GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

ANÁLISIS CRÍTICO RED DE NIVELES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO DE COPIAPÓ

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

H_2 CUENCA INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

S.I.T. Nº 298

Santiago, Diciembre 2012

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministra de Obras Públicas
Abogada Sra. María Loreto Silva Rojas

Director General de Aguas (TP)
Abogado Sr. Francisco Echeverría Ellsworth

Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Sr. Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sr. Miguel Ángel Caro Hernández

Profesional División de Estudios y Planificación
Ingeniero Michael Finger

H_2 CUENCA INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Felipe Espinoza Contreras, Ph.D.

Profesionales
Ingeniero Civil Sr. José Lagos Rehfeld
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables Srta. Catalina Eastman Mendoza
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables Srta. Valeska Cárcamo Azócar
Técnico Sr. Eduardo Sánchez Saldías
Técnico Topógrafo Sr. Richard Carmona Gutiérrez

ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE NIVELES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO DE COPIAPÓ

RESUMEN EJECUTIVO

ÍNDICE

Acápite	Descripción	Página
1.	**INTRODUCCIÓN**	**1**
2.	**OBJETIVOS DEL ESTUDIO**	**1**
2.1.	OBJETIVO GENERAL	1
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
3.	**REVISIÓN DE ANTECEDENTES**	**2**
4.	**LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y COBERTURA DEL ESTUDIO**	**3**
4.1.	REGIÓN DE ATACAMA	3
4.2.	RECURSOS HÍDRICOS EN ATACAMA	4
4.3.	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA CUENCA RÍO COPIAPÓ	5
5.	**CARACTERIZACIÓN RED EXISTENTE**	**7**
6.	**ANÁLISIS DE REPRESENTATIVIDAD, CONFIABILIDAD Y DIAGNÓSTICO DE LA RED DE MONITOREO**	**9**
6.1.	GENERALIDADES	9
6.2.	CARACTERÍSTICAS DE LA RED	9
6.3.	ANÁLISIS DE OPERACIÓN DE LA RED	11
6.4.	ANÁLISIS DE REPRESENTATIVIDAD	11
6.5.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE NIVELES	13
6.6.	ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD	16
6.7.	DIAGNÓSTICO DESDE EL PUNTO DE VISTA GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO DE LA RED	17
6.8.	DIAGNÓSTICO INTEGRAL DE LA RED	18
7.	**PROPOSICIÓN DE RED MEJORADA**	**19**
7.1.	INTRODUCCIÓN	19
7.2.	MÉTODO DE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	19
7.3.	METODOLOGÍAS PROPUESTAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA RED DE MEDICIÓN	20
7.4.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ADOPTADA A LA RED DE NIVELES DE COPIAPÓ	21
7.4.1.	Generalidades	21
7.4.2.	Base de Datos Resultante	22
7.5.	EVALUACIÓN DEL COSTO DE LA RED DE MEDICIÓN	27
7.5.1.	INTRODUCCIÓN	27
7.5.2.	Programa de Implementación de la Red	27
7.5.3.	Evaluación Económica de la Red	28
8.	**CONCLUSIONES**	**30**

ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE NIVELES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO DE COPIAPÓ

RESUMEN EJECUTIVO

ÍNDICE
FIGURAS

Figura	Descripción	Página
4.2-1	Cuencas Río Copiapó	5
4.3-1	Sectorización del Acuífero Río Copiapó	6
6.2-1	Resumen Disponibilidad de Información	10
6.5-1	Variación Media de Niveles Por Sector	14
7.4.2-1	Red de Medición Final	25
7.5.2-1	Etapas Implementación de la Red	27
7.5.2-1	Secuencia de Implementación de la Red	28
7.5.3-1	Gasto de Operación de la Red Actual	28
7.5.3-2	Costo de Instalación de la Instrumentación	29
7.5.3-3	Resumen Costos de Inversión	29
7.5.3-4	Resultados Evaluación Económica Costo Incremental Actualizado	30

ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE NIVELES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO DE COPIAPÓ

RESUMEN EJECUTIVO

ÍNDICE
CUADROS

Figura	Descripción	Página
5-1	Características Pozos de la Red de Vigilancia Vigente	8
6.4-1	Determinación Densidad de Estaciones	12
6.5-1	Análisis Información de Niveles Red de Medición Depurada	15
6.6-1	Análisis de Confiabilidad de la Red Depurada	16
6.6-2	Determinación Densidad de Estaciones de Observación	17
7.4.2-1	Selección de Pozos de la Red Nueva Mediante PCA Aplicado a la Red Depurada	23
7.4.2-2	Densidad Red Final	25
7.5.3-1	Resultados Evaluación Económica Costo Incremental Actualizado v/s Frecuencia de Medición	30

ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE NIVELES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO DE COPIAPÓ

1. INTRODUCCIÓN

La Dirección General de Aguas (DGA) ha realizado diferentes trabajos en la cuenca del río Copiapó, debido a que éste presenta condiciones de explotación por sobre la oferta de aguas subterráneas, lo que ha llevado al acuífero a tener sectores con descensos sostenidos y explotación no sustentable en el tiempo. La DGA, a partir del trabajo "Análisis Integrado de Gestión en Cuenca del río Copiapó" (DICTUC, 2010), establece que el déficit hídrico de la cuenca del río Copiapó ha llevado a consumir el volumen embalsado del acuífero a tasas netas de 1,7 m^3/s.

De acuerdo a la visión de la DGA, la medición de niveles de aguas subterráneas, resulta de vital importancia para entender correctamente la precaria situación del acuífero de Copiapó y permite tomar medidas confiables cuyos resultados puedan ser monitoreados.

De esta forma, es importante realizar un análisis crítico a la actual red de observación de niveles que tiene la DGA, de tal forma de evaluar si los puntos que hoy en día se miden, tienen representación espacial y temporal del acuífero de Copiapó. En caso que no la tenga, se debe proponer una red mejorada, de menor, igual o mayor tamaño a la actual, pero con mejor representación de la red existente.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

2.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del estudio es realizar un análisis crítico de la red de observación de niveles de aguas subterráneas de la DGA en la cuenca del río Copiapó, y establecer una metodología adecuada para la optimización del funcionamiento de la red, que resulte en la propuesta de una red mejorada.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos del estudio son:

- Diagnosticar el funcionamiento actual de la red de observación de niveles de agua subterránea.
- Establecer una metodología adecuada para el análisis de la red de observación.
- Recomendar cambios en la estructura de la red actual de medición de aguas subterráneas de la zona en estudio, para cumplir con los objetivos de una red de medición moderna.

- Desarrollar un programa para la publicación de la información de la red de observación.

3. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Para desarrollar el estudio se revisaron dos grandes tipos de antecedentes: Estudios relacionados con la descripción del valle, y estudios relacionados con la técnica de Análisis de Direcciones Principales (PCA por su sigla en inglés), metodología seleccionada para desarrollar el análisis. Los estudios considerados son:

- **Estudios del Valle del Río Copiapó:**
  - Análisis Integrado de Gestión en Cuenca del Río Copiapó. División de Ingeniería Hidráulica y Ambiental DICTUC S.A., 2010
  - Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos. DGA-Geohidrogeología Consultores Ltda., 2009
  - Informe Técnico - Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Valle del Río Copiapó. DEP-DGA, 2003
  - Estudio Hidrogeológico del Valle del Río Copiapó, Segmento Embalse Lautaro – Piedra Colgada, Región de Atacama. Aguirre, I.; Hauser, A.; Schwerdtfeger, B. 1999.
  - Análisis y Evaluación de los Recursos Hídricos en el Valle del Río Copiapó, III Región. DARH-DGA, 1995.
- **Antecedentes Referidos a Análisis se Direcciones Principales:** La técnica de PCA se utiliza cuando se dispone de múltiples puntos de muestreo, con múltiples parámetros medidos. Por lo anterior, la técnica se utiliza usualmente en problemas de calidad de aguas en los que se muestrean múltiples parámetros. En los puntos siguientes se presentan algunos ejemplos de aplicación.
  - Statistical Analysis Of Hydrographs And Water-Table Fluctuation To Estimate Groundwater Recharge. Sang-Ki Moon, Nam C Woo, and Kwang S. Lee Journal of Hydrology, June 2004.
  - Análisis Crítico de la Red de Aguas Subterráneas del Valle de Aconcagua. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil: Rodrigo Larenas. Universidad de Chile, 2003.
  - Historical And Estimated Ground Water Levels Near Winnipeg, Canada, and Their Sensitivity to Climatic Variability. Grant Ferguson and Scott St. George. Journal Of The American Water Resources Association, October 2003.
  - Factor Analytical Approaches For Evaluating Groundwater Trace Element Chemistry Data. K. H. Johannesson, A. K. Singh, V. F. Hodge' and K. J. Stetzenbach. Analytica Chimica Acta, August 2003.

- Using Principal Component Analysis to Monitor Spatial and Temporal Changes In Water Quality. Karim Bengraïne and Taha F. Marhaba. Journal of Hazardous Materials, June 2003.
- Evaluation of Ground Water Monitoring Network by Principal Component Analysis. Subhrendu Gangopadhyay, Ashim Das Gupta, M.H. Nachabe. Ground Water, March 2001.
- The Use of Component Analysis for Interpreting Ground Water Hydrographs. T. C. Winter, S. E. Mallory, and D. O. Rosenberry. Groundwater, March-April, 2000.

4. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y COBERTURA DEL ESTUDIO

4.1. REGIÓN DE ATACAMA

La región de Atacama se ubica al norte de Chile, entre los 25°17' y 29°11' de latitud sur y desde los 68°17' de longitud oeste hasta el Océano Pacífico. Está conformada por tres provincias y nueve comunas, encabezada por la ciudad de Copiapó, capital regional. Posee una superficie de 75.573.3 km² lo cual corresponde al 10% de la superficie del país. Limita al norte con la región de Antofagasta y al sur con la región de Coquimbo.

Desde el punto de vista político- administrativo, la cuenca del río Copiapó abarca las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla. Geográficamente la superficie de la cuenca equivale al 25% de la superficie total de la Región de Atacama.

En la cuenca existen 20 localidades pobladas, de las cuales 2 son ciudades y el resto, corresponden a poblados, asentamientos rurales y caseríos. Las ciudades emplazadas en la cuenca son Copiapó (capital regional) con 129.279 habitantes y Tierra Amarilla con 12.266 habitantes, según los resultados preliminares del censo del año 2012.

Atacama se estructura en torno a sus características geográficas dominantes de Cordillera, Valles transversales y Costa. Aún cuando se observa de Norte a Sur un grado de distribución de cordones montañosos en variadas Direcciones que dificulta apreciar las unidades clara como Depresión Intermedia, Cordillera de la Costa y Cordillera Andina; es posible distinguir la presencia de una Cordillera de los Andes con los más importantes hitos de altura de nuestro país con el Volcán Ojos del Salado (6.893 m.s.n.m.) y con la interesante presencia de depresiones cerradas que conforman lagunas y salares cordilleranos tales como Salar de Pedernales, Maricunga, Laguna Santa Rosa, Laguna Verde y Laguna del Negro Francisco, entre otras.

La Región posee una superficie total de 75.573,3 km², lo que corresponde aproximadamente al 10% de la superficie del país. De esta superficie, se estima que se pueden aprovechar agrícolamente unas 30.000 ha, lo que representa solo un 0,4% de la extensión territorial. De las provincias de la Región, Huasco y Copiapó presentan interés desde el punto de vista agrícola. La provincia de Chañaral no presenta cultivos de especie alguna. El 12,8% de la mano de obra de la Región está ocupada en la agricultura, esto

suma un total cercano a las 12.000 personas. En ciertas ocasiones, esto está ligado con las labores relacionadas con la uva de mesa, para lo cual se recurre a mano de obra proveniente de otras regiones.

4.2. RECURSOS HÍDRICOS EN ATACAMA

En la Región de Atacama los valles formados por los ríos Copiapó y Huasco cortan a la extrema aridez del desierto. Estos ríos son alimentados por los escasos recursos hídricos disponibles provenientes de glaciares, lluvias ocasionales y neblina costera. Las condiciones climáticas especiales permiten una agricultura de exportación tecnificada que junto con la explotación minera y la pesca constituye el motor del crecimiento de la región. Este conjunto de situaciones han permitido, hasta la fecha, el desarrollo de la región y el establecimiento de poblaciones importantes como Copiapó y Vallenar entre otras.

El valle del río Copiapó tiene una longitud de 160 km desde el embalse Lautaro hasta la desembocadura en el mar en la localidad de Puerto Viejo. Constituye la primera cuenca de norte a sur de la zona exorreica andina y su régimen es catalogado como mixto. Los principales afluentes aportan caudales superficiales continuos, aunque normalmente desaparecen parcial o totalmente en algunas zonas. Los afluentes que interceptan en el curso medio e inferior del río Copiapó, como la quebrada Paipote ubicada en el sector norte de la cuenca del Copiapó, generalmente se encuentran secos en superficie, excepto después de una tormenta. Esta cuenca cuenta con regulación artificial dada por la presencia del embalse Lautaro cuya capacidad de almacenamiento es de 40 hm^3.

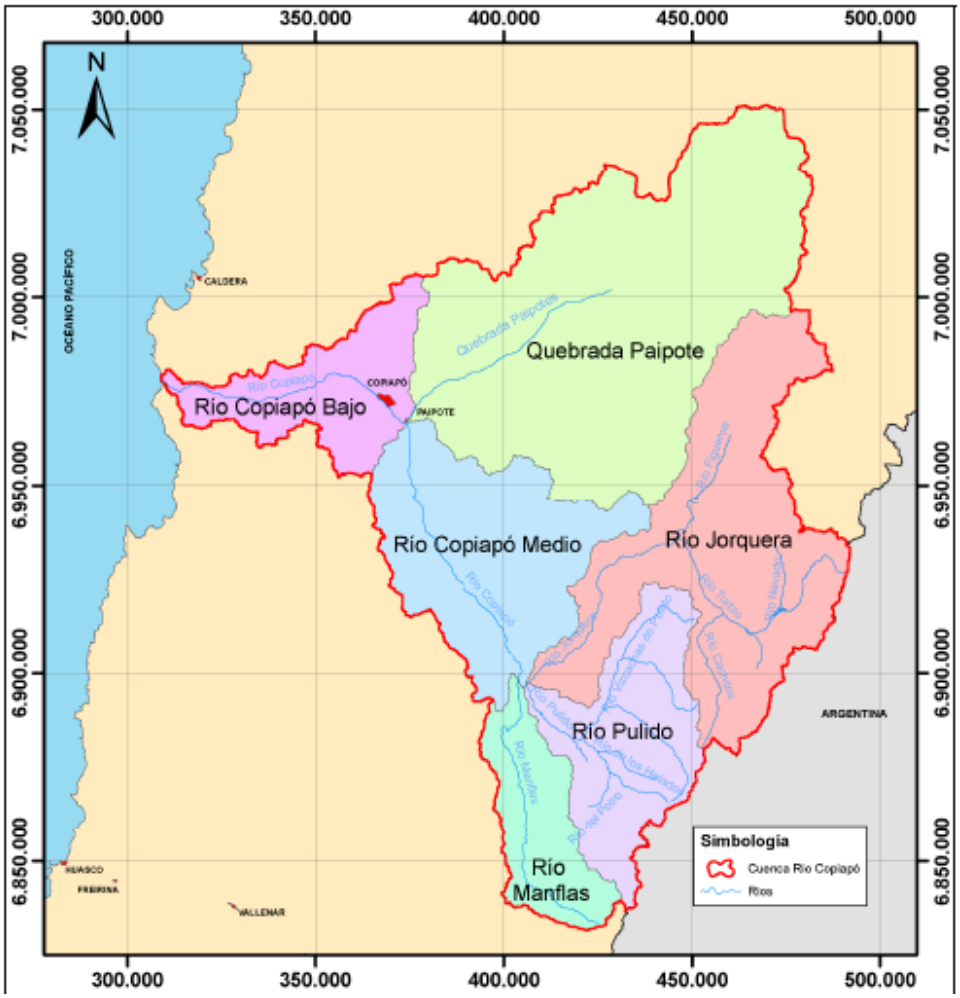
El Río Copiapó en la zona alta tiene como principal cuenca aportante la del Río Jorquera, cuya superficie alcanza aproximadamente 4.185 km^2, a ésta le sigue la cuenca del río Pulido con alrededor de 2.000 km^2 y la cuenca del río Manflas con una superficie de 1.200 km^2. En el tramo medio del río Copiapó, el afluente que presenta una mayor superficie de drenaje corresponde a la quebrada del río Paipote, con una superficie de aproximadamente 6.600 km^2, le sigue en extensión la cuenca del río Carrizalillo con 1.120 km^2 de superficie y la sub cuenca del río Copiapó (entre el embalse Lautaro y la quebrada de Paipote) con una superficie de 1.464 km^2, aproximadamente. Las cuencas de este río se presentan en la Figura 4.2-1.

La alta escasez hídrica de la zona ha determinado históricamente un uso intensivo del agua para el desarrollo de actividades productivas mineras y agrícolas y para el propio uso doméstico en la ciudad. Esto ha con llevado conflictos entre regantes y otros usuarios, principalmente aguas arriba de Copiapó en donde se desarrolla la fruticultura intensiva.

En esa zona el acuífero del río Copiapó se encuentra actualmente sobreexplotado, basado en estudios hidrogeológicos que indican una constitución de derechos de agua siete veces superior al caudal promedio de recarga del acuífero del valle. A raíz de esta situación la Dirección General de Aguas (DGA) ha dictado resoluciones que declaran zona de prohibición para nuevas explotaciones de aguas subterráneas al valle de Copiapó en sus secciones alta y media, es decir, también involucrando al área donde se emplaza la ciudad. Por esta razón cualquier proyecto

industrial, agrícola, minero o de otras características que se instale en esa zona debe considerar la compra de derechos de aguas ya otorgados para su implementación.

FIGURA 4.2-1
CUENCAS RÍO COPIAPÓ



Fuente: Análisis Integrado de Gestión en Cuenca del río Copiapó. DICTUC, 2010

En tanto, en la sección inferior del valle -desde Copiapó hacia el mar-, existen recursos hídricos que no compiten con otros usos, por lo cual, bajo ciertas restricciones, se posibilita la proyección del crecimiento inmobiliario hacia el poniente, así como el desarrollo inmobiliario y turístico del borde costero en torno a Caldera. En esta zona inferior la empresa sanitaria de la III Región tiene constituidos derechos por 965 L/s, lo que permitiría abastecer unos 330.000 habitantes.

4.3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA CUENCA RÍO COPIAPÓ

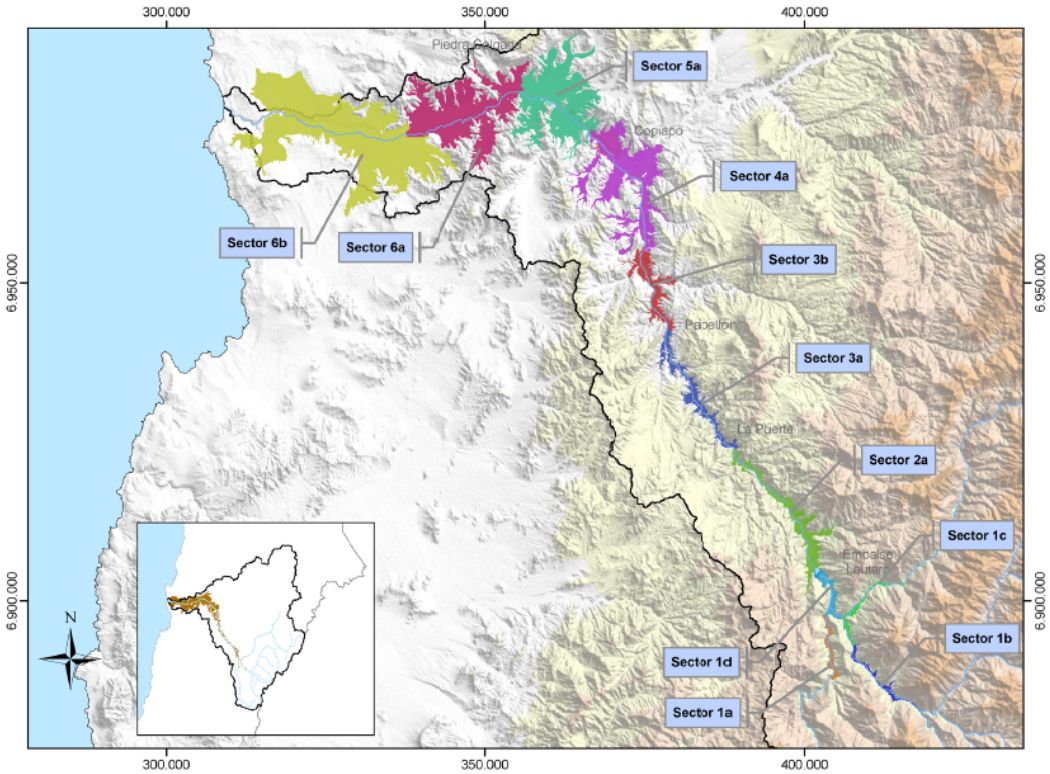
La caracterización hidrogeológica tiene como objetivo entender el funcionamiento general del acuífero, estableciendo conceptualmente criterios para la

sectorización y estimación de parámetros relevantes relacionados con este funcionamiento.

El estudio realizado por Álamos y Peralta para la DGA, el año 1987, tuvo como objetivo establecer la situación de los recursos hídricos en la cuenca y generar un modelo tanto de las aguas superficiales como subterráneas, para poder así realizar una mejor gestión y explotar los recursos de manera sustentable. Uno de los principales resultados hidrogeológicos, fue dividir el valle en 6 grandes sectores. Estos 6 sectores se consideran en la sectorización oficial de la DGA. Posteriormente el DICTUC sub-dividió en 11 sub-sectores, según se muestra en la Figura 4.3-1, y en el siguiente listado:

- **Sector 1 (4 sub-sectores):** Ríos Manflas, Jorquera, Pulido y Copiapó hasta el Embalse Lautaro
- **Sector 2:** Embalse Lautaro hasta la Puerta
- **Sector 3 (2 sub-sectores):** La Puerta hasta Mal Paso
- **Sector 4:** Mal Paso hasta Copiapó
- **Sector 5:** Copiapó hasta Piedra Colgada
- **Sector 6 (2 sub-sectores):** Piedra Colgada hasta Angostura

FIGURA 4.3-1
SECTORIZACIÓN DEL ACUÍFERO RÍO COPIAPÓ



Fuente: Análisis Integrado de Gestión en Cuenca del río Copiapó. DICTUC, 2010

5. CARACTERIZACIÓN RED EXISTENTE

La red de medición existente se presenta en el Cuadro 5-1.

En lo que sigue se presenta una breve caracterización de cada sector:

- **Sector 1:** En este sector se ubican 8 pozos de la red de monitoreo, tal como se indica en el Cuadro 5-1, y corresponde al área más alta del valle, específicamente a los sectores en que nacen los afluentes que dan origen al río Copiapó: Río Manflas y Río Jorquera, y se caracteriza por estar dedicada principalmente a la agricultura, específicamente al cultivo de diversas variedades de vides.

- **Sector 2:** Al igual que en el Sector 1, en este sector se ubican 8 pozos de la red de monitoreo, y corresponde a un área estrecha del valle, ubicado en la comuna de Tierra Amarilla. Los pozos de monitoreo existentes en este sector, se encuentran ubicados tanto en áreas agrícolas como en sectores habitacionales, como es el caso del pozo ubicado en el pueblo de Los Loros, al interior de la escuela y el pozo que se encuentra en el lecho del río, aguas abajo del Embalse Lautaro en el Sector Almolanas.

- **Sector 3:** Al igual que en los Sectores 1 y 2, en este sector se ubican 8 pozos de la red de monitoreo. El área que abarca el Sector 3, está totalmente dedicada a la producción de vides para exportación, al igual que sucede en el resto del Valle, y los predios pertenecen a grandes empresas agroexportadoras, como Fresh del Monte y Río Blanco. En este sector la mayor parte de los pozos tiene una profundidad aproximada de 100 m. y se encuentran fuera de funcionamiento puesto que no tienen nivel para realizar las mediciones.

- **Sector 4:** En este sector se ubican 6 pozos de la red de monitoreo. Este sector del acuífero administrativamente pertenece tanto a la comuna de Tierra Amarilla como a la de Copiapó. En este tramo, el acuífero comienza a ingresar al sector urbano de ambas comunas, lo que diversifica las actividades desarrolladas en las zonas en que se ubican los pozos de observación. La agricultura, como es de suponer comienza a dar paso a la ciudad, pasando de las grandes propiedades agrícolas a pequeñas chacras.

- **Sector 5:** En este sector se ubican sólo 5 pozos de la red de monitoreo. Al igual que en los otros sectores, en este sector los niveles están marcadamente al descenso. El sector 5, ubicado en la Comuna de Copiapó, corresponde al área en que el acuífero comienza a salir del sector central de la ciudad. Así, los pozos de monitoreo ubicados en este sector se encuentran tanto en sectores urbanos, como en el área en que comienza nuevamente a aparecer la actividad agrícola. En esta área es posible encontrar pozos secos, como algunos en que el agua mantiene niveles que rondan los 20 m.

CUADRO 5-1
CARACTERÍSTICAS POZOS DE LA RED DE VIGILANCIA VIGENTE

#	Sector	Sub-Sector	POZO	NORTE	ESTE	COTA	Prof (m)	Caudal (L/s)	Diam (in)	Uso	Medición	Frecuencia	Acceso	Cribas (m)	Ranurado (m)	Estratigrafía	Habilitación	Expediente	Observación
1	1	1a	Hda. Manflas (Manflas Ante Hda.).	6.891.871,10	403.735,90	1.296,70				Riego	Manual	Bimensual	Costado Camino			NO	NO		
2	1	1a	Hda. Manflas .	6.886.875,10	403.324,80	1.429,70				Observación	Manual	Bimensual	Interior Hacienda			NO	NO		
3	1	1b	Iglesia Colorada	6.884.187,80	414.735,40	1.573,30				Sin Uso	Manual	Mensual	Interior Fundo			NO	NO		En Reparación
4	1	1b	Quebrada Seca	6.886.169,00	411.976,90	1.493,70				Riego	Manual	Bimensual	Interior Fundo			NO	NO		
5	1	1c	Fundo Rodeo	6.898.073,10	407.408,00	1.248,10				Riego	Manual	Bimensual	Interior Fundo			NO	NO		
6	1	1d	Algarrobo La Virgen	6.902.276,20	403.915,10	1.151,70	80	40	12	Riego	Manual	Bimensual	Interior Fundo			NO	NO		
7	1	1d	Junta Manflas	6.898.029,80	403.606,10	1.198,20				Observación	Manual	Bimensual	Costado Camino			NO	NO		
8	1	1d	Pastillo (Prohens)	6.899.416,60	404.283,40	1.178,10		53	12	Riego	Manual	Bimensual	Costado Camino			NO	NO		
9	2	2a	Embalse Lautaro	6.904.769,30	401.524,30	1.115,40	87,81		12	Piezómetro Embalse	Manual	Bimensual	Por Camino Público	55 - 65		SI	SI	ND-0302-287	Seco
10	2	2a	Escuela 17 Los Loros	6.921.025,60	391.053,30	960,4	32		8	Riego	Manual	Bimensual	Interior Escuela		18	SI	SI	ND-0302-307	
11	2	2a	Fundo La Puerta	6.923.434,20	388.877,30	886,5	70,6		12 3/4	Riego	Manual	Bimensual	Interior Fundo		26 - 46 -55	SI	SI	ND-0302-232	
12	2	2a	Goyo Díaz	6.911.951,30	399.223,70	1.044,50	70		12 3/4	Riego	Manual	Bimensual	Por Camino Público	30 - 45	55 - 64	NO	SI	ND-0302-222	
13	2	2a	Pueblo San Antonio	6.915.749,00	396.199,00	1.020,00				Riego	Manual	Bimensual	Interior Fundo			NO	NO		
14	2	2a	Quebrada Calquis (Antiguo)	6.909.886,00	400.550,00	1.093,00	60 -30		16- 12	Riego	Manual	Esporádica	Por Camino Público	30 - 45 - 55	68 - 86	SI	SI	ND-0302-229	
15	2	2a	Quebrada Calquis UAC	6.909.647,00	400.660,00	1.096,00				Riego	Manual	Bimensual	Interior Fundo			NO	NO		
16	2	2a	Vegas El Giro	6.916.884,10	394.760,60	989,3	70		12	Riego	Manual	Bimensual	Interior Fundo		30 - 48 - 66	SI	SI	ND-0302-960	Sin Acceso
17	3	3a	Agrícola Villa María	6.936.528,30	379.562,40	715,1	110		12	Riego	Manual	Bimensual	Interior Fundo			NO	NO		
18	3	3a	Hornito (Rojas)	6.929.417,90	383.845,40	799,1	100		12	Observación	Manual	Bimensual	Interior Fundo	65		SI	SI	ND-0302-240	Seco
19	3	3a	Pabellón	6.942.355,20	378.669,40	655,6				Observación	Manual	Bimensual	Costado Camino			NO	NO		Seco
20	3	3a	Planta Elisa de Bordo	6.933.491,70	382.092,00	753,2	92 - 16 - 12		12 - 10 - 8	Observación	Manual	Bimensual	Interior Fundo	48 - 53 - 58		SI	SI	ND-0302-364	Seco
21	3	3a	Villa María- Hornitos	6.936.528,30	379.562,40	715,1	60			Sin Uso	Manual	Bimensual	Interior Fundo			NO	NO		Seco
22	3	3b	Fundo Alianza	6.946.839,00	376.589,00	608	60		12	Riego	Manual	Bimensual	Interior Fundo	22		SI	SI	ND-0302-341	
23	3	3b	Quebrada Cerrillos	6.949.649,10	376.689,10	597,8				Sin Uso	Manual	Mensual	Interior Fundo			NO	NO		Seco
24	3	3b	Quebrada Cerrillos Amancay	6.949.718,20	377.107,80	611,2	130	80	14	Riego	Manual	Mensual	Interior Fundo			NO	NO		
25	4	4a	Buitron	6.962.492,10	374.871,00	468,1				Observación	Manual	Bimensual	Costado Camino			NO	NO		Seco
26	4	4a	Carola	6.956.454,80	375.003,90	513,3				Riego	Manual	Bimensual	Interior Parcela			NO	NO		Sin Acceso
27	4	4a	Hochilds	6.971.996,20	367.532,70	376,4	70			Carguío Aljibes	Manual	Bimensual	Interior Propiedad			NO	NO		
28	4	4a	Pucobre (8)	6.958.607,50	374.671,80	497,5				Industrial	Manual	Bimensual	Interior Propiedad			NO	NO		Sin Acceso
29	4	4a	Pueblo San Fernando (Las Cañas)	6.968.006,10	372.276,80	432,3				Observación	Manual	Bimensual	Interior Propiedad			NO	NO		Seco
30	4	4a	Quebrada Infernillo (Mal Paso)	6.955.346,30	375.038,00	512,3				Riego	Manual	Bimensual	Interior Fundo			NO	NO		
31	5	5a	Escuela Italiana	6.974.241,10	366.171,20	355	38		8	Observación	Manual	Bimensual	Interior Escuela		17 - 25	SI	SI	ND-0302-309	Seco
32	5	5a	Gino Aróstica	6.979.653,20	358.135,40	295,5	46			Riego	Manual	Bimensual	Interior Parcela			NO	NO		Pozo Sin Inscripción, por lo que DGA Atacama lo retiró de la red
33	5	5a	Hda. Toledo	6.979.338,20	357.003,70	291,7				Observación	Manual	Bimensual	Interior Parcela			NO	NO		Seco
34	5	5a	Valle Dorado	6.975.316,30	362.229,20	333,1	60			Observación	Manual	Bimensual	Interior Fundo			NO	NO		Seco
35	5	5a	Villa Candelaria (Daniel Álvarez)	6.979.309,60	358.951,10	297,2				Riego	Manual	Bimensual	Interior Parcela			NO	NO		
36	6	6a	Canto del Viento	6.978.806,50	352.152,30	259,2				Riego	Manual	Bimensual	Interior Parcela			NO	NO		Pozo Sin Inscripción, por lo que DGA Atacama lo retiró de la red
37	6	6a	Fundo San Juan	6.977.601,20	350.339,50	246,1				Observación	Manual	Bimensual	Costado Camino			NO	NO		Sin Acceso
38	6	6a	Hda. Margarita	6.975.101,40	341.191,40	195				Sin Uso	Manual	Bimensual	Costado Camino			NO	NO		Seco
39	6	6a	Hda. Margarita (Mamoros)	6.974.008,00	341.042,60	193,4				Observación	Manual	Bimensual	Interior Fundo			NO	NO		
40	6	6a	Hda. San Francisco	6.980.247,50	355.036,80	280,5	35		10	Sin Uso	Manual	Bimensual	Por Camino Público		22	SI	SI	ND-0302-665	
41	6	6a	Noria Santelices	6.978.640,70	353.178,20	264,8				Sin Uso	Manual	Bimensual	Interior Parcela			NO	NO		Seco
42	6	6a	Piedra Colgada (13)	6.979.848,10	353.128,00	268,4			5	Observación	Manual	Bimensual	Interior Fundo			NO	NO		Seco
43	6	6a	San Pedro (11)	6.977.201,00	345.668,70	214,8	50		12	Observación	Manual	Bimensual	Interior Fundo	17 - 26 - 32 - 41		SI	SI	ND-0302-329	Seco
44	6	6a	San Pedro (Floridor)	6.976.256,90	348.029,00	230,1	20		8	Riego	Manual	Bimensual	Interior Parcela		6,5	SI	SI	ND-0302-594	
45	6	6b	Hda. María Isabel (1)	6.974.809,50	322.613,00	95,7	55		14	Observación	Manual	Bimensual	Interior Fundo	13 - 24	5 - 45	SI	SI	ND-0302-606 (1)	
46	6	6b	Hda. María Isabel (3)	6.974.629,50	324.827,60	105,7	55		10	Observación	Manual	Bimensual	Costado Camino	37 - 48	13 - 22	SI	SI	ND-0302-606 (3)	
47	6	6b	Hda. María Isabel (4)	6.974.192,90	326.794,10	124,7				Observación	Manual	Mensual	Costado Camino			NO	NO		
48	6	6b	Kiosco Santa Valentina	6.974.148,30	339.384,60	185,2	25		10	Riego	Manual	Bimensual	Interior Parcela			NO	NO		Sin Acceso
49	6	6b	Monte Amargo (2)	6.973.059,40	329.531,30	131	11,7			Observación	Manual	Bimensual	Huella			NO	NO		
50	6	6b	Punta Picazo(5)	6.972.994,10	332.401,00	150,7	14,5			Observación	Manual	Bimensual	Costado Camino			NO	NO		
51	6	6b	San Camilo (6)	6.970.812,00	333.555,00	161,4	11			Observación	Manual	Bimensual	Huella			NO	NO		
52	6	6b	San Camilo (8)	6.971.845,50	335.543,20	166,7	12,2			Observación	Manual	Bimensual	Huella			NO	NO		
53	6	6b	Valle Fértil	6.971.129,10	336.803,90	171,6	7,5			Observación	Manual	Bimensual	Costado Camino			NO	NO		

Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes DGA

- **Sector 6:** En este sector se ubica la mayor cantidad de pozos de la red, con un total de 18 pozos. Esta área es la que presenta mayor diversidad en cuanto al uso del suelo, sigue predominando la actividad agrícola pero la producción de uva de exportación da paso a las plantaciones de olivos que abarcan el área agrícola hasta el final de la cuenca, encontrando también áreas de terreno menores dedicadas a la producción de hortalizas, maíz, frutales, etc. Hacia el final de la cuenca estas áreas productivas se encuentran cercanas al lecho del río.

6. ANÁLISIS DE REPRESENTATIVIDAD, CONFIABILIDAD Y DIAGNÓSTICO DE LA RED DE MONITOREO

6.1. GENERALIDADES

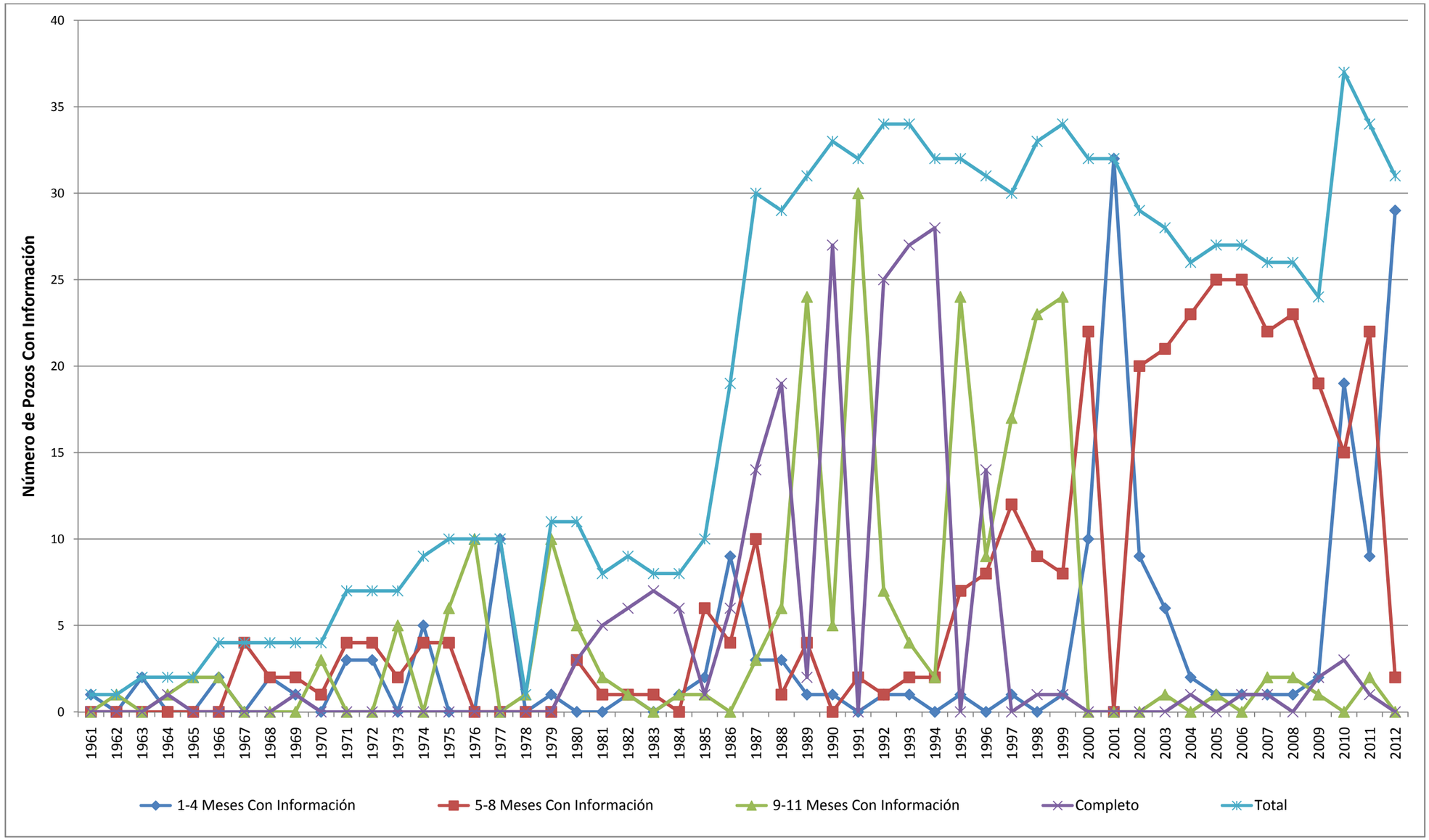
En esta sección del informe se presenta un análisis de la representatividad y confiabilidad de la red de monitoreo, elementos que se utilizan para en definitiva realizar el diagnóstico de la red de monitoreo.

6.2. CARACTERÍSTICAS DE LA RED

Como punto de partida para el análisis, se presentó en el Cuadro 5-1 un resumen con la información básica disponible de la red, tales como profundidad, ubicación de ranurados, frecuencia de medición, diámetro, uso, características de la habilitación.

La red se compone de 53 pozos de propiedad de particulares, con información disponible desde el año 1961. Se observa claramente que hasta el año 1985 hay a lo más 12 pozos con algún grado de información, información que se incrementa rápidamente a partir del año 1986. En la Figura 6.2-1 un gráfico en el que se muestra la cantidad de pozos con información. Este gráfico permite visualizar claramente la cantidad de pozos con más de 5 meses de información es bastante alta, lo que es adecuado, ya que de acuerdo a lo informado por la DGA Regional la frecuencia de medición de los pozos desde el año 2001 es bimensual, con la excepción de 2 pozos, para los cuales la frecuencia de medición es cercana a anual. En lo que respecta al uso de los pozos se puede desglosar de la siguiente forma: 24 pozos de riego, 20 de uso exclusivo de observación de la red, 1 como piezómetro, y 1 para carguío de camiones Aljibes. Se hace notar que de los 24 pozos de riego, DGA Atacama eliminó 2 de la red, ya que un análisis detallado mostró que estos no cuentan con derechos de aguas, por lo que mantenerlos en la red sería validar su uso ilegal, tal como lo expuso personal de esa repartición. La información de niveles muestra que hay 16 pozos que se han encontrado secos en algún momento. Además hay pozos a los cuales no ha sido posible el acceso en los últimos meses.

FIGURA 6.2-1
RESUMEN DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN



Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes DGA

6.3. ANÁLISIS DE OPERACIÓN DE LA RED

En lo que respecta al método de operación de la red, se tiene que de acuerdo a lo reportado por DGA Atacama, ésta se opera como una de las actividades usuales repartición, lo que significa está supeditada a la disponibilidad presupuestaria y de personal de la DGA. Lo anterior se traduce en que en algunas oportunidades la medición de niveles queda en un segundo plano, lo que se traduce en que las mediciones se postergan al mes siguiente, teniéndose de esta manera vacíos de información. Otro elemento que también influye en la calidad de la información es la existencia de pozos secos y otros sin acceso. En el caso de los pozos secos, al menos se sabe que su nivel es al menos igual a la profundidad del pozo, aunque desconocido.

El caso de los pozos sin acceso es importante, ya que la medición actual de los pozos depende de la buena voluntad de los propietarios de los terrenos en los que se encuentran los pozos al momento de la medición. En otros casos, si bien se dispone de la autorización para ingresar a medir, se requiere que se torque el acceso físico al lugar.

En lo que respecta al acceso, entonces se tiene lo siguiente:

- Hay 43 pozos no se presentan mayores problemas, con la salvedad de que en aquellos casos en los cuales los pozos se encuentran en predios particulares, el acceso queda a la disponibilidad del momento de las personas encargadas.

- Con dificultad de acceso hay 10 pozos, los cuales presentan el problema de contacto con la gente encargada en Administración, ya que pertenecen a empresas.

Otro elemento que también influye en las mediciones es la disponibilidad de personal al momento de la medición, dado que vacaciones, permisos y enfermedad del personal asignado a las mediciones puede influir en la continuidad de las mediciones. Un último punto se refiere a la disponibilidad presupuestaria de la DGA, lo que se traduce en que es probable que en algunos meses no se disponga de fondos, lo que posterga la medición al mes siguiente.

En definitiva, la continuidad de las mediciones de niveles está sujeta a diferentes condiciones relacionadas con la disponibilidad presupuestaria y de personal de la DGA, y también a condiciones externas, ajenas a la DGA.

6.4. ANÁLISIS DE REPRESENTATIVIDAD

Con el fin de determinar la representatividad de la red, en general se procede usando la densidad de estaciones, valor que luego se compara con los estándares internacionales. Ahora bien, para el caso de aguas subterráneas, en la publicación que define los estándares mundiales de monitoreo "World Meteorological Organization, Guide to Hydrometeorological Practices", (WMO Nº168) (http://www.whycos.org/hwrp/guide/index.php), no se indica una densidad mínima o máxima de estaciones para el monitoreo de las aguas

subterráneas. Por lo anterior, el análisis se realiza comparando las densidades de muestreo por sector, resultados que se muestran en el Cuadro 6.4-1, tanto para la sectorización original de 6 sectores y para la sectorización modificada de 11 sectores. Se hace notar que la densidad de estaciones se presenta en #/km², y no en km²/# que es la unidad prescrita por World Meteorological Organization. Por otra parte, la Agencia Europea del Medioambiente (European Environment Agency, EAA) recomienda que se instale 1 pozo cada 20 o 25 km². Se observa que esta restricción se cumple si se consideran todos los pozos. Cuando se eliminan los pozos que se encuentran secos en la actualidad, la condición no se cumple.

Al analizar los resultados del Cuadro 6.4-1, con respecto a la sectorización original, se observa que en los sectores 1 al 3 la densidad es menor en comparación con la densidad de los otros sectores, en otras palabras, en los sectores 1 al 3 hay más pozos que en los sectores 5 al 6. Por otra parte, al considerar la nueva sectorización, la variabilidad en sectorización es aún mayor.

Se hace notar que uno de los criterios de trabajo para la proposición de mejoramientos a la red sería propender a tener una densidad de estaciones relativamente homogénea a lo largo del área de estudio. Ahora bien, debe tenerse en cuenta además que la densidad ***necesaria para la red*** depende en un rango de factores, incluyendo densidad de pozos de extracción, pendiente del terreno y la napa y los objetivos del monitoreo, por ejemplo cerca de un pozo de agua potable o un humedal significativo debe contar con una densidad mayor que en un gran llanura con bajo desarrollo del recurso. Es probable que en las partes altas de la cuenca se necesite una mayor densidad de pozos porque la situación es más crítica. Lo anterior hace considerar que la densidad de la red propuesta no debería ser uniforme, sino que debería mantener aproximadamente la proporción actual entre los diferentes sectores, aunque no necesariamente las densidades actuales.

CUADRO 6.4-1
DETERMINACIÓN DENSIDAD DE ESTACIONES

Sector	Número de Pozos	Densidad (#/km²)	Sub-Sector	Número de Pozos	Densidad (#/km²)
1	8	0,244	1a	2	0,282
			1b	2	0,267
			1c	1	0,128
			1d	3	0,288
2	8	0,213	2a	7	0,213
3	8	0,149	3a	5	0,189
			3b	3	0,110
4	6	0,057	4a	6	0,057
5	5	0,049	5a	5	0,041
6	18	0,043	6a	9	0,068
			6b	9	0,034

Fuente: Elaboración propia en base a información DGA

6.5. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE NIVELES

En el Cuadro 7.5-1 se muestra la información de niveles procesada de manera que cada pozo queda representado por 5 parámetros característicos:

- Nivel mínimo
- Nivel promedio
- Nivel máximo
- Desviación Estándar de los niveles
- Variación media de los niveles (calculada como la diferencia entre años consecutivos)

Se hace notar que la información presentada en el Cuadro 6.5-1 corresponde a una base de datos depurada ya que se eliminaron los pozos 32 y 36 que fueron sacados de la red por no tener derechos de agua. Adicionalmente se eliminaron los pozos 26 y 28 ya que poseen muy pocos datos, y la deviación estándar no se puede determinar.

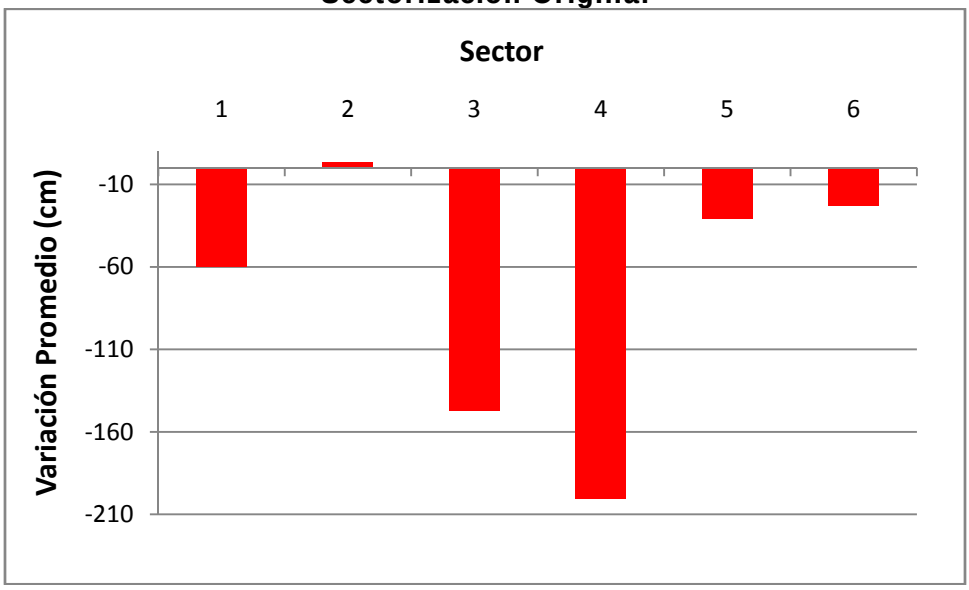
Con el fin de tener una visión de la información histórica recopilada, se presenta en la Figura 6.5-1 la variación de niveles promedio anual en cada sector, tanto para la sectorización original, como para la modificada.

Al analizar la variable “variación media”, se observa que en general en el Sector 1 los niveles en promedio van a la baja. Por otra parte, en el Sector 2 también van a la baja, aunque en menor medida que en el Sector 1, tal como se muestra en la Figura 6.5-1. En el Sector 3 los descensos van a la baja, siendo menores que en el Sector 2. Debe hacerse notar que en el Sector 4 se dispone de muy poca información, e incluso en uno de los casos no hay información ya que el pozo se encontró seco al momento de las mediciones. En el Sector 5 se observa la misma tendencia de pozos con niveles a la baja. Por último, en el Sector 6 los niveles también se encuentran a la baja, aunque con descensos medios no tan pronunciados. Al extender el análisis a la nueva sectorización, en general se observan las mismas tendencias, aunque en el sector 1d, en promedio los niveles están al alza.

Debe hacerse notar en todo caso que el resultado del análisis de los niveles promedio está influenciado por el número de mediciones disponibles, siendo los cálculos realizados con un mínimo número de datos poco confiables.

FIGURA 6.5-1
VARIACIÓN MEDIA DE NIVELES POR SECTOR

Sectorización Original



Sectorización Modificada

Fuente: Elaboración propia en base a información DGA

CUADRO 6.5-1
ANÁLISIS INFORMACIÓN DE NIVELES
RED DE MEDICIÓN DEPURADA

Pozo	Sector	Sub-Sector	Nombre	Coordenadas (m)			Nivel (m)				Variación Media (cm)	Cantidad
				Norte	Este	Cota	Mínimo	Promedio	Desviación	Máximo		
1	1	1a	Hda. Manflas (Manflas ante Hda.)	6.891.871,1	403.735,9	1.296,7	1.541,1	1.552,7	7,1	1.567,9	-34	27
2	1	1a	Hda. Manflas	6.886.875,1	403.324,8	1.429,7	1.468,5	1.473,1	2,8	1.480,2	9	27
3	1	1b	Iglesia Colorada	6.884.187,8	414.735,4	1.573,3	1.547,8	1.556,0	4,4	1.565,1	-60	27
4	1	1b	Quebrada Seca	6.886.169,0	411.976,9	1.493,7	1.471,9	1.478,5	3,8	1.485,1	-45	27
5	1	1c	Fundo Rodeo	6.898.073,1	407.408,0	1.248,1	1.355,8	1.371,3	10,8	1.407,2	115	23
6	1	1d	Algarrobo La Virgen	6.902.276,2	403.915,1	1.151,7	1.238,5	1.273,9	16,9	1.292,2	-224	25
7	1	1d	Junta Manflas	6.898.029,8	403.606,1	1.198,2	1.144,6	1.171,3	13,0	1.194,9	-181	21
8	1	1d	Pastillo (Prohens)	6.899.416,6	404.283,4	1.178,1	1.109,3	1.113,2	4,0	1.117,3	-399	3
9	2	2a	Embalse Lautaro	6.904.769,3	401.524,3	1.115,4	1.100,7	1.113,1	4,9	1.115,8	114	15
10	2	2a	Escuela 17 Los Loros	6.921.025,6	391.053,3	960,4	936,7	939,1	3,5	960,4	-4	42
11	2	2a	Fundo La Puerta	6.923.434,2	388.877,3	886,5	876,6	883,9	4,1	886,5	-7	25
12	2	2a	Goyo Díaz	6.911.951,3	399.223,7	1.044,5	1.032,6	1.035,5	2,8	1.038,1	-151	3
13	2	2a	Pueblo San Antonio	6.915.749,0	396.199,0	1.020,0	1.004,5	1.007,4	3,4	1.019,5	47	29
14	2	2a	Quebrada Calquis (Antiguo)	6.909.886,0	400.550,0	1.093,0	1.070,9	1.078,5	2,0	1.081,0	23	31
15	2	2a	Quebrada Calquis UAC	6.909.647,0	400.660,0	1.096,0	1.063,0	1.066,3	4,1	1.070,4	-274	3
16	2	2a	Vegas El Giro	6.916.884,1	394.760,6	989,3	976,3	981,8	2,3	984,9	0	32
17	3	3a	Agrícola Villa María	6.936.528,3	379.562,4	715,1	643,0	644,3	2,2	646,9	-195	3
18	3	3a	Hornito (Rojas)	6.929.417,9	383.845,4	799,1	725,0	742,5	14,2	785,8	101	23
19	3	3a	Pabellón	6.942.355,2	378.669,4	655,6	597,9	611,2	11,9	635,2	-35	26
20	3	3a	Planta Elisa de Bordo	6.933.491,7	382.092,0	753,2	697,3	715,1	12,5	739,6	-242	32
21	3	3a	Villa María- Hornitos	6.936.528,3	379.562,4	715,1	656,2	673,1	13,1	695,0	9	25
22	3	3b	Fundo Alianza	6.946.839,0	376.589,0	608,0	543,3	548,2	5,0	553,3	-500	3
23	3	3b	Quebrada Cerrillos	6.949.649,1	376.689,1	597,8	559,7	571,4	7,4	593,6	49	35
24	3	3b	Quebrada Cerrillos Amancay	6.949.718,2	377.107,8	611,2	536,9	548,8	9,2	561,1	-365	7
25	4	4a	Hochschild	6.971.996,2	367.532,7	376,4	344,0	346,3	3,4	348,7	476	2
27	4	4a	Carola	6.956.454,8	375.003,9	513,3	453,4	460,5	8,1	470,1	-805	3
29	4	4a	Pueblo San Fernando (Las Cañas)	6.968.006,1	372.276,8	432,3	377,4	399,6	6,9	412,3	-71	45
30	4	4a	Quebrada Infernillo (Mal Paso)	6.955.346,3	375.038,0	512,3	426,4	449,9	20,3	462,1	-1.787	3
31	5	5a	Escuela Italiana	6.974.241,1	366.171,2	355,0	297,0	298,4	1,9	299,7	-268	2
33	5	5a	Hda. Toledo	6.979.338,2	357.003,7	291,7	277,3	283,3	3,9	290,4	31	22
34	5	5a	Valle Dorado	6.975.316,3	362.229,2	333,1	286,5	302,1	9,4	315,9	19	22
35	5	5a	Villa Candelaria (Daniel Álvarez)	6.979.309,6	358.951,1	297,2	264,8	269,2	4,3	273,4	432	3
37	6	6a	Fundo San Juan	6.977.601,2	350.339,5	246,1	233,5	240,5	2,6	244,3	-15	46
38	6	6a	Hda. Margarita	6.975.101,4	341.191,4	195,0	187,5	191,1	1,3	193,2	-18	44
39	6	6a	Hda. Margarita (Mamoros)	6.974.008,0	341.042,6	193,4	187,5	190,3	1,1	191,8	-19	16
40	6	6a	Hda. San Francisco	6.980.247,5	355.036,8	280,5	259,1	272,4	4,9	277,8	-66	32
41	6	6a	Noria Santelices	6.978.640,7	353.178,2	264,8	255,7	260,3	2,3	263,5	-9	23
42	6	6a	Piedra Colgada (13)	6.979.848,1	353.128,0	268,4	263,4	265,0	0,8	266,5	-9	15
43	6	6a	San Pedro (11)	6.977.201,0	345.668,7	214,8	208,8	211,5	1,2	212,9	-23	15
44	6	6a	San Pedro (Floridor)	6.976.256,9	348.029,0	230,1	217,7	218,3	0,6	218,9	-58	3
45	6	6b	Hda. María Isabel (1)	6.974.809,5	322.613,0	95,7	92,8	93,5	0,5	94,3	-4	26
46	6	6b	Hda. María Isabel (3)	6.974.629,5	324.827,6	105,7	102,2	102,8	0,4	103,6	-4	26
47	6	6b	Hda. María Isabel (4)	6.974.192,9	326.794,1	124,7	118,2	118,7	0,5	120,7	3	26
48	6	6b	Kiosco Santa Valentina	6.974.148,3	339.384,6	185,2	178,7	178,8	0,2	179,0	-14	3
49	6	6b	Monte Amargo (2)	6.973.059,4	329.531,3	131,0	122,0	122,9	0,9	126,6	-2	24
50	6	6b	Punta Picazo(5)	6.972.994,1	332.401,0	150,7	140,6	141,1	0,3	141,6	3	26
51	6	6b	San Camilo (6)	6.970.812,0	333.555,0	161,4	154,7	155,2	0,2	155,5	2	26
52	6	6b	San Camilo (8)	6.971.845,5	335.543,2	166,7	160,2	160,5	0,3	161,8	-6	25
53	6	6b	Valle Fértil	6.971.129,1	336.803,9	171,6	165,4	166,2	0,4	166,8	-3	26

Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes DGA

6.6. ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD

En base a los datos mostrados anteriormente en el Cuadro 6.5-1, se considera que en general la información de niveles que entrega la red es confiable, en lo que respecta a los pozos de observación o sin uso, que en total ascienden a 289, tal como se muestra en el Cuadro 6.6-1. Por otra parte, en aquellos pozos de observación que en la actualidad se encuentran secos, la información es sólo de tipo cualitativo. En el Cuadro 6.6-1 se muestra que adicionalmente 20 pozos están en operación (lo que significa que podrían estar midiendo niveles dinámicos en el peor caso, o niveles cercanos a los estáticos en el mejor caso), 13 pozos se encuentran secos, 4 están sin acceso, y 11 tienen registros con menos de 10 años de información.

CUADRO 6.6-1
ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE LA RED DEPURADA

Caracterización de Sectores									
Sector	Observación				Operación				Total
	Vigentes	Secos	Sin Acceso	Menos 10 Datos	Vigentes	Secos	Sin Acceso	Menos 10 Datos	
1	3				5			1	8
2	1				7	1	1	2	8
3	4	4			4			3	8
4	2		1	1	2	1		2	4
5	4	3		2					4
6	15	4	2		2				17
Total	**29**	**11**	**3**	**3**	**20**	**2**	**1**	**8**	**49**
Caracterización de Sub-Sectores									
Sub-Sector	Observación				Operación				Total
	Vigentes	Secos	Sin Acceso	Menos 10 Datos	Vigentes	Secos	Sin Acceso	Menos 10 Datos	
1a	1				1				2
1b	1				1				2
1c					1				1
1d	1				2			1	3
2a	1				7	1	1	2	8
3a	3	3			2			1	5
3b	1	1			2			2	3
4a	2		1	1	2	1		2	4
5a	4	3		2					4
6a	7	4	1		1				8
6b	8		1		1				9
Total	**29**	**11**	**3**	**3**	**20**	**2**	**1**	**8**	**49**

Fuente: Elaboración propia en base a información DGA

En primer lugar se analiza la existencia de pozos secos o sin acceso. Se observa que en el sector 1 no hay pozos secos o sin acceso. Por otra parte en el Sector 3 la situación es delicada, ya que de los 8 pozos existentes, 4 se encuentran secos. Por otra parte, en el Sector 4 hay sólo un pozo seco. En el sector 5 se tiene una situación más compleja ya que hay 3 pozos secos. Por último, en el Sector 6, aunque hay 4 pozos secos, el efecto no es tan importante, ya que la red tiene 17 pozos. Por otra parte, desde el punto de vista de longitud de registros, en los sectores 2, 3 y 4 se concentra la mayor cantidad de pozos con registros cortos, con menos de 10 años con información.

Otro elemento relevante para la confiabilidad de la red está relacionado con el uso de los pozos. Cuando los pozos se usan regularmente, lo que en realidad miden son niveles dinámicos, y no niveles estáticos, lo que resta confiabilidad a las mediciones. Por

lo anterior, desde el punto de vista de los usos, las mediciones en los sectores 1 y 2 son poco confiables, ya que la mayor parte de los pozos son de riego, por lo que en general lo que miden son niveles dinámicos, o a lo más niveles cercanos a los estáticos, y no niveles propiamente estáticos. Por otra parte, en los sectores 3 y 4 los pozos son una mezcla de pozos netamente de observación y pozos en uso. Por último, en la zona definida por los sectores 5 y 6, los pozos son fundamentalmente de observación. En definitiva, para el análisis posterior se consideran los pozos de observación que no se encuentren secos o sin acceso, lo que reduce el universo de pozos de 49 (en la base reducida) a 15 pozos: 3 en el Sector 1; 1 en los sectores 2, 4 y 5; y 9 pozos en el Sector 6. En el Cuadro 6.6-2 se muestra la densidad de la red calculada sólo para los pozos de observación. Se observa que la densidad de los sectores en que hay pozos de observación, es cercana al 50% de la densidad de la red original.

CUADRO 6.6-2
DETERMINACIÓN DENSIDAD DE ESTACIONES DE OBSERVACIÓN

Sector	Número de Pozos	Densidad (# / km^2)	Sub-Sector	Número de Pozos	Densidad (# / km^2)
1	3	0,091	1a	1	0,141
			1b	1	0,133
			1c	0	0,000
			1d	1	0,096
2	1	0,027	2a	1	0,027
3	0	0,000	3a	0	0,000
			3b	0	0,000
4	1	0,010	4a	1	0,010
5	1	0,008	5a	1	0,008
6	9	0,023	6-a	2	0,015
			6-b	7	0,026

Fuente: Elaboración propia en base a información DGA

6.7. DIAGNÓSTICO DESDE EL PUNTO DE VISTA GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO DE LA RED

Con respecto a la representatividad de los pozos que integran la red de monitoreo, la geomorfología del valle del río Copiapó juega un papel fundamental en relación a la distribución de los pozos de monitoreo. Por una parte, en el segmento superior del valle del río Copiapó (sectores 1, 2 y 3), éste presenta una morfología elongada, donde los pozos de monitoreo representan la variación del nivel a lo largo de la línea de flujo. En este segmento la componente longitudinal del flujo subterráneo es la predominante, siendo la componente transversal prácticamente despreciable. En el sector 4 se observa que el segmento sur se mantiene la morfología elongada, pero hacia aguas abajo, desde el sector de San Fernando, se observa un ensanchamiento del valle, por lo que la componente transversal del flujo comienza a tomar importancia. De aquí en adelante, en los sectores 5 y 6, los pozos que integran la red de monitoreo deben representar tanto la variación lateral como longitudinal del flujo, de modo de representar cualquier singularidad del terreno.

En relación a la granulometría, los pozos de la red de monitoreo se emplazan dentro de los depósitos fluviales del río Copiapó, constituidos por arenas y gravas, con intercalaciones de limos y arcillas. Hacia la parte baja del valle se presenta una mayor proporción de material fino, debido a la disminución de la pendiente. Esta disminución de pendiente se relaciona con la energía involucrada en los mecanismos de transporte de sedimentos, donde a menor pendiente, menor energía, por lo que se facilita el transporte de las partículas más finas en lugar de las más gruesas. Si bien dentro de la unidad de depósitos fluviales se pueden observar intercalaciones de depósitos finos entre granulometrías más gruesas, no se considera que la distribución de los sedimentos sea una variable que controle, por si sola, la variación de los niveles freáticos. Por lo tanto, el tipo de material presente en el acuífero no constituye, por si mismo, una variable que permita definir diferencias en la frecuencia de monitoreo de los pozos que integran la red, lo que en definitiva implica que red pueda ser monitoreada con una sola frecuencia de medición.

6.8. DIAGNÓSTICO INTEGRAL DE LA RED

En base a los antecedentes mostrados en los acápites anteriores, se tiene que la red es adecuada como red de observación, teniéndose los siguientes resultados específicos por sector:

- **Sector 1:** De acuerdo a la información disponible, este es el segundo sector en que la red de monitoreo es la más confiable, ya que de los 8 pozos que la conforman, 3 son de observación y tienen registros largos.

- **Sector 2:** En este sector la red, con un total de8 pozos, también no es muy confiable, ya que aunque se tienen 5 pozos con un registro largo y 7 pozos están en uso. Lo anterior obliga a agregar pozos a la red, con el fin de hacerla confiable. En este sector existe un pozo exclusivo para observación.

- **Sector 3:** En este sector la red también es confiable desde el punto de vista de la longitud de los registros, teniéndose 5 pozos con un registro largo. Ahora bien, no hay pozos de observación en operación, ya que se encuentran secos. Se requiere aplicar cambios profundos de manera que se tengan pozos con la suficiente profundidad para que puedan medir a largo plazo.

- **Sector 4 y 5:** Estos 2 sectores en conjunto presentan una red que es poco confiable, con pocos pozos con registros de gran longitud (sólo 5), encontrándose los pozos de observación secos. En términos simples estos sectores son los que requieren una mayor atención al momento de definir la red de monitoreo definitiva.

- **Sector 6:** Tal como se indicó anteriormente, en este sector hay un total de 18 pozos dedicados exclusivamente para observación, de los cuales 13 se encuentran vigentes, lo que haría que este sector sea el que requiera una menor intervención.

Como regla general, para proponer la nueva red se tendrán las siguientes consideraciones:

1. En cada sub-sector se tendrá al menos 1 pozo en uso, con el fin de comparar los niveles pseudo-estáticos con los niveles estáticos de los pozos netamente de observación.

2. En las zonas en que hay pozos secos, se debe profundizar lo existente, y en caso en que esto no se pueda, se deben construir pozos de observación de mayor profundidad a la actual.

3. Tal como se indicó en el diagnóstico geológico y geomorfológico, se requiere que en el sector 6 los pozos se encuentren más dispersos, ya que los flujos laterales son importantes. Por otra parte, en lo que respecta a la frecuencia de medición, las características geológicas del acuífero permiten tener una frecuencia de medición uniforme.

7. PROPOSICIÓN DE RED MEJORADA

7.1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de obtener información de mejor calidad con el mismo costo o incluso menor costo, se desarrolla esta componente del estudio en la que se determina si existen pozos redundantes en la red, es decir, pozos que pueden eliminarse sin disminuir la calidad de la información representativa de los procesos que ocurren en la zona. Con este fin se propone usar el método estadístico de las Componentes Principales (Análisis de Componentes Principales) PCA por su sigla en inglés, que se describe en el Acápite 7.2.

7.2. MÉTODO DE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Análisis de componentes principales es un procedimiento matemático que utiliza una transformación ortogonal para convertir un conjunto de observaciones de las variables correlacionadas posiblemente en un conjunto de valores de las variables linealmente correlacionados denominados componentes principales. El número de componentes principales es menor o igual al número de variables originales. Esta transformación se define de tal manera que la primera componente principal tiene la varianza más grande posible, y cada componente subsiguiente a su vez tiene la mayor varianza posible en virtud de la restricción que sea ortogonal a (es decir, no correlacionada con) las componentes anteriores. Las componentes principales están garantizadas para ser independiente sólo si el conjunto de datos se distribuyen normalmente conjuntamente. Se hace notar que PCA es sensible a la escala relativa de las variables originales.

Se hace notar que PCA puede revelar la estructura interna de los datos en la forma que mejor explica la varianza en los mismos. Si un conjunto de datos multivariante se visualiza como un conjunto de coordenadas en un espacio de alta dimensional de datos (1 eje por variable), PCA puede suministrar al usuario con una imagen de menor dimensión, una "sombra" de este objeto cuando se ve desde un punto de vista más

informativo (en algún sentido). Esto se hace mediante el uso de sólo las primeras componentes principales de modo que la dimensionalidad de los datos transformados se reduce considerablemente (en general 2).

7.3. METODOLOGÍAS PROPUESTAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA RED DE MEDICIÓN

Para el desarrollo del estudio, se propusieron 2 metodologías diferentes, que se enumeran y explican:

- **Metodología para Series de Niveles Con Información Continua:** Esta metodología fue la utilizada en la memoria de título de Rodrigo Larenas (2003) para la red de medición del Valle de Aconcagua, la que fue presentada anteriormente en el Acápite 3.3.3. En este caso se aplica PCA directamente a los registros de la red a través del tiempo. Para esto, el registro de niveles debe ser continuo, sin vacíos de información. En el evento que el registro presente algunos vacíos, éstos deben ser previamente rellenados.

  Posteriormente se aplica el siguiente procedimiento:

  1. Se aplica el PCA a todos los elementos, y se determinan las direcciones principales de interés.

  2. Luego se determina la existencia de "clusters" o agrupaciones de pozos. Estas agrupaciones de pozos son las que se requiere destruir eliminando uno o más pozos. Los criterios para eliminar pozos son: primero los que están secos o sin acceso, luego los que tienen registros cortos, y luego pozos con gran longitud pero que en definitiva son redundantes, es decir, pozos que aportan el mismo grado de información.

  3. Si se estima aún hay pozos redundantes el proceso se repite desde el paso **1**.

- **Metodología para Series de Niveles Sin Información Continua:** En este caso, dado que no se dispone de una serie continua, se reemplaza la serie por una serie de parámetros que representan cada serie. En este caso, se proponen los siguientes 5 parámetros:

  a) Nivel mínimo y máximo

  b) Nivel promedio y desviación estándar

  c) Variación promedio entre medidas consecutivas

  De esta forma, para cada pozo se tiene una colección de 5 parámetros que representan el registro medido, y se pueden calcular sin necesidad de tener continuidad en el registro.

  Posteriormente se aplica el siguiente procedimiento a la serie modificada:

1. Se aplica el PCA a todos los elementos, y se determinan las direcciones principales de interés.
2. Luego se determina la existencia de "clusters" o agrupaciones de pozos. Estas agrupaciones de pozos son las que se requiere destruir eliminando uno o más pozos. Los criterios para eliminar pozos son: primero los que están secos o sin acceso, luego los que tienen registros cortos, y luego pozos con gran longitud pero que en definitiva son redundantes, es decir, pozos que aportan el mismo grado de información.
3. Si se estima aún hay pozos redundantes el proceso se repite desde el paso **1**.

Se hace notar que la metodología de series continuas es de difícil aplicación, ya que requiere información de mejor calidad, que no siempre está disponible. En cambio, la segunda metodología es en general aplicable a cualquier serie. Por estas razones, las metodologías se aplicaron a la red que describe el Sector 6 del acuífero, dado que para este sector es posible definir series continuas. Se determinó que la metodología de series discontinuas es de mejor calidad y aplicabilidad que la metodología de series continuas, por lo que será esta nueva metodología la elegida para analizar la redundancia de los pozos de la red.

7.4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ADOPTADA A LA RED DE NIVELES DE COPIAPÓ

7.4.1. Generalidades

Se hace notar que dado que identificar los pozos que pueden ser redundantes es complejo, se propone aplicar la metodología seleccionando los pozos que deben estar en la red, para luego determinar la información redundante. En definitiva, el protocolo de trabajo propuesto es el siguiente:

- En primer lugar, el proceso se aplica sólo para los pozos de observación que no presentan problemas de acceso o profundidad (al menos actualmente).
- Dada la escala, se identifican los pozos que forzosamente deben estar en la red, para eliminarlos del gráfico, ampliarlo y determinar cuáles pozos deben ser eliminados de la red. Luego se repite el proceso hasta que se determina que no haya pozos redundantes.
- En segundo lugar el proceso presentado en las Etapas 1 y 2 se aplica a los pozos secos. Si bien es cierto estos pozos no son representativos en la actualidad, en el caso de aquellos que tienen suficiente longitud, lo que conviene es ubicar pozos más profundos en sus cercanías, de modo de asimilar los pozos nuevos con los antiguos. De esta manera se puede mantener una red capaz de medir los descensos por un tiempo mayor, pero sin perder la información histórica disponible.

- Al igual que se hizo con los pozos de observación y secos, se aplica la metodología a los pozos en uso. Esto se hace con el mismo objetivo de mantener pozos secos, no perder la historia de los pozos.

Posteriormente, el proceso se aplica a cada uno de los sectores: usando la sectorización original, y no la modificada, ya que en general la cantidad de datos por sector en la nueva situación es muy reducida, lo que hace poco confiable el análisis de redundancia.

7.4.2. Base de Datos Resultante

Luego de aplicado el análisis de redundancia, se debe determinar los elementos de la red antigua que continúan en la red nueva, ya sea como pozos que se mantienen, o como pozos que se deben agregar de reemplazo de pozos existentes. Para esto se confeccionó el Cuadro 7.4.2-1 en el que se indica en primer lugar los pozos que deberían estar en la red de acuerdo a los criterios de análisis: observación, secos, usos, sector, y longitud. En el cuadro se indican los pozos adoptados para la red bajo los siguientes criterios:

- Se adoptan directamente los pozos seleccionados en el análisis de pozos de observación
- Se adoptan aquellos pozos seleccionados en al menos 2 de los análisis de pozos secos, por operación, o que además fueron seleccionados en el análisis por sector
- Se adoptan aquellos pozos seleccionados con uno de los criterios, secos o en operación, pero que a la vez tengan registros largos con más de 10 años de longitud

Se hace notar que el análisis PCA excluye pozos con registros cortos por ser relativamente nuevos, por lo anterior, se sugiere proponer una serie de tipo secundario adicional a lo propuesto por el PCA. Siguiendo este procedimiento, la red se reduce de 53 a 37, tal como se muestra en el Cuadro 7.4.2-1, con una red secundaria de 6 pozos.

Al analizar los resultados del Cuadro 7.4.2-1 se muestra que la red queda compuesta por 11 pozos seleccionados por ser de observación, 18 pozos seleccionados por cumplir con los criterios, 8 por su longitud y 6 que forman parte de la red secundaria.

Al analizar los pozos componentes de la red reducida, se observa que 13 pozos son netamente de observación o están sin uso, 15 están secos o sin acceso en el último tiempo (13 de observación y 2 en operación), y 9 están en operación en la actualidad. Con el fin de no perder la información histórica de los pozos, se sugiere profundizar los pozos secos, o en caso en que esto no sea posible, se sugiere instalar piezómetros de observación muy cercanos a los pozos secos y en uso. Dado que los piezómetros no captan agua, no están sujetos al radio de protección legal, por lo que podrían instalarse cerca a los pozos existentes, sin alterar la situación de derechos. En segundo lugar, con el fin de mejorar la densidad de la red, se propone incrementar el número de pozos de la red en algunos sectores específicos. Lo que interesa es que en cada uno de los sub-sectores la densidad sea al menos igual a lo recomendado por el EEA, lo cual se cumple para toda la red, con excepción del sub-sector 4a. Por otra parte, dado que la densidad

de los sub-sectores 4a, 5a y 6b es baja, la red se debe incrementar con pozos en los citados sub-sectores. Se agregaron 5 pozos, 2 en el sub-sector 4a, 1 en el 5a y 2 en el 6b, de manera que las densidades de los sectores son del mismo orden de magnitud. Dado que en la red secundaria hay un pozo del sector 5a y otro del 6b, estos 2 pozos serán incluidos en la red propuesta, por lo que la red secundaria se reduce de 6 a 4 pozos. Lo anterior queda de manifiesto en el Cuadro 7.4.2-2, en el que se compara la red reducida con la red final. En la Figura 7.4.2-1 se muestra la red final.

CUADRO 7.4.2-1
SELECCIÓN DE POZOS DE LA RED NUEVA MEDIANTE PCA APLICADO A LA RED DEPURADA

Pozo	Sector	Sub-Sector	Nombre	Observación	Secos	Operación	Sector	Longitud	Red Secundaria	Adoptado	Razón para Aceptación
1	1	1a	Hda. Manflas (Manflas Ante Hda.)								PC
2	1	1a	Hda. Manflas								PO
3	1	1b	Iglesia Colorada								PO
4	1	1b	Quebrada Seca								PL
5	1	1c	Fundo Rodeo								PC
6	1	1d	Algarrobo La Virgen								PC
7	1	1d	Junta Manflas								PO
8	1	1d	Pastillo (Prohens)								RS
9	2	2a	Embalse Lautaro								PC
10	2	2a	Escuela 17 Los Loros								PC
11	2	2a	Fundo La Puerta								PC
12	2	2a	Goyo Díaz								RS
13	2	2a	Pueblo San Antonio								PC
14	2	2a	Quebrada Calquis (Antiguo)								PC
15	2	2a	Quebrada Calquis UAC								NS1
16	2	2a	Vegas El Giro								PC
17	3	3a	Agrícola Villa María								NS1
18	3	3a	Hornito (Rojas)								PC
19	3	3a	Pabellón								PC
20	3	3a	Planta Elisa de Bordo								PC
21	3	3a	Villa María- Hornitos								PC
22	3	3b	Fundo Alianza								RS
23	3	3b	Quebrada Cerrillos								PC
24	3	3b	Quebrada Cerrillos Amancay								PC
25	4	4a	Buitron								NS2
27	4	4a	Hochilds								NS1
29	4	4a	Pueblo San Fernando (Las Cañas)								PC
30	4	4a	Quebrada Infernillo (Mal Paso)								PO
31	5	5a	Escuela Italiana								RS
33	5	5a	Hda. Toledo								PL
34	5	5a	Valle Dorado								PL
35	5	5a	Villa Candelaria (Daniel Álvarez)								PO
37	6	6a	Fundo San Juan								PL
38	6	6a	Hda. Margarita								PL
39	6	6a	Hda. Margarita (Mamoros)								PO
40	6	6a	Hda. San Francisco								PO
41	6	6a	Noria Santelices								PC

CUADRO 7.4.2-1
SELECCIÓN DE POZOS DE LA RED NUEVA MEDIANTE PCA APLICADO A LA RED DEPURADA

Pozo	Sector	Sub-Sector	Nombre	Observación	Secos	Operación	Sector	Longitud	Red Secundaria	Adoptado	Razón para Aceptación
42	6	6a	Piedra Colgada (13)								PC
43	6	6a	San Pedro (11)								PL
44	6	6a	San Pedro (Floridor)								RS
45	6	6b	Hda. María Isabel (1)								NS2
46	6	6b	Hda. María Isabel (3)								PO
47	6	6b	Hda. María Isabel (4)								PO
48	6	6b	Kiosco Santa Valentina								RS
49	6	6b	Monte Amargo (2)								PL
50	6	6b	Punta Picazo(5)								PO
51	6	6b	San Camilo (6)								PL
52	6	6b	San Camilo (8)								PO
53	6	6b	Valle Fértil								NS2
			Total	**11**	**12**	**9**	**31**	**36**	**6**	**43**	**-**

	Pozos Preseleccionados
	Pozos Seleccionados
	Pozo con registro largo (> 10)
	Pozos Eliminados
PO	Pozo Seleccionado por ser de Observación
PC	Pozo Seleccionado por cumplir 2 de los criterios: Operación, Seco o Sector
PL	Pozo Seleccionado por longitud de registros
RS	Pozos Aceptados para la Red Secundaria
NS1	No seleccionado por cumplir solo 1 criterio
NS2	No seleccionado por no cumplir criterios

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 7.4.2-2
DENSIDAD RED FINAL

Sectorización Original					
Sector	Red Reducida por PCA		Red Final		
	Número de Pozos	Densidad (# / km^2)	Pozos Adicionales	Número de Pozos	Densidad (# / km^2)
1	8	0,244		7	0,213
2	8	0,213		6	0,160
3	8	0,149		6	0,112
4	6	0,057	2	4	0,038
5	5	0,049	1	4	0,039
6	18	0,043	2	15	0,036
Total	53	-		42	
Sectorización DICTUC					
Sub-Sector	Red Reducida por PCA		Red Final		
	Número de Pozos	Densidad (# / km^2)	Pozos Adicionales	Número de Pozos	Densidad (# / km^2)
1a	2	0,282		2	0,282
1b	2	0,267		2	0,267
1c	1	0,128		1	0,128
1d	2	0,192		2	0,192
2a	6	0,160		6	0,160
3a	4	0,152		4	0,152
3b	2	0,074		2	0,074
4a	2	0,019	2	4	0,038
5a	3	0,024	1	4	0,033
6a	7	0,053		7	0,053
6b	6	0,023	2	8	0,030
Total	37	-	5	42	-

Fuente: Elaboración propia en base a información DGA

FIGURA 7.4.2-1

7.5. EVALUACIÓN DEL COSTO DE LA RED DE MEDICIÓN

7.5.1. Introducción

En este acápite se presenta el costo de implementar la red, tanto en su condición sin instrumentación remota, como con instrumentación remota.

7.5.2. Programa de Implementación de la Red

De acuerdo a lo indicado en el Acápite 8.5, la red consta de 17 pozos antiguos de observación, 11 pozos antiguos que en la actualidad están secos, 15 pozos que en la actualidad están en operación, y 5 pozos nuevos. Adicionalmente se planteó. Con esta información se plantea el cronograma de implementación de la red mostrado en el Cuadro 7.5.2-1. Se considera también que los pozos deberían instrumentarse con el fin de disminuir los costos de operación de la red. Se estima para fines de esta evaluación que se instrumentarán 4 piezómetros por año, reduciendo el costo de operación a un 25 % del actual. Esta reducción está dada ya que se requieren menos visitas a los pozos, y por ende menor tiempo de dedicación del personal.

CUADRO 7.5.2-1
ETAPAS IMPLEMENTACIÓN DE LA RED

Año	Actividad	Cantidad de Piezómetros
1-5	Etapa 1 Perforación piezómetros de reemplazo pozos secos	3
6	Etapa 2 Perforación piezómetros de reemplazo pozos secos	2
2	Perforación nuevos propuestos para mejorar la densidad de la red	3
3-5	Perforación piezómetros de reemplazo pozos en uso	3
1-9	Etapa 1 Instrumentación piezómetros y pozos	4
10-11	Etapa 2 Instrumentación piezómetros y pozos	3

Fuente: Elaboración propia

Usando la información presentada en el Cuadro 7.5.2-1, se construye el Cuadro 7.5.2-2 el que muestra la secuencia de instalación de piezómetros, reemplazo de pozos secos y en uso, e instrumentación.

CUADRO 7.5.2-2
SECUENCIA DE IMPLEMENTACIÓN DE LA RED

Año	Inicial	Nuevos	Reemplazo		Total	Instrumentación	
			Secos	Uso		Incremento	Total
1	39		3		39	4	4
2		3	3		42	4	8
3		2	3	3	42	4	12
4			3	3	42	4	16
5			3	3	42	4	20
6			2		42	4	24
7					42	4	28
8					42	4	32
9					42	4	36
10					42	3	39
11					42	3	42

Fuente: Elaboración propia

7.5.3. Evaluación Económica de la Red

Con el fin de evaluar el costo de reposición de la red, se consideran los costos de operación de la red actual que se presentan en el Cuadro 7.5.3-1 a nivel mensual, y como gasto específico de cada campaña, la que se estima en 4 días por mes, en términos prácticos, iguala un 25% del gasto mensual en personal, además de gastos propios de la campaña en combustible y viáticos.

CUADRO 7.5.3-1
GASTO DE OPERACIÓN DE LA RED ACTUAL ($)

Profesional/Técnico	Mensual	Campaña
Jefe Unidad Hidrología	1.400.000	350.000
Encargado Hidrometría	1.200.000	300.000
Analista Hidrometría	1.200.000	300.000
Chofer	530.000	132.500
Total Gastos en Personal	**4.330.000**	**1.082.500**
Otros Gastos		350.000
Total		**1.432.500**

Fuente: Elaboración propia en base a datos Transparencia DGA año 2012

Dado que la red original tiene 53 pozos, el pozo unitario mensual es cercano a $ 27.000/mes/pozo, adoptándose $ 30.000/mes/pozo como costo de operación unitario a nivel mensual. En todo caso, como la red se opera a nivel bimensual, por lo tanto para los cálculos se considera en promedio un valor de $15.000/mes/pozo. Para la red nueva, se

estima que el costo de operación sería menor, estimándose conservadoramente que disminuye en un 25 %.

Como costo de nuevos pozos se considera en promedio la perforación de piezómetros de 80 m, a $ 200.000 como precio unitario.

Por último, el costo de la instrumentación se determinó a partir de cotizaciones solicitadas a la empresa Hidrotecnologías Ltda. Se incluye data-logger y cableado (en una longitud de 110 m). No se incluye instalación de tipo satelital para el envío de la información. Se consideran 3 configuraciones de sondas según se detalla en el Cuadro 7.5.3-2. La primera configuración considera sólo la medición de niveles, la segunda incluye conductividad eléctrica y temperatura, y la tercera agrega otros parámetros, tales como pH, turbiedad y sólidos disueltos totales.

CUADRO 7.5.3-2
COSTO DE INSTALACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN (millones $)

Opción #	Configuración	Neto	Total
1	Nivel	1,98	2,4
2	Nivel + Cond +Temp	2,45	2,9
3	Nivel + Cond +Temp + pH, Turb + TDS	3,35	4,0

Fuente: Elaboración propia en base cotización Hidrotecnologías Ltda.

Usando la información antes indicada, se preparó en primer lugar el Cuadro 7.5.3-3 que resume los costos de inversión. La evaluación se preparó a precios sociales, considerando una tasa de descuento para la evaluación igual a 6 %. Para incluir el recambio de de los pozos secos y en operación, se considera el peor caso posible, que considera que se perfora el piezómetro en forma íntegra, y no la profundización de los pozos existentes, actividad que es más económica.

CUADRO 7.5.3-3
RESUMEN COSTOS DE INVERSIÓN (millones $)

Costo Mejoramiento	Sin Actualizar	Actualizado
Pozos Secos	272,0	224,8
Pozos Nuevos	80,0	69,6
Pozos en Operación	144,0	114,2

Fuente: Elaboración propia

Los resultados incluidos en el Cuadro 7.5.3-4 muestran que la opción con instrumentación requiere un mayor costo incremental actualizado, que varía entre un 20 % y 35 %, dependiendo del tipo de instrumentación considerada. En todo caso, el incremento en el costo se compensa por una mejor cantidad de información, ya que de tenerse datos bi-mensuales aislados, se tendrían datos continuos en el tiempo. A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 7.5.3-1 la variación del costo incremental de la red, al pasar desde una medición bi-mensual a mensual y quincenal. Al compararse con los

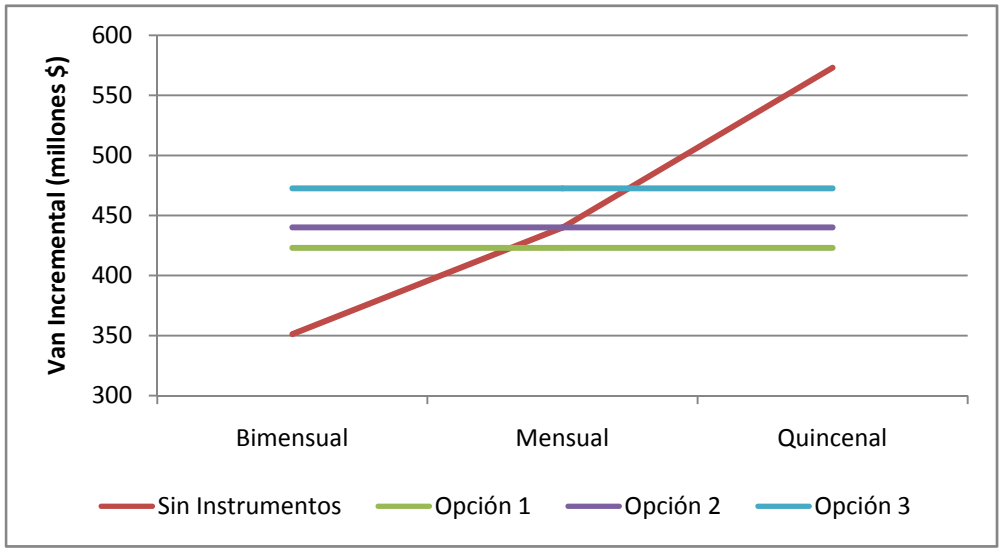
costos incrementales de las diferentes opciones de instrumentación, se observa claramente que aumentar la frecuencia a quincenal es más caro que instrumentar con la opción más cara, con la salvedad que se continúan midiendo sólo niveles de las aguas subterráneas, en contraste a una mejor caracterización de lo que ocurre en el acuífero.

CUADRO 7.5.3-4
RESULTADOS EVALUACIÓN ECONÓMICA
COSTO INCREMENTAL ACTUALIZADO

Red		VAN ($)
Sin instrumentos	-	351.161.982
Con Instrumentos	Opción 1	422.937.291
	Opción 2	439.974.865
	Opción 3	472.600.005

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 7.5.3-1
RESULTADOS EVALUACIÓN ECONÓMICA
COSTO INCREMENTAL ACTUALIZADO V/S FRECUENCIA DE MEDICIÓN



Fuente: Elaboración propia

8. CONCLUSIONES

Como resultado de este estudio se tienen las siguientes conclusiones:

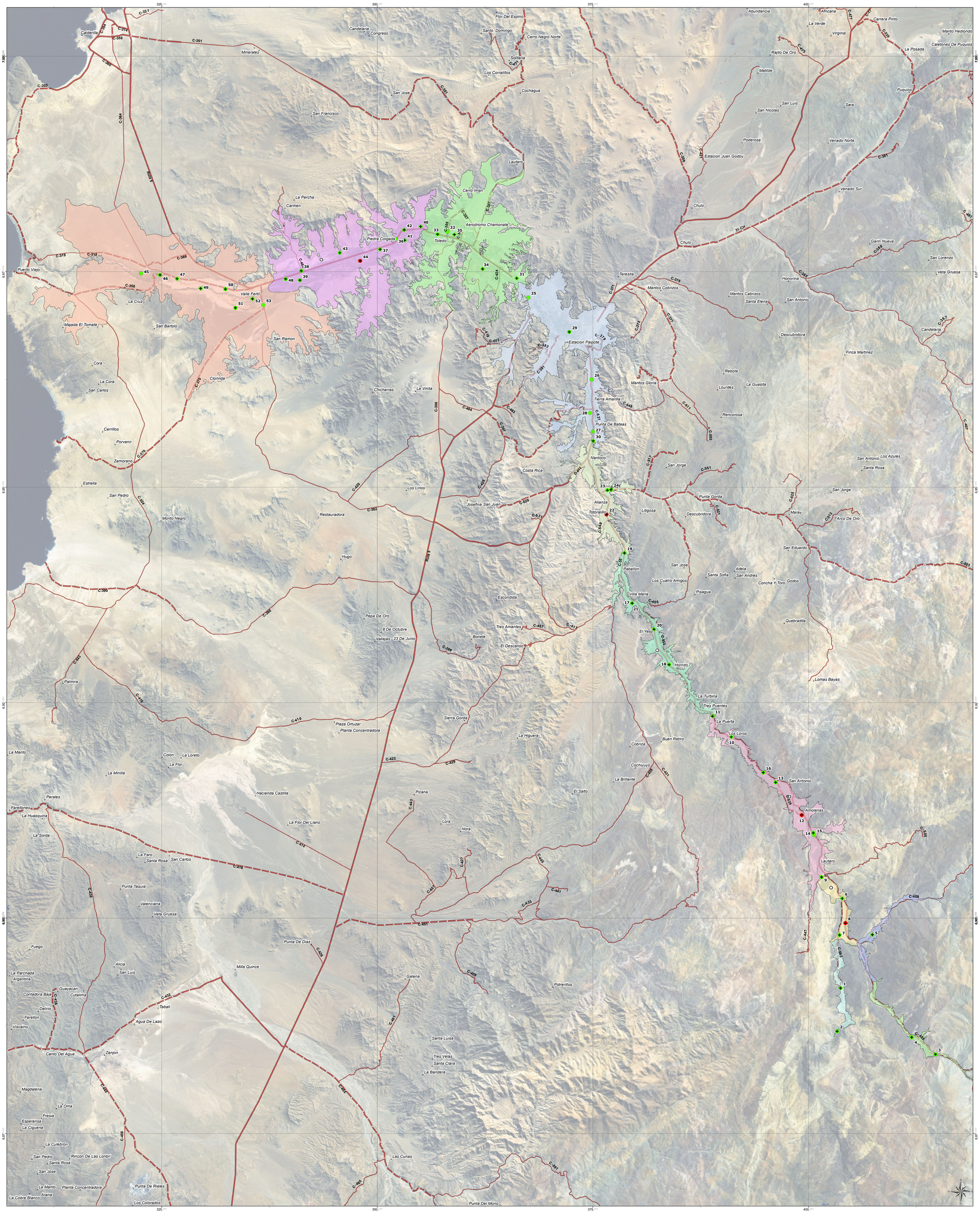
- Se dispone de un análisis que presenta las limitaciones de la red de medición de aguas subterráneas existente

- Se evaluó una metodología de análisis que permite identificar pozos redundantes, no sólo para el acuífero de Copiapó, sino que para otros sistemas de aguas subterráneas.

- Se propone la red simplificada de 42 pozos, que genera menores costos de operación, mejorándose sustancialmente la cobertura temporal de la red. Los costos de inversión de la nueva red se estiman preliminarmente y en forma conservadora en 80 millones en pozos nuevos, 272 millones en reemplazo de pozos secos, y 144 millones en reemplazo de pozos en operación.

- Con el fin de determinar la ubicación apropiada de los pozos nuevos, se debe utilizar PCA con una modelación del acuífero, la que permite determinar la forma esperada de la curva de variación de niveles en el tiempo, insumo que es incuido en el análisis PCA. Si los resultados del PCA no cambian o el cambio es mínimo, entonces, la ubicación elegida no es buena. Por el contrario, si los resultados del PCA cambian, entonces el análisis es satisfactorio, y la ubicación se acepta para ubicar el nuevo pozo de la red.

- La nueva red de medición permite tener información de mejor calidad, la que puede estar disponible para que los distintos usuarios puedan analizar de mejor manera el comportamiento del acuífero de Copiapó en lo que respecta a los niveles de aguas subterráneas.



LEYENDA

Red de Medición Niveles Estáticos de Pozos

ID	POZO
1	HDA MANFLAS (manflas ante hda).
2	HDA MANFLAS .
3	IGLESIA COLORADA
4	QUEBRADA SECA
5	FUNDO RODEO
6	ALGARROBO LA VIRGEN
7	JUNTA MANFLAS
8	PASTILLO (PROHENS)
9	EMBALSE LAUTARO
10	ESCUELA 17 LOS LOROS
11	FUNDO LA PUERTA
12	GOYO DIAZ
13	PUEBLO SAN ANTONIO
14	QUEBRADA CALQUIS (Antiguo)
15	QUEBRADA CALQUIS UAC
16	VEGAS EL GIRO
17	AGRÍCOLA VILLA MARÍA
18	HORNITO (ROJAS)
19	PABELLÓN
20	PLANTA ELISA DE BORDO
21	VILLA MARIA- HORNITOS
22	FUNDO ALIANZA
23	QUEBRADA CERRILLOS
24	QUEBRADA CERRILLOS AMANCAY
25	HOCHSCHILD
26	BUITRON

ID	POZO
27	CAROLA
28	PUCOBRE (8)
29	PUEBLO SAN FERNANDO (Las Cañas)
30	QUEBRADA INFERNILLO (MAL PASO)
31	ESCUELA ITALIANA
32	GINO AROSTICA
33	HDA TOLEDO
34	VALLE DORADO
35	VILLA CANDELARIA (DANIEL ALVAREZ)
36	CANTO DEL VIENTO
37	FUNDO SAN JUAN
38	HDA MARGARITA
39	HDA MARGARITA (Mamoros)
40	HDA SAN FRANCISCO
41	NORIA SANTELICES
42	PIEDRA COLGADA (13)
43	SAN PEDRO (11)
44	SAN PEDRO (FLORIDOR)
45	HDA MARÍA ISABEL (1)
46	HDA MARÍA ISABEL (3)
47	HDA MARÍA ISABEL (4)
48	KIOSCO SANTA VALENTINA
49	MONTE AMARGO (2)
50	PUNTA PICAZO(5)
51	SAN CAMILO (6)
52	SAN CAMILO (8)
53	VALLE FERTIL

SIMBOLOGÍA

Información Base

Red Vial
- Pavimento
- Ripio
- Tierra
- Sin informacion
- Localidades

Sectorización DICTUC

- Sector 1A
- Sector 1B
- Sector 1C
- Sector 1D
- Sector 2A
- Sector 3A
- Sector 3B
- Sector 4A
- Sector 5A
- Sector 6A
- Sector 6B

Red de medición Nivel Estatico de Pozos

- Pozos adicionales propuestos
- Pozos Actuales
- Pozos Actuales Seleccionados por PCA
- Pozos Red Secundaria

Región de Copiapó

País Chile

H2 CUENCA

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
División de Estudios y Planificación

SISTEMA DE INFORMACIÓN TERRITORIAL

ANALISIS CRÍTICO DE LA RED DE NIVELES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO DE COPIAPÓ

RED DE MEDICIÓN FINAL

Fuente Cartográfica: Cartografía Regular 1:250.000
Fuente Temática: DGA. 2012, H2 Cuenca Ingenieros Consultores Lmtda., 2012.

ESCALA 1:150,000
500 250 0 Km

Jefe División Adrian Lillo Z.
Inspector Fiscal Miguel Angel Caro H.

Referencia Cartógrafica: Proyección UTM DATUM WGS84 HUSO 19 Sur

Fecha: Febrero 2012

FIGURA: 7.4.2-1