



GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

**ACTUALIZACION DE LA OFERTA  
DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO  
EN EL SECTOR ACUIFERO DE CODEGUA  
VI REGION**

**REALIZADO POR:**

**DEPARTAMENTO ADMINISTRACIÓN  
DE RECURSOS HIDRICOS**

**S.D.T. N° 245**

**Santiago, agosto 2007**

REPÚBLICA DE CHILE  
 MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
 DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS  
 DEPTO. ADM. RECURSOS HÍDRICOS.  
 NSM/nsm

M.O.P.  
 DIRECCION GENERAL DE AGUAS  
 OFICINA DE PARTES  
 RESOLUCION FRAMITADA  
 09 OCT. 2007  
 Fecha .....

REF.: Aprueba El Estudio "ACTUALIZACION DE LA OFERTA DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO EN EL SECTOR ACUIFERO DE CODEGUA. VI REGION".

SANTIAGO, 09 OCT. 2007

D.G.A. N° 2387

VISTOS: El estudio "ACTUALIZACION DE LA OFERTA DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO EN EL SECTOR ACUIFERO DE CODEGUA. VI REGION". S.D.T. N°245 de Agosto de 2007; y las atribuciones que me confiere el artículo 300 letra c) del Código de Aguas.

RESUELVO: **EXENTA**

- 1.- APRUEBASE el Estudio denominado "ACTUALIZACION DE LA OFERTA DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO EN EL SECTOR ACUIFERO DE CODEGUA. VI REGION". S.D.T. N°245 de Agosto de 2007.
- 2.- COMUNIQUESE la presente resolución al Sr. Secretario Regional Ministerial de Obras Públicas de la VI Región, a los Departamentos de la Dirección General de Aguas y Oficina Regional de la Dirección General de Aguas de la VI Región.
- 3.- El presente estudio estará disponible en el Centro de Información de Recursos Hídricos y en la página web del Servicio [www.dga.cl](http://www.dga.cl)

ANÓTESE Y COMUNÍQUESE.

MINISTERIO DE HACIENDA OFICINA DE PARTES	
<b>RECIBIDO</b>	
CONTRALORÍA GENERAL TOMA DE RAZÓN	
<b>RECEPCIÓN</b>	
DEPART. JURIDICO	
DEP. T. R. Y REGIST.	
DEPART. CONTABIL.	
SUB DEP. C.CENTRAL	
SUB DEP. E.CUENTAS	
SUB DEP. C.P.Y. BIENES NAC.	
DEPART. AUDITORIA	
DEPART. V.O.P., U. y T.	
SUP DEP. MUNICIP.	
<b>REFRENDACIÓN</b>	
REF. POR \$	
IMPUTAC.	
ANOT. POR \$	
IMPUTAC.	
SEDOC. DTO.	
ING. JEFE	15669

DEPTO. DE ADMINISTRACION DE RECURSOS HÍDRICOS  
 ING. JEFE  
 NSM/nsm

*[Handwritten Signature]*  
 RODRIGO WEISNER LAZO  
 Director General de Aguas  
 MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>ASPECTOS GENERALES .....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>CRITERIOS A CUMPLIR EN UNA EXPLOTACION MAXIMA SUSTENTABLE.....</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS DE LA OPERACIÓN DEL MODELO PARA LA SITUACIÓN DE DEMANDA A JUNIO DE 2005 .....</b>	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>ACUIFERO DEL ESTERO CODEGUA.....</b>	<b>12</b>
7.1	SECTORES DE BALANCE DE FLUJO.....	12
7.2	ANTECEDENTES PREVIOS.....	13
7.3	DERECHOS DE AGUA .....	13
7.4	MODELO DE LA CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL .....	15
7.4.1	<i>Revisión del modelo.....</i>	<i>15</i>
7.4.2	<i>Ingreso de los pozos de extracción .....</i>	<i>15</i>
7.4.3	<i>Pozos de observación .....</i>	<i>17</i>
7.5	RÉGIMEN NATURAL .....	18
7.6	RESULTADOS SECTOR CODEGUA A DICIEMBRE DEL 2005.....	19
7.6.1	<i>Balances de Flujo .....</i>	<i>19</i>
7.6.2	<i>Descensos.....</i>	<i>21</i>
7.6.3	<i>Interacción Río Acuífero .....</i>	<i>22</i>
7.6.4	<i>Pozos Secos.....</i>	<i>25</i>
7.6.5	<i>Volumen de agua Utilizado desde el Acuífero.....</i>	<i>25</i>
7.6.6	<i>Simulaciones .....</i>	<i>25</i>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>26</b>

## MAPAS Y FIGURA

Figura 1 .....	5
Sectorización Acuíferos del Valle de Alhué, Cachapoal y Tinguiririca .....	5
Figura 2.- .....	6
Ubicación de los Sectores Acuíferos de la VI Región .....	6
FIGURA 3.....	7
Red de Drenaje, Delimitación Codegua y Límite del modelo numérico. ....	7
FIGURA 4 Sectores de Balance de Flujo.....	12
FIGURA 5. Modelo del acuífero del río Cachapoal, 2005.....	16
FIGURA 6. Sector de Codegua en el modelo .....	16
FIGURA 7.....	17
Pozos de Observación Sector de Codegua .....	17
FIGURA 8 Zonificación en el modelo del acuífero del río Cachapoal. ....	19
Figura 9 Evolución del nivel de la napa en los pozos de observación de Codegua .....	21
Figura 10 . Variación de los flujos entre la simulación y el Régimen Natural.....	23
Figura 11 .....	24
Caudales superficiales con probabilidad de excedencia 85% y $\Delta Q$ .....	24
Figura 12 .....	24
Razón entre $\Delta Q$ y los caudales superficiales con Probabilidad de excedencia 85%.....	24

## TABLAS

<b>Tabla 1. Ubicación de los Sectores Acuíferos de la VI Región, sector Cachapoal.....</b>	<b>6</b>
<b>Tabla 2. Disponibilidad Aguas Subterráneas Sectores Acuíferos de la VI Región.....</b>	<b>10</b>
<b>Tabla 3. Factores de Uso Previsible .....</b>	<b>14</b>
<b>Tabla 4. Pozos de observación en el sector de Codegua .....</b>	<b>17</b>
<b>Tabla 5. Balance de Flujos en el sector de Codegua, Régimen Natural .....</b>	<b>18</b>
<b>Tabla 6. Balance de Flujos ZB 1, Régimen Natural y Simulación.....</b>	<b>20</b>
<b>Tabla 7. Razón de descenso de la napa en el sector de Codegua .....</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 8. Afección caudal de afloramiento e infiltración. ....</b>	<b>23</b>
<b>Tabla 9. Caudales con 85% de probabilidad de excedencia en Codegua .....</b>	<b>24</b>
<b>Tabla 10. Volumen del Acuífero .....</b>	<b>25</b>



## **1 INTRODUCCION**

El creciente desarrollo de actividades agrícolas en la VIª Región ha generado un fuerte interés sobre los recursos hídricos subterráneos, debido a que las principales fuentes superficiales se encuentran agotadas. En este contexto, la Dirección General de Aguas ha decidido estudiar a escala regional los principales acuíferos de la VIª Región, generando el estudio SDT N° 209 “EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS DE LA VIª REGIÓN, Modelación Hidrogeológica de los Valles de Alhué, Cachapoal y Tinguiririca” con fecha Octubre, 2005. En este estudio se utilizó un conjunto de modelos numéricos en Visual MODFLOW, que permitió evaluar la demanda equivalente al mes de Junio del año 2004.

Dicho estudio fue actualizado, con el fin de evaluar la demanda vigente al 30 de Junio de 2005 y determinar las extracciones máximas que se pueden permitir en cada sector acuífero, de manera de cumplir con ciertos criterios establecidos por la Dirección, indicados en el estudio SDT N° 229 “EVALUACIÓN DE LA EXPLOTACIÓN MÁXIMA SUSTENTABLE DE LOS ACUÍFEROS DE LA VIª REGIÓN” con fecha de Julio 2006. Sin embargo, en dicho estudio no se actualizó el sector de Codegua, perteneciente al modelo de la cuenca del Cachapoal.

Por ello, en el presente informe, se realiza una actualización del modelo de Cachapoal, en el sector de Codegua, específicamente se efectúa una operación y actualización del modelo de la VIª Región, correspondiente al valle de Cachapoal, donde todos los parámetros de entrada son los que se describen detalladamente en el informe técnico SDT N° 209 “EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS DE LA VIª REGIÓN, Modelación Hidrogeológica de los Valles de Alhué, Cachapoal y Tinguiririca” (Octubre, 2005). En este informe se detallan todos los resultados obtenidos luego de operar el modelo, así como los procedimientos y supuestos realizados para el cumplimiento de los objetivos planteados.

## **2 OBJETIVOS**

Operar el modelo de aguas subterráneas de la VIª Región, con el fin de evaluar el efecto sobre el acuífero de la explotación en el sector de Codegua de la demanda vigente al 31 de diciembre del 2005, donde se entiende por demanda vigente a todos los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas constituidos, solicitudes en trámite y las regularizaciones informadas favorablemente por la DGA. De esta operación se obtienen resultados de balances de flujo, se analiza la interacción río – acuífero en el sector, y finalmente se analiza una serie de criterios de sustentabilidad que consisten en una interpretación de la Resolución DGA N° 341 de 2005, con el fin de determinar el caudal de explotación sustentable o demanda máxima posible de extraer en el sector.

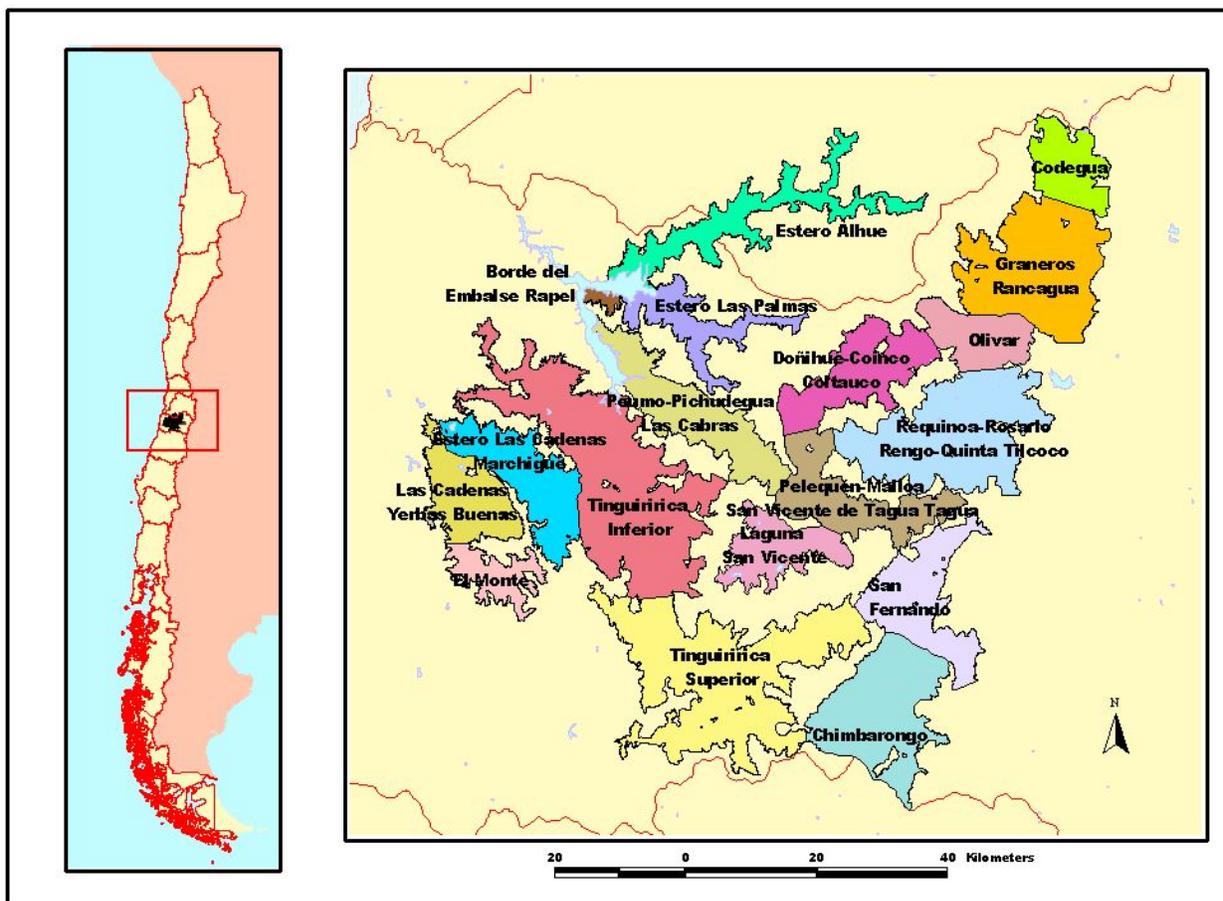
Si la demanda del sector de Codegua es sustentable, se procede a evaluar distintos escenarios de demanda (con un horizonte de 50 años), los que se plantean siguiendo el patrón de demanda histórico del sector correspondiente. En base a estos escenarios, se determina el caudal máximo sustentable que se puede extraer.

### 3 ASPECTOS GENERALES

En el informe técnico SDT N° 209, Octubre 2005, se definió en la VIª Región una serie de sectores hidrogeológicos de interés asociados a los valles de Alhué, Cachapoal y Tinguiririca. Esta definición se hizo en base a criterios hidrogeológicos, hidrológicos, geomorfológicos y de modelación numérica. Los distintos sectores se presentan en la Figura 1 y 2, donde se observa que el acuífero de Codegua se ubica en el extremo nororiental. En la Tabla 1 se describe a grandes rasgos cada uno de los sectores asociados al valle del Cachapoal.

El sector acuífero de Codegua se ubica al norte de la cuenca del río Cachapoal. Comprende la cuenca del río Angostura, el cual tiene su origen en el estero Codegua, que durante su trayecto recibe el aporte del estero Tronco, este último formado por la unión de los esteros Picarquín, y Las Viedmas. Aguas abajo de este aporte, el estero Codegua cambia de nombre, transformándose en el río San Francisco. Finalmente, el río Angostura nace de la unión de las aguas provenientes del río Peuco con el antes mencionado río San Francisco. Cabe señalar que el acuífero asociado a este sector alimenta subterráneamente a la cuenca del río Maipo. La Figura 3 presenta un esquema de los cursos hídricos asociados al sector de Codegua, y el límite del acuífero considerado en el modelo numérico.

**Figura 1**  
**Sectorización Acuíferos del Valle de Alhué, Cachapoal y Tinguiririca**



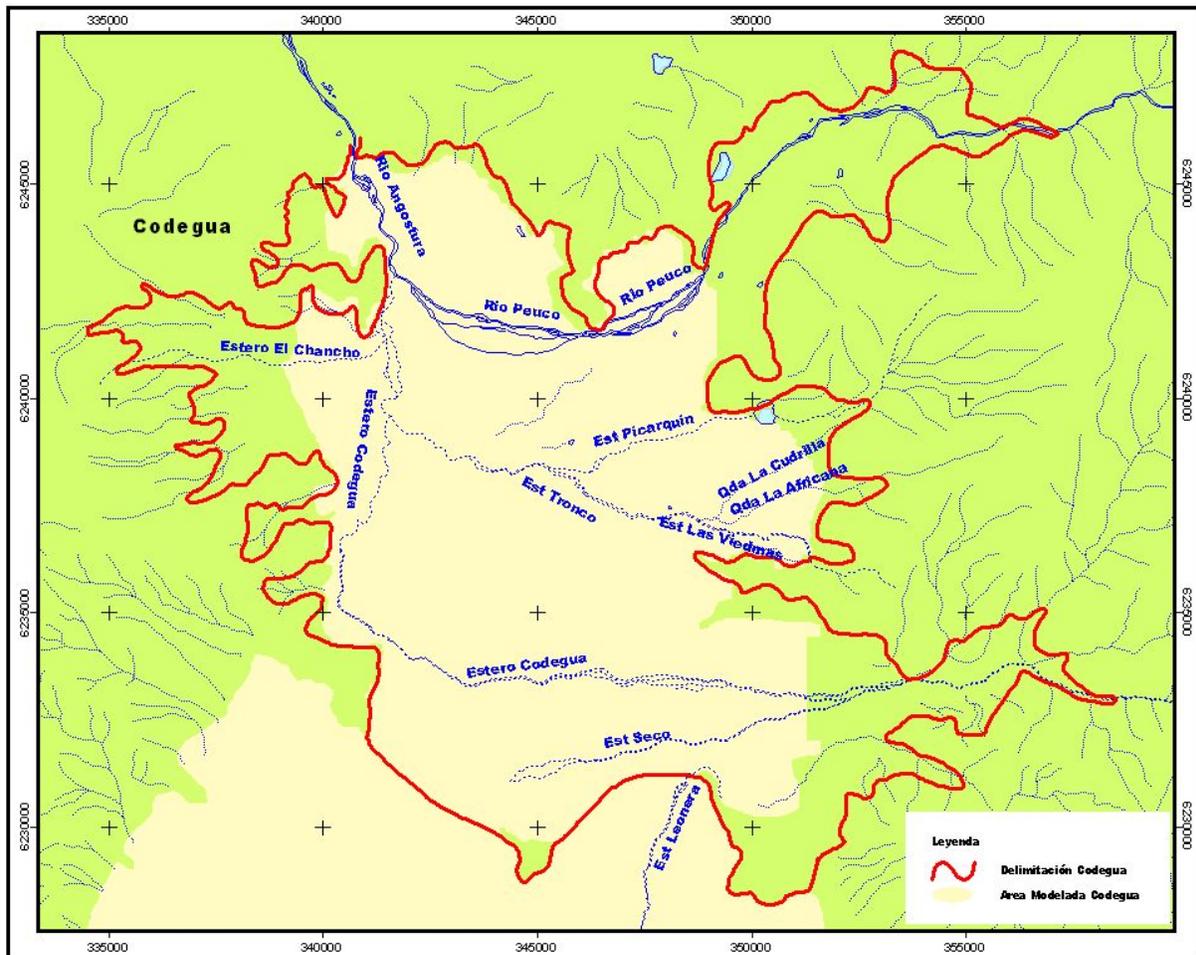
**Tabla 1. Ubicación de los Sectores Acuíferos de la VI Región, sector Cachapoal.**

VALLE DEL RIO CACHAPOAL	
SECTOR	DESCRIPCION
Codegua	Este sector se ubica en la cuenca del río Angostura.
Graneros - Rancagua	Este sector se ubica en la parte alta del relleno acuífero del Cachapoal, es decir, al norte del río Cachapoal entre las localidades de Graneros y Rancagua.
Olivar	Este sector se encuentra asociado a la localidad de Olivar y se ubica al sur de la localidad de Rancagua. La localidad de Olivar está delimitada superiormente por el río Cachapoal y termina aguas arriba de la división del valle hacia Doñihue y Requinoa.
Doñihue - Coinco - Coltauco	Este sector se compone por las localidades de Doñihue, Coinco y Coltauco. Sus principales fuentes superficiales son el curso intermedio del Cachapoal y el Estero Idahue.
Requinoa - Rosario - Rengo - Quinta de Tilcoco	Este sector se compone por las localidades de Requinoa, Rosario, Rengo y Quinta de Tilcoco. Se asocia a la cuenca del río Claro.
Pelequén - Malloa - San Vicente de Tagua Tagua	Este sector se compone por las localidades de Pelequén, Malloa y San Vicente de Tagua Tagua. La cuenca del estero Zamorano es el principal aporte superficial.
Peumo - Pichidegua - Las Cabras	Este sector se ubica en el parte inferior del río Cachapoal, y se compone por las localidades de Peumo, Pichidegua y Las Cabras. Representa la descarga del valle hacia el embalse Rapel.

**Figura 2.-  
Ubicación de los Sectores Acuíferos de la VI Región**



**FIGURA 3**  
**Red de Drenaje, Delimitación Codegua y Límite del modelo numérico.**



#### 4 CRITERIOS A CUMPLIR EN UNA EXPLOTACION MAXIMA SUSTENTABLE

A continuación se presenta una serie de criterios que deben ser cumplidos en aquellos sectores en que se requiere evaluar la demanda máxima sustentable. Es decir, se debe maximizar la explotación posible de obtener de cada sector acuífero, sujeto a una serie de restricciones que se describen a continuación.

##### a) Criterios De Sustentabilidad Sectores Acuíferos Abiertos

Con respecto a los sectores abiertos que utiliza la DGA son:

**Criterio 1: Descensos sustentables en el tiempo a nivel de sector acuífero.** Es decir, los descensos generales en el sector deben estar estabilizados para una operación del sistema de 50 años.

*Se considera que un descenso sustentable es aquel no mayor a 1[m] en los últimos 20 años del tiempo de operación total (50 años de simulación), en caso contrario se considera que los descensos son sostenidos.*

Si los descensos son sostenidos:

Se considera que el volumen de afección sobre el acuífero en el largo plazo (50 años) no debe afectar más allá de un 5% del volumen total del acuífero. En caso contrario, el sistema acuífero será considerado con afección y se deberá cerrar el acuífero.

$$\frac{V_0 - V_{50}}{V_0} < 0,05$$

Donde  $V_{50}$  indica el volumen del acuífero a los 50 años de operación indicados por el modelo y  $V_0$  corresponde al volumen inicial en el acuífero.

En caso que los descensos sean sostenidos y no se cumpla la condición de cierre para volúmenes, se deberá aumentar la extracción hasta alcanzar la condición del 5%.

**Criterio 2: Interferencia río acuífero.** Este criterio busca no afectar los recursos superficiales ya comprometidos. El grado de interacción debe ser menor que 10% de los flujos superficiales pasantes en cada una de las zonas, evaluados como el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia.

La afección sobre el cauce superficial se define como  $\Delta Q$ , termino compuesto por dos variables:

- Aumento de infiltración en el sector acuífero debido al aumento de la explotación.
- Disminución de los afloramientos del río.

$$\Delta Q \leq 10\% \cdot Q_{ANUAL, 85\%}$$

**Criterio 3: Satisfacción de la Demanda.** Para cada sector hidrogeológico, el modelo debe permitir una extracción mínima de un 95% del caudal ingresado como demanda y la oferta estará dada por el caudal de los pozos que el modelo indica que son factibles de obtener.

$$Q_{OFERTA} > 95\% \cdot Q_{DEMANDA}$$

**Criterio 4: Pozos Secos.** En cada sector hidrogeológico no debe haber más de un 5% de pozos desconectados o colgados. En caso contrario el sector quedará cerrado. Esta condición apunta a respetar derechos de terceros sin importar la cantidad que extraiga cada pozo.

$$\frac{N_{POZOS\ SECOS}}{N_{TOTAL\ POZOS}} < 5\%$$

**Criterio 5: Afección a Sectores Abiertos.** Verificar que el aumento de extracciones desde un sector no afecte la disponibilidad sustentable desde otro sector aguas abajo.

*El cumplimiento de este criterio estará dado porque ninguno de los sectores abiertos en que se aumente la demanda provoque el no cumplimiento de los criterios para los otros sectores abiertos, o para los sectores cerrados (dichos criterios para los sectores cerrados se especifican en el siguiente punto).*

## **b) Criterios De Sustentabilidad Sectores Acuíferos Cerrados**

Los criterios a utilizar para estos sectores cerrados, son los siguientes:

**Criterio 1: Descensos sustentables.** No se puede afectar el volumen almacenado del sector acuífero que ha sido cerrado, en más de un dígito porcentual. Es decir, si el sector acuífero ha sido cerrado por descensos sostenidos con una afección sobre el volumen total almacenado de N%, no es permitido que esta afección aumente al (N+1)%. Si esto se produce, aquel sector abierto que provoque dicho efecto, deberá ser cerrado.

**Criterio 2: Interferencia río acuífero.** No se puede aumentar el grado de interferencia río acuífero en un sector que ha sido cerrado en más de una dígito porcentual. Es decir, si el sector acuífero ha sido cerrado por interferencia río acuífero con una afección del N%, no es permitido que esta afección aumente al (N+1)%. Si esto sucede, el sector abierto que provoque este aumento deberá cerrarse.

**Criterio 3: Satisfacción de la Demanda.** No se puede disminuir el grado de cumplimiento de la demanda en un sector cerrado en más de una dígito porcentual. Es decir, si el sector acuífero ha sido cerrado por cumplimiento de la demanda de un N%, no es permitido que este cumplimiento disminuya a un (N-1)%. Si esto sucede, el sector abierto que provoque esta disminución deberá cerrarse.

**Criterio 4: Pozos Secos.** Si en uno de los sectores cerrados, se seca un nuevo pozo, se deberá cerrar aquel sector (abierto) en que se aumentó la demanda y que provocó este nuevo pozo seco en el sector cerrado.

## 5 RESULTADOS DE LA OPERACIÓN DEL MODELO PARA LA SITUACIÓN DE DEMANDA A JUNIO DE 2005

La Tabla 2 resume la disponibilidad de aguas subterráneas en el valle de Cachapoal determinada en el informe técnico SDT N°229 de Julio 2006, para cada uno de los sectores acuíferos. La disponibilidad expresada en términos de la explotación neta previsible de los usos de agua subterránea. Por otro lado se indica el estado final de cada sector.

Si el estado final es abierto, es un indicador de que después de avanzar hasta el caudal establecido, el sector podría satisfacer una demanda mayor, pero queda sujeta a una posterior evaluación. Por otro lado, si el sector se encuentra cerrado, es un indicador de que el sector acuífero, luego de entregar toda su oferta, no podrá satisfacer futuras demandas.

Como se expuso anteriormente, el sector de Codegua, objeto del presente estudio, no fue considerado en el informe técnico SDT 229 (Julio ,2006).

**Tabla 2. Disponibilidad Aguas Subterráneas Sectores Acuíferos de la VI Región**

VALLE DEL RIO CACHAPOAL		
SECTOR	EXPLORACION NETA PREVISIBLE [m <sup>3</sup> /s]	ESTADO FINAL
Graneros – Rancagua	1,570	Cerrado
Olivar	0,560	Cerrado
Doñihue - Coinco – Coltauco	0,870	Cerrado
Requinoa – Rosario - Rengo - Quinta de Tilcoco	1,690	Cerrado
Pelequén - Malloa - San Vicente de Tagua Tagua	1,020	Cerrado
Peumo - Pichidegua - Las Cabras	1,408	Cerrado
Laguna San Vicente	0,520	Cerrado

## 6 METODOLOGÍA

La metodología utilizada para evaluar el funcionamiento hidráulico y el recurso disponible en el sector de Codegua se resume en los siguientes puntos:

- 1) La simulación destinada a evaluar el sector de Codegua fue montada sobre la simulación generada en el estudio SDT N° 229, con fecha Julio de 2006, que corresponde a la simulación base, incluye la totalidad de la demanda del sistema acuífero del río Cachapoal, a excepción del sector de Codegua, actualizada a junio de 2005.
- 2) La única modificación efectuada a la simulación base fue la incorporación de la demanda de agua subterránea en el sector de Codegua.
- 3) La condición inicial utilizada para simular la extracción en Codegua corresponde al resultado de la calibración permanente del modelo, que simula el funcionamiento del acuífero en régimen natural.
- 4) Se efectuó un análisis de los derechos otorgados y de los derechos en trámite en el sector de interés. El escenario de extracción incorporado en el sector de Codegua corresponde a la demanda comprometida, que considera la totalidad de los derechos otorgados y los derechos en trámite con fecha de ingreso previa a la fecha de resolución del último derecho otorgado, que corresponde a 2 de octubre de 2003
- 5) Previo a la incorporación de los pozos de Codegua se realizó una revisión general de la simulación base.
- 6) Por último, se realizó la simulación y posteriormente se revisó la información proporcionada por esta. Con ella se cuantificó el efecto sobre el acuífero de la extracción de la demanda comprometida en el sector de Codegua.

## 7 ACUIFERO DEL ESTERO CODEGUA.

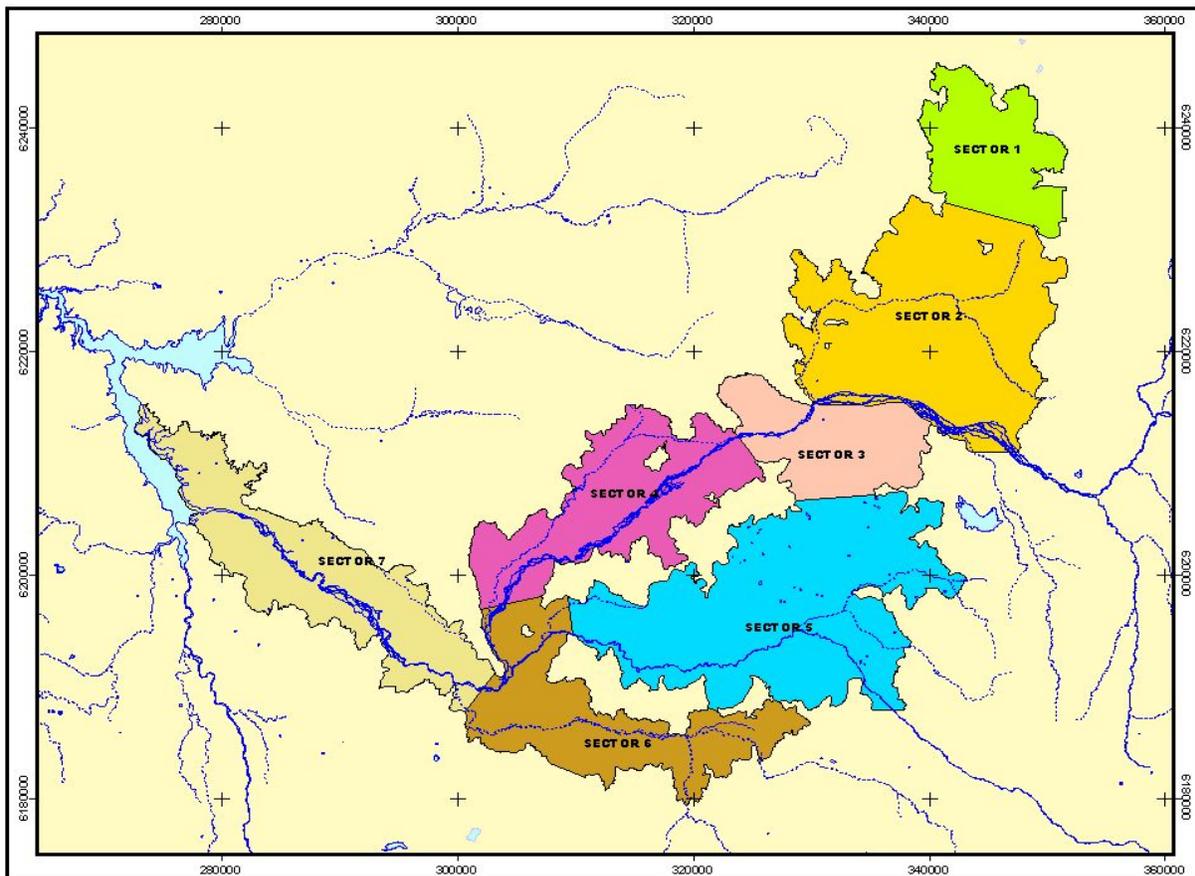
En el presente capítulo se entrega la información de entrada al modelo tales como número de pozos, demandas, etc., y los resultados de la simulación de la demanda comprometida a diciembre de 2005 en el sector de Codegua. En los resultados se incluyen los balances de flujo, los descensos del nivel de la napa en pozos de observación, la presencia de pozos secos, la interferencia río-acuífero, así como también la evaluación del cumplimiento de los criterios de sustentabilidad para la operación de los sistemas acuíferos.

### 7.1 SECTORES DE BALANCE DE FLUJO.

La sectorización del acuífero asociado al río Cachapoal proporciona una visión más detallada de los flujos que entran y salen del sistema:

- Sector 1: Codegua.
- Sector 2: Graneros - Rancagua.
- Sector 3: Olivar.
- Sector 4: Doñihue – Coinco – Coltauco.
- Sector 5: Requinoa – Rosario – Rengo – Quinta de Tilcoco.
- Sector 6: Pelequén – Malloa – San Vicente de Tagua Tagua.
- Sector 7: Peumo – Pichidegua – Las Cabras.

**FIGURA 4 Sectores de Balance de Flujo**



En el estudio SDT N° 229 se analizó el comportamiento del sector 2 al 7 frente a un escenario de demanda actualizada a junio de 2005. El modelo utilizado no incorporó las extracciones existentes en el sector de Codegua. De esta forma, la demanda existente en este sector representa un complemento del estudio SDT N° 229. La incorporación de la extracción del sector de Codegua se realizó sobre el modelo empleado en el estudio SDT N° 229, estudiando las tendencias del nivel de la napa en el sector.

## **7.2 ANTECEDENTES PREVIOS.**

Los antecedentes necesarios para evaluar el funcionamiento del acuífero en el sector de Codegua fueron:

- i) Registro de derechos de agua en la cuenca del estero Codegua a diciembre de 2005.
- ii) Modelo de la cuenca del río Cachapoal, actualizado a julio de 2005, correspondiente al modelo empleado en el estudio SDT N° 229.

## **7.3 DERECHOS DE AGUA**

El registro de derechos de agua incorpora la totalidad de pozos con derechos otorgados y en trámite en la cuenca del estero Codegua. En él se señala para cada pozo, entre otras cosas, el número de expediente, la fecha de ingreso de la solicitud de derechos, la fecha de resolución de dicha solicitud (de existir resolución), el uso, el caudal solicitado y el caudal otorgado (de existir otorgamiento). Para efectos de este estudio a los pozos se les asignó un código identificador, con el fin de optimizar el manejo de la información a la hora de analizar la información.

De acuerdo a la legislación vigente, la constitución de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas es procedente siempre que la explotación del respectivo acuífero sea la apropiada para la conservación y protección en el largo plazo, considerando los antecedentes técnicos recarga y descarga, así como las condiciones de uso existente y previsible.

El uso previsible refleja la naturaleza de la explotación de aguas subterráneas, que hace que las captaciones sean empleadas sólo en forma temporal y de ese modo, la extracción media de largo plazo desde el acuífero sea sustancialmente menor que la explotación máxima autorizada como derecho de aprovechamiento.

En efecto, para una actividad cualquiera, como por ejemplo la actividad agrícola, los pozos se utilizan algunos meses en el año y difícilmente se explotan por más de 8 horas diarias, debido a los requerimientos hídricos del cultivo o plantación; inclusive, en algunos casos las aguas subterráneas se emplean como complemento de recursos superficiales solamente en períodos de déficit y como suplemento al riego superficial. Este mismo análisis puede hacerse a cualquier otra actividad económica que utilice agua entre sus procesos productivos, incluyendo el uso doméstico el cual presenta demandas variables a lo largo del año.

El uso previsible permite determinar en forma real el nivel de extracción del agua y comparar directamente este caudal con el caudal sustentable de explotar en el largo plazo.

Los usos previsible consideran en primer lugar que los derechos solicitados se piden para ser usados de alguna manera. En consecuencia para los estudios técnicos la Dirección General de

Aguas requiere hacer hipótesis de su uso. La hipótesis inicial es que la captación de aguas subterráneas se usará según la naturaleza del peticionario original (Empresa Sanitaria → Agua Potable (AP), Empresa Minera → Minería (M), Agricultor → Riego (R); etc). Según la naturaleza del peticionario original existen coeficientes técnicos, dados por los estudios específicos, información proveniente de organismos técnicos, o la experiencia práctica.

Para este estudio los usos previsibles se determinan por tipo de actividad de acuerdo con la siguiente tabla:

**Tabla 3. Factores de Uso Previsible**

<b>TIPO USO</b>	<b>FACTOR DE USO PREVISIBLE</b>
Agua Potable Ciudades	0,75
Riego	0,20
Industrial	0,30

En la simulación no se ingresó la totalidad de los pozos presentes en el registro. El criterio para definir los pozos a ingresar al sistema consideró los pozos con derechos aprobados y en trámite cuya solicitud de derechos tiene fecha de ingreso anterior a la fecha de resolución aprobatoria en la que se otorgó el último derecho de aprovechamiento, que en este caso corresponde a 2 de octubre de 2003. De esta forma, en el modelo se ingresó un total de 75 pozos de extracción. Estos pozos tienen en total 1540.8 l/seg en derechos otorgados y 1987.2 l/seg corresponden a la demanda total, lo que en función de los factores de uso se traduce en 519.2 y en 661.6 l/seg respectivamente.

Cabe señalar que en el modelo los pozos realizan una extracción constante en el tiempo, a no ser que se seque la celda en la que se ubica el pozo, con lo que se anula la extracción, y que la duración de la simulación es de 50 años.

Algunos de los pozos del registro de Codegua se ubican fuera de los límites del modelo, por lo que la extracción que realizan no se vería reflejada en este. Para solucionar esta situación se desplazó estos pozos al interior del modelo.

El registro de derechos del sector de Codegua se presenta en el anexo 1 del presente informe. En él se incorporan los caudales ponderados por el factor de uso propio del pozo, que corresponde al caudal de simulación. También se destacan los pozos incorporados al modelo, indicando la existencia o no de un cambio de coordenadas en el mismo, y de ser así el par de coordenadas considerado en el modelo.

## 7.4 MODELO DE LA CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL

### 7.4.1 *Revisión del modelo.*

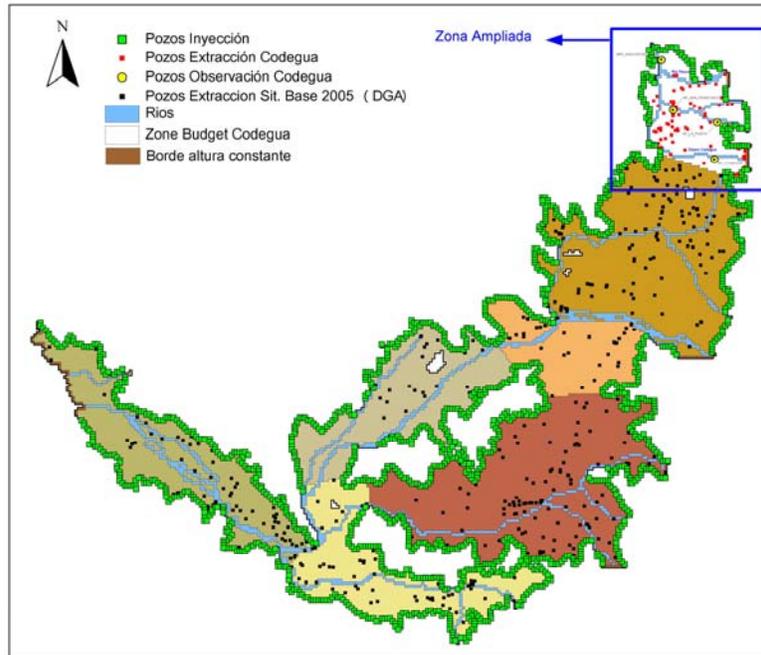
Previo a la incorporación de los pozos del sector de Codegua al modelo del estudio SDT N° 229, se efectuó una revisión del mismo. De ella se desprende los siguientes aspectos que deben ser revisados en próximas simulaciones, con el fin de optimizar el funcionamiento del modelo:

- i) **Pozos de extracción y de inyección en una misma celda.** Los balances de masa proporcionados por el Visual Modflow entrega los balances netos por celda, es decir, en los casos en que los pozos de inyección y extracción ocupan una misma celda, el programa entrega la diferencia entre ambos caudales. Esto dificulta la labor de verificar que el modelo haya incorporado la totalidad de las extracciones y de las inyecciones.
- ii) **Coeficiente de almacenamiento constante.** El modelo considera una única zona de almacenamiento para la totalidad del modelo ( $S_y = 10\%$ ), que responde a las condiciones de acuífero libre del acuífero del Cachapoal.
- iii) **Extracción en la Laguna de San Vicente de Tagua-Tagua.** Esta laguna no forma parte del modelo, pero la influencia que tiene sobre el sistema acuífero modelado se representa a través de pozos de inyección, que simulan la recarga del acuífero del Cachapoal desde el sector de la Laguna.

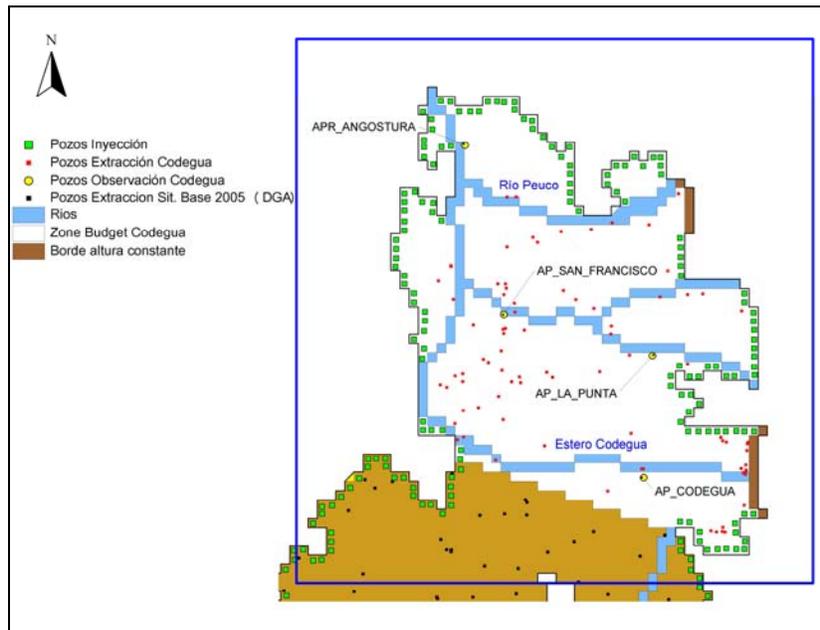
### 7.4.2 *Ingreso de los pozos de extracción*

Posteriormente se ingresó al modelo los 75 pozos de extracción asociados al sector de Codegua. En la Figura 5 se observa la distribución de pozos en el modelo. Se distinguen tres grupos de pozos, que corresponden a los de inyección, que ingresan al sistema la recarga que proviene de las cuencas laterales, los de extracción considerados en la situación base a junio de 2005, y los pozos de extracción incorporados en el sector de Codegua. En la Figura 6 se presenta una ampliación del sector de Codegua, donde se observa en detalle las condiciones de borde consideradas por el modelo.

**FIGURA 5. Modelo del acuífero del río Cachapoa, 2005**



**FIGURA 6. Sector de Codegua en el modelo**



### 7.4.3 Pozos de observación

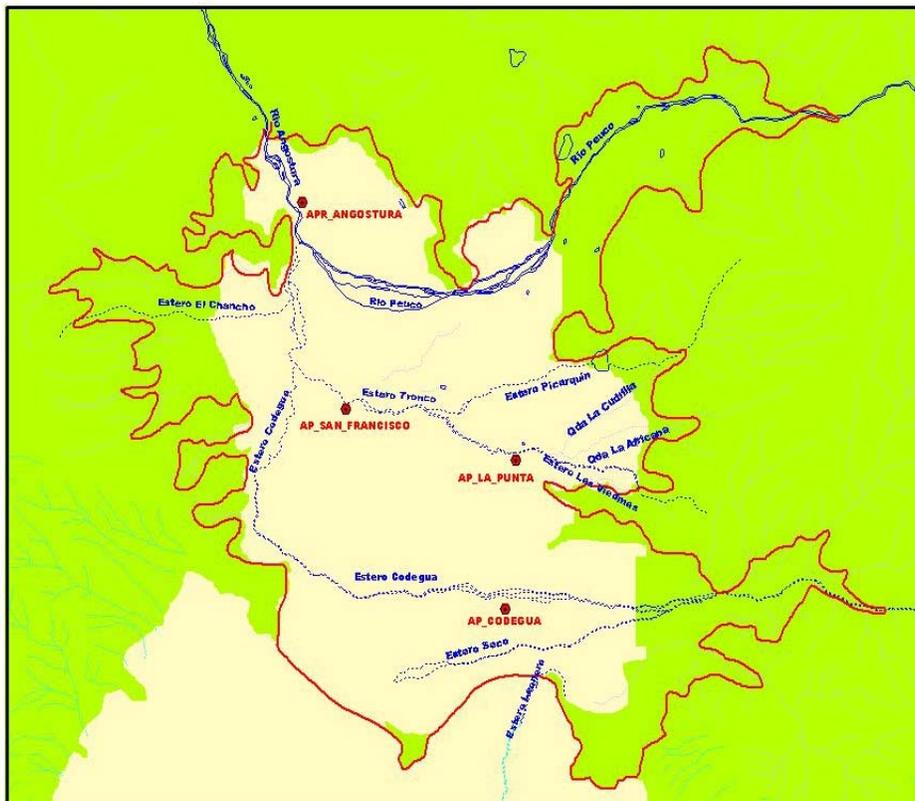
La variación del nivel de la napa en el sector de Codegua fue monitoreado a través de 4 pozos de observación, presentes en la simulación base indicados en el estudio SDT N° 229, julio 2006.

Los nombres y coordenadas de estos pozos se presentan en la Tabla 4, y se observan en la Figura 7.

**Tabla 4. Pozos de observación en el sector de Codegua**

Pozo	UTM Este	UTM Norte
APR_ANGOSTURA	341.730	6.243.890
AP_SAN_FRANCISCO	343.000	6.238.350
AP_LA_PUNTA	347.850	6.237.000
AP_CODEGUA	347.566	6.233.012

**FIGURA 7**  
**Pozos de Observación Sector de Codegua**



## 7.5 RÉGIMEN NATURAL

El escenario de régimen natural corresponde a los resultados obtenidos en el proceso de calibración del modelo (Informe Técnico SDT N°209, Octubre de 2005). Este escenario representa una situación histórica en que las extracciones se suponen despreciables en el sistema. Por lo tanto evalúa un escenario de equilibrio o en régimen permanente, donde sólo interactúan las recargas y descargas por fuentes superficiales.

Los balances de masa reportados en este escenario se utilizan como referentes de la interacción que existe entre el río y el acuífero, y del volumen embalsado en la zona modelada.

La explotación del acuífero necesariamente modifica estos parámetros, y una forma de cuantificar este efecto es comparar la respuesta del acuífero con el escenario de régimen natural.

El presente estudio está enfocado en el comportamiento del acuífero en el sector de Codegua, por lo que el análisis se centrará en la comparación de los balances de ese sector en particular.

El balance de masa del escenario de régimen natural en el sector de Codegua se presenta en la Tabla 5, donde se observa que el error de cierre es inferior al 1%.

**Tabla 5. Balance de Flujos en el sector de Codegua, Régimen Natural**

<b>ENTRADAS (l/seg)</b>	
Borde Constante	127.8
Recarga Lateral	228.8
Recarga Superficial	181.7
Ríos y Esteros	7.8
<b>TOTAL</b>	<b>546.1</b>
<b>SALIDAS (l/seg)</b>	
Ríos y Esteros	397.5
Flujo Subterráneo desde Codegua	146.7
<b>TOTAL</b>	<b>544.2</b>

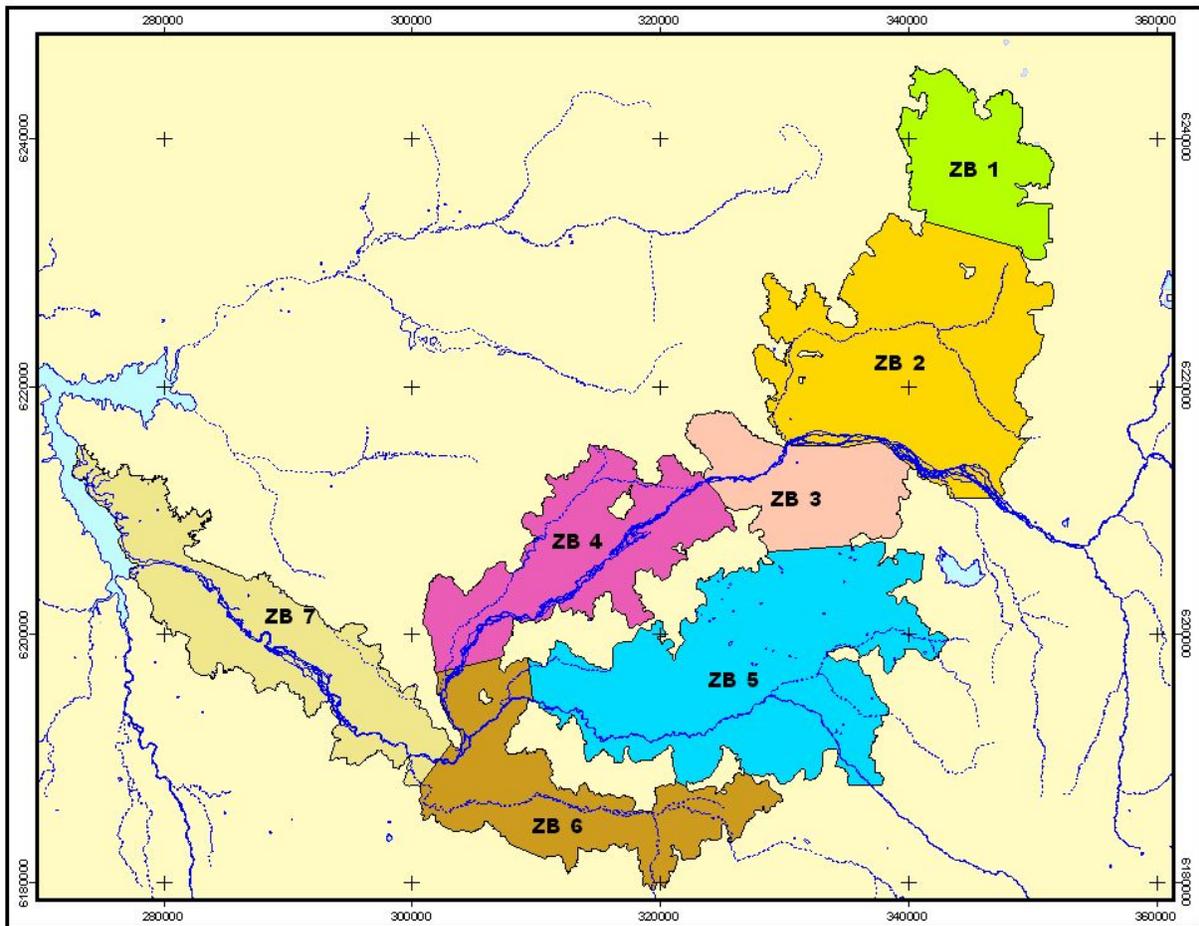
## 7.6 RESULTADOS SECTOR CODEGUA A DICIEMBRE DEL 2005

A continuación se presentan los resultados de la simulación de la demanda del sector de Codegua en el acuífero del río Cachapoal. La demanda de la totalidad del sistema acuífero está actualizada a diciembre de 2005.

### 7.6.1 *Balances de Flujo*

En la Figura 8 se presenta la zonificación empleada en el modelo del río Cachapoal. El manejo de distintas zonas o "Zone Budgets" (ZB) facilita el manejo de la información entregada por este y proporciona más información respecto del comportamiento del flujo en el acuífero.

**FIGURA 8** Zonificación en el modelo del acuífero del río Cachapoal.



**Tabla 6. Balance de Flujos ZB 1, Régimen Natural y Simulación**

<b>Balances (l/s)</b>	<b>Régimen Natural</b>	<b>Demanda Comprometida 2005</b>
<b>Total Entradas</b>	<b>546.1</b>	<b>752.7</b>
Almacenamiento	0.0	104.5
Ríos	7.8	20.1
Recarga	181.7	181.7
Borde altura constante	127.8	217.6
Pozos de inyección	228.8	228.8
<b>Total Salidas</b>	<b>544.2</b>	<b>752.7</b>
Almacenamiento	0.0	0.0
Ríos	397.5	111.4
Borde altura constante	0.0	0.0
Pozos de extracción	0.0	519.2
Subterránea hacia Graneros Rancagua	146.7	122.1
<b>Error balance (%)</b>	<b>0.35</b>	<b>0.01</b>

### 7.6.2 Descensos

En la Figura 9 se presenta la variación en el tiempo del nivel de la napa en los 4 pozos de observación ubicados en el sector de Codegua. Se observa que los 4 presentan un descenso sostenido en el tiempo, y que en 3 de ellos el descenso es importante.

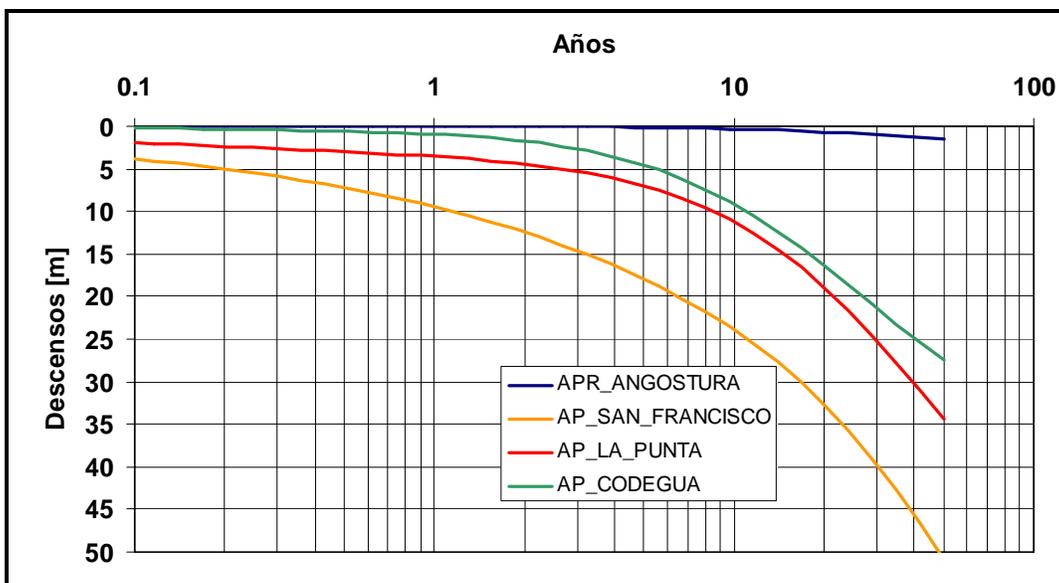
En la Tabla 7 se presentan los niveles calculados en el año 20 y en el año 50. En ella también se presenta la razón de descenso anual en ese intervalo de tiempo (30 años). Los pozos AP\_SAN\_FRANCISCO, AP\_LA\_PUNTA y AP\_CODEGUA presentan descensos de 12.11, 10.33 y 7.39 m, respectivamente, superando con creces el límite de 1 m en 20 años,

Se concluye que en el sector de Codegua el descenso de la napa es sostenido, no cumpliendo con el criterio 1 de sustentabilidad del acuífero. Es necesario determinar la variación del volumen embalsado con el fin de determinar si este sector del acuífero debe o no ser cerrado.

**Tabla 7. Razón de descenso de la napa en el sector de Codegua**

POZO	s2 [m]	s1 [m]	r [cm/año]	20 años [m]
APR_ANGOSTURA	434.55	435.38	2.75	0.55
AP_SAN_FRANCISCO	440.26	458.36	60.54	12.11
AP_LA_PUNTA	491.04	506.49	51.65	10.33
AP_CODEGUA	500.03	511.08	36.96	7.39

**Figura 9 Evolución del nivel de la napa en los pozos de observación de Codegua**



### 7.6.3 Interacción Río Acuífero

Sea  $Q_R$  el caudal neto de afloramiento o infiltración en un tramo de río en régimen natural, en una zona de balance cualquiera, definido como la diferencia entre el caudal de afloramiento  $Q_{Af}$  menos el caudal de infiltración  $Q_{Inf}$ .

$$Q_R = Q_{Af} - Q_{Inf}$$

El signo positivo indica afloramiento neto en el volumen de control y el signo negativo indica infiltración neta en el volumen de control.

Durante la operación del sistema el caudal neto de afloramiento e infiltración sufre variaciones. En la zona de balance las zonas de afloramiento se ven disminuidas por los descensos del nivel de la napa, llegando incluso a transformarse en zonas de infiltración cuando los niveles bajan a tal punto que quedan por debajo del nivel del río. En el caso de las zonas de infiltración estas pueden verse incrementadas cuando los descensos aumentan el gradiente hidráulico entre el río y el acuífero, lo que se traduce en un aumento del flujo de infiltración desde el río hacia el agua subterránea en el acuífero adyacente.

De esta forma, el caudal neto resultante ( $Q_R^*$ ) puede expresarse con la siguiente expresión:

$$Q_R^* = (Q_{Af} - \text{Deja de Aflorar}) - (Q_{Inf} + \text{Aumento Inf}) \quad (2)$$

que reordenada resulta en:

$$Q_R^* = (Q_{Af} - Q_{Inf}) - (\text{Deja de Aflorar} + \text{Aumento Inf}) \quad (3)$$

Finalmente, el caudal neto de afloramiento o infiltración resultante está dado por la expresión (4), donde  $Q_R$  corresponde al caudal de afloramiento o infiltración en el río en régimen natural y  $\Delta Q$  corresponde a la variación con respecto a este escenario, definida como la pérdida por afloramiento más el aumento de las infiltraciones.

$$Q_R^* = Q_R - \Delta Q \quad (4)$$

El criterio 2 de sustentabilidad expone que en el caso de la interferencia río-acuífero el valor de  $\Delta Q$  no debe ser mayor a un 10% del caudal superficial pasante (en este estudio se utiliza el caudal con 85% de probabilidad de excedencia). El valor de  $Q_R$  se obtiene de los balances de masa de la calibración en régimen permanente, y  $\Delta Q$  se calcula a partir de la comparación entre estos balances y los obtenidos en la simulación.

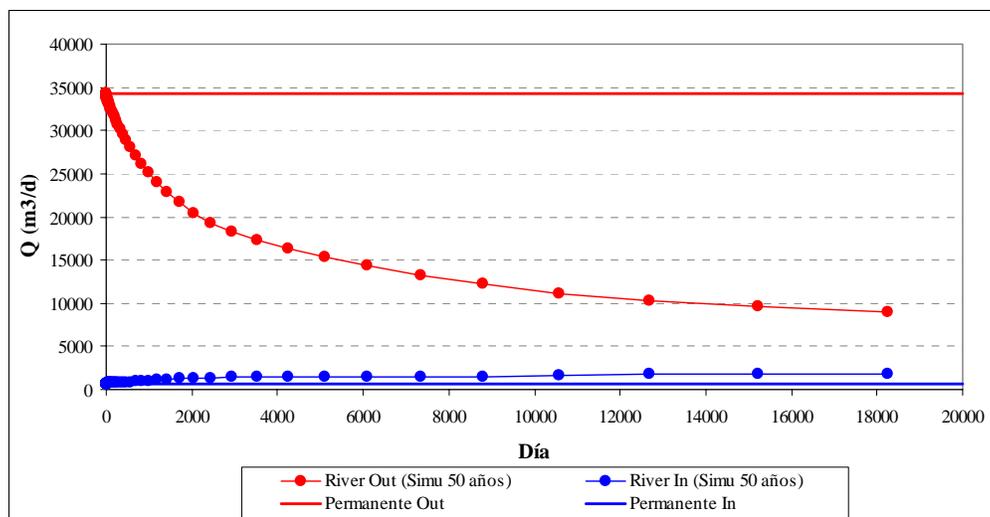
En la Figura 10 se presentan las series de caudales que afloran e infiltran en ambos escenarios. Se observa que en la calibración en régimen permanente el caudal que aflora es del orden de 397.5 l/s, mientras el que infiltra es del orden de 7.8 l/s. El caudal que aflora en la simulación presenta una fuerte disminución en el tiempo, registrando hacia el final de la simulación un caudal del orden de los 111.4 l/s. Por otro lado, el caudal infiltrado registrando el año 50 de la simulación es de 20.1 l/s. Lo anterior implica una afección a cauces superficiales de 298.4 l/s.

La tabla 8 resume las afecciones estimadas para los caudales de infiltración y afloramiento del sector hidrogeológico Codegua.

**Tabla 8. Afección caudal de afloramiento e infiltración.**

Fenómeno	Régimen Natural	Demanda Comprometida	Afección
Infiltración (l/s)	7.8	20.1	12.3
Afloramiento (l/s)	397.5	111.4	286.0
<b>Afección Total (l/s)</b>			<b>298.4</b>

**Figura 10 . Variación de los flujos entre la simulación y el Régimen Natural**



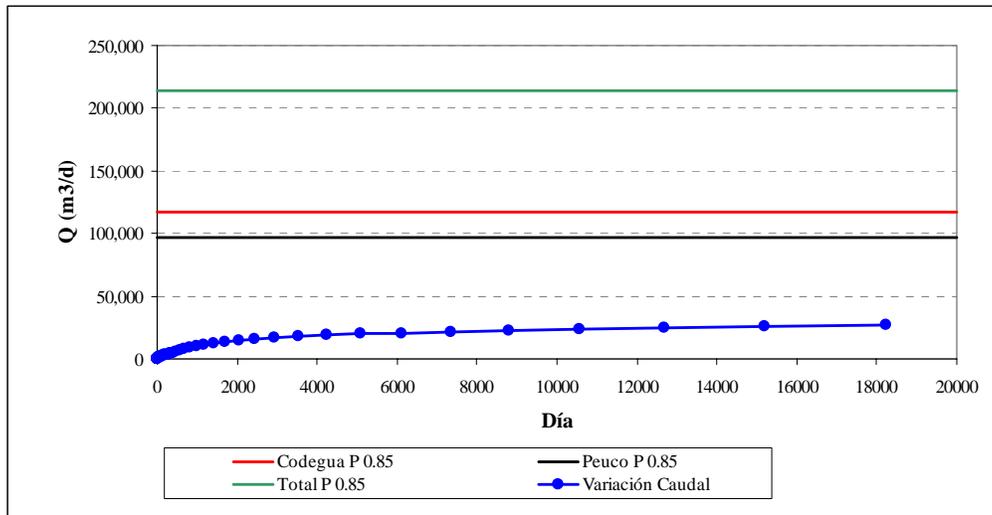
En la Tabla 9 se presentan los caudales estimados con una probabilidad de excedencia de 85% en el estero Codegua y en el río Peuco, estimado a partir de caudales sintéticos reportados en el informe SIT N° 62, de mayo de 2000, de Ayala y Cabrera. En la Figura 11 se grafican los caudales de estos cauces y el  $\Delta Q$ , o la variación del caudal neto con respecto al régimen natural. Se observa que el caudal estimado en estos cursos superficiales supera con creces los caudales  $\Delta Q$ . Tanto en la Tabla 9 como en la Figura 11 se presenta la sumatoria de ambos cursos, debido a que el río Peuco es un afluente del estero Codegua (río san Francisco), y por ende proporciona información adicional de la escorrentía del sector.

La Figura 12 presenta la razón entre  $\Delta Q$  y los caudales superficiales mencionados anteriormente. Se observa que la variación de la interacción río – acuífero reporta un caudal que supera en algún momento de la simulación el 10 % del caudal pasante en el estero Codegua, en el río Peuco, y en la sumatoria de ambos. Por lo tanto, este escenario de simulación no respeta el criterio 2 de sustentabilidad del acuífero.

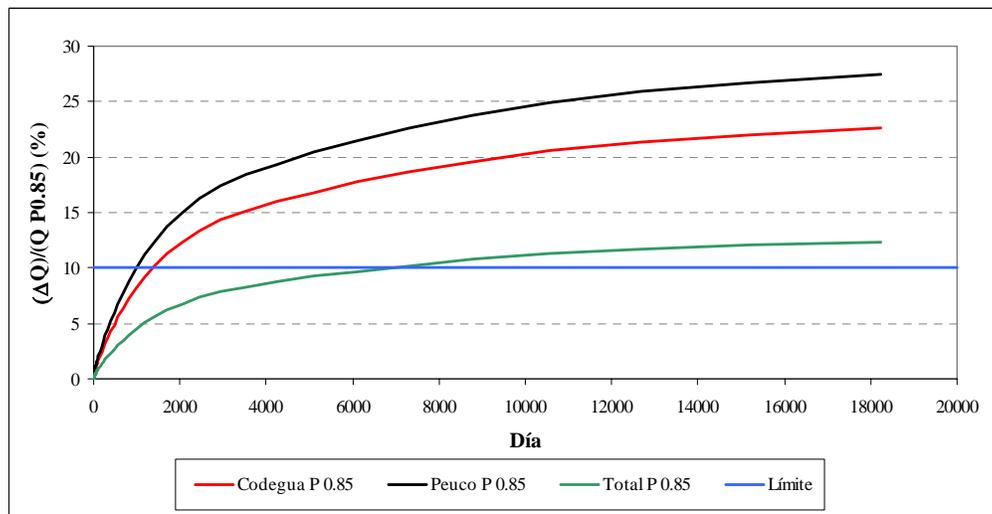
**Tabla 9. Caudales con 85% de probabilidad de excedencia en Codegua**

Prob. Excedencia	Codegua (l/seg)	Peuco (l/seg)	Total (l/seg)
0.85	1358.3	1119.9	2478.2

**Figura 11**  
**Caudales superficiales con probabilidad de excedencia 85% y  $\Delta Q$**



**Figura 12**  
**Razón entre  $\Delta Q$  y los caudales superficiales con Probabilidad de excedencia 85%**



#### **7.6.4 Pozos Secos**

Los resultados de la simulación indican que el ingreso de los 75 pozos de extracción no secan celdas del modelo en el sector de Codegua. De esta forma, se verifica que en el sector no existen mermas ni en el caudal de extracción ni en el de inyección.

#### **7.6.5 Volumen de agua Utilizado desde el Acuífero**

La variación del volumen embalsado se estimó comparando el volumen existente en el sector de Codegua en la situación base, que corresponde a la calibración permanente del modelo, con el volumen registrado al final de la simulación (50 años).

En la Tabla 10 se presenta el análisis de la demanda en volumen calculados en ambos escenarios. Se observa que la diferencia entre ellos es del orden del 24%, valor que supera ampliamente la variación límite del almacenamiento correspondiente al 5%. Este hecho, junto con el descenso sostenido del nivel de la napa reportado en los pozos de observación del sector de Codegua, determina que el criterio 1 de sustentabilidad no se cumple, por lo que el sector acuífero de Codegua debe ser cerrado.

**Tabla 10. Volumen del Acuífero**

<b>Demanda</b>	<b>(Mm<sup>3</sup>)</b>
Volumen Inicial	1259.3
Volumen Final	961.11
Diferencia Volumen	298.2
Error	24%

Es importante tener presente que los cálculos de volumen almacenado en el acuífero del sector hidrogeológico de Codegua considera un coeficiente de almacenamiento de un 10%.

#### **7.6.6 Simulaciones**

No fue necesario realizar simulaciones adicionales debido a que la extracción de la demanda comprometida en el sector de Codegua inhabilita el otorgamiento de nuevos derechos.

## 8 CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo la finalidad de analizar la situación del sector hidrogeológico de Codegua utilizando el modelo hidrogeológico del Acuífero de Cachapoal. Para lo anterior, se evaluó la demanda comprometida por la DGA a diciembre de 2005 equivalente a 519,2 l/s (16.373.491,2 m<sup>3</sup>/año) en usos previsibles. Cabe considerar, que la evaluación de los usos previsibles se realiza utilizando las estimaciones de los coeficientes de usos actuales del agua en la VI región.

La metodología empleada para analizar el funcionamiento del acuífero en el sector de Codegua consistió en revisar los criterios de sustentabilidad que debe cumplir el acuífero con el fin de asegurar que su explotación sea sustentable, y no afecte al medio ambiente ni a otros usuarios del mismo.

El análisis de la información proporcionada por la simulación determinó que para el escenario de demanda comprometida a diciembre de 2005 en el sector acuífero de Codegua, no se cumple el criterio 1 de sustentabilidad, esto es en relación al descenso sostenido del nivel de la napa y a la variación del volumen embalsado.

Según este criterio un descenso sustentable corresponde a un descenso menor a un metro en 20 años. Para el Sector acuífero de Codegua se obtiene un descenso sostenido mayor al establecido en el criterio, por lo cual fue necesario chequear la variación del volumen embalsado.

El criterio respecto de la variación del volumen embalsado respecto al régimen natural (situación inicial), indica que no se debe afectar el acuífero más allá de un 5%. El en caso del acuífero de Codegua, se observa que el volumen embalsado disminuyó aproximadamente en un 24%, no cumpliéndose el criterio 1 de sustentabilidad, por lo que el sector acuífero de Codegua debe ser cerrado.

<b>Demanda</b>	<b>(Mm<sup>3</sup>)</b>
Volumen Inicial	1259.3
Volumen Final	961.11
Diferencia Volumen	298.2
Error	24%

Se observa también que el criterio 2, correspondiente al grado de interacción en la interferencia río acuífero no se cumple, dicho criterio busca no afectar los recursos superficiales ya comprometidos, en este sentido, el grado de interacción debe ser menor que 10% de los flujos superficiales pasantes en cada una de las zonas, evaluados como el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia.

La variación de la interacción río acuífero reporta un caudal que supera considerablemente el 10 % del caudal pasante en el estero Codegua, en el río Peuco, y en la sumatoria de ambos, correspondiente a una afección total de 298.4 l/s.

Por lo tanto, este escenario de simulación no respeta el criterio 2 de sustentabilidad del acuífero.

<b>Fenómeno</b>	<b>Régimen Natural</b>	<b>Demanda Comprometida</b>	<b>Afección</b>
Infiltración (l/s)	7.8	20.1	12.3
Afloramiento (l/s)	397.5	111.4	286.0
<b>Afección Total (l/s)</b>			<b>298.4</b>