



**Estudio:  
“Análisis Modelación de Embalses de Pre  
cordillera”**

**RESUMEN EJECUTIVO**

**Entidad Mandante:  
Corporación Regional de Desarrollo Productivo, Región de Coquimbo  
(CRDP Coquimbo)**

**Ejecutor:  
Laboratorio de Prospección, Monitoreo y Modelamiento de recursos  
agrícolas y ambientales (PROMMRA)  
Departamento de Agronomía  
Universidad de La Serena**



## 1. Resumen del Proyecto.

La iniciativa denominada “**Análisis Modelación de Embalses de Precordillera**”, fue adjudicado por Licitación de la Corporación Regional de Desarrollo Productivo (CRDP) de la Región de Coquimbo, al Laboratorio de Prospección, Monitoreo y Modelación de Recursos Agrícolas y Ambientales (PROMMRA) de la Universidad de La Serena. La ejecución se desarrolló desde octubre 2015 a octubre 2016, por período de ejecución de 12 meses.

Los enfoques hidrológicos tradicionales utilizados en los balances oferta-demanda ya no están respondiendo de manera adecuada sobre la real disponibilidad de las fuentes habituales y menos podrían permitir desarrollar una planificación a futuro sin tener en consideración aspectos que permitan situarnos en escenarios menos vulnerables y con menor incertidumbre.

Dado el contexto mencionado es que se han iniciado una serie de estudios, con distintos niveles de avance, respecto a alternativas para dar mayor sustentabilidad hidro-climática a las actividades humanas en las cuencas de la Región de Coquimbo. Algunas de estas propuestas son operativas, otras reglamentarias y varias de infraestructura. Por citar algunas de las de infraestructura, se puede mencionar los embalses precordilleranos de la comuna de Combarbalá (embalse Valle Hermoso, embalse La Tranca y Embalse Murallas Viejas).

En cada cuenca se presentan múltiples propuestas de embalses de pre-cordillera y otras obras con el objeto de provisionar los recursos hídricos en forma efectiva. En este contexto se hace necesario establecer los efectos en la seguridad de riego y dimensionar las principales externalidades provocadas por las obras en estudio y/o construcción. Para estos efectos, se planteó el desarrollo de un estudio básico de modelación de embalses de pre cordillera mediante el uso del modelo hidrológico WEAP.

El modelo WEAP fue recientemente aplicado en la cuenca del Huasco, y está siendo estudiado, ampliado y aplicado en otras cuencas en Chile, particularmente en la cuenca del Limarí por la Universidad de La Serena. En el mismo contexto del estudio se desarrollaron escenarios para las cuencas, con este modelo, en conjunto con organizaciones de usuarios de agua y se capacitó en el uso del sistema WEAP, obteniendo favorables resultados en la ejecución del estudio e implementación del sistema, siendo un aporte a la toma de decisiones de manera informada.

Dado esto, el presente estudio propuso utilizar los modelos existentes para cada cuenca, sin embargo, se planteó, en función de la disponibilidad de datos, extender las series temporales y recalibrar del modelo de forma que los balances puedan hacerse de forma dinámica.

Los resultados obtenidos en la ejecución del proyecto fueron:

1. Ajuste y calibración de los modelos WEAP de la Cuenca de Elqui, Limarí y Choapa: Se actualizaron y extendieron los modelos WEAP 1999 – 2014 de cada cuenca al período 1990 – 2015.
2. Definición y modelación de los escenarios para la Cuenca de Elqui, Limarí y Choapa: Se revisaron las carteras de inversión pública en infraestructura de almacenamiento para la Región de Coquimbo, siendo priorizadas en función de criterios técnicos relacionados a la disponibilidad de información y de insumos

para el modelo WEAP.

3. Modelación de los escenarios para cada cuenca: Se identificaron, determinaron y analizaron las externalidades (positivas y negativas) para cada uno de los escenarios de las cuencas, para determinar el efecto de las obras en cada área de influencia.
4. Plataforma de Capacitación E-Learning: Se definió, desarrollo e implementó una plataforma de capacitación E-Learning orientada a la entrega de conocimientos en el manejo de recursos hídricos en zonas áridas.
5. Programa de difusión, transferencia y capacitación: Se estableció un programa de difusión y transferencia para dar a conocer sobre la ejecución del estudio y los principales alcances de su ejecución. Además, se definió un programa de capacitación escalonada en el uso del Modelo WEAP en cada cuenca

El equipo de trabajo de este proyecto estuvo constituido por profesionales del Laboratorio de Prospección, Monitoreo y Modelación (PROMMRA), perteneciente al Departamento de Agronomía de la Universidad de La Serena, liderado por el Dr. Pablo Álvarez Latorre.

## **2. Objetivo y Propósito del Proyecto.**

### 2.1. Objetivo del Proyecto.

Usar el modelo WEAP-Elqui, WEAP-Limarí y WEAP-Choapa para dimensionar las externalidades provocadas por las múltiples propuestas de embalses de pre-cordillera y otras obras en cada cuenca, con ello, establecer los efectos en la seguridad de riego, tal que permitan que los esfuerzos públicos generen una mejor condición global en los territorios, minimizando las externalidades negativas y maximizando la seguridad de riego en su conjunto.

### 2.2. Objetivos Específicos.

- a. Identificar los escenarios con los embalses y otras obras en cada cuenca, que serán modeladas, al menos 2 por cada cuenca (Elqui, Limarí y Choapa) y máximo 8 en total, en función de prioridades establecidas con los actores relevantes de cada cuenca y los tomadores de decisiones.
- b. Configurar y calibrar el sistema de gestión de recursos hídricos superficiales y subterráneos a utilizar (WEAP), para la modelación de las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa.
- c. Desarrollar los escenarios para las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa, identificados con los actores relevantes del agua en las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa.
- d. Desarrollar capacitación a actores relevantes del agua y tomadores de decisiones, involucrados en el desarrollo hídrico de las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa.

### **3. Productos Desarrollados.**

- Ajuste y calibración de los modelos WEAP de la Cuenca de Elqui, Limarí y Choapa.
- Definición de los escenarios para cada cuenca.
- Modelación de los escenarios para cada cuenca.
- Plataforma de capacitación E-learning.
- Capacitación en el uso del Modelo WEAP.

### **4. Actividades Desarrolladas.**

El proyecto consideró el desarrollo de 5 componentes y un total de 20 actividades, las cuales se detallan a continuación.

#### *a. Etapa 1. Ajuste y calibración de los modelos WEAP de las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa.*

- a.1. Recopilación de información climática, hidrológica y de uso de suelo de las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa.
- a.2. Prolongación del año base de los modelos a 1990.
- a.3. Actualización de los modelos WEAP a la última temporada.
- a.4. Incorporación de caudales de cabecera.
- a.5. Calibración de los modelos.

#### *b. Etapa 2. Definición y validación de los escenarios para cada cuenca.*

- b.1. Recopilación de antecedentes base para escenarios.
- b.2. Clasificación y priorización de escenarios por cuenca.
- b.3. Validación de los escenarios con los actores vinculados a los recursos hídricos de cada cuenca.
- b.4. Determinación y descripción de los escenarios validados por cuenca.

#### *c. Etapa 3. Modelación de los escenarios para cada cuenca.*

- c.1. Definición de criterios para determinar externalidades de embalse de precordillera.
- c.2. Modelación del escenario base y escenarios de embalse de precordillera para las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa.
- c.3. Identificación de las externalidades de los escenarios de embalse de precordillera para las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa.
- c.4. Análisis de las externalidades de los escenarios de embalse de precordillera para las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa.
- c.5. Recomendaciones en gestión y optimización del uso del agua, para cada escenario de precordillera por cuenca.

#### *d. Etapa 4. Plataforma de Capacitación E-learning.*

- d.1. Diseño del modelo de capacitación a desarrollar con la plataforma.
- d.2. Implementación de la plataforma.
- d.3. Implementación del programa de capacitación.
- d.4. Evaluación de la plataforma.

#### e. Etapa 5. Talleres de Capacitación.

- e.1. Diseño de los talleres de capacitación.
- e.2. Realización de los talleres de capacitación.

### **5. Resultados por componente.**

#### a. Etapa 1. Ajuste y calibración de los modelos WEAP de la Cuenca de Elqui, Limarí y Choapa.

Los modelos utilizados para las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa, son los desarrollados por RHODOS y contemplaron la prolongación de la serie de tiempo ajustado al año base de los modelos correspondiente, el cual en un principio considerada la serie 2000 – 2014, mientras que en los modelos CRDP\_PROMMRA la serie comienza en 1990 y culmina en el año 2015, contemplando una serie temporal de 25 años.

Es así como se incorporan dos eventos importantes en la serie, (1) el período de sequía entre 1993-1996, y (2) el evento Niño de 1997. A partir de ello, se realizó la calibración para el período comprendido entre 1999 - 2011. El proceso de validación consistió en la actualización del modelo desde el período 2011 al 2014, completando la hidrología con nuevos datos, y evaluando si los datos entregados por el modelo eran consistentes con los datos observados por la operación del sistema en la realidad.

Los tres modelos, correspondiente a cada cuenca, se sometieron a la evaluación estadística, en datos observados y modelados, tanto para el volumen embalsado como para estaciones fluviométricas de cada cuenca. Dentro de los estadígrafos evaluados se encuentra el índice de Nash – Sutcliffe (NSE), el índice PBIAS, el índice RSR, y los coeficientes de correlación ( $r$ ) y determinación ( $R^2$ ); de manera de apreciar el desempeño del modelo.

En cada parámetro sometido a evaluación estadística, se obtuvo una buena valoración de los estadígrafos aplicados. De esta manera los modelos de las distintas cuencas, presentan un buen ajuste y calibración respecto a los datos observados.

#### b. Etapa 2. Definición de escenarios para cada cuenca.

En el modelo Cuenca del Río Elqui – CRDP PROMMRA, se generaron dos tipos de escenarios. En primer término, se desarrollaron escenarios de mejoramiento en las eficiencias, tanto para conducción (canales), como para aplicación (riego).

Para el escenario de eficiencia de conducción se simuló que los canales de la cuenca disminuyen totalmente las pérdidas, generando una eficiencia del 100%. Ligado a ello, se crearon subescenarios, definidos según la sectorización de la eficiencia. De esta manera se creó un subescenario de eficiencia de conducción aplicado a los canales ubicados sobre el embalse Puclaro, otro subescenario aplicado a los canales ubicados bajo el embalse Puclaro, y un escenario de eficiencia de conducción para la totalidad de los canales de la cuenca.

Para el desarrollo del escenario de eficiencia de aplicación, este contempló que las zonas cultivadas, presentan una eficiencia de riego de un 85%. Tal como se desarrolló en el escenario de eficiencia de conducción, se crearon tres subescenarios a partir de la espacialización de los nodos de cultivo en la cuenca, con el mismo criterio.

A partir de esto, se desarrolló un último escenario correspondiente a una situación de máxima eficiencia, el cual contempló la eficiencia de aplicación de las zonas de riego, y la eficiencia de conducción para los canales. Este escenario se creó para la totalidad de la cuenca, sin diferenciar áreas.

En segundo término, se realizó un escenario correspondiente a la construcción del embalse Piuquenes ubicado en el Estero Derecho. Dicho escenario se desarrolló con las características del propio proyecto Piuquenes, proporcionado por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

En el modelo Cuenca del Río Limarí – CRDP PROMMRA, se desarrollaron los escenarios correspondientes a la construcción de los embalses de cabecera de la cuenca; embalse Valle Hermoso, ubicado en el río Pama; el embalse Murallas Viejas, ubicado en el río Combarbalá; el embalse La Tranca, ubicado en el río Cogotí; y el embalse Rapel, ubicado en el río Rapel. A partir de estas cuatro obras hidráulicas, se desarrollaron dos escenarios por embalse, con las características que los respectivos proyectos contemplan, según la información proporcionada por la DOH.

El primer escenario corresponde a la construcción del embalse con la superficie de riego actual a la zona de influencia de los embalses, y el segundo escenario contempla la superficie de riego proyectada o nueva superficie beneficiada. Cabe destacar que para los embalses Valle Hermoso, Murallas Viejas, y La Tranca, se desarrolló una regla operacional, en función a la demanda que el embalse satisface a las respectivas zonas de cultivo y el volumen almacenado en el mes donde se toma la decisión del volumen a distribuir en la temporada (En este escenario el mes de decisión es abril).

Para el modelo Cuenca del Río Choapa – CRDP PROMMRA, se crearon los escenarios respecto a construcción del embalse Chalinga, ubicado en el río Chalinga, y el embalse Canelillo, ubicado en el río Choapa. Ambas obras contemplaron el desarrollo de los escenarios respectivos, con las características que la DOH proporcionó para su construcción. Para el embalse Canelillo en particular, se construyó una regla operacional con respecto a la demanda que este es capaz de entregar y el volumen almacenado en un mes de toma de decisión (En este escenario el mes de decisión es abril).

### c. Etapa 3. Modelación de los escenarios para cada cuenca.

Para cada modelación de los escenarios descritos anteriormente, se evaluaron y analizaron las externalidades en 5 componentes: aguas subterráneas, relacionado a las recarga de los acuíferos que se encuentran dentro del área de influencia, o de aquellos que evidencien algún efecto; aguas superficiales, a través de los efectos que provocan en el caudal pasante en algún punto de la cuenca; volúmenes almacenados en los embalse que se ya se encuentran operativos en las respectivas cuencas; satisfacción de la demanda de las zonas de cultivos, a través del porcentaje de cobertura en los nodos ubicados en la zona influenciada por el embalse; y por último la seguridad de riego, relacionado con la cobertura de la demanda, y las veces que esta es satisfecha en un determinado porcentaje.

A partir de esto, en la cuenca de Elqui se observó, que un mejoramiento en la eficiencia de aplicación permite mejorar la satisfacción de la demanda en un 7,4% en algunos periodos de la serie, sobre todo en cultivos anuales, que suplen su demanda después de haber suplido la demanda de los cultivos frutales. Al igual que el escenario anterior, un mejoramiento en la eficiencia de conducción permite aumentar la oferta para los sitios de demanda, de esta manera logran aumentar la cobertura de la demanda en un 7,1% en

algunos años de la serie. Sin embargo, este mejoramiento conlleva una disminución en la recarga de los acuíferos de hasta un -70% en uno de ellos. De esta manera se recomienda realizar un estudio hidrogeológico en detalle sobre el revestimiento de canales y el efecto que estos provocan en la recarga de acuíferos, con el fin de puntualizar secciones de canales a revestir que permitan un aumento de la oferta, sin afectar las aguas subterráneas.

La construcción del embalse Piuquenes, no permite mejorar la seguridad de riego cuando se establece un aumento en la superficie de riego. Para ello, se recomienda mejorar los sistemas de riego, y así aumentar la eficiencia en la aplicación a un 85%. De esta manera se logra aumentar la cobertura de la demanda y la seguridad de riego, llegando a un 85,5%.

Para la cuenca de Limarí, la construcción de los cuatro embalses en una situación con superficie actual, provocan un mejoramiento en la satisfacción de la demanda, en comparación a un escenario sin embalse, con aumentos de un 10%, como es el caso de la zona de riego del río Pama. Sin embargo, en una situación con superficie nueva contemplada por el proyecto para cada embalse, la cobertura de la demanda disminuye un 7% para esa misma zona. De esta manera se recomendó ajustar la nueva superficie de riego proyectada para los 4 embalses de cabecera, con el fin de lograr un aumento en la satisfacción de la demanda y seguridad de riego. Se recomienda para el embalse Valle Hermoso 650 ha; el embalse Murallas Viejas 1.420 ha; el embalse La Tranca 2.500 ha; y el embalse Rapel 1.600 ha.

En la cuenca de Choapa, el embalse Chalinga permite aumentar la seguridad de riego en un 0,6% en las zonas de cultivo ubicadas en el área de influencia, cabe destacar que el escenario se realizó en una situación con superficie actual; sin embargo, es posible mejorar los sistemas de riego de los cultivos aumentando su eficiencia de aplicación a un 85%, para lograr aumentar la cobertura y por ende la seguridad de riego.

Por otro lado, la construcción del embalse Canelillo permite aumentar la seguridad de riego a un 100%, en las zonas de cultivo ya establecidas bajo cortina del embalse; sin embargo, en la nueva superficie de riego, la seguridad en la cobertura de la demanda alcanza un 30,8%. Por lo tanto, se recomienda disminuir la nueva superficie de riego a 10.000 hectáreas, aumentando a un 81,4% la seguridad de riego.

Con el fin de generar la comprensión de manera fácil y sencilla, de los efectos generados (positivos y negativos) por los diferentes escenarios de embalse de precordillera modelados en las cuencas de estudio, se generaron instrumentos de visualización mediante herramientas de Sistema de Información Geográfica (SIG).

La visualización SIG de los resultados de cada uno de los escenarios se desarrollaron bajo dos miradas. La primera presenta el resultado del dato promedio modelado, mientras que el segundo considera la serie temporal analizada.

Los archivos desarrollados estuvieron en concordancia con las áreas de análisis del efecto de los embalses; considerando las zonas de riego para las componentes de satisfacción de la demanda y seguridad de riego, acuíferos para la visualización de las aguas subterráneas, para la componente de aguas superficiales se generaron los puntos de las ubicaciones de estos donde se mediría el caudal en cada uno de los puntos. Cada análisis se visualiza de manera simple en capas de formato KMZ para Google Earth.



#### d. Etapa 4. Plataforma de capacitación E-learning.

La implementación de la plataforma se realizó mediante diseño web responsive o adaptativo que es una técnica de diseño que busca la correcta visualización de una misma página en distintos dispositivos como ordenadores de escritorio, tablets y móviles. En el caso de los videos, también se implementaron con diseño responsivo, con clases especialmente desarrolladas para este fin.

La orientación en el uso de la plataforma para el estudiante se realizará en 3 dimensiones. Cada dimensión implica un canal paralelo de comunicación y ayuda no excluyentes entre sí, y que propician la comunicación y pronta respuesta a las problemáticas y dudas de los estudiantes. Los canales de apoyo considerados son videos tutoriales, ejercicios iniciales y correo electrónico. La evaluación de contenidos se realizará por cada módulo mediante una prueba en línea desde la plataforma.

El desarrollo de los contenidos del curso, se basaron en la utilización de metodologías de búsqueda, selección y análisis de información desde distintas fuentes, siempre asegurando la fidelidad y precisión de la información seleccionada. La estructuración propia de cada contenido sigue la siguiente estructura **(1)** revisión bibliográfica, **(2)** estructuración documento guía y **(3)** trabajo en plataforma. En la plataforma, se dispusieron diversos elementos multimedia para mejorar la experiencia de usuario. Dentro de estos encontramos tutor virtual, presentaciones en línea, documentos guía y los objetos de aprendizaje.

El curso "Principios de Hidrología y Modelación Hidrológica en Zonas Áridas", involucra el desarrollo de 5 módulos, dentro de los cuales se abordan temáticas de hidrología general enfocadas a la modelación hidrológica y tiene un total de 90 horas.

Tiene por objetivo principal *"desarrollar habilidades de análisis y asociación de información hidrológica, de manera que los estudiantes, sean capaces de comprender la operación de un modelo hidrológico; el cual se presenta como una herramienta de gestión de los recursos hídricos a nivel de cuenca y predial"*

Con esto el estudiante es una persona que ha potenciado sus capacidades para reconocer conceptos y manejo de recursos hídricos y del uso e interpretación de resultados de modelamiento hidrológico, en zonas áridas y semi áridas, con énfasis en las cuencas de la Región de Coquimbo.

Los estudiantes inscritos en el curso, fueron divididos en tres grupos, uno por cuenca (Limarí, Choapa y Elqui), distribuido cada grupo en un curso independiente para efectos de mantener una estructura y orden independiente por cuenca. Cada cuenca trabajará con una actividad de análisis práctico de manera independiente, con el objetivo de interiorizar de mejor forma las dinámicas propias de cada zona. Una vez finalizado cada uno de los prácticos, la información a nivel regional estará disponible para todos los alumnos, sin diferenciación de grupo, para entender de mejor manera el comportamiento diferenciados de las cuencas de la región.

La plataforma forma parte del sistema informático de la Universidad de La Serena, ya que el equipamiento informático se encuentra en las dependencias del Centro de Informática y Computación de la Universidad de La Serena (CICULS). Su ubicación le entrega características de estabilidad, seguridad, permanencia y operatividad a la plataforma bajo los estándares de la casa de estudios.

#### e. Etapa 5. Talleres de Capacitación.

Se diseñaron tres talleres de capacitación tipo, los cuales se replicaron en las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa con un total de 9 talleres en la Región. El taller 1 consideró las temáticas de modelamiento de escenarios base sobre los modelos extendidos desarrolladas en la ejecución del estudio y en la introducción al modelamiento de infraestructura de almacenamiento. El taller tipo 2 consideró el análisis e interpretación de escenarios de infraestructura de almacenamiento, con énfasis en los escenarios de cada cuenca (cada zona trabajó con sus propios escenarios). El taller tipo 3 contempló la modelación de obras de almacenamiento en cada cuenca (al igual que en el taller 3) con sus resultados finales y la introducción a la plataforma e-learning WEAP desarrollada, dejando inscritos en el curso a los asistentes a los talleres.

Los talleres fueron en modalidad presencial, y abordaron, además, temáticas sobre fundamentos de modelamiento, nociones de hidrología, normativas (código de agua y modelos operacionales de embalses), uso del suelo o demanda hídrica y nociones sobre cambio climático.

Los talleres contaron con la participación de profesionales de las Junta de Vigilancia de cada cuenca, de la Corporación Regional de Desarrollo Productivo de la Región de Coquimbo, de representantes de las Municipalidades, de programas estatales, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), del Centro del Agua para Zonas Áridas y Semi Áridas de América Latina y El Caribe (CAZALAC), de la Dirección General de Aguas (DGA), de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), del Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), de la Fundación Minera Los Pelambres, de las Gobernaciones Provinciales y del Gobierno Regional de la Región de Coquimbo.