


EL IMPACTO DE LA CALIDAD DE AGUA DE LAS CUENCAS CHOAPA, MAIPO Y RAPEL EN LA AGRICULTURA

La concentración de boro, cadmio, mercurio, molibdeno, manganeso, sulfato, entre varios otros, medida en el agua de las cuencas del río Choapa, río Maipo y río Rapel -en el centro-norte de Chile- en el período 2008-2016, excede los límites de calidad de agua para riego establecidos en la normativa chilena NCh1333, elevando los niveles de toxicidad con graves consecuencias para los cultivos.

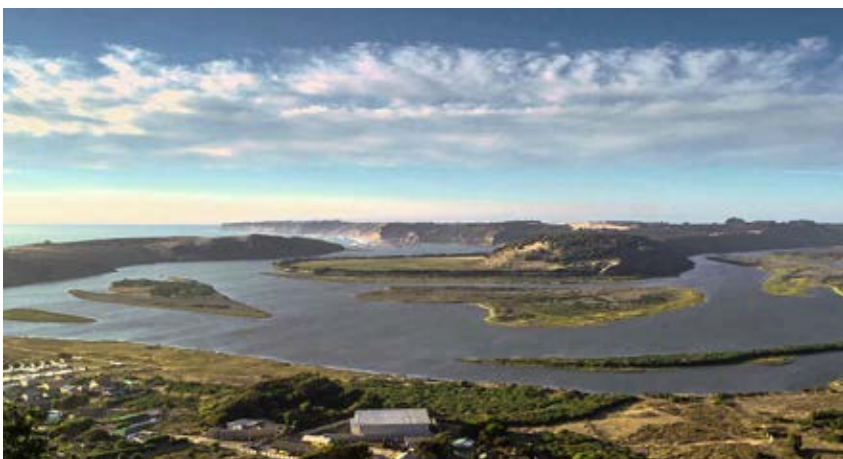
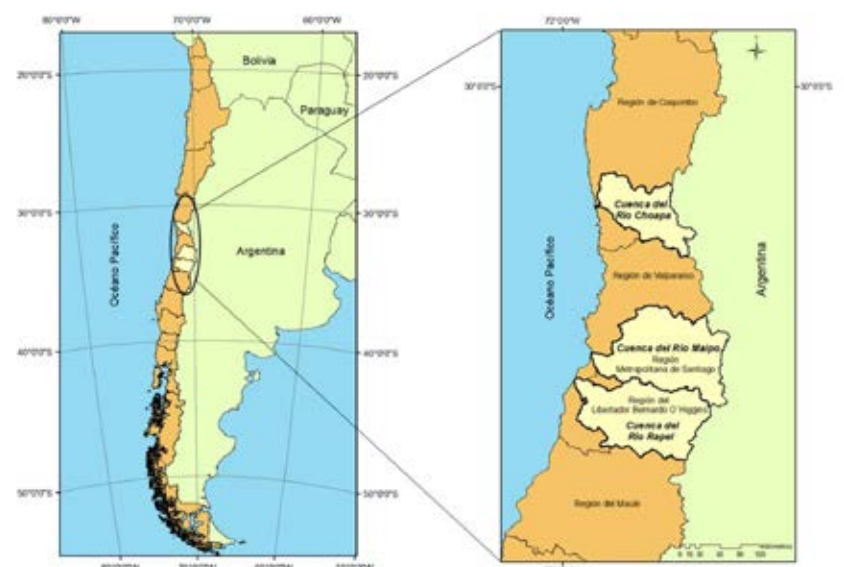
 KARIEN GARCÍA^A, JOSÉ L. ARUMÍ^A, NICOLE USLAR^A, JEAN P. JOUBLAN^B, PEDRO G. TOLEDO^C.
^ADEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS, UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN, VICENTE MENDEZ 595, CHILLÁN, CHILE. EMAIL: JARUMI@UDEC.CL, HTTP://ORCID.ORG/0000-0002-8101-3510.
^BFINCA TOULA-PORTUGAL / COMITÉ NOIX DU PÉRIGORD-FRANCIA / FINCA LAS CABEZAS-ESPAÑA / LA NOCCIOLA-FACMA ITALIA / MALLINKO SA-CHILE / GTT NOGALES BIO BIO-CHILE, LA ESPUELA 881, CHILLÁN, CHILE.
^CDEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y LABORATORIO DE SUPERFICIES (ASIF), UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN, CASILLA 160-C, CORREO 3, CONCEPCIÓN, CHILE. EMAIL: PETOLEDO@UDEC.CL, HTTP://ORCID.ORG/0000-0003-2863-7997.

El estrés salino y la presencia de metales, en especial los catalogados como pesados, produce una serie de efectos negativos para los cultivos; entre ellos, limita el crecimiento de las plantas, produce malformación de las hojas, causa clorosis y necrosis, incrementa la aparición de moho y marchites, e inhibe la germinación y crecimiento de polen, con pérdidas previsibles para el sector agrícola. Un inventario de los factores naturales y antropogénicos que afectan la calidad de los recursos hídricos en las cuencas analizadas revela que no solo las actividades industriales, mineras y agrícolas tienen influencia, sino también la litología del suelo, la actividad volcánica y la aparición de aguas subterráneas y manantiales. Nuestros hallazgos deberían alertar a los agricultores sobre la necesidad de mejorar la calidad del agua antes de usarla para el riego.

ELEMENTOS QUE SUPERAN SIGNIFICATIVAMENTE LA NORMA

La composición química de las aguas naturales en Chile muestra una gran variabilidad a lo largo del territorio nacional, marcada por un alto contenido de sales en las zonas áridas del norte, el que decrece significativamente en las regiones más húmedas del sur. Las aguas del Norte Grande, según la información de la Dirección General de Aguas (DGA), poseen una conductividad que fluctúa entre 500 umhos/cm y 2.000 umhos/cm, que en ocasiones supera el valor máximo permitido por la Norma NCh1333 para riego (Orrego, 2002). En el Norte Chico el contenido salino es menor, aunque suele aumentar en los cursos inferiores de los ríos, al punto que su uso es restringido, como sucede en los ríos Copiapó, Huasco, Elqui y Limarí. Sánchez et al. (2016) explican que la aparición de carbonato y sulfato de calcio, y otros minerales y

Figura 1. Ubicación geográfica de las cuencas del río Choapa, río Maipo y río Rapel.



compuestos ocurre a partir de la meteorización de las rocas, que luego son transportados por el agua de riego y depositados en el suelo, donde se acumulan en la medida que el agua se evapora o es consumida por los cultivos. En un estudio reciente realizado por el Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM) se analizaron datos de la química del agua de las cuencas del río Choapa, río Maipo y río Rapel ubicadas en el centro-norte de Chile (Figura 1), en el período 2008-2016, y se evaluaron en el marco de los parámetros de calidad de agua para riego estipulados en la normativa chilena NCh1333. Los valores de la base de datos de la Dirección General del Aguas (DGA), mostraron que los elementos boro, cadmio, mercurio y molibdeno superan significativamente la norma en la mayoría de las estaciones de monitoreo, y que también lo hacen, aunque en menor grado, la salinidad medida como conductividad específica, el sulfato, el manganeso y la relación de absorción de sodio. En este artículo se analizan los factores naturales y antrópicos que contribuyen al aumento de elementos y compuestos en el agua de estas cuencas y se instala un alerta respecto a los efectos negativos de la mala calidad del agua sobre la actividad agrícola.

CALIDAD DE AGUA Y RIEGO

El agua de riego contiene un gran número de sales minerales disueltas, cuya composición y concentración varía según la fuente y época del año. En tiempos de extensa sequía la sociedad interpela como nunca a especialistas de todas las disciplinas respecto al origen de la sequía y de la mala calidad de la poca agua disponible, especialmente en las regiones del norte del territorio nacional. La respuesta no es sencilla porque el origen de la contaminación proviene de múltiples factores. En este estudio al menos se explican los factores naturales y antropogénicos que dan origen a la mala calidad del agua de riego en las cuencas del río Choapa, río Maipo y río Rapel. Luego se analiza el impacto tóxico sobre los cultivos producto del exceso de elementos y compuestos químicos en el agua de riego.

FACTORES NATURALES Y ANTROPOGÉNICOS

Una serie de factores tanto naturales como antropogénicos influyen y atentan contra la calidad del agua para riego en las tres cuencas estudiadas. Los factores naturales tienen origen en la composición heterogénea y variable de los suelos y subsuelos a lo largo del país. Por ejemplo, los suelos están com-

Tabla 1 Factores naturales y antropogénicos que afectan negativamente la calidad de agua para riego.

Cuencas	Factores naturales	Factores antropogénicos
Choapa	<ul style="list-style-type: none"> Litología de la cuenca compuesta por sedimentos de rocas volcánicas que poseen aluminio y calcio, lo que eleva el pH en algunas zonas. Altas temperaturas en el norte del país ocasionan una mayor evaporación de las masas de agua y por ende una mayor concentración de sales. 	<ul style="list-style-type: none"> Contaminación difusa por aguas servidas. Actividad agrícola. Descarga de RILES industriales. Concentración de minerales por extracción de agua.^a Descarga difusa de plaguicidas y fertilizantes. Descarga de RILES mineros. Contaminación difusa por ganadería.
Maipo	<ul style="list-style-type: none"> Precipitación nival, meteorización y lixiviación dan origen a la disolución de cobre y hierro.^b Escorrentía de arcillas (aluminosilicatos) con pH básico generan complejos de aluminio en solución.^c En el río Maipo sector las Melosas, se encuentra el Volcán Maipo por lo que hay disponibilidad de sulfuros que al mezclarse con agua dan origen a drenajes ácidos. En el sector del río Yeso existe una gran área que queda bajo la isoterma cero, lo cual provoca meteorización de las rocas y posterior lixiviación que da origen a sales en solución.^d En el río Colorado los niveles de sulfato son mayores debido al $MgSO_4$ presente en rocas carbonatadas. 	<ul style="list-style-type: none"> Actividades mineras en la región Metropolitana que concentra extracción de caolín, arcilla, caliza (2 millones ton/año) y yeso.^c Sobrepoblación, en la cuenca del río Maipo vive el 40% de la población de Chile, como consecuencia el agua presenta contaminación por vertimiento de aguas servidas en los centros poblados. Contaminación difusa por ganadería de veranada. Descarga de RILES de empresas agroindustriales, papeleras y metalmeccánica. Aportes de agroquímicos por agricultura cercana.
Rapel	<ul style="list-style-type: none"> Lixiviación superficial y subterránea de filones mineralizados de las franjas metalogénicas. Escorrentía de arcillas (aluminio y silicatos) con pH básico que generan complejos de aluminio en solución.^e Litología de la Región de O'Higgins donde está ubicada la cuenca, está compuesta principalmente por rocas calcáreas. Presencia de sulfuros por la actividad del volcán Tinguiririca y El Palomo, el sulfuro al mezclarse con agua da origen a drenajes ácidos. Lixiviación subterránea de formaciones geológicas. Recarga del río Claro por afloramiento de vertientes. 	<ul style="list-style-type: none"> Agua de proceso de actividades mineras. Drenaje de aguas de minas. Drenaje difuso de relaves mineros. Contaminación difusa por aguas servidas. Lixiviación de botaderos de material de descarte minero.⁵ Contaminación difusa por actividad industrial. Aplicación de fertilizantes y plaguicidas. Contaminación difusa por ganadería.⁵

^aDGA (2004a), ^bDGA (2004b), ^cSERNAGEOMIN (2017), ^dDGA (2003), ^eDGA (2004c).

puestos por rocas que poseen aluminio y calcio lo que eleva el pH, y muchas otras sales que se concentran por la rápida evaporación del agua debido a las altas temperaturas típicas de la zona norte de Chile. La lixiviación natural es otro factor importante de generación de sales que arrastradas hasta los cuerpos de agua afectan su calidad.

También cabe destacar el aporte de material sulfurado y rocas calcáreas provenientes de los volcanes y el afloramiento de aguas de vertientes. Los factores antropogénicos tienen su origen en la industria minera, en la industria agrícola-ganadera y en las actividades domésticas. En lo industrial destaca la alteración de los suelos debido a la mezcla con lixiviados generados por la actividad minera en la precordillera, lo que genera escorrentías de arcilla y disolución de cobre, hierro y sulfatos, también las descargas de RILES mineros e industriales. En lo agrícola-ganadero destacan las descargas de RILES de las agroindustrias, también la contaminación difusa por ganadería, y el aporte de agroquímicos en la práctica

agrícola. En lo doméstico lo más crítico es la contaminación difusa por aguas servidas. La Tabla 1 presenta un resumen detallado de los factores que afectan la calidad del agua de cada una de las tres cuencas estudiadas.

CULTIVOS AGRÍCOLAS AFECTADOS POR SALINIDAD Y METALES

Existe acuerdo que el principal efecto negativo que produce la salinidad en los cultivos es de tipo osmótico. La alta concentración de sales en la solución del suelo hace que el cultivo tenga que hacer un consumo extra de energía para poder absorber agua del suelo. Este efecto es similar al producido por estrés hídrico, en el que el cultivo sufre la falta de agua en el suelo respecto a lo que demanda para su normal desarrollo. El estrés salino ocasiona la inhibición del crecimiento de las plantas, malformación de las hojas, colores café y amarillento, clorosis, necrosis, incremento de moho, marchites e inhibición de la germinación y crecimiento de los tubos de polen con pérdidas significativas para la agricultura.

Los cultivos agrícolas también se ven afectados negativamente por la presencia de metales, en especial los catalogados como pesados, que son contaminantes ambientales severos, cuya toxicidad es un problema de creciente importancia por razones ecológicas, evolutivas, nutricionales y ambientales. Como metal pesado se hace referencia a cualquier elemento metálico que tenga una densidad relativamente alta y que sea tóxico o venenoso incluso a baja concentración (Lenntech Water Treatment and Air Purification 2004). Los metales pesados incluyen plomo, cadmio, níquel, cobalto, hierro, zinc, cromo, hierro, arsénico, plata y los elementos del grupo platino (Nagajyoti, 2010). En la Tabla 2 se realiza un análisis del origen y la toxicidad para los cultivos que generan elementos y compuestos que están por sobre la normativa de agua para riego NCh1333. La Tabla 2 presenta un resumen de la toxicidad para los cultivos de cada uno de los elementos y compuestos que se encuentran en exceso en cada una de las tres cuencas estudiadas.

Tabla 2. Origen y toxicidad de los elementos que sobrepasan la norma de calidad de agua para riego NCh1333.

Elemento/ Compuesto	Especies en agua de riego	Toxicidad para cultivos
Aluminio (Al)	Al ³⁺ Al(OH) ²⁺ Al(OH) ²⁺ Al(OH) ⁴⁻ AlO ₄ Al ₁₂ (OH) ₂₄ (H ₂ O) ₁₂ ⁷⁺ Al(SO ₄) ⁺ Al(SO ₄) ₂ ⁻ AlF AlF ²⁺ AlF ₂ ⁺	<ul style="list-style-type: none"> En los suelos ácidos, especialmente en aquellos cuyo pH es menor a 4,5, el aluminio se solubiliza y se convierte en su catión trivalente Al³⁺, que en alta cantidad es tóxico para las plantas.^a Un síntoma visible de la toxicidad por Al, es la inhibición del crecimiento de raíces y brotes. Las raíces se vuelven ineficientes en la absorción de nutrientes y agua.^{b,c} Sin embargo el estudio presentado muestra que los suelos de las zonas son de carácter neutro básico por lo que la presencia de aluminio no debería provocar problemas y debiera ser desplazada por el calcio en el suelo.
Boro (B)	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O H ₃ BO ₃ Arcillas	<ul style="list-style-type: none"> Los límites entre la deficiencia y la toxicidad del boro son muy reducidos, tanto que aplicaciones de boro pueden ser extremadamente tóxicas para algunas plantas en concentraciones que están ligeramente sobre el óptimo para otras^d. La toxicidad del boro en las plantas se caracteriza por el crecimiento lento, malformación de las hojas, colores café y amarillento, clorosis, necrosis, incremento de moho, marchites e inhibición de germinación de polen y crecimiento de tubos de polen.^e Dado que los resultados muestran que el Boro esta alrededor de 1 mg/L afecta a los cultivos semi tolerables (verduras) y sensibles (frutas)^f significa que es un elemento que se debe tratar.
Cadmio (Cd)	Cd ⁺² CdCl ₂	<ul style="list-style-type: none"> Los síntomas de toxicidad de Cadmio son fácilmente identificables en las plantas, los más generales son retraso del crecimiento y la clorosis. La clorosis se puede deber a una deficiencia de Fe en conjunto de la interacción con metales tóxicos. También ocurre por una interacción directa o indirecta con el hierro foliarg. Se ha demostrado en varias especies de plantas que el Cd⁺² disminuye la asimilación de carbono, produce estrés oxidativo que puede generar marchitamiento^g.
Cloruros (Cl-)	NaCl KCl CaCl ₂	<ul style="list-style-type: none"> La norma de calidad de agua de la CCME^h indica que las plantas sensibles no deberían ser regadas con aguas que contienen >100 mg/L de cloruro. Las plantas absorben el cloruro de la solución del suelo como ión Cl⁻. El cloruro desempeña un papel importante en algunas plantas, incluyendo en la fotosíntesis, el ajuste osmótico y la supresión de enfermedades de las plantas. Si la concentración de cloruro en las hojas excede la tolerancia del cultivo, se desarrollan síntomas de lesión, como quemadura de la hoja o secado del tejido de la hojaⁱ. Además, se presenta una necrosis excesiva (tejido muerto) que suele ir acompañada de una caída temprana de la hoja o de una defoliación^k.
Cobre (Cu)	Calcopirita Calcosita Bornita Carbonato	<ul style="list-style-type: none"> El cobre es un elemento esencial para la vida de las plantas, pero se ha detectado que concentraciones de 100 a 1.000 mg/L en soluciones de nutrientes han sido encontrados tóxicas para un gran número de plantas. En concentraciones superiores a las requeridas se demostró que inhibe el crecimiento e interfiere importantes procesos celulares como la fotosíntesis y la respiración. Las plantas que crecen en presencia de altos niveles de Cu normalmente muestran una reducción de la biomasa y síntomas cloróticos^l. En las plantas, los altos niveles de cobre pueden competir con la absorción de hierro y, en ocasiones, de molibdeno o zinc^m.
Hierro (Fe)	Hematita (Fe ₂ O ₃) Magnetita (Fe ₃ O ₄) Limonita (FeO(OH)) Siderita (FeCO ₃) Pirita (FeS ₂) Ilmenita (FeTiO ₃) Óxidos e hidróxidos	<ul style="list-style-type: none"> Una alta concentración de Hierro provoca retraso del crecimiento de las plantas; reducción en el tamaño de la hoja; profundización del color de la hoja verde (particularmente en las hojas más jóvenes); enrojecimiento de los tallos y hojas más viejas; marchitamiento de brotes; coloración amarillenta o muerta de las hojas más viejasⁿ. La solubilidad del Fe³⁺ es muy baja, se requiere que se reduzca a ión ferroso (Fe²⁺) para la absorción en cultivos^o. En suelos alcalinos es baja la disponibilidad por lo que no presenta problemas.
Manganeso (Mn)	Rodocrosita Franklinita Psilomelana Manganita	<ul style="list-style-type: none"> El Mn se considera menos tóxicos para las raíces en comparación con otros metales. Entre sus efectos se encuentra la reducción del número y tamaño de nódulos, germinación y crecimiento retardado, necrosis, agrietamiento en las frutas y quemaduras en las puntas de las hojas^p. Las concentraciones excesivas de Mn en los tejidos de las plantas pueden alterar diversos procesos, como la actividad de las enzimas, la absorción, la translocación y la utilización de otros elementos minerales (Ca, Mg, Fe y P), lo que causa un estrés oxidativo. El umbral de la toxicidad por Mn y la tolerancia a un exceso de este metal dependen en gran medida de las especies de plantas y de los cultivos que son variados dentro de una misma especie^q. En suelos neutros o alcalinos no presenta problemas.
Mercurio (Hg)	Cinabrio (HgS) Cordeorita (Hg ₂ Cl ₂) Livingstonita (HgSb ₄ S ₆)	<ul style="list-style-type: none"> El mercurio metálico y compuestos de mercurio en los suelos son fácilmente adsorbidos por las plantas y han producido retardo en el crecimiento en ellas. Se ha observado graves pérdidas en los brotes en especies sensibles como la lechuga y zanahorias^r. Se asocia a la alta concentración de Cloruro de Mercurio (HgCl₂), la reducción de la biomasa y la disminución en la clorofila^s.
Molibdeno (Mo)	Molibdenita (MoS ₂) Wulfenita (PbMoO ₄) Powellita (CaMoO ₄)	<ul style="list-style-type: none"> En el suelo el molibdeno existe predominantemente en forma de molibdato de oxianión, que sirve como un micronutriente esencial en todos los reinos de la vida. En el suelo, un punto crítico se refiere a la biodisponibilidad de este que aumenta a un pH de 5,5 y decrece a un pH más bajo debido a la adsorción de molibdato al suelo oxidante^t. En condiciones de pH bajo a 5,5 la asimilación de molibdato es limitada, lo que da como resultado una deficiencia de molibdeno asociada con una actividad reducida de las enzimas de molibdeno y reducciones en el crecimiento y rendimiento de las plantas^u. La toxicidad por molibdeno es muy poco común, y en algunos cultivos los tejidos pueden tener varios miles de ppm y aun así no mostrar síntomas. En pocos casos excepcionales se ha informado de la aparición de un amarillo dorado en las hojas. Aunque no es importante para los cultivos hortícolas, los animales rumiantes que consumen pastos o que se alimentan con altos niveles de molibdeno (de entre 5 y 10 ppm en el tejido) pueden enfermarse de molibdenosis; esta consiste en que el molibdeno compite e induce a la deficiencia de cobre en el interior del animal^v.
Sodio (Na)	Criolita Halita (NaCl) Zeolita Nitrato sódico	<ul style="list-style-type: none"> El sodio también puede afectar indirectamente el crecimiento de los cultivos al causar desequilibrios nutricionales y al degradar la condición física del suelo. Los niveles altos de sodio pueden causar deficiencias de calcio, potasio y magnesio, y los niveles altos de sodio en relación con las concentraciones de calcio pueden reducir severamente la velocidad a la que el agua se infiltra en el suelo^w.
Sulfato (SO₄)⁻²	CaSO ₄ MgSO ₄ Na ₂ SO ₄ S (en arcillas)	<ul style="list-style-type: none"> El sulfato contribuye a la salinidad del agua de riego junto con Na, Ca, Mg, Cl y HCO₃. Un agua de riego con niveles de sulfato entre 1.000 y 1.500 mg/l es un agua con una Conductividad Eléctrica alta y por lo tanto puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos^x.

^aMossor-Pietraszewska (2001) ^bThornton et al. (1986). ^cChang et al. (1999). ^dGupta et al. (1985). ^eNable et al. (1997). ^fU. Chile-SAG (2005). ^gDas et al.(1997) ^hPerfus-Barbeoch (2002). ⁱCCME (2011). ^jHanson et al. (2006). ^kAyers and Westcot (1985). ^lYruela (2005). ^mFlemming and Trevors (1989). ⁿSnowden and Wheeler (1993). ^oFageria et al. (2008). ^pEl-Jaoual and Cox (1998). ^qMillaleo et al.(2010). ^rCargnelutti et al. (2006). ^sChen and Yang (2012). ^tKaiser et al. (2005). ^uBittner (2014). ^vRuiz (2017).

LIMITAR FACTORES ANTRÓPICOS Y MITIGAR

El exceso de cloro, cobre, hierro, manganeso, mercurio metálico, sodio, entre otros elementos y compuestos químicos detectados en el agua para riego de las cuencas del río Choapa, río Maipo y río Rapel, respecto a la norma NCh1333 para el caso de riego, produce una se-

rie de efectos negativos para los cultivos, por ejemplo limita el crecimiento de las plantas, produce malformación de las hojas, causa clorosis y necrosis, incrementa la presencia de moho y marchites, e inhibe la germinación y el crecimiento de polen, con pérdidas significativas para el sector agrícola. Si

bien hay factores naturales que contribuyen a la salinidad de las aguas, urgentemente se deben limitar los factores antrópicos y en el intertanto recurrir a medidas de mitigación, como tecnologías de tratamiento de agua para riego costo-efectivas y sencillas de usar por los agricultores. **Ra**

AGRADECIMIENTOS

Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería CRHAM ANID/Fondap/15130015.

*Este artículo será publicado con su bibliografía completa en el sitio web www.redagricola.com