento de aguas en el río Cachapoal. *Ciencia e Investigación Agraria*, 29, 91-100.

Herath, I., Green, S., Singh, R., Horne, D., Van der Zijpp, S., & Clothier, B. (2013). Water foot printing of agricultural products: a hydrological assessment for the water footprint of New Zealand's wines. *Journal of Cleaner Production*, 41, 232-243.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual*. Earthscan, London. Recuperado http://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf

Hoekstra, A.Y., Mekonnen, M. M., Chapagain, A. K., Mathews, R. E., & Richter, B. D.(2012). Global Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprints versus Blue Water Availability. *PLoS ONE*, 7(2), e32688.

Hoekstra, A. Y. (2013). *The Water Footprint of Modern Consumer Society*. Routledge, London. Soft and hardcover, 216.

Hoekstra, A. Y. (2014). Water scarcity challenges to business. *Nature Climate Change*, 4(5), 318-320.

INE, Instituto Nacional de Estadísticas Chile. (2007). Censo agropecuario y forestal. http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_agropecuarios/censos_agropecuarios.php.

Konar, M., Dalin, C., Suweis, S., Hanasaki, N., Rinaldo, A., & Rodriguez Iturbe, A. I. (2011). Water for food: the global virtual water trade network. *Water Resources Research*, 47, 1029-10307.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological Indicators*, 46, 214–223.

Martínez-Austria, P. (2013). Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV (5), 165-180.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Science*, 15, 1577-1600.

Montesinos, P., Camacho, E., Campos, B., & Rodríguez-Díaz, J. A. (2011). Analysis of virtual irrigation water. Application to water resources management in a Mediterranean river basin. *Water Resour Manage*, 25, 1635-1651.

MOP, Ministerio de Obras Públicas. (2013). Estrategia nacional de recursos hídricos 2012-2025. Resumen ejecutivo, Santiago, Chile, 1-40. Recuperado de http://www.mop.cl/Documents/ENRH_2013_OK.pdf.

Mubako, S. T., & Lant, C. L. (2013). Agricultural virtual water trade and water footprint of U.S. States. *Association of American Geographers*, 103, 385-396.

Neuenschwander, A. (2010). El Cambio Climático en el Sector Silvoagropecuario de Chile. Fundación para la Innovación Agraria FIA, 126.

ODEPA, Oficina de estudios y políticas agrarias. (2013). “Cambio climático Impacto en la Agricultura Heladas y Sequía”. Recuperado de http://www.odepa.cl/wp-content/files_mf/1388169148cambioClimatico.pdf.

ODEPA, Oficina de estudios y políticas agrarias. (2013). Evolución de las exportaciones silvoagropecuarias de Chile, 2003- junio 2013. Recuperado de http://www.odepa.cl/wp-content/files_mf/1386811080evolucionExportaciones.pdf.

ODEPA, Oficina de estudios y políticas agrarias. (2014). Maíz: producción, precios y comercio exterior. Recuperado de http://www.odepa.cl/wp-content/files_mf/1416319649Boletíndelmaíz201411.pdf.

Osorio, U., A (ed). (2013). Determinación de la huella del agua estrategias de manejo de recursos hídricos. Serie Actas n°50. Instituto de investigaciones agropecuarias. Centro regional de investigación Intihuasi, 211.

Oyarzún, R., Alvarez, P., Arumí, J., & Rivera, D. (2008). Water use in the Chilean agriculture: current situation and areas for research development. In Columbus, F. (Chief Editor) Agricultural Water Management Research Trends. Nova Science Publishers, Inc. Hauppauge, NY 11788. ISBN: 978-1-60456-159-3.

Peña, H., & Nazarala, B. (1987). Snowmelt–runoff simulation model of a central Chile Andean basin with relevant orographic effects. IAHS Publ. 166 (Symposium at Vancouver 1987 – Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover), 161–172.

Pfister, S., Bayer, P., Koehler, A., & Hellweg, S. (2011). Projected water consumption in future global agriculture: Scenarios and related impacts. *Science of the Total Environment*, 409, 4206–4216.

Pizarro, R., Garcia-Chevesich, P., Valdes, R., Dominguez, F., Hossain, F., Ffolliott, P., Olivares, C., Morales, C., Balocchi, F., & Bro, P. (2013). Inland water bodies in Chile can locally increase rainfall intensity. *Journal of Hydrology*, 481, 56–63.

Postle, M., George, C., Upson, S., Hess, T., & Morris, J. (2012). Assessment of the Efficiency of the Water Footprinting Approach and of the Agricultural Products and Foodstuff Labelling and Certification Schemes, Report for the European Commission, DG Environment, 457.

Ridoutt, B. G., & Pfister, S. (2010). A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. *Global Environmental Change Human and Policy Dimensions*, 20, 113-120.

Rodríguez-Casado, A., Garrido, M., Llamas, R., & Varela-Ortega, C. (2008). La huella hidrológica de la agricultura española. *Papeles de Agua Virtual*. 2.

Salmoral, G., Dumont, A., Aldaya, M., Rodríguez-Casado, R., Garrido, A., & Llamas R. (2011). Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir. *Fundación botín, observatorio del agua*, 91.

Sánchez, M., & Carvacho, L. (2013). Aproximación a la determinación del déficit hídrico en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile, a partir de imágenes MODIS y datos meteorológicos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 55, 109-124.

Schmidhuber, J., & Tubiello, F. (2007). Global food security under climate change. *Proceedings of the National. Academy of Sciences*, 104, 19703–19708.

StatSoft., Inc. (2001). Statistica (data analysis software system). www.statsoft.com.

Strzepek, K., & Boehlert, B. (2010). Competition for water for the food system. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 365, 2927–2940.

Sun, S., Wu, P., Wang, Y., Zhao, X., Liu, J., & Zhang, X. (2013). The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China. *Science of the Total Environment*, 444, 498–507.

Valiente, O. (2001). Sequía: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, 26, 59-80.

Vanham, D., & Bidoglio, G. (2013). A review on the indicator water footprint for the EU28. *Ecological Indicators*, 26, 61–75.

Willaarts, B. A., Volk, M., & Aguilera, P. A. (2012). Assessing the ecosystem services supplied by freshwater flows in Mediterranean agro ecosystems. *Agricultural Water Management*, 105, 21–31.

Xiong, W., Holman, I., Lin, E. D., Conway, D., Jiang, J. H., Xu, Y. L., & Li, Y. (2010). Climate change, water availability and future cereal production in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 135, 58–69.

ARTÍCULOS PUBLICADOS EN REVISTA TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA

Número 2

La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos

- Por: Oscar Luis Palacios-Vélez, Bernardo Samuel Escobar-Villagrán-

Sistemas de agua potable rurales. Instituciones, organizaciones, gobierno, administración y legitimidad

- Por: Emmanuel Galindo, Jacinta Palerm-

Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile

- Por: Vanessa Novoa, Octavio Rojas, José Luis Arumí, Claudia Ulloa, Roberto Urrutia, Anny Rudolph-

Agua virtual en un marco insumo-producto para la cuenca del valle de México

- Por: Lilia Rodríguez-Tapia, Jorge A. Morales-Novelo, Fabiola S. Sosa-Rodríguez, Juan Carlos Altamirano-Cabrera, Francisco Torres-Ayala-

Evaluación de la sostenibilidad de cuencas mediterráneas semiáridas. Caso de estudio: cuenca del Segura, España

- Por: Javier Senent-Aparicio, Julio Pérez-Sánchez, Alicia María Bielsa-Artero-

Metodología para la delimitación y caracterización de humedales en escalas 1:50 000 y 1:20 000

- Por: Jorge Brena, Cervando Castillo, Ana Wagner-

Modelación del riesgo de inundaciones en el estado de Tabasco en el periodo 1961-2007

- Por: Ana Laura Reyes-Olvera, Eduardo Gutiérrez-González-

Relaciones entre parámetros de los modelos de infiltración de Kostiaikov y Lewis-Kostiakov,

- Por: Córdoba, Argentina, Juan Francisco Weber, Laureana Apestegui-

El abasto de agua por pipa en el valle de Texcoco, México

- Por: Monserrat Iliana Gómez-Valdez, Jacinta Palerm-Viqueira-

Gestión del riego enfocada a variabilidad climática en el cultivo de papa: aplicación al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México

- Por: Ernesto Sifuentes, Jaime Macías, Waldo Ojeda, Víctor M. González, Daniel A. Salinas, José G. Quintana-

4.2.- Capítulo 2. Huella hídrica agrícola de la cuenca del río Cachapoal, Chile

Novoa, V., Rojas, O., Arumí, J. L., Sáez, K. & Rudolph, A. Manuscrito enviado y sometido a revisión en la Revista Agrociencia.

Resumen

Se determina la huella hídrica ($HH_{\text{agrícola}}$) de la agricultura desarrollada en la cuenca del río Cachapoal (34°S), utilizando como indicadores la huella hídrica azul (HH_{azul}), verde (HH_{verde}) y gris (HH_{gris}), bajo condiciones de variabilidad climática. Se estableció una $HH_{\text{agrícola}}$ mayor en el año seco, al igual que los consumos de la HH_{azul} y HH_{gris} con $12.000 \text{ m}^3/\text{ton}$ y $4.934 \text{ m}^3/\text{ton}$, respectivamente. La mayor HH_{verde} fue calculada para un año normal con $2.000 \text{ m}^3/\text{ton}$. La mayor demanda de agua fue estimada en los cultivos de paltos, olivos, maíz y viñas, que en conjunto equivalen a un 63% de la superficie agrícola de la cuenca. La Política Nacional para los recursos hídricos plantea la necesidad de grandes inversiones en infraestructuras de almacenamiento y/o la utilización de fuentes de agua subterráneas. Sin embargo, es necesario trabajar por una mayor eficiencia del recurso, seleccionando cultivos con menor requerimiento de agua y mayor rendimiento.

Palabras claves: Indicador, gestión hidrológica, clima, riego, agricultura, gestión del agua.

Introducción

La Huella hídrica corresponde a un indicador de apropiación de los recursos hídricos, que permite caracterizar el volumen de agua consumido y/o contaminado directa e indirectamente para la producción de un bien o servicio (Vanham *et al.*, 2013; de Miguel *et al.*, 2015). Refleja la variabilidad climática y los flujos de captación y/o demandas que compiten por su uso, lo que hace de éste, un recurso escaso y vulnerable (Hejazi *et al.*, 2014). Así entonces, es una herramienta útil para abordar el desequilibrio entre oferta y demanda de los diferentes flujos de agua.

La escorrentía a través de los ríos y la infiltración de las aguas subterráneas, es denominada flujo de agua azul. El flujo de agua verde corresponde a la precipitación que se almacena temporalmente en el suelo y en la parte superior de la vegetación. Finalmente, se considera como flujo de agua gris, el recurso necesario para reponer la capacidad de carga ambiental luego de una intervención antrópica (Martínez-Austria, 2013; Hoekstra, 2014). A nivel global, se estima que alrededor de tres quintas partes de la precipitación caída toma la vía verde y dos quintos la azul (Oki y Kanae, 2006). Así, la huella hídrica (HH) evalúa tres componentes: 1) HH_{azul} , que corresponde volumen de agua de flujo azul captado para fines industriales, domésticos y de riego en la agricultura. 2) HH_{verde} , correspondiente al consumo de agua de flujo verde que sustenta la producción de cultivos, tierras de pastoreo, la silvicultura y ecosistemas. 3) HH_{gris} , que corresponde al volumen de agua que se requiere para asimilar el ingreso de contaminantes o fertilizantes (Hoekstra *et al.*, 2016).

En los cultivos la huella hídrica se define como el agua consumida producto de la evapotranspiración, los requerimientos de riego y los fertilizantes aplicados durante el periodo de crecimiento, según las características de clima, suelo y parámetros de los cultivos; la suma de los consumos de agua de cada cultivo determinarían la $HH_{\text{agrícola}}$ en una cuenca hidrográfica (Salmoral *et al.*, 2011; Schyns *et al.*, 2015).

Establecer el consumo del agua a escala de cuenca hidrográfica, contribuye a un manejo eficiente de los recursos hídricos. La parte no consumida de las extracciones de agua retornaría al sistema y quedaría aprovechable para su uso aguas abajo, siendo de importancia la calidad del recurso y el destino de los retornos (Hoekstra *et al.*, 2012). Sin embargo, existen pocos estudios que aborden la evaluación de la huella hídrica a escala de cuenca hidrográfica, especialmente en el caso de regiones mediterráneas; que requieren agricultura de regadío para compensar los periodos de sequía. En estas áreas la disponibilidad de agua azul como verde es variable, precisamente por la irregularidad pluviométrica, por lo cual, la agricultura en estas zonas constituye el mayor consumidor de agua (Ercin *et al.*, 2013). Son ejemplos, España (Sotelo *et al.*, 2011), Suiza (Hoekstra, 2015), México (Ríos *et al.*, 2015) y California (Fulton *et al.*, 2012).

En el caso de Chile, el crecimiento económico tiene como uno de sus pilares fundamentales la utilización de recursos naturales, dentro de los cuales se encuentra el

recurso hídrico (Donoso, 2006; Delgado *et al.*, 2015). La agricultura es el mayor consumidor de este recurso; representa un 80% de las extracciones consuntivas de agua, lo que permite el riego de más de 1,1 millones de hectáreas, las que evidencian un sostenido aumento de un 4% de la superficie regada entre 1997-2007. Último aspecto asociado a la tecnificación del riego, que ha permitido la expansión de los cultivos en áreas antes no explotadas (Donoso *et al.*, 2014; DGA, 2016).

Las tendencias del cambio climático global, producirán una mayor vulnerabilidad para satisfacer la demanda creciente del agua, ya que las proyecciones al año 2040 indican una reducción hídrica generalizada en las zonas del centro de Chile, que concentran un alta superficie agrícola (Abraham y Salomon, 2006; Pino *et al.*, 2015). Se suma, el periodo de sequía iniciado hace más de siete años entre las regiones de Coquimbo (30°S) a la Araucanía (37°S) con un déficit de precipitaciones de un 30% y aumentos de temperaturas entre 0,5 °C y 1,5 °C sobre el promedio histórico (Núñez *et al.*, 2013; Arumí *et al.*, 2014; Bosier *et al.*, 2016; Valdes-Pineda *et al.*, 2016).

Lo anterior plantea la necesidad de reformular y diseñar políticas públicas que aseguren la eficiencia y equidad del recurso hídrico (Cabrales y Néspolo, 2014). En Chile, la manera en que se gestiona el agua lo define el Código de Aguas (DFL 1.122). Básicamente es un sistema de reparto, en el que se concede derechos de uso transferibles libremente (Retamal *et al.*, 2012; Hearne y Donoso, 2014). Esta asignación refleja un sistema jurídico unitario, independiente del ecosistema local y de la abundancia actual de los recursos naturales (Rivera *et al.*, 2016). Esto último ha llevado a que gran parte de las regiones con vocación agrícola en la macro zona centro (30°- 35°S) a una condición de sobre-otorgamiento de derechos de agua, la que utiliza actualmente 389 m³/s para uso agrícola. De dicha cifra, la región de O'Higgins (34°S) utiliza el 25%, compatibilizando altos requerimientos hídricos debido a la variabilidad climática asociada al régimen mediterráneo (Oyarzun *et al.*, 2008; Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011; Rojas *et al.*, 2014).

Localizada en la región de O'Higgins, se encuentra la cuenca del río Cachapoal (34°S), que representa el 78% del uso de suelo agrícola de la región (Antúnez y Felmer, 2009). En sus riberas, se emplazan empresas agroindustriales las que contribuyen a la contaminación de las aguas (INE, 2015). La creciente erosión

(moderada, severa y muy severa) de los suelos representa el 44% de la superficie total de la cuenca, daño ambiental producido por malas prácticas en el sector silvoagropecuario (CIREN, 2010), razón por la cual se ha reducido la superficie dedicada a los cereales y aumentado el área dedicada a la silvicultura, la fruta y viñas (Donoso *et al.*, 2014). Del mismo modo, en algunos cultivos, se ha incrementado la productividad y el rendimiento, principalmente por la adición de agroquímicos y mejores técnicas de riego (Núñez-López *et al.*, 2007; Billi *et al.*, 2009). Sin embargo, el déficit hídrico, ha restringido el uso de riego y la disponibilidad del agua (Cortés *et al.*, 2012; Sánchez y Carvacho, 2013; Cabrales y Néspolo, 2014).

Las prácticas actuales de la gestión hídrica a nivel de cuenca en nuestro país, condicionan la producción agrícola, a la dependencia del tipo de riego y las características climáticas, sin embargo, el mayor consumo de agua para el desarrollo de los cultivos se realiza en años de sequía, a pesar que los recursos superficiales se encuentran disminuidos. El principal objetivo de este estudio fue determinar los consumos de agua de los principales cultivos producidos en la cuenca del río Cachapoal, a partir del cálculo de la HH de la agricultura, considerando la variabilidad climática (año seco, húmedo y normal) y los indicadores de la huella del agua verde, azul y gris.

Metodología

Área de estudio

La cuenca Andina del río Cachapoal (34°S 70°O), abarca un 38% de la superficie de la Región de O'Higgins, con 637.000 ha y 170 Km de longitud; comprende 18 comunas y 584.000 habitantes, de ellas el 30% se desempeña en actividades relacionadas con la agricultura (INE, 2015). Posee un clima mediterráneo con variaciones por efecto de la topografía, en que el ascenso del relieve genera modificaciones térmicas y pluviométricas. Sobre los 3.500 m la rigurosidad climática se acentúa en ésta cuenca, hasta alcanzar condiciones glaciales (Figura N° 1). El régimen pluviométrico es de tipo pluvio-nival, donde los mayores caudales se producen en los períodos de lluvias en invierno y de deshielo en primavera-verano, con caudales máximos en los meses de junio-julio y diciembre (Hadji Georgalis y Riquelme, 2002; Ortiz-Gómez *et al.*, 2015).

El análisis de la HH se realizó dividiendo la cuenca del río Cachapoal en tres secciones (1°, 2° y 3°), que corresponde a la división administrativa de los recursos hídricos en dicho río conforme a la práctica Chilena (Figura N° 1). Fue necesario además, la utilización de datos agrícolas como: superficie cultivada, tipo de cultivo, rendimiento y técnicas de riego en las distintas secciones de la cuenca, las que se obtuvieron del Censo Agropecuario (INE, 2007) (Cuadro N° 1).

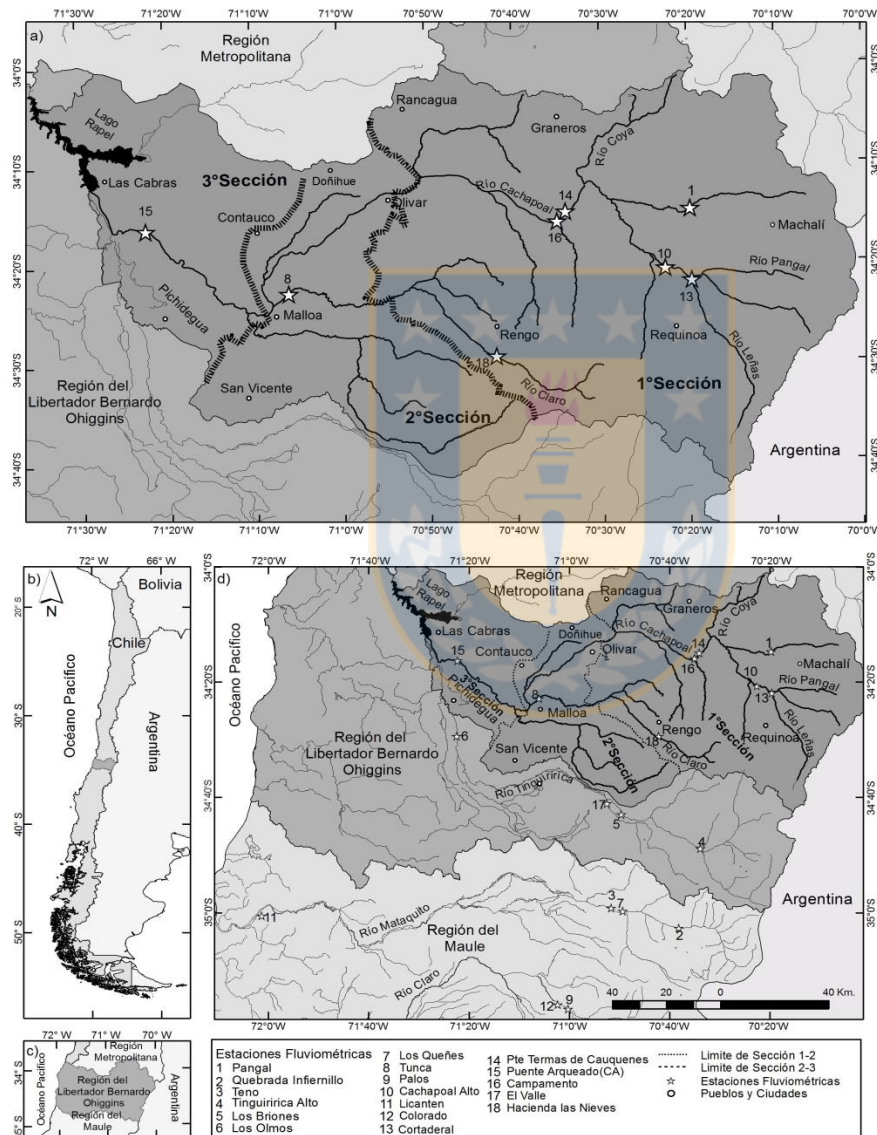


Figura 4.2.1 Cuenca del río Cachapoal con secciones administrativas de recursos hídricos. Se indican estaciones fluviométricas utilizadas en el análisis de caudal ambiental.

Tabla 4.2.1 Superficie cultivada (ha) y los diferentes tipos de cultivos, superficie regada y técnicas de riego utilizadas en las diferentes secciones de la cuenca del río Cachapoal. Fuente: Censo agropecuario (INE, 2007).

	Cultivo	Familia	Especie	1°Sección	2°Sección	3°Sección
				34°45'31 S	34°17'30 S	34°17'29 S
				70°45'24 O	71°04'52 O	71°24'24 O
Superficie cultivada (ha)	Hortalizas	Solanáceas	Tomate industrial	934,2	428,2	271,8
			Tomate	145,2	590,8	218,7
		Cucurbitáceas	Melón	18,8	847,6	467,1
			Amarilidáceas	Cebollas	29,7	947,6
	Árboles Frutales	Rutáceas	Cítricos	194,1	1023,6	2441,3
		Rosáceas	Manzana	4758,4	1639,5	39,9
		Rosáceas	Durazno	7068,4	2730,7	914,6
		Lauráceas	Palto	62,9	873,4	1724,1
		Vitácea	Vid	5204,1	1434,5	4178,5
		Oleáceae	Olivos	222,1	207	16,1
	Cereales	Poáceae	Maíz	7473,4	12263,8	9975,3
	Superficie regada	Riego gravitacional		75,7	82,6	62,8
		Riego mecánico		0,4	0,8	1,2
Micro-riego		24	16,7	36,4		

Variabilidad climática. Los datos meteorológicos de entrada fueron recogidos desde 9 estaciones meteorológicas y pluviométricas que mantiene la Dirección General de Aguas (DGA, 2016), con una data homogénea de 34 años. Se trabajó con tres condiciones: año húmedo (2005), año normal (2006) y año seco (2007), según las estimaciones realizadas por Novoa *et al.*, (2016).

Cálculo de la huella hídrica agrícola (HH_{cultivos}). Para el cálculo de la huella hídrica agrícola, se empleó la metodología propuesta por Hoekstra *et al.*, (2011), considerando éste, como la suma de sus componentes, verde, azul y gris de los cultivos agrícolas calculados.

$$HH_{\text{agrícola}} (\text{m}^3/\text{ton}) = \Sigma HH_{\text{Cultivos}} \quad (1)$$

$$HH_{\text{cultivos}} (\text{m}^3/\text{ton}) = \Sigma HH_{\text{Verde}} + HH_{\text{Azul}} + HH_{\text{gris}} \quad (2)$$

Ambos componentes, HH_{verde} y HH_{azul} de los cultivos, se determinaron a partir de las siguientes ecuaciones:

$$HH_{\text{verde}} = \frac{UAC_{\text{verde}}}{Y} \text{ (m}^3\text{/ton) (3)}$$

$$HH_{\text{azul}} = \frac{UAC_{\text{azul}}}{Y} \text{ (m}^3\text{/ton) (4)}$$

Dónde: Y (ton/ha) = rendimiento del cultivo (cuadro 1), UAC = uso de agua del cultivo verde y azul, según su fuente (precipitación o riego), expresada en m³/ha.

Estimación de rendimientos de cultivos (Y). Los cultivos agrícolas analizados se ajustaron mediante el software CROPWAT, que relacionó la reducción de evapotranspiración a un porcentaje de disminución del rendimiento, a través del siguiente cálculo:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_{caj}}{ET_c}\right) \text{ (5)}$$

Donde K_y es el factor de respuesta a la productividad, ET_{caj} es la evapotranspiración ajustada (real) del cultivo (mm/día), ET_c la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (sin estrés hídrico), los rendimientos reales obtenidos o ajustados del cultivo (ton/ha) y los rendimientos esperados (ton/ha) (FAO, 2011).

Cálculo de uso del agua de los cultivos (UAC) (m³/ha). Se utilizaron las siguientes relaciones:

$$UAC_{\text{Verde}} = 10 \times \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{\text{Verde}} \text{ [volumen/área] (6)}$$

$$UAC_{\text{Azul}} = 10 \times \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{\text{Azul}} \text{ [volumen/área] (7)}$$

Dónde: Σ = ciclo de crecimiento del cultivo, es decir, desde la siembra (día 1) hasta la cosecha, l_{gp} = longitud, días que cada etapa del ciclo. ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm/día).

Estimación de evapotranspiración (verde y azul) de los cultivos (ET_c). Se determinó la demanda hídrica del cultivo de cereales, a partir del requerimiento de agua del cultivo (RAC), utilizando el software CROPWAT 8.0. Bajo condiciones de crecimiento ideales, la ET_c se consideró igual al RAC y correspondería al agua de evapotranspiración. El cálculo de ET_c se realizó, en relación a la eficiencia de riego. Esta metodología asume que las pérdidas por producto del riego permanecen y retornan a la cuenca.

$$ET_c [\text{mm/día}] = K_c * ET_o \quad (8)$$

$$ET_c [\text{mm/año}] = ET_c [\text{mm/día}] * \text{días en cada año} \quad (9)$$

Donde, K_c = coeficiente de cultivo, ET_o = evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}).

La estimación de la ET_{verde} , se realizó:

$$ET_{\text{verde}} [\text{mm/año}] = ET_c [\text{mm/año}] - \text{Req riego} [\text{mm/año}] \quad (10)$$

Requerimiento de riego (Req de riego)

$$\text{Req riego} [\text{mm/año}] = ET_c [\text{mm/año}] - \text{Peff} [\text{mm/año}] \quad (11)$$

Precipitación efectiva (P_{eff}) calculada por el programa, según Método USDA S.C.

La estimación de ET_{azul} , se realizó a partir de:

$$ET_{\text{azul}} [\text{mm/año}] = \text{Req de riego} [\text{mm/año}] \quad (12)$$

La suma de ambas ET_{azul} (mm/año) y ET_{verde} (mm/año), es igual a ET_c (mm/año).

Cálculo de la evapotranspiración (ET_o). Se utilizó el método de Penman-Monteith y el programa CROPWAT 8.0. Los datos climáticos, en función de la latitud y del período, fueron tomados de la Dirección general de Agua (DGA, 2016).

Calculo de la huella hídrica gris de los cultivos (HH_{gris}). Se midió en términos de volumen por unidad de masa del producto (m^3/ton), definida como la cantidad de agua necesaria para asimilar los residuos y diluirlos hasta el punto que su concentración se mantenga dentro de los rangos de calidad, según las normas (Hoekstra *et al.*, 2011):

$$HH_{\text{gris}} = \frac{(\alpha * AR)}{(C_{\text{max}} - C_{\text{nat}})} * Y \quad (\text{m}^3/\text{ton}) \quad (13)$$

Donde AR corresponde a la cantidad aplicada del fertilizante, α representa la fracción de lixiviación y escorrentía del producto expresada en porcentaje, C_{max} concentración máxima aceptable definida por estándares de calidad (mg/L), C_{nat} concentración natural del contaminante (mg/L), Y rendimiento de la producción agrícola. El agente utilizado para medir la HH_{gris} fue el nitrógeno (AR), corresponde a la dosis de referencia de nitrógeno para cada cultivo agrícola de la región, extraído de ODEPA (2013b). La fracción de lixiviación para este agente fue del 10% y la C_{max} fue

de 15 mg/L, basada en el DS. 90 de la Norma de Emisión. La C_{nat} de la cuenca del río Cachapoal se estableció en 0,01 mg/L evaluando el mejor escenario, según la metodología de Hoekstra *et al.* (2011).

Análisis estadísticos. Se realizaron análisis de correlaciones en las variables climáticas, según el coeficiente de correlación de Pearson, a través del programa ESTADISTICA 8.0.

Resultados

Huella hídrica de los cultivos agrícolas ($HH_{cultivo}$). El análisis de la precipitación muestra una mayor precipitación para el año 2005 (año húmedo) ($969,4 \pm 3,10$ mm), al igual que la precipitación efectiva ($625,8 \pm 8,1$ mm). Lo opuesto se observó en el año 2007 (seco) en que la precipitación registrada fue menor ($420 \pm 3,4$ mm), lo mismo que la precipitación efectiva ($212,0 \pm 8,2$ mm) con una disminución de un 43% respecto del año 2005, observándose una correlación lineal entre ellas ($r = 0,99$; $p < 0,05$). Estas variables fueron mayores en la 1° sección de la cuenca (Figura N° 2).

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se mantuvo similar en los años en estudio y entre las secciones del río Cachapoal. Para el año 2007 se estimó la mayor ET_c con 17.645 mm, además de altos requerimientos de riego 16.116 mm. Estas variables en las secciones 2° y 3° fueron mayores, y se encuentran correlacionadas linealmente ($r = 0,98$; $p < 0,05$) (Figura N° 2).

La $HH_{agrícola}$ de los cultivos agrícolas en la cuenca del río Cachapoal se estimó en $15.902 \text{ m}^3/\text{ton}$ para el año húmedo (2005), $14.091 \text{ m}^3/\text{ton}$ para el año normal (2006) y $18.221 \text{ m}^3/\text{ton}$ para el año seco (2007). Respecto de un año normal, el consumo de $HH_{agrícola}$ en un año húmedo fue mayor en $1.810 \text{ m}^3/\text{ton}$ y en un año seco en $4.129 \text{ m}^3/\text{ton}$; el mayor consumo de agua se alcanza en un año seco. El consumo de la $HH_{agrícola}$ fue mayor en la 2° y 3° sección de la cuenca (Cuadro N° 3 y Figura N° 2).

La mayor HH_{verde} , se observó en el año 2006 (normal) con $2.000 \text{ m}^3/\text{ton}$, encontrándose el mayor consumo de este flujo de agua, en la 1° sección de la cuenca, debido a que el suelo dispondría de la precipitación y humedad necesarias para el crecimiento de los cultivos. La mayor HH_{azul} se observó en el año 2007 (año seco) con $12.000 \text{ m}^3/\text{ton}$, correlacionada directamente con el requerimiento de riego de los cultivos ($r = 0,99$; $P < 0,05$), e imprescindible para disminuir el impacto de las heladas,

donde la mayor parte del agua consumida azul provendría de fuentes subterráneas, ya que las fuentes superficiales se encuentran reducidas (Odepa, 2013a) y un volumen no menor en el año 2005 (húmedo), con 3251 m³/ton de HH_{azul}, correlacionado directamente con la precipitación ($r = 0,97$; $P < 0,05$) (Figura N° 2).

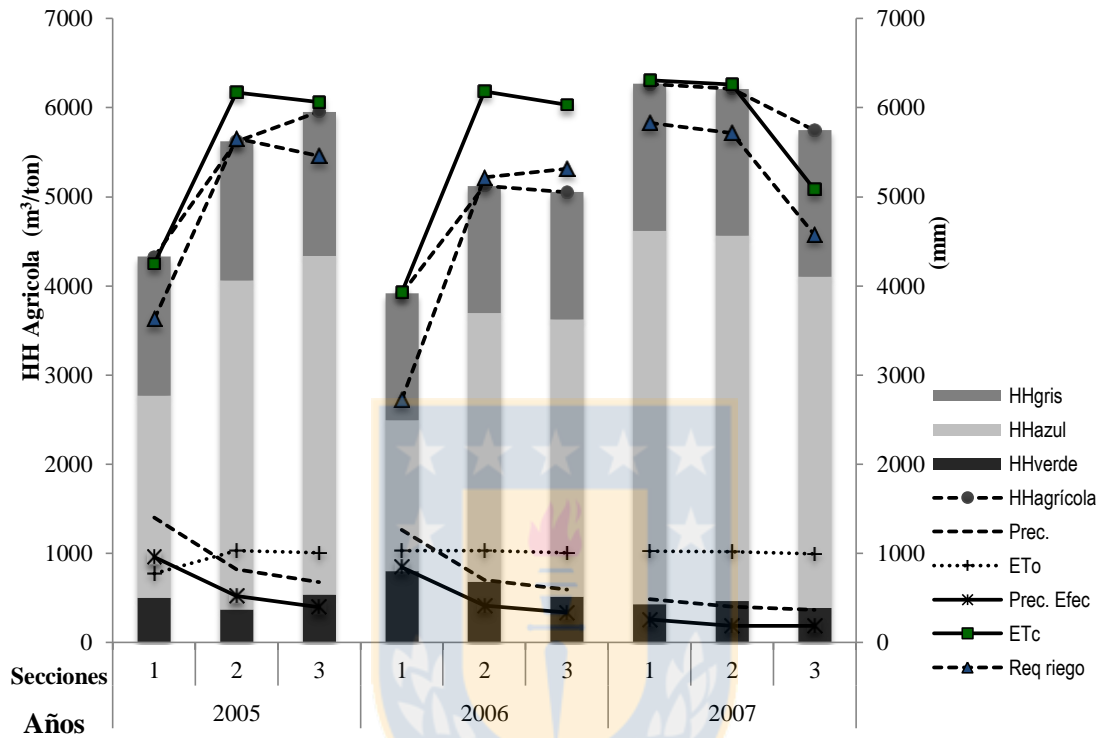


Figura 4.2.2 Huella hídrica agrícola acumulada de la cuenca del río Cachapoal. Se indica la precipitación anual (Prec.), evapotranspiración de referencia (ETo), precipitación efectiva (Prec. Efec.), evapotranspiración de los cultivos (ETc), requerimientos de riego (Req. Riego), en los años 2005, 2006 y 2007, para las distintas secciones del río Cachapoal.

Se estimó además, el mayor volumen de HH_{azul} para las secciones 2° y 3° con 10.800 m³/ton y 10.622 m³/ton respectivamente. La mayor HH_{gris} se obtuvo en el año 2007 (seco) con 4.934 m³/ton, correspondiente a un 35% de la HH_{agrícola}, correlacionada directamente con el rendimiento de los cultivos y el uso de nitrógeno en los fertilizantes ($r = 0,97$; $P < 0,05$). La aplicación de nitrógeno promedio se estimó en $375 \pm 35,4$ kg/ha para una lixiviación de un 10%, con una alta \pm d.e. según el cultivo y su sistemas de gestión. El agua necesaria para asimilar la lixiviación de nitrógeno en la cuenca en promedio se estima en 1.550 m³/ton en el mejor escenario, para una concentración natural de 0,001 kg/m³ (Liu *et al.*, 2012) (Figura N° 2).

El promedio de la huella hídrica (\pm e.e) mostró que la $HH_{\text{agrícola}}$, HH_{azul} y HH_{gris} aumentan en el año seco (2007) y disminuyen en un año normal (2006). En el análisis de las secciones los promedios de $HH_{\text{agrícola}}$, HH_{azul} y HH_{gris} (\pm e.e) disminuyeron en la 1ª sección (Figura N° 3), a pesar, de que se evaluó la mayor cantidad de superficie agrícola, correspondiente a 26.111 ha.

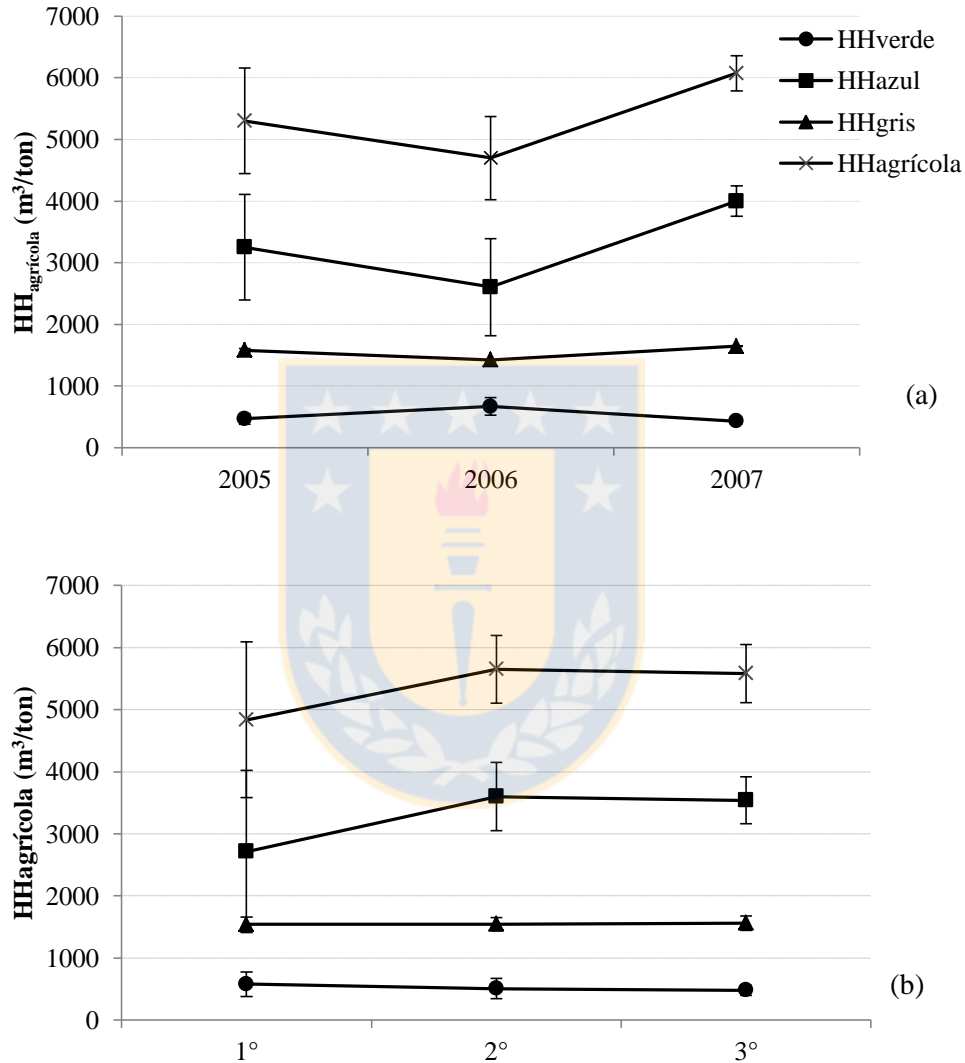


Figura 4.2.3 Huellas hídricas promedio (\pm e.e) establecidas en el río Cachapoal para los años (a): húmedo (2005), normal (2006), seco (2007) y las secciones (b) 1° (alta), 2° (media) y 3° (baja).

La mayor disminución en el rendimiento de los cultivos según las variables climáticas, se observó en los años 2007 y 2005 ($14 \pm 0,9\%$ y $13 \pm 0,9\%$) respectivamente. Siendo los cultivos más afectados los de paltos y duraznos, entre un

30 ± 1,6% y 15 ± 1,6%, respectivamente. El cultivo menos afectado correspondió al de cebollas, con una disminución de 3,3 ± 1,6% (Cuadro N° 3).

Tabla 4.2.2 Rendimientos de referencia y porcentaje de disminución del rendimiento según variables climáticas, estimados para los cultivos en la cuenca del río Cachapoal. Fuente ODEPA, 2010.

cultivo	Rend. Ref. (ton/ha)	Porcentaje de disminución del rendimiento (%)								
		2005			2006			2007		
		Sección			Sección			Sección		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Tomate indust.	80	10	11	12	8,5	8,6	9	11,9	12,2	12,4
Tomate	55	10	11	12	8,5	8,6	9	11,9	12,2	12,4
Melón	25	10,8	11,7	11,4	6,6	7,9	7,5	11,5	11,5	11,2
Cebollas	65	4,6	5,6	4,5	0	0	0	4,3	5,5	5,5
Cítricos	28,2	9,6	9,6	10,4	8,4	8,1	8,6	10,3	9,9	10
Manzana	45,1	9,6	10,3	10,6	8,4	8,5	8,6	10,3	10,3	10,1
Durazno	37,4	16,2	16,9	17,5	11	11,9	12,3	17,5	17,4	17,2
Palto	9,3	34,4	31,6	45,9	8,1	8,2	9,1	48,3	47,1	45,8
Vid	24,5	8,2	8,8	8,9	5,2	5,5	6,2	8,8	8,6	9,1
Olivos	4,7	9,9	10,9	10	5	5,5	5,7	9,3	9,8	9,3
Maíz	11,6	12	13,1	9,2	6	6,4	6,5	13,5	14	15,1
Prom. de disminución (%)		12,3	12,8	13,9	6,9	7,2	7,5	14,3	14,4	14,4

En las etapas de los cultivos de la cuenca del río Cachapoal se consideran los tres valores de coeficiente de cultivo (Kc): inicial, desarrollo–crecimiento y final para los períodos 2005, 2006, 2007 (Figura N° 4). Es importante destacar que para los distintos cultivos agrícolas, la duración de la temporada (periodo de crecimiento) como la fecha de inicio de los cultivos, son variables que influyen significativamente en la evapotranspiración, al estar directamente relacionadas con las necesidades hídricas de cada cultivo ($r = 0,89$; $P < 0,05$), las que a su vez se ven afectadas por la variabilidad climática (Hoekstra, 2012; Tolón *et al.*, 2013).

El promedio mundial de las huellas hídricas de la agricultura difieren significativamente entre cultivos y regiones. Sin embargo, para entender mejor los valores calculados de la huella hídrica para la cuenca del río Cachapoal, se puede afirmar que ésta se encuentra bajo el valor medio mundial, según lo reporta Mekonnen

y Hoekstra (2011), lo que se explicaría principalmente por su mayor rendimiento agrícola, tendencia semejante a lo que ocurre a nivel global. Por otra parte, se informa que el requerimiento de agua de los cultivos son mayores en América Latina (Aldaya *et al.*, 2010; Chartzoulakisa *et al.*, 2015) comparado con Asia (Liu *et al.*, 2007; Konar *et al.*, 2011), pero su huella hídrica sería menor, situación que debe ser considerada en la elección de la actividad productiva, costos de exportación y aumentos de la productividad del agua.

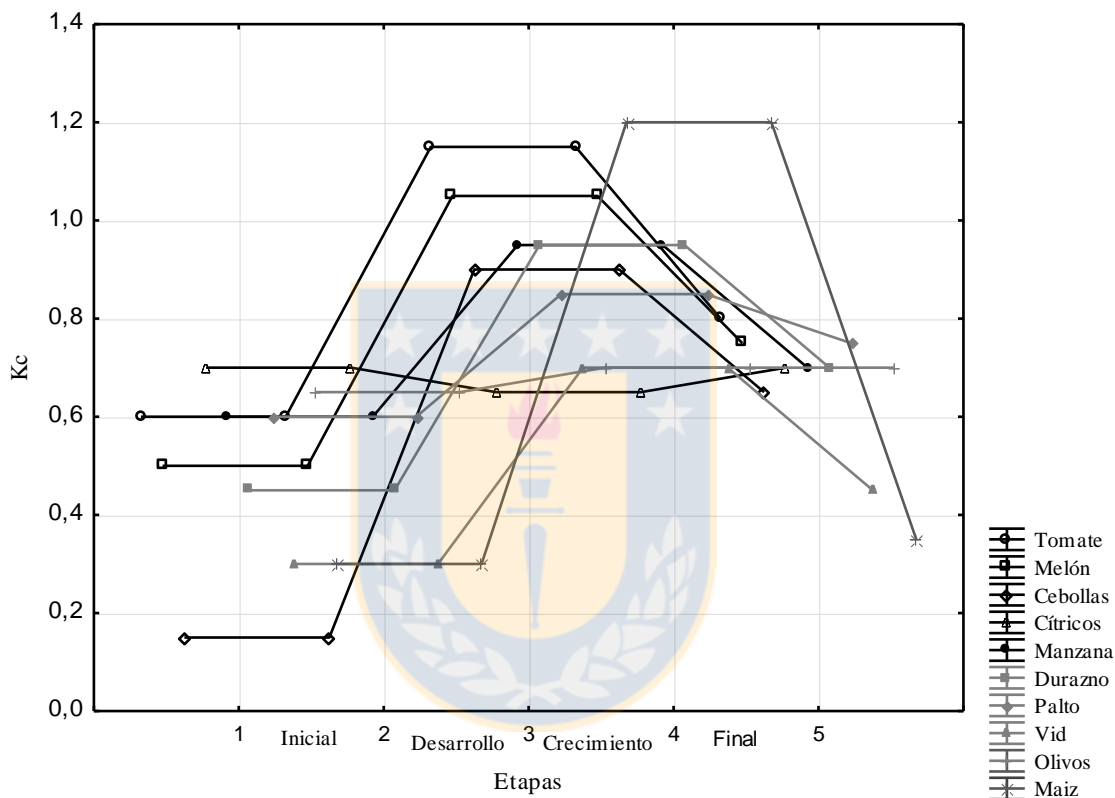


Figura N° 4.2.4 Etapas y coeficientes (kc) estimados para los cultivos agrícolas de la cuenca del río Cachapoal.

En relación al cultivo por especie se observó una mayor $HH_{cultivos}$ en los de paltos ($1.480 \pm 19,2 \text{ m}^3/\text{ton}$), olivos ($1.257 \pm 4,1 \text{ m}^3/\text{ton}$), maíz ($750 \pm 4,58 \text{ m}^3/\text{ton}$) y viñas ($420 \pm 14,9 \text{ m}^3/\text{ton}$), mientras que el cultivo con menor consumo $HH_{cultivos}$ correspondió al de cebollas con $36 \pm 6,4 \text{ m}^3/\text{ton}$ (Figura N° 5).

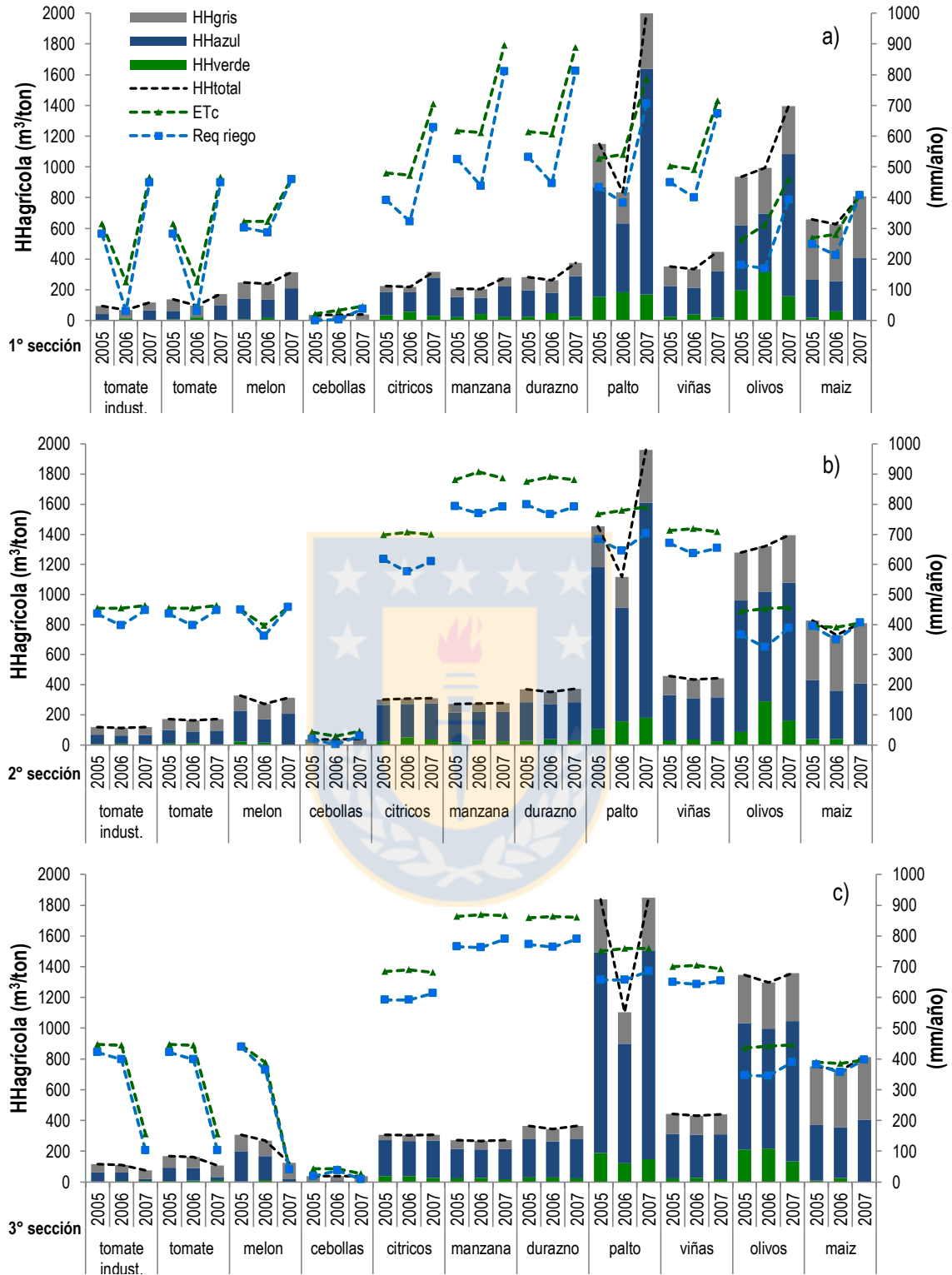


Figura 4.2.5 Huella hídrica agrícola de los cultivos según la variabilidad climática de cuenca del río Cachapal a) 1° sección, b) 2° sección y c) 3° sección.

En relación a la HH_{verde} los cultivos con un consumo mayor de este tipo de agua fueron los olivos ($196 \pm 7,7$) y paltos ($156 \pm 7,4$). Por su parte, cultivos con mayor HH_{azul} correspondieron a paltos ($1.035 \pm 12,3 \text{ m}^3/\text{ton}$), olivos ($751 \pm 10,4 \text{ m}^3/\text{ton}$), maíz ($340 \pm 11,3 \text{ m}^3/\text{ton}$) y viñas ($267 \pm 10,5 \text{ m}^3/\text{ton}$). La mayor HH_{gris} calculada indica que los cultivos de maíz ($387 \pm 6,6 \text{ m}^3/\text{ton}$), olivos ($310 \pm 6,4 \text{ m}^3/\text{ton}$) y paltos ($285 \pm 6,1 \text{ m}^3/\text{ton}$) presentan los máximos niveles. Los cultivos con más consumo de ETc y requerimientos de riego, se estimaron en manzanos ($822 \pm 15,4$ y $715 \pm 13,2$) y duraznos ($815 \pm 14,7$ y $718 \pm 16,3$) (Figura N° 5).

Discusión

El estudio de la huella hídrica a escala de cuencas hidrográficas se realiza a través del desarrollo de indicadores cada vez más complejos, esto permitió considerar una gran variabilidad de factores que condicionan el ciclo del agua, simular su dinámica y además incluir variaciones espaciales como datos de entrada (Van Oel *et al.*, 2009). Se incluyó variables climáticas como: precipitación total y efectiva, temperatura, radiación solar, viento, insolación, evapotranspiración de referencia, humedad y las propiedades del suelo, según el tipo de suelo, como: humedad, tasa de infiltración, profundidad radicular con información geo-referenciada. Además, se utilizó datos de los cultivos como: valores de Kc, etapas, fracción de agotamiento crítico por periodo de desarrollo, que incluyó estimaciones de evapotranspiración de los cultivos y requerimiento de riego, lo que constituye un avance importante desde un punto de vista ambiental, económico o social, para la cuenca analizada (Jaramillo y Destouni, 2015).

Para una superficie total de 69.433 hectáreas, en que se ubican los principales cultivos de la cuenca del río Cachapoal, durante el período 2005-2007 se estableció que los paltos, olivos, maíz y viñas fueron los cultivos con la mayor HH_{cultivos} (Figura N° 5), debido principalmente a la cantidad de agua que se utiliza para su crecimiento y fotosíntesis. Por otra parte, se observó que las variaciones climáticas son determinantes en el requerimiento hídrico de la actividad agrícola, ya que éstos condicionan el flujo del agua ($HH_{\text{agrícola}}$) con las diversas formas de consumo (Figura N° 4). Se estimó que en un año húmedo el 9% correspondió a HH_{verde} , 61% a HH_{azul} y 30% a HH_{gris} ; en cambio en año normal aumenta el porcentaje de la HH_{verde} *e.i.*, 15%, disminuye la HH_{azul} *i.e.*, 55%, conservándose en 30% la HH_{gris} . En un año seco solo el

7 % correspondería a HH_{verde} y el mayor porcentaje a la HH_{azul} *e.i.*, 66%. Los resultados de la variación en la precipitación observada en este estudio para la cuenca del río Cachapoal fue similar al caso descrito por Rodríguez-Casado *et al.*, (2009) para una cuenca mediterránea en España.

Si se evalúa y considera el consumo real del recurso hídrico para cada actividad productiva, esto es, los consumos de los tres componentes de la huella hídrica, HH_{azul} , HH_{verde} y HH_{gris} , se posibilita gestionar eficazmente la distribución y sostenibilidad del agua, ya que es posible visualizar cada uno de los servicios ecosistémicos que esta presta. Los enfoques convencionales del manejo hídrico hasta ahora se realizaban considerando solamente el uso del flujo de agua azul (Vanham *et al.*, 2013; Cazcarro *et al.*, 2015).

La gestión de los recursos hídricos ha demostrado que los escenarios (húmedo, normal y seco), como se realizó en éste estudio, son útiles para explicar las incertidumbres asociadas a las condiciones climáticas. Enfoques basados en estos escenarios han sido aplicados para explorar y analizar futuros problemas de requerimiento de este recurso, así como para apoyar a los gestores del agua y proporcionar herramientas a los actores de proponer soluciones (Oyarzun *et al.*, 2008; Dong *et al.*, 2013; Iglesias y Garrote, 2015).

Se debería esperar, de acuerdo a la variabilidad climática, un aumento en la agricultura de riego en la cuenca del río Cachapoal, sin embargo, el riego no es sustentable si los suministros de agua no son fiables, por lo cual, se requiere desarrollar mayores esfuerzos para encontrar cultivos que utilicen un mínimo de agua o que resulten menos afectados frente a la variabilidad climática (López y Bautista-Capetillo, 2015). En este estudio destaca el cultivo de cebollas por un menor uso de agua y mayor rendimiento.

Finalmente, en el periodo analizado, la mayor huella hídrica fue estimada para el año en condición de sequía (año 2007) producto principalmente de los altos volúmenes requeridos de agua de riego (HH_{azul}). Éste año en particular fue donde se registró en nuestro país “el comienzo del periodo seco”, el cual se ha prolongado hasta la actualidad (Sánchez *et al.*, 2013). En relación a esto, la Política Nacional para los recursos hídricos, plantea la necesidad de grandes inversiones para conseguir un suministro adecuado, a través de la construcción de nuevas infraestructuras de

almacenamiento y/o la utilización de fuentes de agua subterráneas. Sin embargo, ésta no pareciera ser la única estrategia, con la misma energía se debería considerar y sensibilizar el manejo adecuado del recurso, poniendo hincapié en la eficiencia de su uso, esto cuantificado, a través de indicadores de predicciones climáticas estacionales, como lo es la huella hídrica, que refleja los flujos de consumo, de modo de evitar la saturación hídrica, la erosión y la lixiviación de áreas ya vulneradas.

AGRADECIMIENTOS. Los autores expresan su agradecimiento a Conicyt por el financiamiento dado a través del proyecto CRHIAM Conicyt/Fondap/15130015 y al Programa de Capital Humano Avanzado Conicyt Gobierno de Chile, Beca de Doctorado Nacional-2011.

Bibliografía

Abraham, E., y M. Salomón. 2006. Indicadores y puntos de referencia de la desertificación utilizados en argentina por diversos usuarios. *En:* Abraham, E., M., y G. B. Beekman (eds). Indicadores de la Desertificación para América del Sur. Mendoza, Argentina. pp: 113-140.

Aldaya M., M., P. Martinez-Santos, and M. R. Llamas. 2010. Incorporating the water footprint and virtual water into policy: reflections from the Mancha occidental region, Spain. *Water Resources Management.* 24: 941–958.

Antúnez, B., A., y S. Felmer E. 2009. Boletín del Nodo de riego en el seco, Región de O'Higgins. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Boletín INIA, Santiago, Chile. 120 p.

Arumí J., L., O. Melo, J. Nuñez, y M. Billi M. 2014. Riego y Usuarios del Agua en Chile. Desde la Revolución a la Evolución. *In:* Sanchis C., A., S. Palau G., A. Mangue I., L. Martínez S. (ed). Irrigation, society and landscape. Tribute to Tom F. Glick. Editorial Universitat Politècnica de València. España pp: 661 – 671.

Billi, M., M., K. Bardowicks, and J. L. Arumí. 2009. Integrated water resources management for sustainable irrigation at the basin scale. *Chilean Journal of Agricultural Research.* 69: 69-80.

Bosier, J., P., R. Rondanelli, R. Garreaud, and F. Muñoz. 2016. Natural and anthropogenic contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent mega-drought in central Chile. *Geophysical Research Letters*. 43: 413–421.

Cabrales G., L. Fernando, y C. Nespolo M. 2014. Racionamiento del agua ante fluctuaciones de disponibilidad: Una discusión teórica para el caso de Chile. *IDESIA*. 23: 129 - 137.

Cazcarro I., R. Duarte, M. Martín-Retortillo, V. Pinilla, and A. Serrano. 2015. How Sustainable is the Increase in the Water Footprint of the Spanish Agricultural Sector? A Provincial Analysis between 1955 and 2005–2010. *Sustainability*. 7: 5094-5119.

CENTRO DE CIENCIA DEL CLIMA Y LA RESILIENCIA (CR)². 2015. Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Chile: Universidad de Chile. Santiago, Chile. pp: 27.

Chartzoulakis A., K., and M. Bertaki. 2015. Sustainable water management in agriculture under climate change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 4: 88-98.

CIREN, CENTRO DE INFORMACIÓN RECURSOS NATURALES. 2010. Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. Síntesis de Resultados Región del Lib. Gral. Bernardo O'Higgins. Chile. pp: 48.

Cortés A., E., R. Oyarzún, N. Kretschmer, H. Chaves, G. Soto, M. Soto, J. Amézaga, J. Oyarzún, T. Rötting, M. Señoret, and H. Maturana. 2012. Application of the Watershed Sustainability Index to the Elqui river basin, North-Central Chile. *Obras y Proyectos*. 12: 57-69.

Delgado L., E., M. Torres-Gomez, A. Tironi-Silva and V. Marin H. 2015. Local adaptation strategy to climate change for equitable water access in Chilean rural zones. *America Latina hoy*. 69: 113-137.

De Miguel A., A. Y. Hoekstra and M. García-Calvo. 2015. Sustainability of the water footprint of the Spanish pork industry. *Ecological Indicators*. 57: 465–474.

DGA. 2016. Atlas del agua Chile: 2016. Dirección General De Agua (DGA). Ministerio de Obras Públicas, Chile. pp: 141.

Dong C., S. Gerrit, and N. Van De Giesen,. 2013. Scenario development for water resource planning and management: A review. *Technological Forecasting and Social Change*. 80: 749-761.

Donoso G. 2006. Water Markets: Case Study Of Chile's 1981 Water Code. *Ciencia e Investigación Agraria*. 33: 157-171.

Donoso G., G. Franco, E. Blanco and J. Lira. 2014. An estimation of agriculture water footprint in Chile. *Water footprints and agricultural growth: The case of Chile*. Researchgate. 1-30 pp.

Dumont A., G. Salmoral, and M. Llamas R. 2013. The water footprint of a river basin with a special focus on groundwater: The case of Guadalquivir basin (Spain). *Water Resources and Industry*.1: 60-76.

Ercin, A., E., M. Mekonnen M., and A. Y. Hoekstra. 2013. Sustainability of national consumption from, a water resources perspective: The case study for France. *Ecology Economics Journal*. 88: 133-147.

Falkenmark M. and J. Rockström. 2006. The New Blue and Green Water Paradigm: Breaking New Ground for Water Resources Planning and Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 132: 129-132.

FAO. 2011. Climate change, water and food security. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 175 p.

Fulton J., H. Cooley, and P. H. Gleick. 2012. California's Water Footprint. Pacific Institute. Oakland, CA, USA. 47 p.

Hadji Georgalis, E., and Riquelme C. 2002. Análisis de los precios de los derechos del aprovechamiento de aguas en el río Cachapoal. *Ciencia e Investigación Agraria*. 29: 91-100.

Hearne, R., and Donoso, G. 2014. Water Markets in Chile: Are They Meeting Needs? *In: Easter K., W., and Q. Huang. (ed). Water Markets for the 21st Century*, Springer, Netherlands. pp: 103-126.

Hejazi M., I., J. Edmonds L., P. Clarke, E. Kyle, V. Davies, M. Chaturvedi¹, P. Wise, J. Pate, L. Eom, and K. Calvin. 2014. Integrated assessment of global water scarcity over

the 21st century under multiple climate change mitigation policies. *Hydrology and Earth System Sciences*. 18: 2859-2883.

Hoekstra, A., Y., A. Chapagain K., M. Aldaya, M., and M. Mekonnen M. 2011. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan. London, UK. pp: 205.

Hoekstra, A., Y. 2012. The hidden water resource use behind meat and dairy. *Animal Frontiers*. 2: 3-8.

Hoekstra, A., Y., M. Mekonnen M., A. Chapagain K., R. Mathews E. and B. Richter D. 2012. Global Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprints versus Blue Water Availability. *PLoS ONE* 7: 32-68.

Hoekstra, A., Y. 2014. Water scarcity challenges to business. *Nature Climate Change*. 4: 318-320.

Hoekstra, A., Y. 2015. The water footprint: The relation between human consumption and water use. *In: Antonelli M. and F. Greco. (ed). The water we eat: Combining virtual water and water footprints: Switzerland*. pp: 35-48.

Hoekstra, A., Y., A. Chapagain K., and G. Zhang P. 2016. Water footprints and sustainable water allocation. *Sustainability*, 8: 2-23.

Iglesias, A., and L. Garrote. 2015. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. *Agricultural Water Management*. 155: 113-124.

INE. 2007. Censo agropecuario y forestal. Instituto Nacional de Estadísticas. Santiago, Chile.

INE. 2015. Compendio estadístico regional. Instituto Nacional de Estadísticas. Santiago, Chile.

Jaramillo, F. and G. Destouni. 2015. Local flow regulation and irrigation raise global human water consumption and footprint. *Science*. 350: 1248-1250.

Konar, M., C. Dalin, S. Suweis, N. Hanasaki, A. Rinaldo, and I. Rodriguez-Iturbe. 2011. Water for food: The global virtual water trade network. *Water Resources Research*. 47: 1-17.

Liu, C., A. Kroeze, C., A. Y. Hoekstra, and W. Gerbens-Leenes. 2012. Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers. *Ecological Indicators*. 18: 42–49.

Liu, J., G., J. Williams R., A. J. Zehnder B., and H. Yang. 2007. Gepic-Modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale. *Agricultural systems*. 94: 478-493.

López L., I., E., and C. Bautista-Capetillo. 2015. Green and blue water footprint accounting for dry beans (*Phaseolus Vulgaris*) in primary region of Mexico. *Sustainability*. 7: 3001–3016.

Novoa V., O. Rojas, J. L. Arumí, C. Ulloa, R. Urrutia, and A. Rudolph. 2016. Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile. *Tecnología y ciencias del agua*. 2: 35-50.

Núñez-López D., C. Muñoz-Robles A., V. Reyes-Gómez M., I. Velasco-Velasco y H. Gadsden-Esparza. 2007. Caracterización de la sequía a diversas escalas de tiempo en Chihuahua, México. *Agrociencia* 41: 253-262.

Núñez, J., D. Rivera, R. Oyarzún and J. L. Arumí. 2013. Chile a secas: Vulnerabilidad chilena frente a la sequía y déficit hídrico extremo desde la interfaz ciencia-política. Instituto de Políticas Públicas. Chile pp: 32.

Martínez-Austria, P. 2013. Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 4: 165-180.

Mekonnen, M., M., and A.Y. Hoekstra. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*. 15: 1577–1600.

ODEPA. 2013a. Cambio climático impacto en la agricultura heladas y sequía. Oficina De Estudios y Políticas Agrarias. Ministro de Agricultura. Chile. pp: 36.

ODEPA. 2013b. Evolución de las exportaciones silvoagropecuarias de Chile, 2003-junio 2013. Oficina De Estudios y Políticas Agrarias. Ministro de Agricultura. Chile. pp: 67.

Ojeda-Bustamante W., E. Sifuentes-Ibarra, M. Íñiguez-Covarrubias, M. J. Montero-Martínez. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia* 45: 1-11.

Oki T., and Kanae S. 2006. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *Science*. 313: 1068-1072.

Ortiz-Gómez R., J. M. González-Camacho, y Jesús Chávez-Morales. (2015). Modelo de asignación de agua considerando un caudal ambiental mínimo en la cuenca del río Metztlán en Hidalgo, México. *Agrociencia* 49: 703-721.

Oyarzun, R., J. L. Arumí, P. Álvarez, and D. Rivera. 2008. Water use in the Chilean agriculture: current situation and areas for research development. *In: Sørensen M. L. (ed). Agricultural Water Management Research Trend*. NY, USA. pp: 213 – 236.

Pino P., V. Iglesias, R. Garreaud, S. Cortés, M. Canals, W. Folch, S. Burgos, K. Levy, L. Naeher, and K. Steenland. 2015. Chile confronts its environmental future under uncertain perspectives of climate change. *Annals of Global Health*. 81: 354-367.

Retamal R., O. Melo, J. L. Arumí, and O. Parra. 2012. Sustainable water governance in Chile: from a sectoral management system to an integrated one. *In: Rivera D. (ed). Chile: Environmental, Political and Social Issues*. NY, USA. pp: 33 – 68.

Ríos J., L., M. Torres, R. Castro, M. Torres A., y J. Torres R. 2015. Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México. *Revista Fca Uncuyo*. 47: 93-107.

Rivera D., A. Godoy-Faúndez, M. Lillo, A. Alvez, V. Delgado, C. Gonzalo-Martín, E. Menasalvas, R. Costumero, and Á. García-Pedrero. 2016. Legal disputes as a proxy for regional conflicts over water rights in Chile. *Journal of Hydrology*. 535: 36-45.

Rodríguez-Casado R., A. Garrido y C. Varela-Ortega. 2009. La huella hidrológica de la agricultura española. *Fundación Marcelino Botín, Papeles del Agua Virtual*. 2: 5-34.

Rojas O., M. Mardones, M. Aguayo, y J. L. Arumí. 2014. Una revisión de las inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, tipologías y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*. 57: 177-192.

SStatSoft., Inc. (2001). Statistica (data analysis software system).www.statsoft.com.

Salmoral G., A. Dumont, A. M. Aldaya, R. Rodríguez-Casado, A. Garrido, y M. Llamas R. 2011. La Huella Hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir. *Fundación Marcelino Botín, Papeles de seguridad hídrica y alimentaria y cuidado de la naturaleza*. 1:5-92.

Sánchez M., y L. Carvacho. 2013. Aproximación a la determinación del déficit hídrico en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile, a partir de imágenes MODIS y datos meteorológicos. *Revista de Geografía Norte Grande*. 55: 109-124.

Schyns J., F., A. Y. Hoekstra, and M. Booij J. 2015. Review and classification of indicators of green water availability and scarcity. *Hydrology and Earth System Sciences*. 19: 4581-4608.

Sotelo J., A., J. Olcina, A. Tolon, J. Garcia M., X. Bolivar, F. Garcia, M. Soltelo, y I. Sotelo. 2011. Huella hídrica, desarrollo y sostenibilidad en España. *Fundación Mapfre*. España 425 p.

Tolón A., X. Lastra, y V. Fernández. 2013. Huella hídrica y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos. *Revista Electrónica de Medio Ambiente*. 14: 56-86.

Valdes-Pineda R., J. Valdes B., H. Diaz F., and R. Pizarro-Tapia. 2016. Analysis of spatio-temporal changes in annual and seasonal precipitation variability in South America-Chile and related ocean-atmosphere circulation patterns. *International journal of climatology*. 36: 2979-3001.

Van Oel P., R., M. Mekonnen M. and A. Y. Hoekstra. 2009. The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment. *Ecological Economics*. 69: 82-92.

Vanham D., A. Y. Hoekstra, and G. Bidoglio. 2013. Potential water saving through changes in European diets. *Environment International* 6: 45-56.

4.3.- Capítulo 3. Evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica agrícola en la cuenca del río Cachapoal, Chile.

Manuscrito en preparación

Resumen

Se evaluó la sostenibilidad del consumo de agua para el desarrollo de la agricultura en la cuenca del río Cachapoal (34°S), utilizando como indicadores el índice de sostenibilidad de la huella hídrica azul (HHS_{azul}) y la sostenibilidad de huella hídrica gris (HHS_{gris}), bajo condiciones de variabilidad climática. En la 1°sección de la cuenca (alta), la escasez hídrica fue evidenciada en el periodo de primavera-verano durante el año seco (2007) y húmedo (2005), con una HHS_{azul} clasificada como moderada a significativa y severa; situación contraria a lo observado en la 3°sección (baja). Relacionado a una disminución de la disponibilidad hídrica (QD_{azul}) en la 1° y 3°sección de la cuenca de un 70% y 38% respecto del año húmedo, junto a una tendencia al aumento en el consumo de la HH_{azul} de la agricultura en la 1°sección y a mantenerse constante en la 3°sección. La calidad de aguas superficiales, según la concentración de fertilizante aplicado a los cultivos (HHS_{gris}) se observó más afectada en la zona alta de la cuenca, para el periodo otoño e invierno en el año seco (2007), con una capacidad de asimilación consumida y las Normas de calidad ambiental superadas.

Palabras claves. Sostenibilidad, disponibilidad, huella hídrica, variabilidad climática.

Introducción

El agua es el eje principal para el desarrollo en una comunidad (Malghan, 2010; WWAP, 2015). Gracias a los recursos hídricos y a la gama de servicios ecosistémicos que provee, asegura la reducción de la pobreza, el crecimiento económico y la protección ambiental (Zhineng *et al.*, 2016). Sin embargo, el consumo antrópico ha alterado el ciclo global del agua, modificado las velocidades y su tiempo de residencia en los diferentes reservorios (Keys *et al.*, 2016). La razón principal de estas intervenciones se debe a la producción de alimentos (Konar *et al.*, 2011).

La agricultura a nivel global representa alrededor del 70% del total de las extracciones directas de agua y el 90% del consumo indirecto (agua evapotranspirada y no devuelta al sistema), afectando las tasas de infiltración, los patrones de humedad del suelo y la generación de escorrentía (Russo *et al.*, 2014b; WWAP, 2015). Se proyecta que para el año 2050 la demanda de agua para la agricultura se incrementará en un 55%, particularmente en economías emergentes y países en desarrollo, que ya se encuentran bajo estrés hídrico (Grey & Sadoff, 2007; Wang *et al.*, 2016). La agricultura, a su vez es extremadamente vulnerable a fenómenos de cambio climático (Rost *et al.*, 2008; Wheeler & von Braun, 2013). El aumento de las temperaturas reducen la producción de los cultivos (Challinor *et al.*, 2014). Los cambios en los regímenes de lluvias amplían las probabilidades de riesgo en las cosechas (Min *et al.*, 2011), junto al aumento de la temperatura (Zwiers *et al.*, 2011; Schlenker & Roberts, 2009), periodos de sequía (Porter *et al.*, 2014) y heladas (Rosenzweig *et al.*, 2002).

La intensificación de la variabilidad climática es a menudo un factor determinante de la escasez hídrica (Pfister *et al.*, 2009; Mubako & Lant, 2013). El riego proporciona un buffer de suministro y dependencia del agua durante los períodos secos (Hunter *et al.*, 2015), donde en algunos casos se utilizan más del 100% de los recursos disponibles (Khan & Hanjra, 2009; FAO, 2011; Herath *et al.*, 2013). Por lo tanto, uno de los principales desafíos a nivel global es alcanzar la sostenibilidad hídrica (Gleick, 1996; Ecosystems & Human Well-Being, 2005), entendida como la satisfacción de la demanda actual de agua para todos los usuarios, sin perjudicar el suministro futuro, contribuyendo a los propósitos de la sociedad y del ambiente (Russo *et al.*, 2014a; Mays, 2016). Existe sostenibilidad hídrica en una cuenca si es posible asegurar el abastecimiento de agua de una manera equitativa y eficiente, en cantidad y calidad a través del tiempo (Wang *et al.*, 2016), preservando las funciones hidrológicas, ecológicas, biológicas y químicas de los ecosistemas (Agenda 21, 1992; Mihelcic *et al.*, 2003).

Para alcanzar niveles sostenibles de consumo del agua en la agricultura, la apropiación del recurso hídrico, no debe ser superior a la tasa de reposición natural, siendo necesario considerar el balance hídrico y la capacidad de carga ambiental en el área de influencia (Chartzoulakisa *et al.*, 2015). Se evidencia así, la importancia de la gobernabilidad del agua, donde su efectividad, implementación y seguimiento, dependerán del uso de indicadores que establezcan la seguridad hídrica actual y futura

(Rogers, 2003; Cortés *et al.*, 2012). Es necesario por tanto, una evaluación del recurso hídrico que refleje la variabilidad natural y los flujos de captación y/o demandas que compiten por su uso (Hejazi *et al.*, 2014; WWAP, 2015), como lo considera el concepto de huella hídrica (HH).

La HH se define como un indicador de apropiación de los recursos hídricos que permite caracterizar el volumen de agua consumido (Hoekstra *et al.*, 2016). Considera a las aguas superficiales o subterráneas utilizadas para fines productivos o de riego, denominada huella hídrica azul (HH_{azul}), a las aguas de precipitación almacenadas como humedad del suelo, señalada como huella hídrica verde (HH_{verde}) y al agua contaminada directa e indirectamente para la producción de un bien o servicio, correspondiente a la huella hídrica gris (HH_{gris}) (Martínez-Austria, 2013; Vanham & Bidoglio, 2013; de Miguel *et al.*, 2015a).

La HH como indicador de sostenibilidad está comenzando a incluir mayor complejidad en sus modelos geográficos, desarrollados en diferentes resoluciones de tiempo y escalas espaciales, con el objeto de estimar los límites de consumo del recurso en el medio (de Richter, 2010; Siebert & Döll, 2010; Gerten *et al.*, 2011). Este indicador es especialmente útil en zonas sensibles a la variabilidad hídrica, como en el caso de las cuencas mediterráneas, donde en periodos de menor precipitación, aumentan la demanda de agua para irrigación, reduciendo la escorrentía y el caudal río abajo, como lo describen los trabajos realizados en el caso de España (Cazcarro *et al.*, 2015); América Latina (Mekonnen *et al.*, 2015), California (Fulton *et al.*, 2014) y Australia (Stoeglehner *et al.*, 2011).

La HH considera que los impactos surgen por el efecto acumulativo de todas las actividades, entendiendo que la huella hídrica agrícola ($HH_{\text{agrícola}}$) es la suma de las HH de cada cultivo realizado dentro de un área, con el objeto de identificar los periodos en los cuales se hacen insostenibles las extracciones (Mekonnen *et al.*, 2011; Nana *et al.*, 2014); Fulton *et al.*, 2012). En el caso de la sostenibilidad de la huella hídrica azul (HHS_{azul}), se identifica un punto de inflexión ambiental cuando se excede la disponibilidad de agua superficial, sobrepasando el requisito de caudal ambiental necesario para mantener los ecosistemas (Zeng *et al.*, 2012; de Miguel *et al.*, 2015). La insostenibilidad de la huella hídrica verde (HHS_{verde}) se genera cuando la demanda

sobrepasa la cantidad de agua destinada a la vegetación natural, con el objeto de preservar la biodiversidad (Hoekstra *et al.*, 2012; 2016; Zhuo *et al.*, 2016). En el caso de la insostenibilidad de la huella gris (HHS_{gris}) se genera cuando se superan los límites en la aplicación, por ejemplo de fertilizantes, derivando en un problema de contaminación (Arthington *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2012; Konar *et al.*, 2011).

En Chile la insostenibilidad hídrica se registra a través de los instrumentos de protección ambiental, como la declaración de zonas con agotamiento de aguas superficiales, decretos de reserva y áreas de restricción y/o prohibición para la extracción de aguas subterráneas (DGA, 2016). Sin embargo, estas medidas han sido insuficientes, ya que entre el 2015 y lo que va del 2016, se han decretado con serios problemas de escases hídrica a las regiones de Atacama, Coquimbo, Valparaíso y O'Higgins (Cabrales & Néspolo, 2014; DGA, 2016). Esto último ha llevado a que gran parte de las regiones con vocación agrícola, como la Región de O'Higgins (34°S), deban necesariamente condicionar el suministro de agua en la producción de alimentos (Oyarzun *et al.*, 2008; Rojas *et al.*, 2014; DGA, 2016).

La cuenca del río Cachapoal, no está exenta de esta problemática. Comprende el 78% del suelo agrícola de la región de O'Higgins (34°S) (INE, 2007; Antúnez & Felmer, 2009). Se ha reportado áreas del secano interior y de depresión intermedia con déficit hídrico, lo que ha llevado a restringir el uso de riego y la disponibilidad del agua (DGA, 2012; Sánchez & Carvacho, 2013; Cabrales *et al.*, 2014). Agravantes a esta situación son el sobre-otorgamiento de derechos de aguas (MOP, 2013), las prácticas agrícolas no adecuadas y un severo estado erosionado de sus suelo (CIREN, 2010). Por otra parte, el uso intensivo de fertilizantes como el nitrógeno, necesario para hacer rentable los cultivos por la calidad del suelo, favorecen la degradación de sus aguas (González *et al.*, 2003; Cortés *et al.*, 2012).

Reconociendo que la sostenibilidad del uso de agua para la agricultura en un área, no sólo depende de la escorrentía y disponibilidad de agua superficial, sino también, del consumo y calidad del agua, el objetivo de este trabajo fue evaluar la sostenibilidad de la $HH_{agrícola}$ desarrollada en la cuenca del río Cachapoal, considerando como escenario la variabilidad climática (año seco, húmedo y normal) y los indicadores de HHS_{azul} y HHS_{gris} de sus principales cultivos.

Metodología

Área de estudio. La cuenca del río Cachapoal (34°S 70°W), abarca una superficie de 637.000 ha y 170 Km de longitud, comprende 18 comunas, con un total de 584.000 habitantes; el 30% de ellos se desempeña en actividades relacionadas con la agricultura (INE, 2015). Posee un clima templado mediterráneo, con variaciones por efecto de la topografía, en que el ascenso del relieve genera modificaciones térmicas y pluviométricas drásticas (MOP, 2013). El río Cachapoal nace en la cordillera de los Andes, recibe afluentes de primer orden como los ríos Pangal y Coya, posteriormente en la depresión intermedia el estero La Cadena y río Claro. Finalmente, casi a la altura del Embalse Rapel, confluye el estero Zamorano.

El análisis de la sostenibilidad $HH_{\text{agrícola}}$ en la cuenca del Cachapoal se realizó utilizando la división administrativa de la cuenca, conforme a la práctica Chilena *i.e.*, tres secciones: 1°, 2° y 3° (Fig. 1). Además, se utilizó la información del Censo agrícola (INE, 2007) de los principales cultivos analizados, esto es, hortalizas: tomate, tomate industrial, melón, cebollas; árboles frutales: cítricos, manzanas, durazno, paltos, vid, olivos y cereales: maíz (Tabla 1).

Los datos fluviométricos de entrada fueron recogidos desde la estación Cachapoal en puente termas de Cauquenes a 700m de altura (34°16'S, 70°34' O), representativa para la 1°sección y la estación Cachapoal en puente arqueado a 115m de altura (34° 16'S, 70° 22' O) representativa de la 3°sección, que mantiene la Dirección General de Aguas (DGA). Se trabajó con información del año 2005 clasificado con una condición humedad, el año 2006 normal y el año 2007 seco, estimado previamente en Novoa *et al.*, (2016).

Tabla 4.3.1 Resumen de información sobre la actividad agrícola: tipos de cultivos, superficie cultivada y técnicas de riego en las de las secciones de la cuenca del río Cachapoal. Fuente: Censo (2007).

		1° Sección	2°Sección	3°Sección
Superficie cultivada (ha)	Hortalizas	1.128	2.814	1.046
	Árboles frutales	17.510	7.909	9.315
	Cereales	7.473	12.264	9.975
	Total	26.111	22.986	20.335
Superficie regada (%)	Riego gravitacional	75,7	82,6	62,8
	Riego mecánico	0,4	0,8	1,2
	Micro-riego	24	16,7	36,4

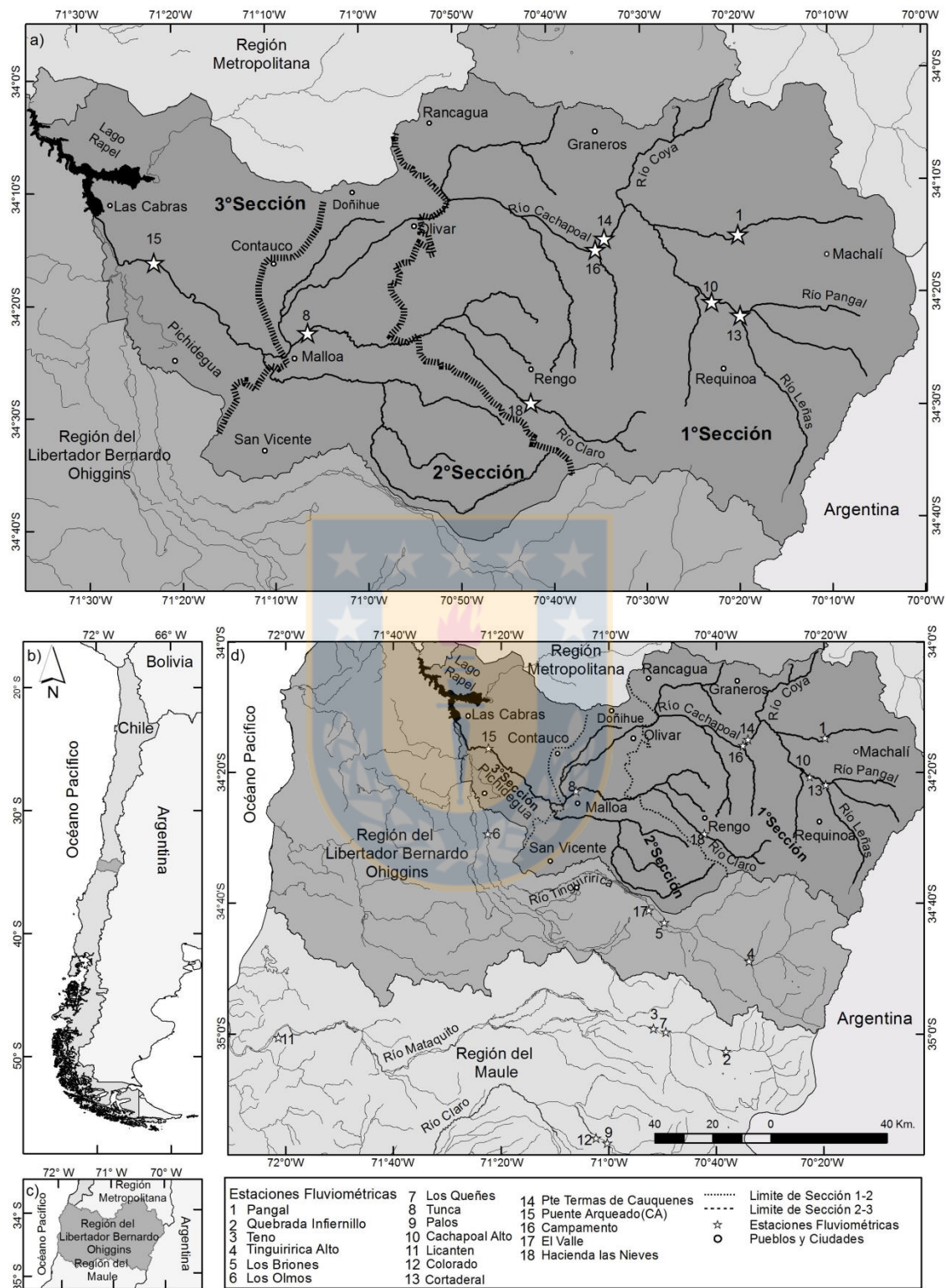


Figura 4.3.1 Cuenca del río Cachapoal. Se indican estaciones fluviométricas utilizadas en el análisis de caudal ambiental.

Cálculo del índice de sostenibilidad de la huella hídrica azul de la agricultura (HHS_{azul}). La estimación se estableció como la relación entre la ΣHH_{azul} de los cultivos analizados en la cuenca y la disponibilidad de agua azul (QD_{azul}) (Hoekstra *et al.*, 2012). Según la siguiente ecuación:

$$HHS_{azul} [x, t] = \frac{\Sigma HH_{azul}[x, t]}{QD_{azul} [x, t]} [-] \quad (1)$$

La ΣHH_{azul} (m³/mes) se realizó como la sumatoria de volúmenes mensuales consumidos de sus componentes HH_{azul} de los principales cultivos agrícolas, analizados en la cuenca del río Cachapoal (ha). Se empleó la metodología propuesta por Hoekstra *et al.*, (2011). El procedimiento se explica en Novoa *et al.*, (artículo enviado a revista Agrocienca).

La QD_{azul} (disponibilidad de agua azul) se estimó mediante la siguiente expresión:

$$QD_{azul} [x, t] = QMM [x, t] - Q_{ecológico} [x, t] [volumen/tiempo]$$

Donde QMM (m³/mes) corresponde a escorrentía o caudal natural de la cuenca y Q_{ecológico} requisito de caudal ambiental (m³/mes).

Cálculo del caudal ecológico (Q_{ecológico}). Se estimó considerando el valor mínimo para cada mes entre los siguientes casos: 50% del caudal con 95% de probabilidad de excedencia y el 20% del caudal medio anual. Se utilizó una data de 25 años y la metodología elaborada por la DGA (Decreto 14 letra b). Los valores faltantes de la zona alta y baja se estimaron a través de la transposición de cuencas, con el 95% de excedencia.

Cálculo del índice de sostenibilidad de la huella hídrica gris de la agricultura (HHS_{gris}). El cálculo del índice mensual de contaminación de las aguas (HHS_{gris}) fue establecido como la capacidad de asimilación de desechos consumidos, según la siguiente ecuación:

$$HHS_{gris} [x, t] = \frac{\Sigma HH_{gris} [x, t]}{QMM [x, t]} [-]$$

Donde (ΣHH_{gris}) (m³/mes) corresponde a la sumatoria de las HH_{gris} de los cultivos desarrollados en la cuenca, evaluados según el aporte de nitrógeno, el procedimiento

se explica en Novoa *et al.*, (artículo en proceso de publicación) y QMM corresponde a escorrentía o caudal natural de la cuenca (m^3/mes) (Hoekstra *et al.*, 2012).

El índice de sostenibilidad HHS_{azul} se clasificó en cuatro niveles: <1 como bajo, entre 1-1,5 como moderado, entre 1,5 – 2 como significativo y >2 como severo, de escasez de agua. Además, se estimó el número de meses en que el HH_{azul} excede la disponibilidad de agua.

El índice de sostenibilidad HHS_{gris} se clasificó en dos niveles: entre 1 – 2 su capacidad asimilación ha sido totalmente consumida y >2 cuando se ha superado la normas de calidad ambiental del agua. Ambos índices se calcularon para las secciones 1° y 3° de la cuenca utilizando la data de estaciones representativas de cada una. En la sección 2° no existe una estación aforada, por lo que no pudieron ser estimados.

Análisis estadísticos. Se realizaron análisis de correlación para las variables hidrológicas, según el coeficiente de correlación de Pearson, a través del programa STATISTICA 8.0. Para establecer la tendencia de HH_{azul} y QD_{azul} a lo largo de los años se realizó un análisis de descomposición de series temporales, en componente estacional (S_t) y componente de tendencia (T_t).

Resultados

Sostenibilidad de la huella hídrica azul de la agricultura (HHS_{azul}). El indicador de sostenibilidad hídrica (HHS_{azul}) para los escenarios, húmedo (año 2005), normal (años 2006) y seco (año 2007) se muestra en la figura 2. Se observa que los caudales medios mensuales (QMM) y los caudales medios anuales (QMA) del río Cachapoal fueron mayores en la 3°sección respecto de la 1°sección de la cuenca. En la 3°sección el QMA fue mayor en año 2006, con $361.972.471 m^3/año$ y en la 1° sección fue mayor en el año 2005 con $175.744.700 m^3/año$. Además, en ésta última el QMM mostró el mayor volumen de agua en los meses de noviembre y diciembre, en cambio, en la 3°sección el mayor QMM se observó mes de julio. Producto de lo anterior, el caudal ecológico ($Q_{ecologico}$) mostró ser mayor en los meses estivales en la 1°sección y en los meses de invierno en la 3°sección (Fig. 2).

En relación a la disponibilidad hídrica (QD_{azul}) calculada, fue un 70 % menor en la 1°sección y un 38 % en la sección 3°en el año seco (año 2007), respecto del año húmedo (año 2005) (Fig. 2).

La figura 3 muestra que independiente del escenario *i.e.*, año seco, normal o húmedo, o la sección del río analizada *i.e.*, sección alta y baja, se observó un mínimo en la QD_{azul} , (agua disponible) en los meses de abril y mayo, en la cuenca del río Cachapoal.

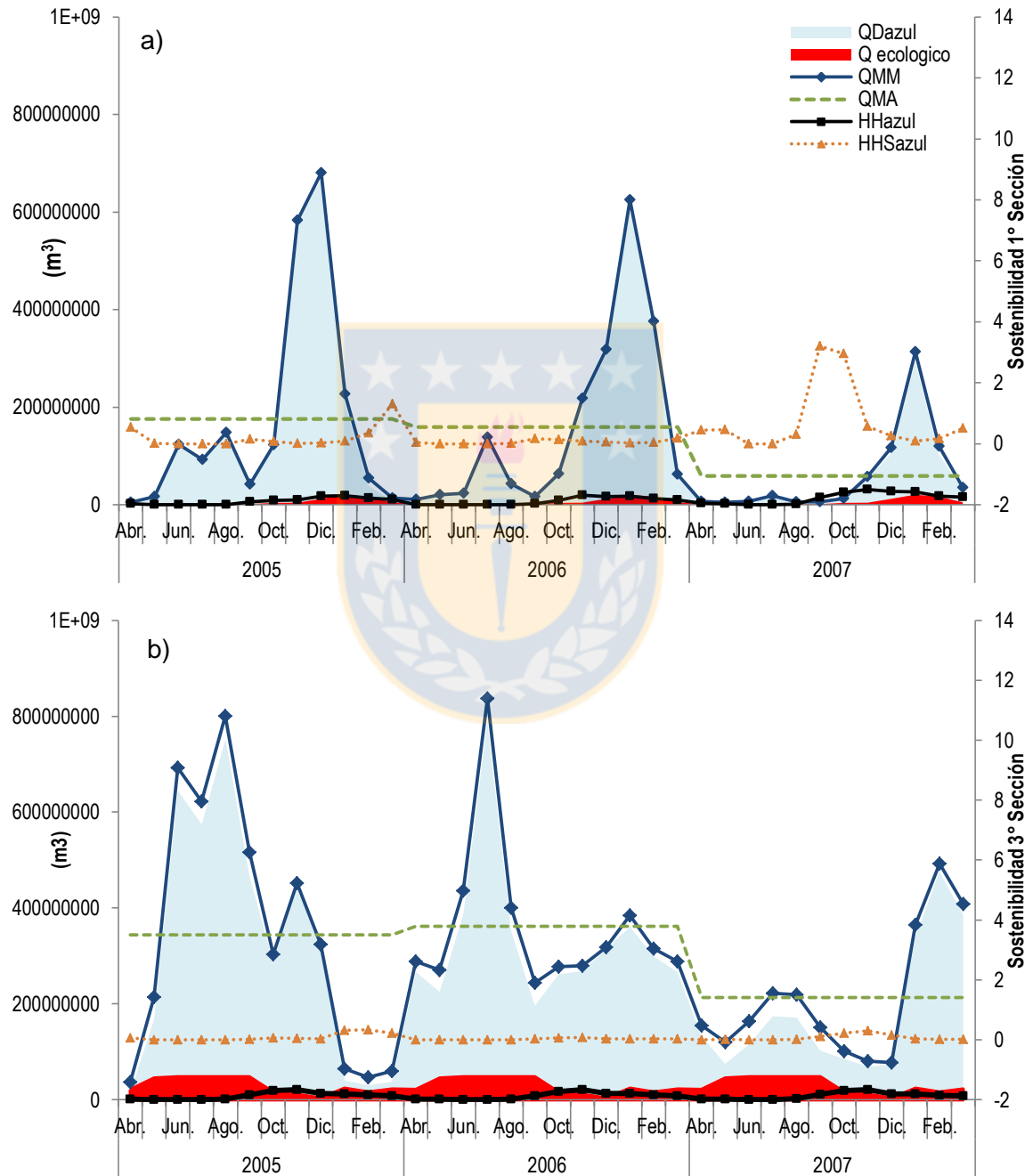


Figura 4.3.2 Índice de sostenibilidad de la huella hídrica azul (HHS_{azul}) de la cuenca del río Cachapoal: a) 1° sección (alta), b) 3° sección (baja).

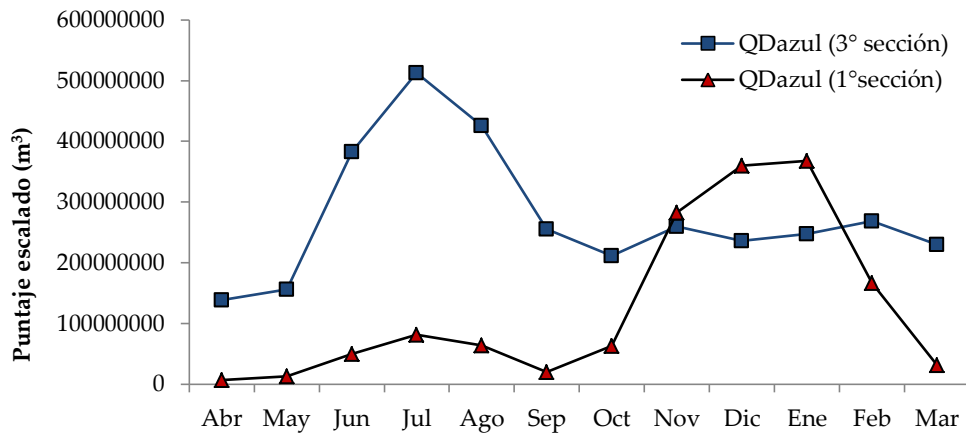


Figura 4.3.3 Componente estacional de QD_{azul} en la cuenca del río Cachapoal.

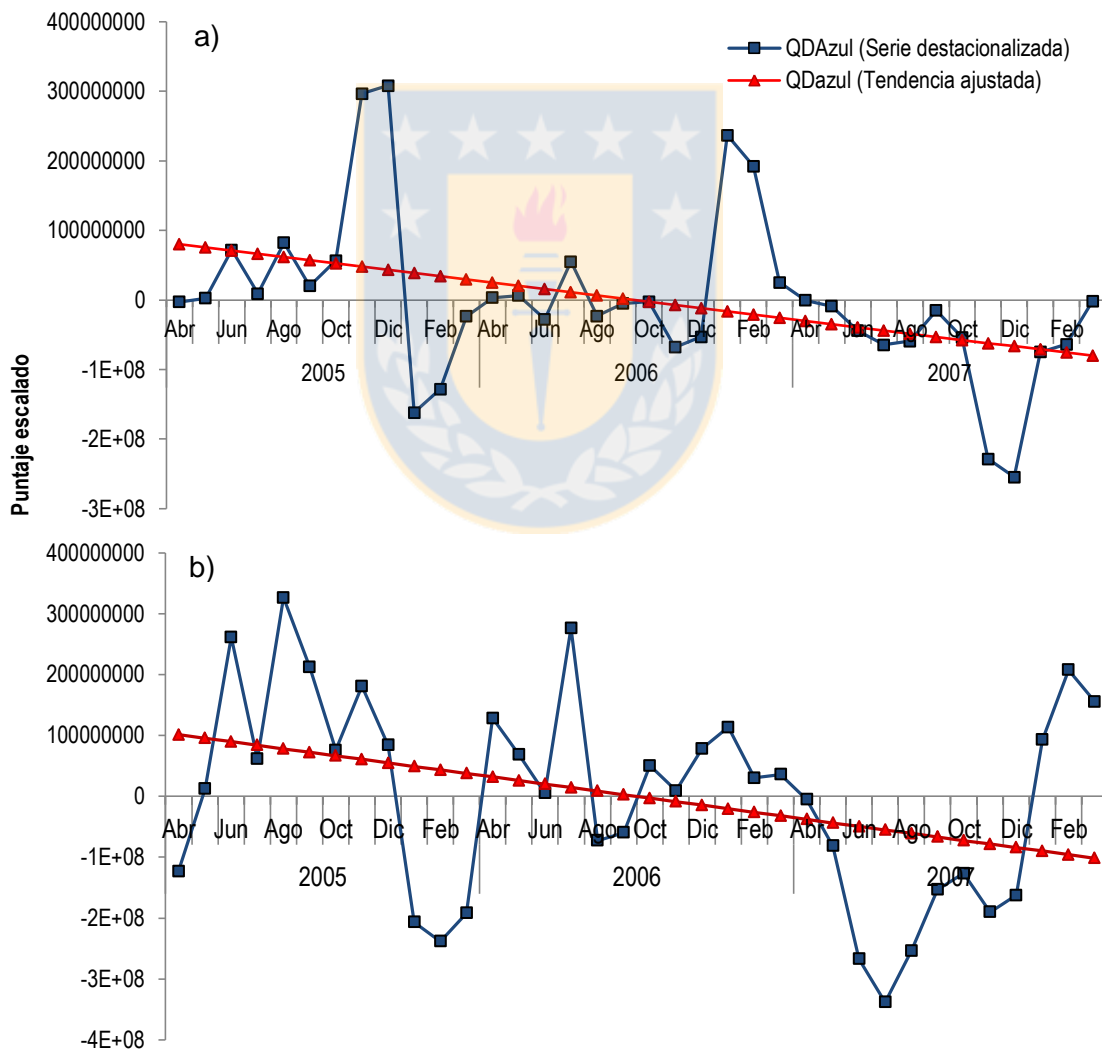


Figura 4.3.4 Componente de tendencia (Tt) y serie desestacionalizada (St) del consumo de QD_{azul} de la cuenca del río Cachapoal: a) 1°sección (alta), b) 3°sección (baja).

En relación al componente destacionalizado (St) de la QD_{azul} en la cuenca del río Cachapoal, la serie de tendencia proyectó un componente lineal (Tt), obtenido a través de un ajuste de regresión lineal, donde la tendencia fue a disminuir el QD_{azul} en el tiempo en ambas secciones (1°sección, $R^2 = 0,20$; pendiente = -4597043; $P = 0,0055$) y (3°sección, $R^2 = 0,14$; pendiente = -5800324; $P = 0,0237$) (Fig. 4).

El consumo de HH_{azul} (m^3) en la cuenca del río Cachapoal fue mayor en el año 2007 para la 1°sección con 163.673.566 m^3 y el año 2007 junto al 2005 en la 3°sección (Fig. 2). El componente estacional de la HH_{azul} , muestra el comportamiento mensual de esta variable (St) donde los consumos de la HH_{azul} de los cultivos son menores en los meses de abril, mayo, junio, julio y agosto (Fig. 5).

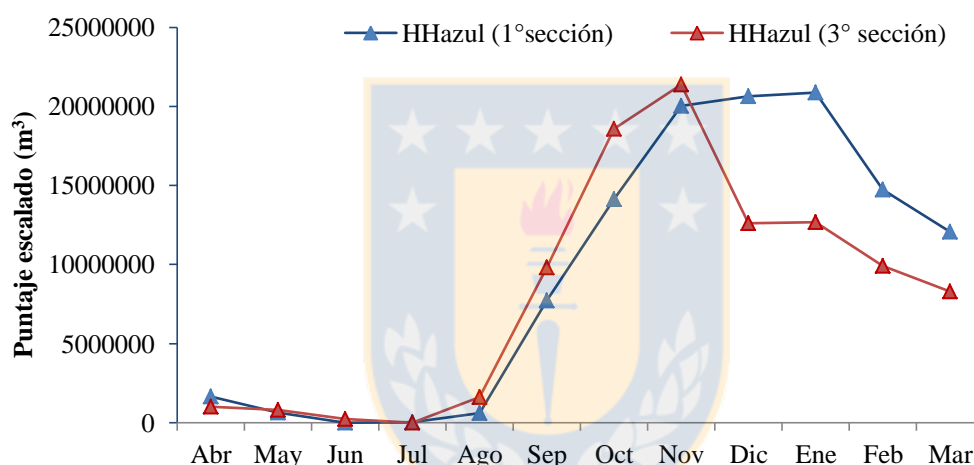


Figura 4.3.5 Componente estacional del consumo de HH_{azul} (St) para la cuenca del río Cachapoal. Estimado independiente de la condición de año: húmedo, normal y seco.

En la serie desestacionalizada, se identificó un componente lineal, según el ajuste de regresión lineal. La tendencia fue a aumentar el consumo de HH_{azul} a través del tiempo en la 1°sección ($R^2 = 0,34$; pendiente = 235950,3; $P = 0,0002$) y a mantenerse constante en la 3°sección ($R^2 = 0,0002$; pendiente = -781,6; $P = 0,9322$) (Fig. 6).

Según lo anterior, el indicador de sostenibilidad HHS_{azul} clasificó a la 1°sección como insostenible en el año 2007 (seco), esto es escasez severa y significativa en los meses de septiembre, octubre y enero. En el año 2006 la escasez sería moderada, sólo en el mes enero sería severa; y en el año 2005, se clasificaría como de escasez

moderada a significativa en los meses de enero, febrero y marzo. En cambio, para la 3° se clasifica como escasez significativa sólo el mes de enero y en todos los años estudiados (Fig. 2).

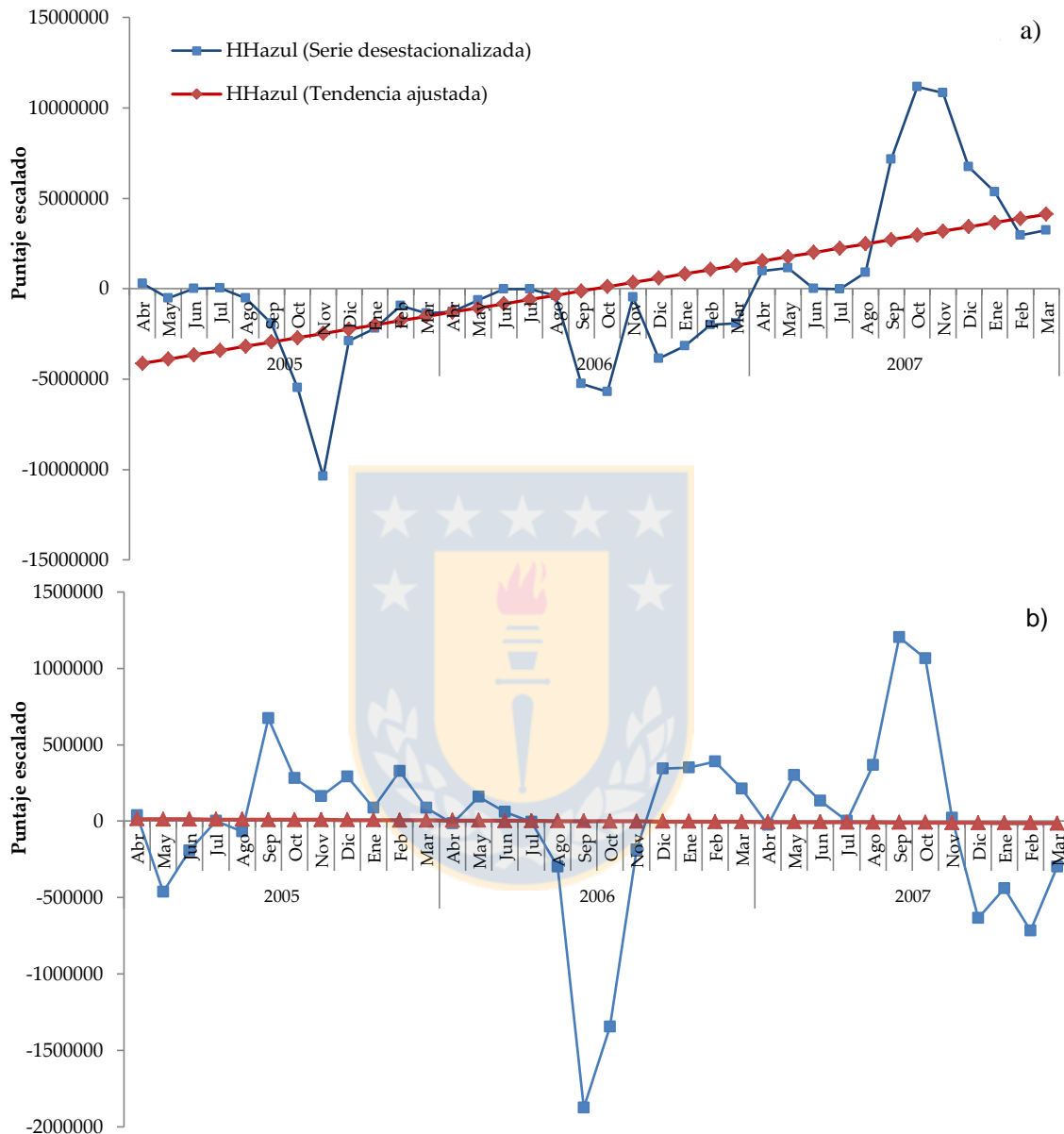


Figura 4.3.6 Componente de tendencia (Tt) y serie desestacionalizada del consumo de HH_{azul} de la cuenca del río Cachapual: a) 1°sección (alta), b) 3°sección (baja).

Sostenibilidad de la huella hídrica gris de la agricultura (HHS_{gris}). El mayor consumo de HH_{gris} (ha) se observó en el año 2007, con un volumen hídrico de 85.019.956 m³/año para la 1°sección y 68.289.114 m³/año en 3°sección (Fig. 7).

El indicador de sostenibilidad HHS_{gris} evaluado por el aporte de nitrógeno en los cultivos clasificó a la 1ª sección como insostenible en el mes septiembre del año 2006, con una capacidad de asimilación consumida. Del mismo modo, en los meses de mayo, junio y agosto del año 2007 se clasificaría con una capacidad de asimilación consumida, en que se superaría además, las Normas de Calidad Ambiental en el mes de septiembre. En cambio, en la 3ª sección, no se generaría insostenibilidad hídrica (Fig. 7).

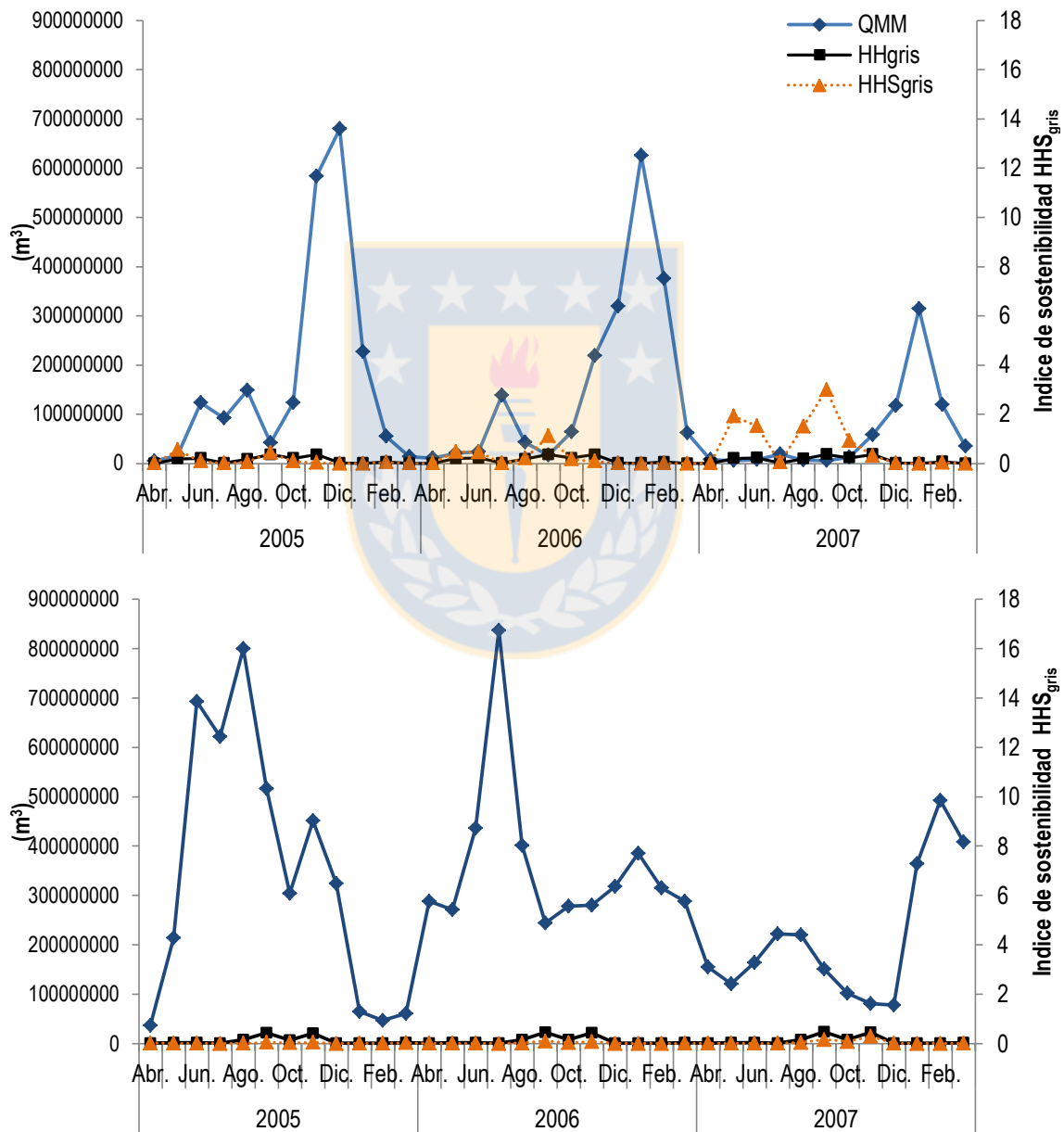


Figura 4.3.7 Sostenibilidad de la huella hídrica gris (HHS_{gris}) de la cuenca del río Cachapoal: a) 1ª sección (alta), b) 3ª sección (baja).

Discusión

En este estudio de la huella hídrica de la cuenca del río Cachapoal, incorporó variaciones espaciales y estacionales de la cuenca como datos de entrada de acuerdo a lo planteado por Hoekstra *et al.*, (2016). El análisis de escenarios con años húmedos, normales y secos seleccionados de una data de 34 años de observaciones (DGA, 2016), fueron útiles para visualizar incertidumbres asociadas a las condiciones climáticas y demográficas que afectan la eficiencia del recurso hídrico (Dong *et al.*, 2013). Enfoques basados en estos escenarios han sido aplicados para explorar y analizar las estrategias de manejo, así como para apoyar a los gestores del agua y actores responsables de proponer soluciones, como lo reportado por De Miguel *et al.* 2015b, el caso de una cuenca Española.

En la actualidad, el cálculo del caudal ecológico toma importancia a la hora de evaluar la sostenibilidad hídrica de una cuenca (Richter, 2012). Al respecto la normativa Chilena no discrimina entre la fluctuación natural o antrópica de los volúmenes de un curso de agua. Sin embargo, es aconsejable establecer los caudales mínimos dentro de los cuales se garantiza la sostenibilidad ambiental de la cuenca a largo plazo, además de establecer un programa de vigilancia preventivo permanente, ya que según lo observado en este estudio el volumen de agua destinado a mantener el medio ambiente es mínimo (Fig. 2)

En la cuenca del río Cachapoal el daño ambiental generado por las inadecuadas prácticas agrícolas, tiene relación directa con la calidad de las aguas superficiales. En esta cuenca la HHS_{gris} principalmente en la 1°sección mostro el mayor número de meses con insostenibilidad en el periodo seco (Fig. 2). El nitrógeno es un fertilizante que se utiliza intensivamente en la práctica agrícola, ya que actúa como nutriente limitante del crecimiento y la producción de los cultivos (Arumí *et al.*, 2005; Pizarro *et al.*, 2010; 2014). En una cuenca la variación espacial en la aplicación del nitrógeno tiene directa relación con el uso del suelo, la topografía (*i.e.*, la humedad, el grupo hidrológico y nivel de erosión) junto a la precipitación. Estudios realizados por Yevenes *et al.*, (2016) en cuencas de la VII y VIII Región de Chile, revelan que el uso de suelo agrícola explica el 60 % de la variación de la calidad del agua del río.

La insostenibilidad hídrica de la HHS_{azul} se observó principalmente en la 1°sección (alta) de la cuenca del río Cachapoal. Esta situación, en un año húmedo se

identificó sólo en el mes de marzo, en cambio, en un año seco se observó en septiembre y octubre (Fig. 2), coincidiendo con un disminuido aporte de agua en condiciones naturales (disponibilidad del agua superficial). Esto dio como resultado el incumplimiento de los caudales ecológicos (Fig. 4 y 6). En estos meses la satisfacción de la demanda de agua se realizaría gracias a la utilización de agua procedente de la extracción subterránea (DGA, 2016). Además, los valores calculados ratificarían que la variabilidad climática de la zona puede generar el incumplimiento de los caudales ecológicos debido al efecto del tipo de cuenca, esto es, nívio-pluvial.

En la sección alta se observó una mayor disponibilidad hídrica en los meses de verano, opuesto a lo que sucede en la sección baja, donde la disponibilidad de agua fue mayor en los meses de invierno, característico para un clima mediterráneo (BCN, 2010). Por lo tanto, el aumento de las temperaturas, la variabilidad y disminución del caudal en la época estival podrían cambiar los suministros de agua y demandas regionales y, en consecuencia, agravar la condición de escasez hídrica en la cuenca (Wang *et al.*, 2016).

Como medida preventiva la ponderación de estos indicadores podría ser más restrictiva, ya que estudios de De Miguel *et al.*, (2015) señalan como insostenibles niveles sobre el 0,5 (los que en este estudio fueron de >1), cambiando la capacidad de carga ambiental de la cuenca del río Cachapoal.

Dada la insostenibilidad hídrica estimada en la cuenca del río Cachapoal, sería esencial considerar entre otros, aumentar la eficiencia del uso del recurso, considerando por ejemplo mejores prácticas agrícolas, ya que se estima que sólo el 55% del agua suministrada en las actuales condiciones sería utilizada por el cultivo. Además, se debería considerar la factibilidad de emplear para el riego aguas marginales, por ejemplo, aguas servidas tratadas y/o de drenaje (Oyarzun *et al.*, 2008; Iglesias & Garrote, 2016).

El efecto del aumento de la superficie regable en la cuenca, debido a la mayor demanda por alimentos, se vería reflejado en la tasa de consumo de agua azul con respecto a los caudales naturales, que aumentaría de forma considerable. Sin embargo, es importante destacar que en la 3ª sección (tramo bajo), la tendencia es a mantener la HH_{azul} , situación determinante para conservar la sostenibilidad de esta área, por la cual, ambientalmente no resultaría significativamente afectada (Fig. 6).

Para una asignación eficiente del agua, facilitando un equilibrio entre la oferta y la demanda, el índice HHS_{azul} , debería ser monitoreado permanentemente, ya que, este índice permite visualizar la presión que ejercen las actividades antrópicas sobre los recursos hídricos locales, en función de la disponibilidad temporal de los mismos (Divakar *et al.*, 2011).

Un futuro optimista dependería de que la agricultura establezca, gestione y consuma agua en forma sostenible (Iglesias & Garrote, 2015). Estas medidas requieren de programas de información y de educación, con el objeto de promover la conservación del agua y suelo (Foladori & Tommasino, 2000). El índice de la huella hídrica contribuye además a la planificación del suministro de agua desde una perspectiva ambiental, ya que revela la disponibilidad y/o escases del agua y la capacidad de carga del área evaluada (Jaramillo y Destouni, 2015). Por lo general, las áreas con escasez y contaminación de sus cursos de agua, tienden a incurrir en el aumento de los costos de suministro y tratamiento de agua, a veces incluso superior a los beneficios, resolviendo los problemas desde el lado de la oferta (Tolón *et al.*, 2013). Medidas y estrategias de reducción de la $HH_{agrícola}$, en la mayoría de los casos, se orientan a la tecnificación del riego y a la producción de cultivos intensivos que consumen menor cantidad de agua (Cazcarro *et al.*, 2015). No menos importante sería, en la cuenca del Cachapoal revisar de los calendarios de siembra, teniendo en cuenta que enero es el mes con mayor insostenibilidad del recurso agua (Fig. 2) y que el cultivo en la sección baja de la cuenca presenta ventajas comparativas, donde el suministro de agua es mayor (Fig. 3).

Finalmente, al analizar la sostenibilidad de la huella hídrica agrícola en una cuenca mediterránea, como la del río Cachapoal, se evidencia que el factor estacional ejerce una presión significativa sobre el consumo del recurso hídrico, observándose un nivel de escasez severa, agravado en los periodos de sequía. Sin embargo, mantener constante y eficiente uso el recurso, es determinante para conservar la capacidad de carga. Además, se pone de manifiesto la vulnerabilidad de la calidad del agua en los usos del suelo, ya que la actividad agrícola amplifica la degradación ambiental, al igual que la disminución de la disponibilidad del recurso hídrico tiene directa relación con la insostenibilidad de la huella hídrica.

REFERENCIAS

Aldaya, M. M., Martínez-santos, P. & LLamas, M. R.(2010). Incorporating the water footprint and virtual water into policy: reflections from the Mancha occidental region, Spain. *Water Resource Managed*, 34 (24), pp. 941–958.

Agenda 21, United Nations (1992). In *Proceedings of the United Nations Conference on Environment & Development*, Rio de Janeiro, Brazil, 3–14.

Antúñez., B. A. & Felmer, E. S .(2009). Boletín del Nodo de riego en el seco, Región de O'Higgins. Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Boletín INIA.

Arumí, J. L., Oyarzún, R. A., & Sandoval, M. (2005). A discussion about natural protection against groundwater pollution by nitrates in the Central Valley of Chile. *Hydrological Sciences- Journal*, 50(2),pp. 331–340.

BCN, Biblioteca del Congreso Nacional. (2010). Sistema integrado de información Territorial (SIIT); Región de O'Higgins : BCN.

Bértola, L. & Ocampo, J.A. (2013). *El Desarrollo Económico de América Latina desde la Independencia*. México: FCE.

Billib, M., Bardowicks, K. & Arumí J. L. (2009). Integrated water resources management for sustainable irrigation at the basin scale. *Chilean Journal of Agricultural Research*, **N** (69), pp. 69-80.

Bonilla, C., Reyes, J. & Magri, A. (2009). Water erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, **n** (70), pp. 159-169.

Cabral, G., Fernando, L. & Nespolo, C. M. (2014). Racionamiento del agua ante fluctuaciones de disponibilidad: Una discusión teórica para el caso de Chile. *Idesia*, **N** (1), pp. 129-137.

Cazcarro, I., Duarte, R., Martín-Retortillo, M., Pinilla, V., & Serrano, A. (2015). How Sustainable is the Increase in the Water Footprint of the Spanish Agricultural Sector? A Provincial Analysis between 1955 and 2005–2010. *Sustainability*, 7(3), pp. 5094-5119.

Chartzoulakisa, K. & Bertaki, M. (2015). Sustainable water management in agriculture under climate change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4 (2), pp. 88-98.

CIREN, Centro de información recursos naturales. (2010). Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile .Síntesis de Resultados Región del Lib. Gral. Bernardo O`Higgins: CIREN.

Cortés, A. E., Oyarzún, R., Kretschmer, N., Chaves, H., Soto, G., Soto, M., Amézaga, J., Oyarzún, J., Rötting, T., Señoret, M. & Maturana, H. (2012). Application of the Watershed Sustainability Index to the Elqui river basin, North-Central Chile. *Obras y Proyectos*, 12 (2), pp. 57-69.

Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D. B., Howden, S. M., Smith, D. R. & Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nat Clim Change*, 4 (2), pp. 287–291.

Herath, I., Green, S.R., Horne, D., Singh, R. & Clothier, B. E. (2013). Water footprinting of agricultural products: Evaluation of different protocols using a case study of New Zealand wine. *Journal of Cleaner Production*, 44 (3), pp.156-167.

Hunter, C., Gironás, J., Bolster, D. & Karavitis, C. (2015). A Dynamic, Multivariate Sustainability Measure for Robust Analysis of Water Management under Climate and Demand Uncertainty in an Arid Environment. *Water*, 7 (11),pp. 5928-5958.

De Miguel, A., Hoekstra., A. Y. & García-Calvo, M. (2015 b). Sustainability of the water footprint of the Spanish pork industry. *Ecological Indicators*, (57), pp. 465–474.

De Miguel, Á., Kallache, M. & García-Calvo, E. (2015a). The water footprint of agriculture in Duero River Basin. *Sustainability*, 7 (4), pp. 6759–6780.

DGA, Dirección general de agua. (2012). Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. División de Hidrología. Dirección general de Aguas Ministerio de Obras Públicas. Chile: DGA.

DGA, Dirección general de agua. (2016). Atlas del agua, Chile: DGA.

<http://www.dga.cl/atlasdelagua/Paginas/default.aspx>

Divakar, L., Babel, M.S., Perret, S.R. & Das Gupta, A. (2011). Optimal allocation of bulk water supplies to competing use sectors based on economic criterion – an application to the Chao Phraya River Basin, Thailand. *Journal Hydrology*, 401(2), pp. 22–35.

Dong, C., Gerrit, S. & Van De Giesen, N. (2013). Scenario development for water resource planning and management: A review. *Technological Forecasting & Social Change*, 80 (), pp. 749-761.

Donoso, G., Franco, G., Blanco, E. & Lira, J. (2014). An estimation of agriculture water footprint in Chile. *Water footprints and agricultural growth: The case of Chile*.

Ecosystems and Human Well-Being (2005). *Wetlands and Water Synthesis; Millennium Ecosystem Assessment*: Washington, DC, USA.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2011). *Climate change, water and food security*. Land and Water Development Division, Rome: FAO. Recuperate de <http://www.fao.org/3/a-i2096e.pdf>.

Foladori, G. & Tommasino, H. (2000). El concepto de desarrollo sustentable treinta años después. *Desarrollo y Medio Ambiente*, 1(1), pp. 41-56.

Fulton, J., Cooley, H. & Gleick, P. (2012). *California's Water Footprint*, Pacific Institute, Oakland, CA, USA. **III**

Fulton, J., Cooley, H. & Gleick P. (2014). Water Footprint Outcomes and Policy Relevance Change with Scale Considered: Evidence from California. *Water resources management*, 28 (11), pp. 3637-3649.

Gao, H. (2014). Water saving effect on integrated water resource management. *Resour. Conserve Recycle*, 93, pp. 50–58.

Gerten, D., Heinke, J., Hoff, H., Biemans, H., Fader, M. & Waha, K. (2011). Global water availability and requirements for future food production. *Journal of Hydrometeorology*, 12(1), pp. 887-898.

Grey, D. & Sadoff, C.W. (2007). Sink or swim? Water security for growth and development. *Water Policy*, 6 (4), pp. 545-571.

Gleick, P.(1996). Basic water requirements for human activities: Meeting basic needs. *Water Int.* 21 (3), pp. 83–92.

González, L.; González, A. & Mardones, A. (2003). Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile. Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción. *Revista Geológica de Chile*, 30 (1), pp. 3-22

Hejazi, M. I., Edmonds, J. L., Clarke, P., Kyle, E., Davies, V., Chaturvedi, M., Wise, P., Pate, J., Eom, L. & Calvin, K. (2014). Integrated assessment of global water scarcity over the 21st century under multiple climate change mitigation policies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18 (2), pp. 2859-2883.

Hoekstra, A.Y. (2012). The hidden water resource use behind meat and dairy. *Animal Frontiers*, 2(2), pp. 3-8.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A.K. & Zhang, G. P. (2016). Water footprints and sustainable water allocation. *Sustainability*, 8,pp. 2 -23.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. & Mekonnen, M.M. (2001). *The Water Footprint Assesment Manual: Setting the Global Standard*. London, UK: Earthscan.

Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., Chapagain, A. K., Mathews, R. E. & Richter, B. D. (2012). Global Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprints versus Blue Water Availability. *PLoS ONE*, 2012, 7 (3), pp. 32-68.

Iglesias, A. & Garrote, L. (2015). Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. *Agricultural Water Management*, 155, pp. 113-124.

INE, Instituto Nacional de Estadísticas Chile. Censo agropecuario y forestal. Santiago, Chile: INE, 2007.

INE Instituto Nacional de Estadísticas. Compendio estadístico regional. Santiago, Chile, INE, 2015.

Jaramillo, F. & Destouni, G. (2015). Local flow regulation and irrigation raise global human water consumption and footprint. *Science*, 350 (3), pp. 1248-1250.

- Khan, S. & Hanjra, M. A. (2009). Footprints of water and energy inputs in food production—Global perspectives. *Food Policy*, 34 (2), pp. 130–140.
- Keys, P. W., Wang-Erlandsson, L. & Gordon, L. J. (2016). Revealing Invisible Water: Moisture Recycling as an Ecosystem Service. *PLoS ONE*, 11 (3), pp. 32-40.
- Konar, M., Dalin, C., Suweis, S., Hanasaki, N., Rinaldo, A. & Rodriguez-Iturbe, I. (2011). Water for food: The global virtual water trade network. *Water Resources Research*, 47(4), pp. 1-17.
- Liu, C., Kroeze, C., Hoekstra, A. Y. & Gerbens-Leenes, W. (2012). Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers. *Ecological Indicators*, 2012, 18 (4), pp. 42–49.
- Nana, E., Corbari, C. & Bocchiola, D. (2014). A model for crop yield and water footprint assessment: Study of maize in the Po valley. *Agricultural systems*, 127(4), pp. 139-149.
- Novoa, V., Rojas, O., Arumí, J.L., Ulloa, C., Urrutia, R. & Rudolph, A. (2016). Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(2), pp. 35-50.
- Malghan, D. (2010). On the relationship between scale, allocation, and distribution. *Ecol. Econ.* 69 (11), pp. 2261–2270.
- Martínez-Austria, P. (2013). Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2013, 4(5), pp. 165-180
- Mays, L. (2006). *Water Resources Sustainability*; McGraw-Hill Professional: New York, NY, USA.
- Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 4(5), pp. 1577–1600.
- Mekonnen, M. M., Pahlow, M., Aldaya, M. M., Zarate, E. & Hoekstra, A. Y. (2015). Sustainability, Efficiency and Equitability of Water Consumption and Pollution in Latin America and the Caribbean. *Sustainability*, 7 (2), pp. 2086-2112.

Min, S., Zhang, X., Zwiers, F. W. & Hegerl, G. C. (2011). Human contribution to more intense precipitation extremes. *Nature*, 470 (3), pp. 378-381.

Mihelcic, J. R., Crittenden, J. C., Small, M. J., Shonnard, D. R., Hokanson, D. R., Zhang, Q., Chen, H., Sorby, S. A., James, V. U. & Sutherland, J. W. (2003). Sustainability science and engineering: The emergence of a new metadiscipline. *Environ. Sci. Technol*, 37 (2), pp. 5314–5324.

MOP, ministerio de obras públicas. (2013). Estrategia nacional de recursos hídricos 2012-2025. Resumen ejecutivo, Santiago, Chile, 2013.

Mubako, S. & Lant. (2013). Agricultural virtual water trade and water footprint of United States. *Annals of the association of American geographers*, 103(2): 385 -396.

ODEPA, oficina de estudios y políticas agrarias. Cambio climático Impacto en la Agricultura Heladas y Sequía. Santiago, Chile: ODEPA.
http://www.odepa.cl/wp-content/files_mf/1388169148cambioClimatico.pdf.

Oyarzun, R., Arumí, J.L., Álvarez, P. & Rivera, D. (2008). Water use in the Chilean agriculture: current situation and areas for research development. *Agricultural Water Management Research Trend*. NY, USA: Nova Science Publisher.

Pizarro, J., Vergara, P., Morales, J., Rodríguez, J. & Vila, I. (2014). Influence of land use and climate on the load of suspended solids in catchments of Andean rivers. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186 (2), pp. 835–843.

Pizarro, J., Vergara, P., Rodríguez, J., Sanhueza, J. & Castro, J. (2010). Nutrients dynamics in the main river basins of the centre-southern region of Chile. *Journal of Hazardous Materials*, 175 (2), pp. 608–613.

Pfister, S., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. *Environmental Science & Technology*. American Chemical Society, 43 (9), pp. 4098-4104.

Porter, J. R., Xie, L., Challinor, A. J., Cochrane, K., Howden, S. M., Iqbal, M. M., Lobell, D. B. & Travasso, M. I (2014). Food security and food production systems. *In: Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O. & Genova, RC.*(2014). *Climate Change: Impacts,*

Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: *Cambridge University Press*.

Richter, B. D., Davis, M. M., Apse, C. & Konrad, C. A. (2012). presumptive standard for environmental flow protection. *River Research and Applications*, 8 (2), pp. 1312-1321.

Rogers, P. & Hall, A. W. (2003). *Effective Water Governance*. Technical Paper No. 7. Stockholm: Global Water Partnership.

Rojas, O., Mardonez, M., Aguayo, M. & Arumí, J. L. (2014). Una revisión de las inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, tipologías y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, pp. 177-192.

Rost, D. & Heyder, U. (2008). Human alterations of the terrestrial water cycle through land management. *Adv. Geosci.*, 18 (1), pp. 43–50.

Rosenzweig, C., Tubiello, F.N., Goldberg, R., Mills, E. & Bloomfield, J. (2002). Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change. *Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions*, 12 (1), pp. 197-202.

Russo, T., Devineni, N. & Lall, U. (2014a). Assessment of Agricultural Water Management in Punjab, India Using Bayesian Methods. In *Sustainability of Integrated Water Resources Management: Water Governance, Climate and Ecohydrology*; Setegn, S., Donoso, M., Eds.; Springer: Berlin, Germany.

Russo, T., Alfredo, K. & Fisher, J. (2014b). Sustainable Water Management in Urban, Agricultural, and Natural Systems. *Water*, 6 (12), pp. 3934-3956.

Sánchez, M. & Carvacho, L. (2013). Aproximación a la determinación del déficit hídrico en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile, a partir de imágenes MODIS y datos meteorológicos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 55, pp. 109-124.

Schlenker, W. & Roberts, M.J. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106 (37), pp. 15594-15598

Siebert, S. & Döll, P. (2010). Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation. *Journal Hydrology*, 384 (2), pp. 198–217.

Sotelo, J. A., Olcina, J., Tolon, A., Garcia, J. M., Bolivar, X., Garcia, F., Soltelo, M. & Sotelo, I. (2011). Huella hídrica, desarrollo y sostenibilidad en España. *Fundación Mapfre*, 2011, 1(1), pp 9- 421.

StatSoft., Inc. (2001). *Statistica* (data analysis software system).www.statsoft.com.

Stoeglehner, G., Edwards, P., Daniels, P. & Narodoslowsky, M. (2011). The water supply footprint (WSF): a strategic planning tool for sustainable regional and local water supplies. *Journal of cleaner production*. 19 (15). pp. 1677-1686.

Tolón, A., Lastra, X. & Fernández, V. (2013). Huella hídrica y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos. *Revista Electrónica de Medio Ambiente*, 14, pp. 56-86.

Vanham, D.; Hoekstra, A.Y. & Bidoglio, G.(2013). Potential water saving through changes in European diets, *Environment International*, 6 (2), pp. 45-56.

Van Oel, P. R., Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y (2009). The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment. *Ecological Economics*, 69 (4), p. 82–92.

Wang, X., Zhang, J., Shahid, S., Guan, E., Wu, Y., Gao, J. & He, R. (2016). Adaptation to climate change impacts on water demand. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2 (2), pp. 8-99.

WWAP, United nations world water assessment programme. (2015). The United Nations: WWAP. <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002318/231823E.pdf>

Wheeler, T. & von Braun, J. (2013). Climate change impacts on global food security. *Science*, 341 (6), pp. 508–513. doi:10.1126/science.1239402.

Yevenes, M., Arumí, J. L. & Farías, L. (2016). Unravel biophysical factors on river water quality response in Chilean Central-Southern watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment*. IIIII

Zeng, Z., Liu, J., Koeneman, P. H., Zarate, E. & Hoekstra, A. Y. (2012). Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heine River Basin in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16 (4), pp. 2771–2781.

Zwiers, F. W., Zhang, X. & Feng, Y. (2011). Anthropogenic influence on long return period daily temperature extremes at regional scales. *Journal of Climate*, 24(3), pp. 881-892.

Zhineng, H., Yazhen, C., Liming, Y., Weib, C. & Chaozhi, L. (2016). Optimal allocation of regional water resources: From a perspective of equity–efficiency tradeoff. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, pp. 102-113.

Zhuo, L.; Mekonnen, M. M.; Hoekstra, A. Y. & Wada, Y.(2016). Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River Basin (1961-2009). *Advances in Water Resources*, 87 (3), pp. 21-41.



5.- DISCUSIÓN GENERAL

El análisis de la huella hídrica a nivel de cuenca hidrográfica posibilita el desarrollo de modelos cada vez más complejos, al incluir factores que condicionan el ciclo del agua, simulan su dinámica y las variaciones espaciales a lo largo del territorio (Van Oel *et al.*, 2009). En este estudio, se incluyó variables como: precipitación total y efectiva, temperatura, radiación solar, viento, insolación, evapotranspiración de referencia. Entre las propiedades del suelo: humedad, tasa de infiltración, profundidad radicular e información geo-referenciada; además, de datos de los cultivos como: valores de K_c , etapas, profundidad radicular, fracción de agotamiento crítico por periodo de desarrollo, que incluye estimaciones de evapotranspiración de los cultivos y requerimiento de riego, lo que constituye un avance importante en la caracterización de esta cuenca, desde un punto de vista ambiental con implicancias económicas y sociales (Hejazi *et al.*, 2014; Jaramillo & Destouni, 2015).

En la cuenca del río Cachapoal, la agricultura es la actividad productiva y económica que presenta la mayor dependencia respecto de las condiciones climáticas locales, siendo ésta la principal responsable por la variación en la producción anual de los cultivos (Bonilla *et al.*, 2008). Dentro de los elementos del clima, la precipitación y la evapotranspiración son las principales causantes de la alternancia periódica de los rendimientos, en condiciones de agricultura de secano y riego (Cuadro 3, Capítulo 2).

El resultado del análisis de los diferentes componentes de la huella hídrica para el río Cachapoal indican que la disponibilidad y la fuente del agua, es un factor clave para la sostenibilidad hídrica (Mekonnen *et al.*, 2015). El agua para riego está influenciada por (i) cambios en los regímenes hidrológicos (*e.i.*, variación en las precipitaciones, evaporación potencial y real y/o escorrentía en la escala de cuenca (Bunn *et al.*, 2002) (ii) el aumento de la competencia entre los usuarios por el agua (Schmidhuber & Tubiello, 2007) y (iii) el período de siembra, crecimiento y métodos de cultivo (Xiong *et al.*, 2010).

El análisis de la data de 34 años de precipitaciones en el área, demostró que esta cuenca presenta marcadas variaciones hídricas entre la 1°sección, zona andina (con las más altas precipitaciones), y la 3°sección, con las menores precipitaciones (aprox. un 52 % de disminución) correspondiente al sector en que el cauce drena la

Cordillera de la Costa (Fig. 3, Capítulo 1). Del mismo modo, el análisis de las precipitaciones permitió agrupar el comportamiento hídrico de la cuenca en años secos, normales y húmedos fluctuando entre 117 y 1.517 mm para los extremos, años secos y húmedos. Debido a que esta región contribuye con un 73,2 % a la producción chilena de cereales es de fundamental importancia para el país, contar con información sobre los factores que inciden en el consumo del agua, entre los cuales se destacan las condiciones de suelo (aluviales) y de clima.

Bajo el supuesto de una disminución del 20 % en el rendimiento de los cultivos de cereales (situación proyectada ante un cambio climático), se observó que el uso del agua resulta menos productivo, ya que por tonelada de producto generado fue mayor el consumo de agua (mayor huella hídrica) (Fig. 3, Capítulo 1). En el análisis de los cultivos de cereales, los valores de productividad aparente del agua (PAA) no evidenciaron el efecto de la condición climática (Fig. 5, Capítulo 1). Donoso *et al.* (2012) planteó que en Chile, los sectores económicos con mayor uso de agua, como es el caso de la agricultura, serían los que obtienen una menor PAA, estimada a nivel nacional con 110 \$/m³ para los cereales, similar a lo calculado en este análisis.

En una superficie total de 69.433 hectáreas, en que se ubican los principales cultivos en la cuenca del río Cachapoal, en el período 2005 - 2007 se estableció que los paltos, olivos, maíz y viñas fueron los cultivos con la mayor HH_{total} (Fig. 5, Capítulo 2), debido a la gran cantidad de agua que es retenida para su crecimiento y fotosíntesis (Osorio, 2013). Es importante destacar que en función de los distintos productos agrícolas, la duración de la temporada (periodo de crecimiento) y la fecha de inicio de los cultivos, influyen significativamente en la evapotranspiración, variables directamente relacionadas con las necesidades hídricas ($r = 0,89$), las que a su vez se ven afectadas por la variabilidad climática (Hoekstra *et al.*, 2012; Tolón *et al.*, 2013).

En el periodo analizado la mayor HH_{total} fue estimada para el año en condición de sequía (2007) producto principalmente a los altos volúmenes requeridos de agua de riego para mitigar tal situación (Sanchez *et al.*, 2013). El año 2007 fue donde se registró el comienzo del periodo seco en el país, situación que se ha prolongado hasta la actualidad (aprox. 7 años), por lo cual la DGA ha debido declarar como zona de riesgo, entre otras, a la cuenca del río Cachapoal (DGA, 2016). Por otra parte, se observó que las variaciones climáticas determinaron los requerimientos hídricos de la

actividad agrícola, ya que éstos, relacionan el flujo hídrico (HH_{total}) con las diversas formas de consumo, estimándose que en un año húmedo el 9 % correspondió a HH_{verde} , 61 % a HH_{azul} y 30 % a HH_{gris} ; en cambio en año normal aumentó el porcentaje de la HH_{verde} hasta un 15 %, disminuyó la HH_{azul} hasta 55%, conservándose en 30% la HH_{gris} . En un año seco sólo el 7 % correspondería a HH_{verde} y el mayor porcentaje a la HH_{azul} con un 66 % (Fig. 1). Los resultados de la variación en la precipitación observada en este estudio para la cuenca del río Cachapoal fue similar al caso descrito por Rodríguez-Casado et al., (2009) para una cuenca mediterránea en España.

En un año de condición normal se observó el mayor consumo de la HH_{verde} ; lo que se atribuye a que el suelo dispondría de la precipitación y humedad necesarias para el crecimiento de los cultivos. El mayor consumo de HH_{azul} , se observó a un año seco, lo que se encuentra correlacionado directamente con el requerimiento de riego de los cultivos ($r = 0,99$) y que es además imprescindible para disminuir el impacto de las heladas (Odepa, 2013a). El año húmedo se observó correlacionado directamente con las precipitaciones ($r = 0,97$) y asociado a la mayor disponibilidad del recurso. En un año seco la mayor parte del agua azul consumida provendría de fuentes subterráneas, ya que, las fuentes superficiales se encuentran disminuidas. Por otra parte, la HH_{gris} se correlacionó directamente con el rendimiento de los cultivos ($r = 0,97$) y el uso de nitrógeno en los fertilizantes para asegurar la producción.

La aplicación de nitrógeno en los cultivos analizados, en promedio se estimó en $375 \pm 35,4$ kg/ha. El agua necesaria para asimilar la lixiviación de nitrógeno en la cuenca en promedio se estimó en $1.550 \text{ m}^3/\text{ton}$ en el mejor escenario, esto es, con una concentración natural de $0,001 \text{ kg/m}^3$. De acuerdo a esta estimación, por ejemplo, cultivos como el maíz presentarían la mayor HH_{gris} por tonelada de producción. Cultivos con el mayor consumo de $HH_{cultivos}$ confirmaron ser los de paltos, olivos, maíz y viñas; y los cultivos con menor demanda del recurso el de cebollas, durazno situación que debe ser considerada para la elección de la actividad productiva, en los costos de exportación y en la sustentabilidad de la producción.

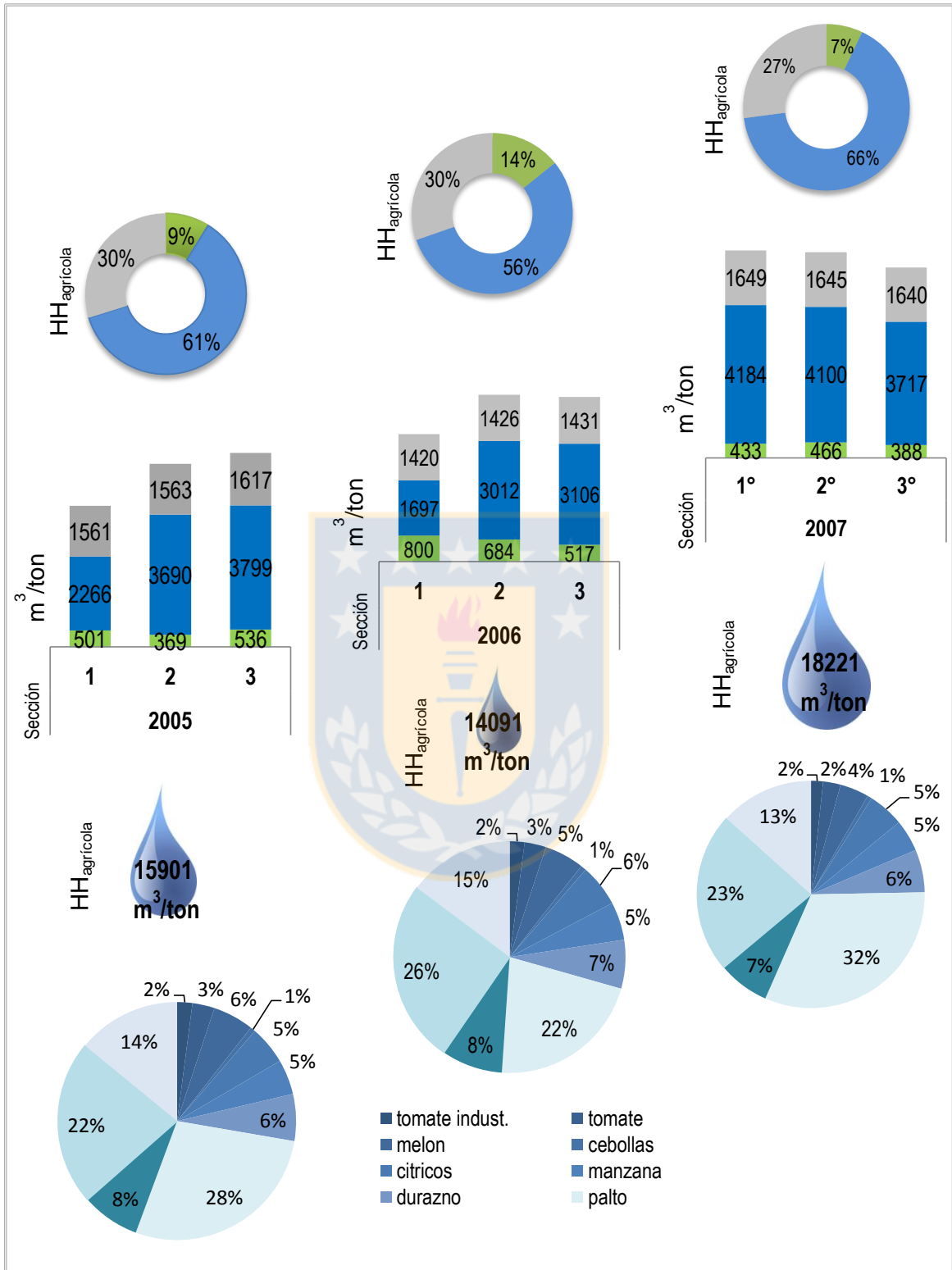


Figura 5.1 Resumen de la Huella hídrica de la agricultura en la cuenca río Cachapal

A pesar que el uso de suelo agrícola de la cuenca del río Cachapoal al año 2007 correspondió a un 63 % para la 1°sección, 67 % en la 2°sección y 90 % en la 3°sección, no se encontraron diferencias en los consumos de las $HH_{agrícola}$ entre las secciones, salvo el consumo de HH_{azul} que fue mayor en la 2° y 3°sección, producto de las extensas superficies de producción (Fig. 2, Capítulo 2).

Evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica

Las inadecuadas prácticas agrícolas repercute directamente en la calidad de las aguas superficiales (Arumí *et al.*, 2006). En esta cuenca la HHS_{gris} fue insostenible primordialmente en la 1°sección, ya que se observó el mayor número de meses con requerimiento de agua mayor la disponibilidad en el periodo seco, debido principalmente a que el nitrógeno es un fertilizante utilizado intensivamente en las prácticas agrícolas, ya que actúa como nutriente limitante del crecimiento y la producción de los cultivos (Donoso, 2006; Pizarro *et al.*, 2010; 2014). En esta cuenca la variación espacial en la aplicación del nitrógeno tiene directa relación con el uso del suelo, la topografía (*i.e.*, la humedad del suelo, el grupo hidrológico del suelo, nivel de erosión) y la precipitación (Tabla 1).

Tabla 5.1 Sostenibilidad de la huella hídrica gris en la cuenca del río Cachapoal.

Sección	Año	QMA	HH_{gris}	HHS_{gris}
1°	2005	175.744.700	79.403.893	
1°	2006	159.731.207	82.194.208	Septiembre= capacidad asimilación ha sido totalmente consumida
1°	2007	58.942.912	85.019.956	Mayo- Junio- Agosto- Septiembre = superado las normas de calidad ambiental
3	2005	344.514.435	62.047.102	
3	2006	361.972.471	65.204.157	
3	2007	213.042.831	68.289.114	

En la cuenca analizada la insostenibilidad hídrica azul (HHS_{azul}) se estimó principalmente en la sección alta. Sin embargo en un año húmedo se observó sólo en el mes de marzo (verano), a diferencia de un año seco en que se observó además en el periodo de primavera (Fig. 6 y 7, Capítulo 3), coincidiendo con un bajísimo aporte de agua en condiciones naturales (QD_{azul}) lo que genero a un incumplimiento de los caudales ecológicos (caudales mínimos). En estos meses la satisfacción de la

demanda de agua se realizaría gracias a la extracción de agua subterránea (DGA, 2016).

Los valores calculados ratifican que la variabilidad climática de la zona pudo generar el incumplimiento de dichos caudales, sumado al efecto del tipo de cuenca, esto es, nívio-pluvial. En la sección alta se observó una mayor disponibilidad hídrica (QD_{azul}) en los meses de verano, opuesto a lo que sucede en la sección baja, donde la disponibilidad de agua (QD_{azul}) fue significativamente mayor en los meses de invierno, característico de un clima mediterráneo (BCN, 2010). Considerando que la tendencia de la QD_{azul} es a disminuir en ambas secciones a través del tiempo, el volumen del caudal medio anual (QMA) fue más del doble en la 3ª sección, una de las razones por la cual en esta área los periodos de insostenibilidad se atenúan.

El otro motivo correspondería de insostenibilidad de HHS_{azul} podría ser atribuido al aumento de la superficie regable en la cuenca. La tasa de consumo de HH_{azul} aumentaría con respecto a los caudales naturales de forma considerable en la 1ª sección según las tendencias evaluadas en este estudio, en cambio en la 3ª sección el consumo de HH_{azul} se mantendría constante en el tiempo. Por lo tanto, la variabilidad climática, la disminución de las precipitaciones y caudales podrían cambiar los suministros de agua y demandas regionales y, en consecuencia agravarían la condición de escasez de agua (Wang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2016). En este contexto el índice de sostenibilidad mensual de agua azul, debería ser monitoreado permanentemente, ya que permite visualizar la presión que ejercen las actividades antrópicas sobre los recursos hídricos locales en función de la disponibilidad temporal de los mismos, de forma que constituya una información base para la asignación eficiente del agua, facilitando un equilibrio entre la oferta y la demanda (Divakar *et al.*, 2011) (Tabla 2).

En la actualidad, el cálculo del caudal ecológico de una cuenca, toma importancia a la hora de evaluar su sostenibilidad hídrica (Richter, 2012). Desafortunadamente aun la Normativa Chilena no permite discriminar la fluctuación natural o antrópica de los volúmenes de un curso de agua. En este contexto, es aconsejable establecer los caudales mínimos dentro de los cuales se garantiza la sostenibilidad ambiental de la cuenca a largo plazo, además de establecer un programa de vigilancia preventivo permanente.

Tabla 5.2 Sostenibilidad de la huella hídrica azul de la superficie agrícola de cuenca del río Cachapoal.

Sección	Año	QMA (m ³ /año)	Q _{ecol.} (m ³ /año)	QD _{azul} (m ³ /año)	HH _{azul} (m ³ /año)	HHS _{azul}
1°	2005	175.744.700	6.055.020	169.689.680	87.284.666	Marzo = severo
1°	2006	159.731.207	6.055.020	153.676.188	88.516.438	
1°	2007	58.942.912	6.055.020	52.887.892	163.673.566	Septiembre- octubre = severo
3°	2005	344.514.435	29.514.240	315.000.195	98.135.272	
3°	2006	361.972.471	29.514.240	332.458.231	94.712.542	
3°	2007	213.042.831	29.514.240	183.528.591	97.901.712	

Para superar la escasez del agua necesaria para la agricultura, dada la insostenibilidad hídrica estimada en la cuenca del río Cachapoal, se debe considerar tanto la eficiencia del recurso agua como la situación climática. Evaluando por ejemplo la factibilidad de utilizar para el riego aguas marginales, como aguas servidas tratadas y/o de drenaje (Oyarzun *et al.*, 2008; Iglesias & Garrote, 2016). Un ejemplo destacable es la región de O'Higgins que impulsada por la promulgación de la ley 18.450, ha incorporado métodos de riego con mayor tecnología, en la producción de productos de exportación de alto valor. Sin embargo, este esfuerzo no se ve reflejado en un menor consumo del recurso, tampoco se ve incorporada la productividad aparente del agua.

Un componente esencial para la atención de los retos de la seguridad hídrica es la generación de conocimiento e innovación como de metodologías de gestión del agua, organización social, marcos legales adecuados y el desarrollo de instituciones como la Superintendencia del agua, propuesta por el actual gobierno, en el contexto de la Política Nacional para los Recursos hídricos, 2015.

La gestión de los recursos hídricos ha demostrado que los escenarios (húmedo, normal y seco) también son útiles para explicar las incertidumbres asociadas a las condiciones climáticas, demográficas, económicas, sociales, técnicas y políticas que afectan el rendimiento de los sistemas de recursos hídricos, incluyendo sus efectos sobre la disponibilidad de agua y la demanda futura de agua (Dong *et al.*, 2013). Un futuro optimista dependerá de que la agricultura establezca, gestione y consuma agua en forma sostenible (Iglesias & Garrote, 2015; Chartzoulakisa & Bertaki, 2015). Estas

medidas requieren de programas de información y educación, siendo necesario promover la conservación del agua y suelo en áreas prioritarias, con propuestas innovadoras a problemas potenciales.

El índice de la huella hídrica contribuye además a la planificación del suministro de agua desde una perspectiva ambiental, ya que revela la disponibilidad y/o escases del agua y la capacidad de carga del área cultivada (Jaramillo & Destouni, 2015). Por lo general, las áreas con escasez y contaminación de sus cursos de agua, tienden a incurrir en el aumento de los costos de suministro y tratamiento de agua, a veces incluso superior a los beneficios, resolviendo los problemas desde el lado de la oferta (Tolón *et al.*, 2013). Medidas y estrategias de reducción de la $HH_{\text{agrícola}}$, en la mayoría de los casos se orientan a la tecnificación del riego, sin embargo, el énfasis debería ser puesto también, dentro lo posible desde un punto de vista económico, en la elección de cultivos que consuman menor cantidad de agua (Cazcarro *et al.*, 2015). No menos importante sería, revisar los calendarios de siembra, teniendo en cuenta que enero es el mes con mayor insostenibilidad del recurso agua (Fig. 2, Capítulo 3) y que el cultivo en la sección baja de la cuenca presenta ventajas comparativas, ya que el suministro de agua es mayor (Fig. 10, Capítulo 3).

Si se evalúa y considera el consumo real de agua para cada actividad productiva, esto es, los consumos de los tres componentes de la huella hídrica, HH_{azul} , HH_{verde} y HH_{gris} , se posibilita encontrar cultivos económicos que utilicen el menor consumo de agua de los diferentes flujos (en este estudio de los cultivos analizados fueron los cultivos de cebollas y durazno). Además, de seleccionar métodos que reduzcan la pérdida del recurso por evaporación desde el suelo o por percolación fuera de la zona radicular, sumado a que es necesario minimizar las pérdidas de agua en los sistemas de almacenamiento o de entrega del insumo. En las regiones productoras de alimentos es fundamental implementar mejoras en el uso del agua, por ejemplo, a través de la captura y almacenaje de agua de lluvia, selección de los cultivos resistentes a la sequía y prácticas de labranza alternados (Chartzoulakisa & Bertaki, 2015).

Para la cuenca del río Cachapoal el INIA pone a disposición de los usuarios, entre otros, datos de evapotranspiración de los cultivos. En el año 2015 informó, por ejemplo, un promedio diario de 2,4 mm, con un valor anual de 857 mm. En este estudio

para el periodo 2005 – 2007 estudiado, se estimó una media similar de 2,8 mm/día, pero con una fluctuación desde 755 a 1030 mm/año. Dado el rango de variación que presenta esta variable a lo largo del año, sería conveniente considerar el monitorear a lo largo de la cuenca esta importante variable de forma diaria, como se hace con la pluviosidad, ya que es una información fundamental para programar los periodos de siembra y los volúmenes de consumo.

Por último, los resultados revelan además que, las evaluaciones para resguardar la sostenibilidad de los recursos hídricos consumidos en la agricultura de la cuenca del río Cachapoal, necesariamente deben ser “sitio específicas”, ya que la variabilidad climática local influye significativamente en los requerimientos hídricos de los cultivos. La estimación de la huella hídrica por sector ayuda a una gestión eficiente y equitativa del agua, ya que las fuentes de consumo de agua, esto es, los indicadores de la huella del agua verde (HH_{verde}), azul (HH_{azul}) y gris (HH_{gris}), permiten seleccionar cultivos, que contribuye a mantener la integridad del flujo del agua en el ciclo hidrológico, incluyendo como variable los rendimientos de los cultivos. Los impactos ambientales negativos debido a la producción de alimentos son inevitables, pero pueden ser minimizados mediante el aumento de la eficiencia en la adición de nutrientes y el uso del agua. Es fundamental establecer la vinculación entre el consumo de la $HH_{agícola}$ y los recursos disponibles para mantener los caudales ecológicos y la calidad del agua en la cuenca del río Cachapoal, como lo evidencia los indicadores de sostenibilidad de la HHS_{azul} y HHS_{gris} .

6.- CONCLUSIONES

1.- El análisis de la data de 34 años de precipitaciones, permitió demostrar que la cuenca del río Cachapoal presenta una condición climática asimilable a un clima mediterráneo, con lluvias durante la estación fría (mayo - agosto) y un período seco durante la estación cálida (noviembre - febrero). Además, de marcadas variaciones hídricas entre la zona andina (1°sección) y sección de la Cordillera de la Costa (3°sección), con menores precipitaciones (52 % de disminución). Del mismo modo, el análisis de las precipitaciones permitió agrupar el comportamiento hídrico de la cuenca en años secos, normales y húmedos, que fluctuaron entre 117 y 1.517 mm.

2.- En el análisis que incluyó múltiples variables mostro que las variaciones climáticas determinarían los requerimientos hídricos de la actividad agrícola, ya que éstos relacionan el flujo hídrico ($HH_{\text{agrícola}}$) con las diversas formas de consumo. La mayor $HH_{\text{agrícola}}$ fue estimada para el año en condición de sequía, un mayor consumo de la HH_{verde} se determinó en un año de condición normal; el mayor consumo de HH_{azul} correspondería en un año seco y la HH_{gris} se correlacionó directamente con el rendimiento de los cultivos.

3.- En las 69.433 hectáreas en que se ubican los principales cultivos de la cuenca del río Cachapoal, durante el período 2005-2007, se estableció que los paltos, olivos, maíz y viñas fueron los cultivos con la mayor $HH_{\text{agrícola}}$ y los cultivos de cebollas y durazno los que mostraron los menores consumos.

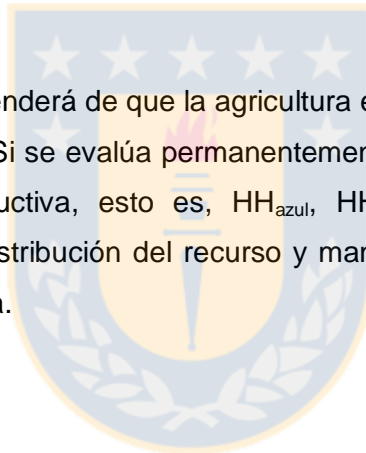
4.- Debido a la cada vez es mayor demanda de alimentos y al previsible aumento de la superficie regable en la cuenca, la tasa de consumo de agua azul (HH_{azul}) debería aumentar de forma considerable, esta tendencia fue observada para la 1°sección, en cambio en la 3°sección la tendencia fue a mantenerse constante en el tiempo. En ambas secciones la menor HH_{azul} fue consumida en los meses de abril, mayo, junio, julio y agosto.

5.- La variabilidad climática de la zona mediterránea, sumado al efecto del tipo de suministro (nuvio-pluvial), inciden en la disponibilidad estimada de agua azul (QD_{azul}) la que disminuye en ambas secciones a través del tiempo, siendo mayor en el año húmedo y menor en el año seco, donde la situación de los meses de abril y marzo fue crítica.

6.- El indicador HHS_{azul} del consumo agrícola mostró en la sección alta de la cuenca en el año seco y húmedo escasez severa y significativa, como resultado de la disminución de la QD_{azul} y del aumento en el consumo de HH_{azul} , se tradujo en un incumplimiento del caudal ecológico y de la capacidad de carga ambiental. Situación contraria a lo evaluado en la 3ª sección, en que no se observó insostenibilidad o escasez hídrica, debido a que el volumen de QMM fue más del doble y el consumo de HH_{azul} se mantuvieron constantes en el tiempo.

7.- En la cuenca del río Cachapoal, de vocación agrícola, se ejerce una significativa influencia antrópica debido al aporte de nitrógeno en las prácticas de fertilización para asegurar el rendimiento de los cultivos. La contaminación de las aguas superficiales (HHS_{gris}) se evidenció principalmente en la 1ª sección en el año seco, con una capacidad de asimilación consumida y superación de las Normas de Calidad Ambiental.

8.- Un futuro optimista dependerá de que la agricultura establezca, gestione y consuma agua en forma sostenible. Si se evalúa permanentemente y considera el consumo real para cada actividad productiva, esto es, HH_{azul} , HH_{verde} y HH_{gris} , se posibilitaría gestionar eficazmente la distribución del recurso y mantener el fundamental equilibrio entre la oferta y la demanda.



7.- REFERENCIAS GENERALES

Abraham, E. & Fernández, A. (2008). Indicadores y Tecnologías apropiadas de uso sustentable del agua en las tierras secas de Iberoamérica. Mendoza: CYTED-Proyecto XVII-1.

Allen, G., Pereira, L., Raes, D. & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization.

Allan, J. (2006). Virtual water, part of an invisible synergy that ameliorates water scarcity. In: Rogers P, Llamas M, Martinez-Cortina L Water crisis: myth or reality?. Balkema, Rotterdam: FAO.

Aldaya, M. M. & Hoekstra, A. (2009). The water needed to have Italians eat pasta and pizza. Value of Water Research Report Series No. 36. The Netherlands: UNESCO-IHE, University of Twente.

Aldaya, M. M. & Llamas, M. R. (2009), Water Footprint Analysis (Hydrologic and Economic) of the Guadiana River Basin, World Water Assessment Programme. The United Nations World Water Development Report. Scientific Paper.

Aldaya, M. M., Martinez-santos, P. & Llamas, M. R. (2010). Incorporating the water footprint and virtual water into policy: reflections from the Mancha occidental region, Spain. *Water Resource Managed*, 34 (24), 941–958.

Antúñez., B. A. & Felmer, E. S. (2009). Boletín del Nodo de riego en el seco, Región de O'Higgins. Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Boletín INIA. Recuperado de <http://www.inia.cl/biblioteca-digital/boletines/>

Arthington, A. H., Bunn, S. E., Poff, N. L., & Naiman, R. J. (2006) The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems. *Ecological Applications* 16, 1311-1318.

Arumí, L. J., Nuñez, J., Salgado, L. & Claret, M. (2006). Evaluación del riesgo de contaminación con nitrato de pozos de suministro de agua potable rural en Chile. *Revista Panamericana Salud Publica*. 20(6), 385-392.

Arumí, J. L., Rivera, D., Holzapfel, E. & Fernald A. (2008). Effect of irrigation canal network on surface and groundwater connections at an agricultural valley in Central Chile. *Surface Water–Groundwater Interactions: Process Understanding, Conceptualization and Modelling*, 321(1), 197-203.

Arumí J., L., Melo O., Nuñez J. & Billi M. M. (2014). Riego y Usuarios del Agua en Chile. Desde la Revolución a la Evolución. In: Sanchis C., A., Palau S. G., Mangue A. I., Martínez L. S. (Ed.), *Irrigation, society and landscape. Tribute to Tom F. Glick*. España: Editorial Universitat Politècnica de València. pp: 661–671.

Arumí, J. L., Oyarzún, R. A. & Sandoval, M. (2005). A discussion about natural protection against groundwater pollution by nitrates in the Central Valley of Chile. *Hydrological Sciences- Journal*, 50(2), 331–340.

Banco Mundial. (2010). Informe sobre el desarrollo mundial 2010, basado en datos del Instituto Mundial sobre Recurso Hídrico. Banco Mundial. ISBN: 978-0-8213-7987-5.

BCN, Biblioteca del Congreso Nacional. (2010). Sistema integrado de información Territorial (SIIT); Región de O'Higgins: BCN.

Bértola, L. & Ocampo, J. A. (2013). *El Desarrollo Económico de América Latina desde la Independencia*. México: FCE.

Bettina, S. (2012). ¿Cómo fluye el agua? Una aproximación al metabolismo hídrico desde la economía ecológica del agua. Chile. Researchgate.

Billib, M., Bardowicks, k. & Arumí J. L. (2009). Integrated water resources management for sustainable irrigation at the basin scale. *Chilean Journal of Agricultural Research*, (69), 69-80.

Bonilla, C., Reyes, J. & Magri, A. (2009). Water erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70, 159-169.

Bown, F., Rivera, A. & Acuña, C. (2008). Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, 48(2), 40-48.

Brown, S., Schreier, H. & Lavkulich, L. M. (2009). Incorporating virtual water into water management: A British Columbia example. *Water Resources Management*. 23(13), 2681–2695.

Bulsink, F. A., Hoekstra, Y. & Booij, M. J. (2010). The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 119-128.

Bunn, S. E. & Arthington, A. H. (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management*. 30(2), 492–507.

Cabral, G., Fernando, L. & Nespolo, C. M. (2014). Racionamiento del agua ante fluctuaciones de disponibilidad: Una discusión teórica para el caso de Chile. *Idesia*, 1, 129-137.

Carrasco, J. F., Casassa, G. & Quintana, J. (2005). Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 933–948.

Cazcarro, I., Duarte, R., Martín-Retortillo, M., Pinilla, V. & Serrano, A. (2015). How Sustainable is the Increase in the Water Footprint of the Spanish Agricultural Sector? A Provincial Analysis between 1955 and 2005–2010. *Sustainability*, 7(3), 5094-5119.

Centro de ciencia del clima y la resiliencia (CR)². (2015). Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Chile: Santiago, Universidad de Chile.

CENMA. (2010). Análisis de la composición físico química de los sedimentos fluviales y su relación con la disponibilidad de metales en el agua. Cuenca del río Cachapoal. Centro Nacional del Medio Ambiente. Recuperado de <http://documentos.dga.cl/CQA5191v5.pdf>

Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D. B., Howden, S. M., Smith, D. R. & Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 4(2), 287–291.

Chartzoulakisa, K. & Bertaki, M. (2015). Sustainable water management in agriculture under climate change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4(2), 88-98.

Chapagain, A. K. & Orr, S. (2009). An improved water footprint methodology to link global consumption to local water resources: A case study of Spanish tomato consumption. *Journal of Environmental Management*. 90, 1219–1228.

Chapagain, A. K. & Hoekstra, A. Y. (2004) Water footprints of nations. Value of Water Research Report Series No. 16. Netherlands: UNESCO–IHE, Delft,

Chen, Z. M. & Chen, G. Q. (2013). Virtual water accounting for the globalized world economy: National water footprint and international virtual water trade. *Ecological Indicators*, 28, 142–149.

CIREN. (2010). Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. Chile: Centro de información recursos naturales. Recuperado de <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/2076>

Cortés, A. E., Oyarzún, R., Kretschmer, N., Chaves, H., Soto, G., Soto, M., Amézaga, J., Oyarzún, J., Rötting, T., Señoret, M. & Maturana, H. (2012). Application of the Watershed Sustainability Index to the Elqui river basin, North-Central Chile. *Obras y Proyectos*, 12(2), 57-69.

Costa P. C., Domínguez C. E., Rivera, H. G. & Vanegas S. R. (2005). El índice de escasez de agua ¿Un indicador de crisis ó una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico?. *Revista de Ingeniería*, 22, 104-111.

Delgado, D. E., Torres-Gomez, M., Tironi-Silva, A. & Marin, V. H. (2015). Local adaptation strategy to climate change for equitable water access in Chilean rural zones. *América Latina hoy. Revista de Ciencias Sociales*, 69(3), 113-137.

de Miguel, A., Hoekstra, A. Y. & García-Calvo, M. (2015b). Sustainability of the water footprint of the Spanish pork industry. *Ecological Indicators*, 57, 465–474.

De Miguel, Á., Kallache, M. & García-Calvo, E. (2015a). The water footprint of agriculture in Duero River Basin. *Sustainability*, 7(4), 6759–6780.

DGA, Dirección general de agua. (2012). Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. División de Hidrología. Dirección general de Aguas Ministerio de Obras Públicas. Chile: DGA. Recuperado de www.dga.cl

DGA, Dirección general de agua. (2016). Atlas del agua, Chile: <http://www.dga.cl/atlasdelagua/Paginas/default.aspx>

Divakar, L., Babel, M.S., Perret, S.R. & Das Gupta, A. (2011). Optimal allocation of bulk water supplies to competing use sectors based on economic criterion – an application to the Chao Phraya River Basin, Thailand. *Journal Hydrology*, 401(2), 22–35.

Donoso, G. (2006). Water Markets: Case Study Of Chile's 1981 Water Code. *Ciencia e Investigación Agraria*, 33(2), 157-171.

Donoso, G., Blanco, E., Foster, W., Franco, G. & Lira, J. (2012). Seguridad hídrica y alimentaria en américa latina y España: el caso de Chile. Pontificia Universidad Católica, 463. Recuperado de http://www.researchgate.net/profile/Javier_Lira/publication/236589704_Report_2012_Water_and_Food_Security_in_Chile/links/0deec5181e6485b23f000000.pdf

Donoso, G., Franco, G., Blanco, E. & Lira, J. (2014). An estimation of agriculture water footprint in Chile. *Water footprints and agricultural growth: The case of Chile*. Researchgate.

Dong, C., Gerrit, S. & van de Giesen, N. (2013). Scenario development for water resource planning and management: A review. *Technological Forecasting & Social Change*, 80, 749-761.

Duarte, P., Alegre, H. & Marques, J. (2006). Application of a technical performance assessment tool to support wáter distribution systems rehabilitatio. 8th annual water distribution system analysis symposium, Cincinnati, Ohio, August 27-30.

Ecosystems & Human Well-Being (2005). *Wetlands and Water Synthesis; Millennium Ecosystem Assessment*: Washington, DC, USA.

Ercin, A. E., Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y. (2013). Sustainability of national consumption from,a water resources perspective: The case study for France. *Ecology Economics Journal*, 88(2), 133-147.

Falkenmark, M. (2003). Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 358(1440), 2037–2049.

Falkenmark, M. & Rockström J. (2004). *Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Eco-hydrology*. London: Routledge.

Falkenmark, M. & Rockström, J. (2006). The New Blue and Green Water Paradigm: Breaking New Ground for Water Resources Planning and Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(3), 129-132.

FAO. (2011). *Climate change, water and food security*. Land and Water Development Division, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperate de <http://www.fao.org/3/a-i2096e.pdf>

FAO (2010) CROPWAT 8.0 Model, FAO, Rome.
www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html

Ferrando, F. (1994). Métodos Hidromorfométricos para determinar la Erosividad a nivel de Cuencas Hidrogáficas. *Revista Ingeniería Hidráulica en México IX (3)*: 5-14.

Foladori, G. & Tommasino, H. (2000). El concepto de desarrollo sustentable treinta años después. *Desenvolvimiento y Medio Ambiente*, 1(1), 41-56.

Fulton, J., Cooley, H. & Gleick, P. (2012). *California's Water Footprint, California, USA: Pacific Institute*

Fulton, J., Cooley, H. & Gleick P. (2014). Water Footprint Outcomes and Policy Relevance Change with Scale Considered: Evidence from California. *Water resources management*, 28(11), 3637-3649.

Gayoso, J. & Gayoso, M. (2005). *Eventos Extremo, Revisión del Caso de Chile 1985-2005*. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile.

Gao, H. (2014). Water saving effect on integrated water resourcemanagement. *Resour. Conserve Recycle*, 93(2), 50–58.

Gerten, D., Heinke, J., Hoff, H., Biemans, H., Fader, M. & Waha, k. (2011). Global water availability and requirements for future food production. *Journal of Hydrometeorology*, 12(1), 887-898.

Gleick, P. (1996). Basic water requirements for human activities: Meeting basic needs. *Water Int*, 21(4), 83–92.

Gleick, P. H. (2010). Climate Change and the Integrity of Science. *Science*, 328, 689-690.

Gleick, P. (2015). On methods for assessing water-resource risks and vulnerabilities. *Environmental research letters*, 10(11), 1-3.

Grey, D. & Sadoff, C.W. (2007). Sink or swim? Water security for growth and development. *Water Policy*, 6(4), 545-571.

González, L.; González, A. & Mardones, A. (2003). Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile. Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción. *Revista Geológica de Chile*, 30(1), 3-22

Guenni, L., Degryze, E. & Alvarado, K. (2008). Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela. *Revista Colombiana de Estadística*, 31(1), 41-65.

Hanasaki, N., Fujimori¹, S., Yamamoto, T., Yoshikawa, S., Masaki, Y., Hijioka, Y., Kainuma, M., Kanamori, Y., Masui, T., Takahashi, K. & Kanae, S. (2013). A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways – Part 1: Water use. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17(2), 2375–2391

Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Konzmann, M., Ludwig, F., Masaki, Y., Schewe, J., Stacke, T., Tessler, Z., Wada, Y. & Wisser D. (2014). Global water resources affected by human interventions and climate change. *PNAS*, 111(9), 3251-3256.

Hearne, R. & Donoso, G. (2014). *Water Markets in Chile: Are They Meeting Needs?* In: *Water Markets for the 21st Century*, Netherlands: Springer.

Hejazi, M. I., Edmonds, J. L., Clarke, P., Kyle, E., Davies, V., Chaturvedi, M., Wise, P., Pate, J., Eom, L. & Calvin, K. (2014). Integrated assessment of global water scarcity over the 21st century under multiple climate change mitigation policies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2), 2859-2883.

Herath, I., Green, S.R., Horne, D., Singh, R. & Clothier, B. E. (2013). Water footprinting of agricultural products: Evaluation of different protocols using a case study of New Zealand wine. *Journal of Cleaner Production*, 44(3), 156-167.

Hoekstra, A.Y. (2012). The hidden water resource use behind meat and dairy. *Animal Frontiers*, 2(2), 3-8.

Hoekstra, A.Y. (2010a) The water footprint: water in the supply chain. *The Environmentalist*. 93, 12-13.

Hoekstra, A.Y. (2010b) The relation between international trade and freshwater scarcity, Working Paper, Geneva, Switzerland: World Trade Organization,

Hoekstra, A. Y. (2013). *The Water Footprint of Modern Consumer Society*. London: Routledge.

Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K. & Zhang, G. P. (2016). Water footprints and sustainable water allocation. *Sustainability*, 8(6), 2 -23.

Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., Chapagain, A. K., Mathews, R. E. & Richter, B. D. (2012). Global Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprints versus Blue Water Availability. *PLoS ONE*, 7(3), 32-68.

Hoekstra, A.Y., & Hung, P.Q. (2002) Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Value of Water Research Report Series No. 11*.

Hoekstra, A. Y. & Hung, P. Q. (2005). Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change*, 15(5), 45–56.

Hoekstra, A.Y. (2014). Water scarcity challenges to business. *Nature Climate Change*, 4(2), 318-320.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*, London, UK: EarthScan

Hunter, C., Gironás, J., Bolster, D. & Karavitis, C. (2015). A Dynamic, Multivariate Sustainability Measure for Robust Analysis of Water Management under Climate and Demand Uncertainty in an Arid Environment. *Water*, 7(11), 5928-5958.

Iglesias, A. & Garrote, L. (2015). Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. *Agricultural Water Management*, 155(1), 113-124.

INE, Instituto Nacional de Estadísticas Chile. (2007). *Censo agropecuario y forestal*. Santiago, Chile: INE.

INE, Instituto Nacional de Estadísticas Chile. (2015). *Compendio estadístico regional*. Santiago, Chile: INE.

Jaramillo, F. & Destouni, G. (2015). Local flow regulation and irrigation raise global human water consumption and footprint. *Science*, 350(3), 1248-1250.

Jianguo, L., Mooney, H., Hull, V., Davis, S., Gaskell, J., Hertel, T., Lubchenco, J., Seto, K., Gleick, P., Kremen, C. & Li, S. (2015). Systems integration for global sustainability. *Science*, 347(6225), 963-972.

Keys, P. W., Wang-Erlandsson, L. & Gordon, L. J. (2016). Revealing Invisible Water: Moisture Recycling as an Ecosystem Service. *PLoS ONE*, 11(3), 32-40.

Khan, S. & Hanjra, M. (2009). Footprints of water and energy inputs in food production Global perspectives. *Food Policy*, 34(5), 130–140.

Konar, M., Dalin, C., Suweis, S., Hanasaki, N., Rinaldo, A. & Rodriguez-Iturbe, I. (2011). Water for food: The global virtual water trade network. *Water Resources Research*, 47(4), 1-17.

Liu, J. G. (2009). A gis-based tool for modelling large-scale crop-water relations. *Environmental Model Software*, 24(4), 411–422.

- Liu, C., Kroeze, C., Hoekstra, A. Y. & Gerbens-Leenes, W. (2012). Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers. *Ecological Indicators*, 18(4), 42–49.
- Nana, E., Corbari, C. & Bocchiola, D. (2014). A model for crop yield and water footprint assessment: Study of maize in the Po valley. *Agricultural systems*, 127(4), 139-149.
- Neuenschwander, A. (2010). *El Cambio Climático en el Sector Silvoagropecuario de Chile*. Chile: Fundación para la Innovación Agraria FIA.
- Nilsson, A. & Pettersson, L. (2015). The structural origin of anomalous properties of liquid water. *Nature Communications*, 6(34), 387-392.
- Novoa, V., Rojas, O., Arumí, J.L., Ulloa, C., Urrutia, R. & Rudolph, A. (2016). Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(2), 35-50.
- Núñez, J., D. Rivera, R. Oyarzún & Arumí, J. L. (2013). *Chile a secas: Vulnerabilidad chilena frente a la sequía y déficit hídrico extremo desde la interfaz ciencia-política*. Chile: Instituto de Políticas Públicas.
- Malghan, D. (2010). On the relationship between scale, allocation, and distribution. *Ecological Economics*, 69(11), 2261–2270.
- Mays, L. (2006). *Water Resources Sustainability*; McGraw-Hill Professional: New York, USA.
- Martínez, J. (2012). Agua y sostenibilidad: algunas claves desde los sistemas áridos. *Polis, Revista Latinoamérica*, 2(1), 1-14.
- Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Science*, 15, 1577-1600.
- Mekonnen, M. M., Pahlow, M., Aldaya, M. M., Zarate, E. & Hoekstra, A. Y. (2015). Sustainability, Efficiency and Equitability of Water Consumption and Pollution in Latin America and the Caribbean. *Sustainability*, 7(2), 2086-2112.
- Martínez-Austria, P. (2013). Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(5), 165-180

Min, S., Zhang, X., Zwiers, F. W. & Hegerl, G. C. (2011). Human contribution to more intense precipitation extremes. *Nature*, 470(45), 378-381.

Mihelcic, J. R., Crittenden, J. C., Small, M. J., Shonnard, D. R., Hokanson, D. R., Zhang, Q., Chen, H., Sorby, S. A., James, V. U. & Sutherland, J. W. (2003). Sustainability science and engineering: The emergence of a new metadiscipline. *Environ. Sci. Technol*, 37(2), 5314–5324.

Montesinos, P., Camacho, E., Campos, B., & Rodríguez-Díaz, J. A. (2011). Analysis of virtual irrigation water. Application to water resources management in a Mediterranean river basin. *Water Resour Manage*, 25, 1635-1651.

MOP, ministerio de obras públicas. (2013). Estrategia nacional de recursos hídricos 2012-2025. Resumen ejecutivo, Santiago, Chile

Mubako, S. & Lant. T. (2013). Agricultural virtual water trade and water footprint of United States. *Annals of the association of American geographers*, 103(2): 385 -396.

ODEPA, Oficina de estudios y políticas agrarias. (2013a). Cambio climático Impacto en la Agricultura Heladas y Sequía. Santiago, Chile: ODEPA.

ODEPA, Oficina de estudios y políticas agrarias. (2013b). Evolución de las exportaciones silvoagropecuarias de Chile, Santiago, Chile: ODEPA.

Oyarzun, R., Arumí, J.L., Álvarez, P. & Rivera, D. (2008). Water use in the Chilean agriculture: current situation and areas for research development. *Agricultural Water Management Research Trend*. NY, USA: Nova Science Publisher.

Oki, T. & Kanae, S. (2006). Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *Science*, 313(25), 1068-1072.

Palmer, M. A., Reidy-Liermann, C., Nilsson, C., Floerke M., Alcamo, J., Lake, P. S., and Bond, N. (2008) Climate change and world's river basins: anticipating management options. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(2), 81–89.

Peña, H., & Nazarala, B. (1987). Snowmelt–runoff simulation model of a central Chile Andean basin with relevant orographic effects. *IAHS Publ. 166 (Symposium at Vancouver 1987 – Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover)*, 161–172.

Pino, P., Iglesias, V., Garreaud, R., Cortés, S., Canals, M., Folch, W., Burgos, S., Levy, K., Naeher, L. & Steenland, K. (2015). Chile confronts its environmental future under uncertain perspectives of climate change. *Annals of Global Health*, 81(1), 354-367.

Pizarro, R.; Morales, C.; Balocchi, F.; Sanguesa, C., and Vargas, J. (2010). Capítulo de Aguas Continentales. In: Informe País, estado del medio ambiente en Chile 2008. Chile: Centro de Análisis de Políticas Públicas.

Pizarro, J., Vergara, P., Morales, J., Rodríguez, J. & Vila, I. (2014). Influence of land use and climate on the load of suspended solids in catchments of Andean rivers. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186 (2), 835–843.

Pizarro, R., Garcia-Chevesich, P., Valdes, R., Dominguez, F., Hossain, F., Ffolliott, P., Olivares, C., Morales, C., Balocchi, F. & Bro, P. (2013). Inland water bodies in Chile can locally increase rainfall intensity. *Journal of Hydrology*, 481, 56–63.

Pfister, S., Bayer, P., Koehler, A., & Hellweg, S. (2011). Projected water consumption in future global agriculture: Scenarios and related impacts. *Science of the Total Environment*, 409, 4206–4216.

Pfister, S., Koehler, A. & Hellweg, S. (2009). Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. *Environmental Science & Technology*. American Chemical Society, 43(9), 4098-4104.

Poff, N. L., Richter, B. D. & Arthington, A. H. (2010). The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 55, 147-170.

Poff, N. L., Allan, J. D., Palmer, M. A., Hart, D. D., Richter, B. D., Arthington, A. H., Rogers, K. H., Meyer, J. L. and Stanford, J. A. (2003). River flows and water wars? Emerging science for environmental decisionmaking. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 1, 298–306.

Porter, J. R., Xie, L., Challinor, A. J., Cochrane, K., Howden, S. M., Iqbal, M. M., Lobell, D. B. & Travasso, M. I (2014). Food security and food production systems. In: Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O. & Genova, RC.(2014). *Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of*

Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press.

Retamal, R., Melo, O., Arumí, J.L. & Parra, O. (2012). Sustainable water governance in Chile: from a sectoral management system to an integrated one. In: Rivera, D. (Ed.), Chile: Environmental, Political and Social Issues. NY, USA: Nova Publishers.

Rivera, D., Godoy-Faúndez, A., Lillo, M., Alvez, A., Delgado, V., Gonzalo-Martín, C., Menasalvas, E., Costumero, R. & García-Pedrero, Á. (2016). Legal disputes as a proxy for regional conflicts over water rights in Chile. *Journal of Hydrology*, 535(2), 36-45.

Richter, B. D., Davis, M. M., Apse, C. & Konrad, C. A. (2012). presumptive standard for environmental flow protection. *River Research and Applications*, 8(2), 1312-1321.

Ríos, J. L., Torres, M., Castro, R., Torres, M. A. & Torres, J. R. (2015). Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México. *Revista Fca Uncuyo*, 47(1), 93-107.

Richter, B.D., Davis, M. M., Apse, C. & Konrad, C. (2012). A presumptive standard for environmental flow protection. *River Research and Applications*, 1, 1312-1321.

Rodríguez-Casado, A., Garrido, M., Llamas, R. & Varela-Ortega, C. (2009). La huella hidrológica de la agricultura española. *Papeles de Agua Virtual*. 2.

Rojas, O., Mardones, M., Aguayo, M. & Arumí, J. L. (2014). Una revisión de las inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, tipologías y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 177-192.

Rost, D. & Heyder, U. (2008). Human alterations of the terrestrial water cycle through land management. *Adv. Geosci.*, 18 (1), 43–50.

Rosenzweig, C., Tubiello, F. N., Goldberg, R., Mills, E. & Bloomfield, J. (2002) Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change. *Global Environmental Change. Human and Policy Dimensions*, 12(2), 197-202.

Russo, T., Devineni, N. & Lall, U. (2014a). Assessment of Agricultural Water Management in Punjab, India Using Bayesian Methods. In Setegn, S. & Donoso, M.

(Eds.). Sustainability of Integrated Water Resources Management: Water Governance, Climate and Ecohydrology, Springer: Berlin, Germany.

Russo, T., Alfredo, K. & Fisher, J. (2014b). Sustainable Water Management in Urban, Agricultural, and Natural Systems. *Water*, 6(12), 3934-3956.

Sánchez, M. & Carvacho, L. (2013). Aproximación a la determinación del déficit hídrico en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile, a partir de imágenes MODIS y datos meteorológicos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 55, 109-124.

Sánchez-Ortiz, E. (2013). El uso de la disponibilidad relativa de agua como indicador en la cuenca del río San Pedro, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(5), 199-206.

Schlenker, W. & Roberts, M.J. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(37), 15594-15598

Siebert, S. & Döll, P. (2010). Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation. *Journal Hydrology*, 384(2), 198–217.

Sotelo, J. A., Olcina, J., Tolon, A., Garcia, J. M., Bolivar, X., Garcia, F., Soltelo, M. & Sotelo, I. (2011). Huella hídrica, desarrollo y sostenibilidad en España. España: Fundación Mapfre, 1(1), 9-421.

StatSoft., Inc. (2001). Statistica (data analysis software system). www.statsoft.com.

Stoeglehner, G., Edwards, P., Daniels, P. & Narodoslowsky, M. (2011). The water supply footprint (WSF): a strategic planning tool for sustainable regional and local water supplies. *Journal of cleaner production*. 19 (15). 1677-1686.

Smakhtin, V., Revenga, C., and Döll, P. (2004a) Taking into account environmental water requirements in global-scale water resources assessments Comprehensive Assessment Research Report 2. Colombo, Sri Lanka: Comprehensive Assessment

Secretariat.

Smakhtin, V., Revenga, C. & Döll, P. (2004b) A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity. *Water International*. 29(3), 307-317.

Sun, S., Wu, P., Wang, Y., Zhao, X., Liu, J. & Zhang, X. (2013). The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China. *Science of the Total Environment*, 444, 498–507.

Schyns, J. F., Hoekstra, A. Y. & Booij, M. J. (2015). Review and classification of indicators of green water availability and scarcity. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19 (3), 4581-4608.

Tolón, A., Lastra, X. & Fernández, V. (2013). Huella hídrica y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos. *Revista Electrónica de Medio Ambiente*, 14, 56-86.

UNEP. (2014). Sustainable Consumption and Production, Targets & Indicators. United Nations: Environment Programme. Canada: International Institute for Sustainable Development.

UNESCO. (2004). World water assessment programme. www.unesco.org

UNEP. (2004). Vital Water Graphics, recuperado de www.unep.org/vitalwater/01.htm.

Valdes-Pineda, R., Valdes, J. B., Diaz, H. F. & Pizarro-Tapia, R. (2016). Analysis of spatio-temporal changes in annual and seasonal precipitation variability in South America-Chile and related ocean-atmosphere circulation patterns. *International journal of climatology*, 36(8), 2979-3001.

Valiente, O. (2001). Sequía: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, 26, 59-80.

Van Oel, P. R., Mekonnen M. M. & Hoekstra, A. Y. (2009). The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment, *Ecological Economics* 69(1): 82-92.

Wang, X., Zhang, J., Shahid, S., Guan, E., Wu, Y., Gao, J. & He, R. (2016). Adaptation to climate change impacts on water demand. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21, 81. doi:10.1007/s11027-014-9571-6

WWAP. United Nations world water assessment programme. (2015). The United Nations, Paris, France: UNESCO.

Wheeler, T. & von Braun, J. (2013). Climate change impacts on global food security. *Science*, 341(6), 508–513.

Yevenes, M., Arumí, J. L. & Fariás, L. (2016). Unravel biophysical factors on river water quality response in Chilean Central-Southern watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(5), 264. doi: 10.1007/s10661-016-5235-1

Zeng, Z., Liu, J., Koeneman, P. H., Zarate, E. & Hoekstra, A. Y. (2012). Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heine River Basin in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(4), pp. 2771–2781.

Zhineng, H., Yazhen, C., Liming, Y., Weib, C. & Chaozhi, L. (2016). Optimal allocation of regional water resources: From a perspective of equity–efficiency tradeoff. *Resources, Conservation and Recycling*, 109 (2), pp. 102-113.

Zhuo, L.; Mekonnen, M. M.; Hoekstra, A. Y. & Wada, Y. (2016). Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River Basin (1961-2009). *Advances in Water Resources*, 87(3), pp. 21-41.

Zwiers, F. W., Zhang, X. & Feng, Y. (2011). Anthropogenic influence on long return period daily temperature extremes at regional scales. *Journal of Climate*, 24(3), 881-892.

Zhao, X.; Chen, B. & Yang, Z. (2009). National water footprint in an input-output framework- A case study of China. *Ecological Modelling*, 220 (1), 245-253.

www.agromet.inia.cl/estaciones.php. Acceso 10 de octubre 2016.