CIDERH
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN RECURSOS HÍDRICOS

FIC CARACTERIZACIÓN Y MONITOREO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA REGIÓN DE TARAPACÁ

ANÁLISIS CRÍTICO de la RED DE MONITOREO de los RECURSOS HÍDRICOS

- REGIÓN DE TARAPACÁ -

Universidad ARTURO PRAT del Estado de Chile

Región de Tarapacá
Somos el Norte del Desarrollo

CONICYT Ministerio de Educación
Gobierno de Chile

DIAGNÓSTICO y ANÁLISIS CRÍTICO de la RED DE MONITOREO de los RECURSOS HÍDRICOS de la REGIÓN DE TARAPACÁ

Autores:

Elisabeth Lictevout

Reynaldo Payano

Damián Córdoba

Sonia Amaro

Venecia Herrera

Fernando Arancibia

Colaborador:

Jean Pierre Bricquet

Marzo, 2014

INDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO 3

PRESENTACIÓN CIDERH 7

SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES 9

AGRADECIMIENTOS 10

RESUMEN EJECUTIVO 11

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN 17

1.1. Antecedentes 17

1.1.1. Antecedentes Generales 17

1.1.2. Antecedentes Regionales 17

1.1.3. Antecedentes de la Red de Monitoreo de Recursos Hídricos de la Región de Tarapacá 23

1.2. Presentación del proyecto 28

1.2.1. Objetivos 28

1.2.2. Metodología 28

CAPITULO 2. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE MONITOREO METEOROLÓGICA 32

2.1. Descripción General 33

2.2. Instrumentación y Mediciones 35

2.3. Organización y Tratamiento de los Datos 37

2.4. Análisis Espacial y Temporal 39

2.4.1. Análisis de Precipitación versus Altura 46

2.4.2. Análisis del Porcentaje de Lluvia anual por mes 49

2.4.3. Análisis de Correlaciones entre Precipitaciones de distintas estaciones 51

2.4.4. Precipitación versus Caudal 56

2.5. Análisis por Estación 57

CAPITULO 3. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE MONITOREO FLUVIOMÉTRICA 59

3.1. Descripción General 60

3.2. Instrumentación y Mediciones 62

3.3. Análisis espacial y temporal 67

3.4. Análisis por Estación 69

CAPITULO 4. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICA 71

4.1. Descripción general 72

4.1.1. Características Generales de las Estaciones de Monitoreo 74

4.2. Unidades Hidrogeológicas de Análisis: representatividad espacial y temporal de los datos 81

4.2.1. UHA Pampa del Tamarugal 81

4.2.1.1. Representatividad Espacial de los Datos 81

4.2.1.2. Representatividad Temporal de los Datos 83

4.2.2. UHA Pica 88

4.2.2.1. Representatividad Espacial de los Datos 88

4.2.2.2. Representatividad Temporal de los Datos 89

4.2.3. UHA Sur Viejo 89

4.2.3.1. Representatividad Espacial de los Datos 90

4.2.3.2. Representatividad Temporal de los Datos 90

4.2.4. UHA Salar de Llamara 91

4.2.5. UHA Salar de Coposa 91

4.2.6. Otros Acuíferos 91

CAPITULO 5. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA 93

5.1. Red de Monitoreo de Calidad de Agua 94

5.2. Red de Calidad de Agua Superficial 97

5.2.1. Análisis de Datos 99

5.2.2. Análisis espacial de Datos 102

5.3. Red de calidad de Agua Subterránea 103

5.3.1. Análisis de Datos 104

5.3.2. Metodologías para evaluar la representatividad de la red 108

CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES 110

6.1. Recomendaciones generales 111

6.2. Estaciones meteorológicas 111

6.3. Estaciones fluviométricas 111

6.4. Estaciones piezométricas 112

6.5. Estaciones de calidad de aguas 112

6.6. Bibliografía 113

6.7. Anexos 113

PRESENTACIÓN DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN RECURSOS HÍDRICOS - CIDERH

El Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos - CIDERH - nace en 2010 como parte de una política pública impulsada por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica - CONICYT que, a través de la creación de Centros Regionales, busca promover e instalar las capacidades de investigación y formación de masa crítica a nivel regional en disciplinas o materias específicas para que se conviertan en referentes nacionales en el área temática de su competencia.

El Gobierno Regional de Tarapacá, reconociendo el carácter prioritario y estratégico que tiene el recurso hídrico para la sustentabilidad de la región, acordó financiar con CONICYT, mediante fondo FIC-Regional, la creación de un "Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos - CIDERH". El proyecto fue presentado y adjudicado por la Universidad Arturo Prat, institución reemplazante, por una primera fase de 5 años, 2010-2014.

La misión del CIDERH es generar y difundir conocimiento científico sobre los recursos hídricos en zonas áridas, a través de un equipo multidisciplinario de investigadores, vinculado a redes nacionales e internacionales. Tiene como prioridad, en el desarrollo de sus investigaciones, responder a necesidades regionales, vinculándose con los actores locales, públicos, privados y académicos, y con la comunidad en general. El conocimiento científico generado busca apoyar la toma de decisiones y la formulación de políticas públicas y contribuir al desarrollo y transferencia de soluciones tecnológicas innovadoras para abordar los desafíos estratégicos de la región y de sus sectores productivos. El CIDERH promueve la gestión integrada de los recursos hídricos, la cual tiene como propósito mejorar el conocimiento del recurso, optimizar su uso, evitar su contaminación, promover el tratamiento y el reúso y mejorar la eficiencia hídrica. Se da particular importancia a la transferencia de los trabajos a la comunidad en general, las autoridades y los actores vinculados al recurso hídrico.

El CIDERH cuenta con un equipo multidisciplinario de investigadores y profesionales nacionales e internacionales que se destaca por su fuerte compromiso con el desarrollo de la región y busca que su productividad sea referente a nivel nacional e internacional en la gestión sustentable y eficiente de los recursos hídricos en zonas áridas. El eje central del Centro, en la primera fase 2010-2014, se articula en dos líneas de investigación:

1. **“Gestión Integrada del Recurso Hídrico”:** Esta línea busca generar y transferir conocimiento sobre los recursos hídricos en zona árida para contribuir a su gestión integral y sostenible. Abarca las siguientes temáticas: Clima, Geografía, Hidrogeología, hidrología e Hidroquímica, Química Analítica y Ambiental, Gestión Integrada de Recursos Hídricos. Se focaliza en tres ejes:

I. Caracterización de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la región:
- Generación, procesamiento, sistematización y análisis de información hídrica.
- Procesos hidrológicos e hidrogeológicos, por cuencas y cuerpos de agua.
- Cuantificación y predicción de la evolución de los compartimentos hidrológicos.

II. Gestión integrada del recurso hídrico:

- Definición de indicadores de sustentabilidad
- Desarrollo de modelos integrales de gestión por cuencas o cuerpo de agua.

III. Contribución al desarrollo sustentable de la Región de Tarapacá:
- Aumentar la capacidad científico-técnica en la región.
- Capacitación y asesoría.

2. **"Innovación Tecnológica en Sistemas Acuosos":** Esta línea busca aumentar a través de la innovación tecnológica la disponibilidad de agua de calidad a partir de fuentes no convencionales y eficacia hídrica. Abarca los siguientes ámbitos: agricultura, industria, minería y población. Se focaliza en torno a tres ejes:

I. Investigación y desarrollo en tecnologías de eficiencia hídrica en riego:
- Producción de cultivos con y sin suelo en zonas con escasez hídrica.
- Aumentar la eficiencia del uso del agua en la producción de biomasa.
- Simulaciones computacionales de flujo de agua y solutos en material poroso no saturado.

II. Investigación y desarrollo en tratamiento de aguas residuales urbanas:
- Tratamientos no colectivos de aguas residuales para asentamientos rurales.
- Reutilización de agua mediante tecnologías innovadoras.

III. Investigación y desarrollo en nuevas fuentes de agua naturales y reutilización de aguas industriales:
- Desalinización de agua mediante la implementación de procesos eficientes adecuados a zonas áridas.
- Tratamientos innovadores para la remoción de contaminantes de aguas para distintos usos (calidad variable).
- Aumentar la eficiencia del uso del agua para disminuir los costos operacionales de la industria.

SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

APSO	Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental
BNA	Banco Nacional de Aguas
CE	Conductividad Eléctrica
CVRM/Geo-Systems	Centre, Instituto Superior Técnico, Technical Univ. of Lisbon
CEH	Centro de Estudios de Humedales
CIDERH	Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos
CMCC	Compañía Minera Cerro Colorado
CMDIC	Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi
CMQB	Compañía Minera Quebrada Blanca
CNA	Catastro Nacional de Agua
CONICYT	Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica
DAA	Derechos de Aprovechamiento de Aguas
DAD-UNAP	Departamento Agricultura del Desierto - Universidad Arturo Prat
DGA	Dirección General de Aguas
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
DICTUC	Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
FIC	Fondo de Innovación para la Competitividad
GORE	Gobierno Regional
GPS	Global Positioning System
HSM	Laboratoire Hydroscience de la Universidad de Montpellier II
IRH	Ingeniería y Recursos Hidráulicos
IRD	Institut de Recherche et Developpement
JICA	Japan International Cooperation Agency
MOP	Ministerio de Obras Públicas
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PM	Punto de Monitoreo
PUC	Pontificia Universidad Católica de Chile
R^2	Coeficiente de Determinación
RCA	Resoluciones de Calificación Ambiental
SCM	Sociedad Contractual Minera
SIG	Sistema de Información Geográfica
SQM	Sociedad Química y Minera de Chile
s.n.m.	Sobre el nivel del mar
STD	Sólidos Totales Disueltos
UHA	Unidad Hidrogeológica de Aprovechamiento
UNAP	Universidad Arturo Prat
UTM	Proyección Universal Transversal de Mercator
VPC	Variación de Punto de Captación
WGS	World Geodetic System

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto FIC-R 2012 n° IJIP 30129147-0 del Gobierno Regional de Tarapacá y co-financiado por el proyecto CONICYT REGIONAL/CIDERH R09I1001.

Queremos expresar nuestro profundo reconocimiento a Jean-Pierre Bricquet del Institut de Recherche et Developpement (IRD) y Laboratoire Hydroscience (HSM), Universidad de Montpellier II, Francia, por su implicación altruista y desinteresada con el equipo CIDERH, transfiriendo 30 años de experiencia en hidrometría. También, destacamos y agradecemos sinceramente a la Dirección General de Aguas, en especial al Director Regional Javier Vidal, al Jefe Unidad de Hidrología Waldo Solar y al Jefe Unidad de Fiscalización y Medioambiente, Juan Salas por el interés, colaboración y apoyo en la realización de este trabajo. Agradecemos a las diferentes entidades que gestionan estaciones de monitoreo de recursos hídricos en la región, por permitir el acceso a sus estaciones y la entrega de datos: Jorge Arenas, de la facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Arturo Prat; José Luis Delgado de la Compañía Doña Inés de Collahuasi y Ariel Santana de la consultora I&P. Finalmente agradecemos al Dr. João Nascimento, Investigador del centro CVRM-Geo-systems.

RESUMEN EJECUTIVO

- El análisis crítico de la red de monitoreo de los recursos hídricos de la Región de Tarapacá constituye un producto del proyecto titulado "Caracterización y Monitoreo de los Recursos Hídricos de la Región de Tarapacá", financiado por el Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC-R 2012) del Gobierno Regional de Tarapacá y ejecutado por el CIDERH. Este trabajo busca mejorar el monitoreo de los recursos hídricos de la región de Tarapacá realizando un diagnóstico detallado de la red de monitoreo de variables meteorológicas, fluviométricas, hidrogeológicas y de calidad del agua a cargo de la DGA. Este análisis crítico constituye el trabajo previo a la elaboración de una propuesta de red monitoreo que permita obtener datos fiables, representativos y en tiempo oportuno, con el fin de reducir el error en los estudios y proyectos y mejorar la gestión de los recursos hídricos de la región de Tarapacá.

- La gestión eficiente de los recursos hídricos necesita información hidrológica que se genera a través de una red hidrométrica. Una red hidrométrica o hidrológica es un conjunto de estaciones que proporcionan datos que permiten medir todas las variables del ciclo hidrológico (precipitaciones, características de los flujos superficiales y subterráneos, calidad de agua) para estudiarlo. Los datos hidrológicos constituyen la información fundamental para diseñar y evaluar proyectos y estudios sobre los recursos hídricos, como por ejemplo, embalses, sistema de abastecimiento de agua para diversos usos, sistemas de irrigación, estudios de cambio climático, modelos hidrológicos, etc.

- La Organización Meteorológica Mundial (OMM) emitió recomendaciones en cuanto al diseño de una red hidrométrica y a la densidad de estaciones para una red mínima. En Chile, la Dirección General de Aguas (DGA) es el organismo mandatado por el Estado de Chile para operar y mantener la red de monitoreo hidrométrica, administrada al nivel regional. Por otra parte, otros actores vinculados al recurso hídrico han desarrollado sus propias estaciones hidrométricas, respondiendo a objetivos propios de monitoreo o a compromisos adquiridos en el marco de resoluciones de calificación ambiental (RCA). En conjunto, generan una cantidad de datos no depreciable, pero que desafortunadamente no se analizan de forma integral.

- La OMM recomienda realizar periódicamente una revisión de la red hidrométrica. En este sentido, desde la década de los ochenta, la red de monitoreo de los recursos hídricos ha sido un continuo objeto de estudios por la DGA, en un esfuerzo de estudiar y mejorar la red. Estos estudios destacaron las deficiencias de la red, tanto al nivel de distribución espacial de las estaciones que del equipamiento e instrumentación. A nivel general apuntaron a mejorar la distribución espacial, más que la densidad. De hecho, la evaluación hidrométrica nacional del Ministerio de Obras Públicas (MOP) en 2006 recomendó, lamentablemente, la reducción de la densidad de estaciones de monitoreo de la red de la DGA con la consecuencia de la suspensión de las estaciones que ya tenían un registro histórico desde los años setenta como es el caso de seis estaciones meteorológicas de la región.

- En 2013, el Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) de la Región de Tarapacá, realizó y publicó un diagnóstico de la información hídrica existente. Se identificaron brechas de información que llevaron a la realización de la segunda etapa de trabajo: estudiar cómo se generan los datos hidrométricos de la región con los cuales se realizan los estudios y proyectos sobre los recursos hídricos de la Región de Tarapacá. Se concluyó que las cuencas y subcuencas en las cuales se registraron datos presentan información no siempre confiable, representativa y suficiente.

- La red de monitoreo existente de la Dirección General de Aguas (DGA) en la región de Tarapacá comprende un total de 92 estaciones, correspondiente a 25 meteorológicas, 12 fluviométricas, 38 piezométricas y 17 estaciones de calidad de agua versus 50 estaciones meteorológicas, 10 estaciones fluviométricas, 515 pozos de monitoreo y 179 estaciones de calidad de agua pertenecientes a entidades privadas, académicas y otras instituciones públicas. Sin embargo, estas estaciones no están repartidas espacialmente de manera homogénea.

- La metodología empleada para realizar este trabajo constó de cuatro etapas: obtención de los registros históricos, campañas de reconocimiento de terreno, elaboración de fichas completas por estación y análisis de la información. La etapa de análisis de la información siguió metodologías distintas según se analizaba la red meteorológica y fluviométrica, la red piezométrica y la red de calidad de agua. Fueron claves las intensas campañas de terreno que permitieron visitar no solamente las estaciones de la DGA sino estaciones pertenecientes a entidades privadas, públicas y académicas.

Red de estaciones meteorológicas

- La red de monitoreo meteorológica oficial de la Región de Tarapacá consta de 25 estaciones meteorológicas vigentes que incluyen, desde la más simple configuración (pluviómetro manual), hasta estaciones más completas con sensores. Sin embargo, existe además nueve estaciones meteorológicas de la DGA no vigentes que presentan un registro histórico de datos.

- Actualmente, existen 17 estaciones meteorológicas (de un total de 25) que tienen un registro digital de datos horarios de las cuales cuatro poseen transmisión satelital dos estaciones poseen transmisión GSM o celular. Sólo existen 12 estaciones del tipo “meteorológica” y 13 del tipo “pluviométrica”. Hay que señalar, que de las 13 estaciones pluviométricas, nueve tienen un registro manual con una frecuencia de recogida de datos cada 2 meses y medio. Además, sólo hay cinco estaciones que registran la evaporación.

- Diecinueve estaciones, de las 25 estaciones meteorológicas vigentes, tienen un registro de más de tres décadas lo que permite realizar análisis estadísticos estacionales. Sin embargo, la poca cobertura espacial dificulta la realización de un análisis de las precipitaciones en toda la región, ya que hay zonas o cuencas en las cuales no se cuenta con información meteorológica.

- El Altiplano presenta una densidad de estaciones acorde con la recomendación de la OMM (1994). En las cuencas Pampa del Tamarugal, Llamara-Rio Loa y Camiña-Camarones, la densidad de estaciones meteorológicas cumpliría con las recomendaciones de la OMM (1994) si todas las estaciones fueran digitales, lo que no es el caso actualmente. Por otra parte, la distribución espacial es muy heterogénea con una concentración de estaciones en el centro y en los límites de la región y 15 unidades hidrográficas sin información meteorológica. Sin embargo, casi todas las cuencas carecen de estaciones meteorológicas en sus cabeceras, sobre todo en la zona de Precordillera.

- La estación que presenta una mayor longitud de la serie de datos continua es la estación de Collacagua con 52 años de datos, seguido por las estaciones de Poroma y Camiña con 45 y 42 años de datos. Un tercio de las estaciones con registro histórico presentan un registro de datos inferior a 10 años; otro tercio presentan un registro entre 10 y 30 años y el último tercio con un registro superior o igual a 30 años.

- La cantidad media de lluvia anual registrada por las estaciones se divide en dos grupos distintos: Las estaciones ubicadas sobre los 3.500 m s.n.m registran una precipitación media anual cercana a los 135 mm, mientras que las ubicadas bajo esta cota presentan valores significativamente menores y que bordean los 25 mm anuales.

- Más del 90% de la precipitación anual está concentrada durante los meses diciembre a marzo, con máximas precipitaciones en los meses de Enero y Febrero.

- Solo las estaciones del Altiplano (con altitud superior a 3500 m s.n.m) presentan una buena correlación entre ellas. Las estaciones a menor altitud no presentan una buena correlación entre ellas, debido a varios factores, entre ellos la cantidad de datos disponibles (mayor en la estaciones del Altiplano) y la menor variación en las precipitaciones conforme se aumenta la altitud; pero también debido a la representatividad de los datos registrados.

- No hay una correlación representativa en los datos de precipitación y escurrimiento registrado en las estaciones de monitoreo de la DGA.

- Existen 15 estaciones que presentan una alta incertidumbre en el registro del dato tanto por problemas de verticalidad y horizontalidad del pluviómetro, por obstáculos en la estación y sombra de cerros y por instrumentación y tecnología (estaciones manuales con un observador). Al contrario, las estaciones pertenecientes a otras instituciones tanto privadas como académicas no presentan este tipo de problemas.

Red de estaciones fluviométricas

- Esta red consta de 12 estaciones fluviométricas vigentes y 13 no vigente con registro histórico.

- Cinco de las 12 estaciones (41%) no registra bien los caudales extremos.

- Las estaciones fluviométricas de la DGA en la región no han sido diseñadas ni para el control de crecidas ni la alerta temprana, sino que su instalación ha sido impulsada por la necesidad de información en un lugar específico, priorizando sólo algunos sectores.

- La frecuencia anual de medición manual del caudal (aforo) en las estaciones fluviométricas es de 6 veces al año. Son las estaciones del Altiplano que registran la mayor cantidad de aforos.

- De un total de 12 estaciones, tres son manuales. Seis estaciones cuentan con sensores de nivel y con un registro de datos horario y cinco estaciones cuentan con limnígrafo. Tres estaciones tienen transmisión automática de datos por satélite.

- Las dificultades encontradas en las mediciones continuas de caudales se deben en parte a las características intrínsecas del régimen hidrológico en una zona árida como la Región de Tarapacá.

- Finalmente, sólo cuatro unidades hidrográficas tienen estaciones fluviométricas (14 no tienen información). Por lo tanto, la gran mayoría de la región tiene poco o ningún control hidrométrico. La Quebrada de Tarapacá es la cuenca de la región que está mejor instrumentalizada desde el punto de vista hidrométrico.

- El Altiplano presenta una densidad por estaciones fluviométrica aceptable acorde con la recomendación de la OMM (OMM, 1994). En la Pampa del Tamarugal, Llamara-Rio Loa y Camiña-Camarones, las superficies por estaciones fluviométricas son muy superiores a las recomendaciones de la OMM (OMM, 1994), en media 6 veces superiores. En estas unidades de análisis, la red existente no es representativa.

- Once estaciones de una total de 12 (91%) presentan una incertidumbre en los datos registrado debido a problemas estructurales de la estación (8 estaciones), fatiga y desgaste del hormigón (12), problemas de control hidráulico (7), diseño de la estación adaptado al contexto local (4). No existe una homogeneidad coherente en el tipo de tecnología utilizada en la red de estaciones de monitoreo.

Red de estaciones piezométricas

- En la región, se reconocen oficialmente cuatro Unidades Hidrogeológicas de Aprovechamiento (UHA) - Pampa del Tamarugal, Pica, Salar de Sur Viejo, Salar de Llamara. Son definidas mediante resolución administrativa y no responden en varios casos a los límites hidrogeológicos del acuífero.

- Existen 38 pozos de monitoreo de la DGA, de los cuales 31 pozos se localizan en el acuífero Pampa del Tamarugal, dos en el acuífero Salar Sur Viejo, tres en el acuífero de Pica y dos en el Salar del Huasco.

- La información geográfica existente de estos puntos (precisión de las coordenadas y altitud) no es suficiente para validar técnicamente y espacialmente el dato medido y comparar los niveles entre pozos.

- Los valores de resalto para los pozos de monitoreo de la DGA no están correctamente definidos. Seis pozos presentan esta anomalía; en los otros pozos de la red de monitoreo, existe una gran incertidumbre en cuanto a los criterios que utiliza la DGA para la definición del resalto lo que dificulta el análisis histórico de los datos de medición para un mismo pozo.

- Las mediciones de nivel no están estandarizadas. Se observa la ausencia de un informe de cada campaña de monitoreo y de protocolos de medición en los pozos de la red de la DGA

- De un total de 38 pozos de monitoreo, solo 13 (34%) tienen una valoración cualitativa positiva en cuanto a las características básicas que deben cumplir los pozos de una red de monitoreo. Doce de ellos corresponden a los pozos de monitoreo construidos en el marco de estudio JICA-DGA (1995).

- 60% de los pozos de monitoreo presentan una buena accesibilidad y solo 45% se encuentran en buen estado. Se tiene un medianamente bueno conocimiento de las características técnicas de 45% de las perforaciones que constituyen la red. Los pozos JICA son los únicos de la red de monitoreo que cuentan con la estratigrafía definida, accesible y conocida, así como las características técnicas de la perforación.

- La UHA Pampa del Tamarugal contiene 82% (31) de los pozos de la red de monitoreo de la DGA. Los pozos en la unidad parecen no guardar ninguna representatividad espacial de acuerdo a los diferentes usos tal como las actividades industriales, zonas forestales, zonas de explotación de agua subterránea. Se nota una componente fuertemente aleatoria en la distribución de los pozos.

- La UHA Pica presenta solo dos pozos de monitoreo (5% de los pozos de monitoreo de la red DGA). Se considera muy bajo por la relevancia agrícola y turística del Oasis de Pica. Además, en la actualidad, uno ha dejado de ser monitoreado por problemas técnicos.

- La UHA Sur Viejo alberga dos pozos de los 38 definidos para la red regional (5%). Sin embargo, presentan una columna de agua mínima por lo cual es necesario replantear los puntos de monitoreo a corto plazo.

- Las UHAs Salar de Llamara, Coposa y Lagunilla no están monitoreados por parte de la DGA.

- Se reconocen otros cuerpos de aguas subterráneas en la región que no están siendo monitoreados aunque tengan pozos de extracción asociados.

- Existen dos pozos JICA en el sector del Salar del Huasco a pesar de que la DGA no lo reconoce oficialmente como una UHA.

Red de estaciones de calidad de agua

- Es de suma importancia seguir el protocolo de muestreo estipulado en el *Manual de normas y procedimientos* de la DGA (SIT Nº 132), en especial: a) Purgar los pozos antes de tomar la muestra de agua subterránea; b) Refrigerar las muestras hasta su análisis y c) Rellenar las botellas en su totalidad, para evitar la presencia de burbujas y la alteración de la muestra.

- Desde el año 2006, la DGA no analiza el HCO_3^- que suele ser uno de los iones mayoritarios que forman las sales disociadas en las aguas, y por consecuente un elemento imprescindible para calcular el balance iónico.

- No se analizan algunos elementos esenciales como el fluoruro, sustancias no esenciales (cadmio y cianuro) y parámetros organolépticos (color, olor, sabor, amoníaco y compuestos fenólicos), sustancias y componentes orgánicas, productos secundarios de la desinfección, elementos radioactivos y plaguicidas (Decreto Nº 131 de marzo de 2007).

- La red de monitoreo de la calidad de aguas superficiales en la región de Tarapacá *Figura 5.10*comprende 10 estaciones de muestreo. Sin embargo, a finales de los años 70 e inicio de los 80, la red contaba con 27 estaciones siendo más representativa.

- Las estaciones actuales de la red de monitoreo de las aguas superficiales cubren 6 cuencas, o sea existen 22 cuencas no son monitoreadas (79% de la región).

- En las unidades monitoreadas, los puntos se encuentran agrupados en determinadas zonas, sin alcanzar la cobertura total de la cuenca.

- Las aguas superficiales de la región presentan una composición muy variada y heterogénea según las zonas.

- La red de monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas es muy deficiente en la Región de Tarapacá. Sólo la UHA Pampa del Tamarugal tiene 3 puntos de monitoreo, las otras masas de agua identificadas no presentan puntos de monitoreo.

- Las aguas subterráneas de la región presentan una composición más homogénea que las aguas superficiales. Las concentraciones de sales son distintas.

- La red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas no es representativa, ya que la única unidad definida que presenta estaciones es la Pampa del Tamarugal

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

1.1.1. Antecedentes Generales

La gestión eficiente de los recursos hídricos necesita información hidrológica. La hidrometría (del griego "*hydro*" que significa "*agua*" y "*metros*" que significa "*medir*") es la ciencia que tiene por objetivo medir las características físicas del agua y concierne la medición de todas las variables del ciclo hidrológico, incluyendo la precipitación, las características de los flujos superficiales, las características del agua subterránea y la calidad del agua (Boiten, 2000). Por lo cual, una red hidrométrica o red hidrológica se define como un conjunto de estaciones hidrológicas y puestos de observación situados en una zona determinada (por ejemplo en una cuenca o región administrativa) que proporcionan los datos para estudiar el régimen hidrológico (OMM & UNESCO, 2012). El objetivo de una red hidrométrica es generar información hidrológica que se utilizará para diferentes fines (Taylor & Alley, 2001; OMM, 1994; WHYCOS, n.d.):

- Evaluación de los recursos hídricos regionales y nacionales y tendencias (impactos climáticos y antropogénicos)
- Planificación para la gestión y uso de los recursos hídricos
- Estimación de los impactos medioambientales, económicos y sociales, de las prácticas actuales y planificadas en gestión de recursos hídricos
- Análisis y predicción de eventos extremos (alerta): sequía, inundaciones

Es también importante mencionar que una red hidrométrica busca lograr un objetivo único o un conjunto de objetivos compatibles (OMM, 1994).

Los datos hidrométricos registrados en una cuenca, gracias a la red hidrométrica, constituyen la información fundamental necesaria para diseñar y evaluar estudios y proyectos sobre los recursos hídricos de la zona (Mishra & Coulibaly, 2007), tal como: embalses, sistema de abastecimiento de agua para diversos usos, sistemas de irrigación, estudios de cambio climático, modelos hidrológicos, etc.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1994) recomienda realizar periódicamente una revisión de la red hidrométrica para reducir la incertidumbre hidrológica obtenida con los datos adicionados desde el último análisis de red y para adaptar la red a cualquier modificación socioeconómica que pueda haber ocurrido. Además, emite recomendaciones en cuanto al diseño de una red hidrométrica y a la densidad de estaciones para una red mínima (ver capítulos 2 y 3).

En Chile, la Dirección General de Aguas es el organismo mandatado por el Estado de Chile para gestionar y administrar el recurso hídrico y en particular operar y mantener la red de monitoreo hidrométrica. Se administrada al nivel regional.

1.1.2. Antecedentes Regionales

La Región de Tarapacá se ubica en el extremo norte de Chile entre los 19° y 21° 38' S y entre los 68°25' y 70 10' W. Se caracteriza por presentar cuencas cerradas o endorreicas en el Altiplano

(cuencas altiplánicas, algunas compartidas con Bolivia) y en la Depresión Central (cuenca Pampa del Tamarugal) y cuencas arreicas en la zona costera. Es limitada al norte y al sur por cuencas exorreicas que desembocan al mar (Camiña y Río Loa; Figura 1.1).

Figura 1.1. Zonas hidrográficas de la Región de Tarapacá

De Oeste a este, se definen cinco elementos geomorfológicos: Planicie Litoral y Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera, Altiplano y Cordillera de los Andes (Figura 1.2).

Figura 1.2. Unidades geomorfológicas de la Región de Tarapacá

La Región de Tarapacá es una de las zonas más áridas del mundo. Las precipitaciones, casi nulas en el Litoral, la Cordillera de la Costa y la Depresión Central (Nimeyer *et al.,* 1984), aumentan gradualmente desde los 2000 m s.n.m (DICTUC, 2006) en la Precordillera hasta alcanzar en el Altiplano un promedio anual de 150 a 180 mm (PUC, 2009; GCF, 2010). La evaporación juega un papel predominante en el balance hídrico ya que supera ampliamente las precipitaciones al alcanzar un promedio entre 2.000 y 3.000 mm/año en el Litoral, la Cordillera de la Costa y la Depresión Central, y entre 1.000 y 2.000 mm/año en el Altiplano (PUC, 2009; GCF, 2010). Las características meteorológicas, geomorfológicas y geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas

condicionan ecosistemas vulnerables en los cuales dominan ambientes evaporíticos (salares) y napas subterráneas que conforman el único recurso permanente (Lictevout *et al.*, 2013). Estas napas se recargan lateralmente desde las zonas de precipitación en el Altiplano y Precordillera mediante movimientos muy lentos del agua (Dingman & Galli, 1965; Margaritz *et al*. 1990; Grilli *et al.,* 1999). Los flujos superficiales escurren desde el Altiplano y la Precordillera por las quebradas - valles angostos a veces cañones que cortan la Precordillera desde el Altiplano hasta la depresión Central; alcanzan la Depresión Central de forma esporádica durante eventos hidrometeorológicos extremos (Lictevout *et al.*, 2013). Se ha estimado que gran parte de los recursos hídricos subterráneos se generaron durante una fase húmeda comprendida entre los 17.000 y 11.000 años y crecidas durante el Holoceno (últimos 11.000 años) hasta la actualidad (Aravena, 1995; Margaritz *et al*., 1990; Grilli *et al*., 1999). Lo anterior lleva a considerar parte del agua subterránea de la región como no renovable (Grilli *et al*., 1999, Troger *&* Gerstner, 2004). Los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la Región de Tarapacá presentan un amplio intervalo de valores de salinidad natural, así como elementos tóxicos y nocivos para la salud. Los valores de salinidad encontrados varían entre 50 y 350.000 mg/l (contenido de Sólidos Totales Disueltos - STD). Se han identificado áreas con elevadas concentraciones de Arsénico (As), Boro (Br) y Manganeso (Mn), principalmente en todas las aguas del Altiplano y algunas quebradas (Aroma, Chacarilla y Guatacondo). La distribución de estos elementos de origen natural (sedimentos volcánicos de la Cordillera de los Andes) es altamente heterogénea, con ríos (río Llacho y Charvinto en el Altiplano) y acuíferos de muy buena calidad (zona de Pica y Canchones) (Ayala *et al*., 1994; DGA, 1978).
En las dos últimas décadas, el crecimiento poblacional y económico de la región ha generado una fuerte presión sobre los recursos hídricos, aumentando la demanda. De hecho, la macro zona norte presenta una demanda hídrica mayor a la disponibilidad (Banco Mundial, 2011), originando escenarios de uso competitivo entre usuarios – minería, abastecimiento de la población, agua ancestral y agricultura, medioambiente. Además ha resaltado la existencia de áreas naturales altamente sensibles. El rubro con el caudal otorgado más alto lo constituyen las Compañías Mineras seguido por la empresa sanitaria. La empresa sanitaria es el usuario con el caudal otorgado más alto de la región. La estimación del consumo de agua (extracciones) y de los respectivos usos, basada en la información contenida en el Catastro Nacional de Agua (CNA) de la DGA, muestra un alto grado de incertidumbre debido a que la información se encuentra incompleta y desactualizada. Dicha incertidumbre afecta la estimación de la descarga, y por ende, el balance hídrico de las cuencas y acuíferos. De acuerdo a los estudios analizados (JICA, 1995; DICTUC, 2005, 2007a y 2007b; DGA, 2009 y 2011), todos los acuíferos explotados (con extracciones) de la región muestran un balance negativo (las descargas superan la recarga), si bien tal afirmación no se puede cuantificar, por una parte, por no disponer de información actualizada y, por otra parte, por existir incertidumbres en la estimación de la recarga y las descargas. Esta situación se materializa con un descenso continuo y paulatino de los niveles estáticos.

La heterogeneidad temporal y espacial de las variables hidrológicas, característica de las zonas áridas (Castillo *et al.,* 2000), y la complejidad de los procesos hidrológicos e hidrogeológicos involucrados requieren disponer de una cantidad más importante de datos, tanto espacial como temporalmente, para generar modelos hidrológicos e hidrogeológicos predictivos.

El conocimiento de los recursos hídricos superficiales y subterráneos se limita al análisis de los datos generados por la red de monitoreo de la DGA (figura 1.3). Por otra parte, otros actores vinculados al recurso hídrico han desarrollado sus propias estaciones hydrométricas, respondiendo a objetivos propios de monitoreo o a compromisos adquiridos en el marco de resoluciones de calificación ambiental (RCA). Es el caso de las compañías mineras, instituciones públicas y académicas (universidades, centros de investigación). En conjunto, generan una cantidad de datos no depreciable (figura 1.3). Desafortunadamente, raramente estos datos son analizados de manera integral (Lictevout *et al.*, 2013).

En este contexto, el Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) de la Región de Tarapacá, creado en 2010, inició su trabajo con la generación de un diagnóstico de la información hídrica existente. El trabajo, cual objetivo fue realizar un análisis cualitativo, cuantitativo, espacial y temporal de la información existente, se realizó mediante la recopilación, sistematización y análisis de los datos y estudios existentes. Los principales productos fueron un análisis crítico y el observatorio del agua, herramienta de gestión y transferencia de la información dirigida a toda persona o institución con actividades vinculadas al recurso hídrico; además se identificaron brechas en la información existente. A raíz de este trabajo, el CIDERH inicio una segunda etapa enfocada a analizar cómo se generan los datos hidrométricos de la región con los cuales se realizan los estudios y proyectos.

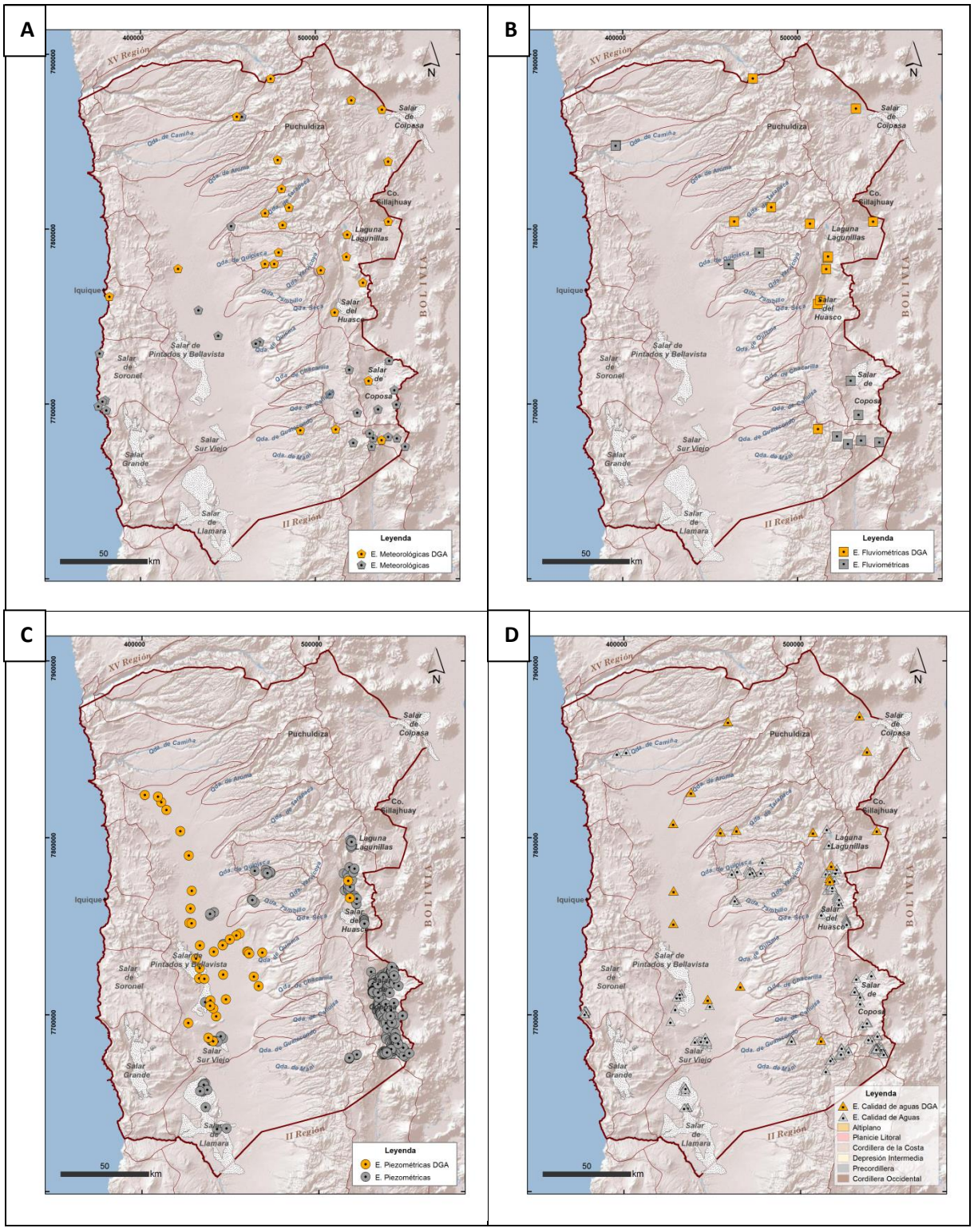


Figura 1.3. Localización de las estaciones de monitoreo de la red hidrométrica DGA y estaciones perteneciendo a otros actores regionales: A: Estaciones pluviométricas; B: Estaciones meteorológicas; C: Estaciones fluviométricas; D: Estaciones de calidad de agua.

1.1.3. ANTECEDENTES DE LA RED DE MONITOREO DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA REGIÓN DE TARAPACÁ

Desde la década de los ochenta, la red de monitoreo de los recursos hídricos ha sido un continuo objeto de estudios por la DGA, en un esfuerzo de estudiar y mejorar de la red.

- **Análisis Crítico de la Red FLuviométrica Nacional, I Región. 1983. IRH Ingeniería y recursos hídricos – Dirección General de aguas (DGA).**

El análisis determinó que la red de monitoreo era insuficiente para la caracterización de regímenes hidrológicos y evaluar recursos hídricos. Existían 24 estaciones que se concentraban en solo 11 cuencas de un total de 25 con interés hidrológico en la región I (actuales regiones XV y I). Seis estaciones se localizaban en la actual región de Tarapacá: Coscaya en Pampa Lirima, Camiña en Altusa, Piga en Collacagua, Batea en Confluencia, Collacagua en Peñablanca y Guatacondo en Copaquire. Además, el desarrollo de la red de monitoreo estaba concentrado en la zona norte de la región I (Valle de Azapa, Río San José) que presentaba una densidad desproporcional comparando con el resto del área. El estudio constaba que la densidad de estaciones estaba en concordancia con los rangos que propone la Organización Mundial de Meteorología (OMM) pero que estos no son aplicables, ya que se dejan sin control numerosas cuencas. Se determinó que los problemas de la red de monitoreo se debían a la ubicación y al diseño de las estaciones fluviométricas: en caso de caudales pequeños, los datos generados tienen poca precisión; se deposita material por arrastre, produciendo embanque y disminuyendo la velocidad del agua; las crecidas modifican el cauce, afectando la sección de la estación, y por ende la medición. Por otra parte, el estudio mencionó la dificultad de analizar estadísticamente los caudales y hacer correlaciones entre las estaciones debido a la interrupción de los registros. El estudio propuso una red de monitoreo de 33 estaciones las cuales 27 primarias y 6 secundarias. Recomendó reevaluarlo en un periodo 10 a 15 años.

- **Análisis de la Red Fluviométrica Nacional, Red de Calidad de Aguas I y II Región. 1984. BF Ingenieros Civiles - Dirección General de Aguas (DGA).**

Se determinó que la red existente de calidad de aguas estaba conformada por un número excesivo de puntos de monitoreo, especialmente en ríos o esteros con caudales muy pequeños o temporales. La red existente en la región I (incluye las actuales regiones XV y I) contemplaba un total de 285 estaciones, 104 estaciones con monitoreo regular y 181 estaciones de muestreo ocasional. En los límites de la actual Región de Tarapacá, 26 estaciones correspondían a estaciones de monitoreo regular y 68 a estaciones de monitoreo ocasional. Respecto al número de estaciones de muestreo, se propuso la reducción del número de estaciones, priorizando una mayor uniformidad. El estudio recomendó disminuir a solo 24 estaciones de muestreo, de las cuales 11 se asignaron como primera prioridad y 13 como segunda prioridad; lo que corresponde a 8 estaciones en la actual Región de Tarapacá de las cuales 3 son de primera prioridad (Quebrada de Tarapacá) y 5 de segunda (Quebrada de Guatacondo (1), Isluga–Cariquima (2), Cancosa (1) y Collacagua (1)). En este sentido, las recomendaciones del estudio son sorprendentes ya que, aparte de reducir el número de estaciones – y por consiguiente interrumpir registros continuos e

histórico de puntos de monitoreo - la red propuesta no muestra una distribución más uniforme de la estaciones (concentración de las estaciones prioritarias en la Quebrada de Tarapacá). El estudio admitió que se producían variaciones notables de la calidad del agua durante las crecidas pero que no era posible detectar estas variaciones sin un monitoreo continuo. El estudio recomendó la estructuración definitiva de la red de monitoreo, tomando en cuenta el grado de desarrollo de cada cuenca y la utilización de criterios para la distribución uniforme de los puntos de muestreo. El objetivo era incluir estaciones base para determinar la calidad natural del agua y estaciones de impacto para determinar la calidad bajo fuentes de contaminación. Además, se busco incluir estaciones de primera prioridad que correspondían a la red de monitoreo mínima y estaciones de segunda prioridad que correspondían a la red que podía ser postergada. Por otra parte el estudio definió la red futura en base al uso y planificación de los recursos hídricos no explotados entonces, a las fuentes de contaminación integrando parámetros económicos, específicamente en las cuencas altiplánicas.

- **Análisis de la Red Hidrometeorológica Nacional, Regiones I, II, III y IV. 1985. BF Ingenieros Civiles - Dirección General de Aguas (DGA).**

En la Región de Tarapacá (regiones XV y I actuales), el estudio realizo un análisis de la distribución y cobertura espacial media de las estaciones hidrometeorológicas. Obtuvo un total de 43 estaciones pertenecientes a la DGA distribuidas en un área de 54.000 Km^2 lo que equivale a una cobertura espacial media de 1.255 Km^2/estación. El estudio analizó la información registrada en cuanto a la calidad y extensión de los registros, denotando que la mayoría de las estaciones tenían un periodo de medición inferior a 30 años y que gran parte presentaban una discontinuidad/interrupciones del registro. El estudio propuso una red hidrometeorológica de control (mínima) destinada a satisfacer los requerimientos básicos de información para el desarrollo y planificación de los recursos hídricos de las zonas en estudio. Por ello, la densidad media de las estaciones de la red de hidrométrica propuesta es menor que en la red que existía, argumentando que la distribución espacial era más racional. Por consiguiente, en la propuesta se disminuye de 43 a 32 estaciones obteniendo una densidad de 1.700 Km^2/estación.

- **Análisis Crítico de la Red de Medición de Niveles de Agua Subterránea, Región I, II, III, IV, V". 1987. Alamos y Peralta Ingenieros Consultores Ltda y Dirección General de Aguas (DGA).**

El estudio describió la hidrogeología del acuífero Pampa del Tamarugal en el cual, entre los años 1981 y 1985, la DGA inició la medición de los niveles de agua en 30 pozos de monitoreo. El estudio propuso mantener solo 20 pozos y agregar 31 pozos nuevos debido a que algunos de los pozos de monitoreo se encontraban secos, las distancias entre pozos era corta y era necesario distribuir uniformemente los pozos de monitoreo en el área del acuífero. Respecto al sector de Esmeralda, se planteó generar una red independiente con un total de seis pozos debido a la explotación de agua subterránea en el sector. Por último, en el sector de Pica y Matilla, se agregaron 3 norias como parte integrante de la red debido al uso de agua para la agricultura.

- **Análisis Redes de Vigilancia Calidad Aguas Terrestres Estadística Hidroquímica Nacional, Etapa 1, Primera Región. 1994. Ayala, Cabrera y Asociados y (DGA).**

El estudio tuvo como objetivo ordenar y procesar toda la información de calidad de aguas disponible en el Banco Nacional de Aguas (BNA) y en el Laboratorio Ambiental de la DGA, desde 1980 a 1994. Además buscó representar la estadística hidroquímica nacional y así apreciar las características físico-químicas de las aguas superficiales. Se identificaron 129 estaciones en la Región de Tarapacá (XV y I) de las cuales 62 tienen al menos un muestreo completo o incompleto. Las estaciones se dividieron en estaciones permanentes (21), estaciones eventuales (14), estaciones ocasionales (27) y estaciones sin identificación BNA (3). Dentro de los límites de la actual Región de Tarapacá, se localizaron 15 estaciones de las cuales 8 estaciones eran permanentes o de primera prioridad (Isluga en bocatoma, Cariquima en Cariquima, Cancosa en el Tambo, Collacagua en Peñablanca, Camiña en Altusa, Coscaya en Pampa Lirima, Tarapacá en Sibaya y Tarapacá en Laonzana) y 7 estaciones eran de segunda prioridad, incluyendo 2 estaciones eventuales (Tarapacá en Pachica y Vertiente el Tambo en Mamiña) y 5 ocasionales (Huasco Norte, Ermitaño en salar del Huasco, Coposa, Tarapacá en Mocha y Coscaya en Mosquito de Oro). En comparación al análisis crítico de la red de calidad de aguas de 1984, aumentó el número de estaciones de monitoreo de 5 estaciones de primera prioridad y 2 segunda prioridad.

- **Evaluación Hidrométrica Nacional. 2006. MOP.**

El estudio resaltó la importancia de la DGA y su obligación, como organismo del estado dependiente del MOP, en la caracterización, disponibilidad y calidad del recurso hídrico. Se evaluó y analizó la red de monitoreo actual en base a estudios existentes, experiencia de los consultores y experiencia internacional. El análisis apunta a una evaluación costo-beneficio de los servicios hidrológicos e hidrogeológicos por cada estación instalada. Como resultado, el estudio recomendó cuatro programas de mejoramiento de la red orientados a obtener información de mayor cobertura, calidad y disponibilidad: cambio de estaciones de registro analógico a digital; transmisión satelital; aumento de la densidad de estaciones pluviométricas y fluviométricas y aumento de estaciones piezométricas para control de extracciones. Por último para la red de calidad de aguas, se recomendó aumentar el número de puntos y frecuencia de muestreo, el registro continuo de indicadores de calidad y biomonitoreo (uso de indicadores biológicos) en los cursos superficiales y un mejoramiento a la red de monitoreo de lagos; estas recomendaciones estaban orientadas a dar cumplimiento a las futuras normas secundarias de calidad de aguas. Lamentablemente, esta evaluación recomendó la reducción de la densidad de estaciones de monitoreo de la red de la DGA y la suspensión de las estaciones que ya tenían un registro histórico desde los años setenta como es el caso de seis estaciones meteorológicas de la región (Apamilca (Camiña), Collahuasi, Esmeralda, Pampa Lirima DCP, Puchultiza, Pumire) y una estación fluviometrica (Camiña en Altusa).

- **Mejoramiento de la Red Fluviométrica para el Control de Crecidas. 2011, DGA.**

El estudio se basó en el análisis crítico de 1983 para fundamentar el diagnóstico de la situación vigente de la red fluviométrica de la Región de Tarapacá. Se analizó el estado de funcionamiento,

equipamiento, eventos cronológicos y antecedentes de terreno de cada estaciones fluviométricas que se encontraban en la región, como también se consideró el hecho de que las estaciones podían utilizarse para una red de alerta temprana para crecidas. El estudio analizó la identificación, selección y aplicación de alternativas para el control de crecidas en cada estación fluviométrica de la región, como es el uso de tecnologías satelitales para la transmisión de datos, la utilización de telemetría para medir niveles, cámaras de medición, etc.

- **Diagnostico Plan Maestro de Recursos Hídricos, Región de Tarapacá. 2012. DGA**.

El estudio integró un análisis de la red hidrométrica regional: tipo de estación existente, estadística disponible desde el año 1970 hasta el año 2012, variables y tipos de control que se han registrado históricamente en la región ya sea meteorológico o pluviométrico, fluviométrico, piezométricos y de calidad de agua. Se analizó la vigencia histórica de las estaciones, determinando como vigente una estación que presenta un registro en los últimos tres años hasta el año 2012 (2009, 2010 y 2011). Se observó que según las estadísticas pluviométricas, existen 26 estaciones con registros de precipitación en el año 2012 en la región, de las cuales 21 de estas estaciones se encuentraban vigentes. Además, según la distribución espacial de las estaciones, observó que, determinadas cuencas no se contaban con información, como es el caso de la Quebrada Aroma, Cuenca Cariquima, subcuencas de Quisma, Chacarilla, Ramucho y cuencas al sur del Salar del Huasco. Respecto a las estadísticas de niveles subterráneos, se analizó el registro histórico desde el año 1970 hasta el año 2011, observando que es a partir del año 1990 que se registran en forma periódica los niveles de los pozos (más de 8 registros mensuales al año); entre 1999 y 2009 los registros comenzaron a disminuir, reportando de 4 a 7 registros al año hasta, en algunos casos, registrar solamente 4 registros al año. Por otra parte el análisis de las estaciones fluviométricas de la Región de Tarapacá determinó que existen 10 estaciones vigentes con registros de caudales medios mensuales.

- **Recursos Hídricos de la Región de Tarapacá: Diagnostico y Sistematización de la Información. 2013. Lictevout et al. (CIDERH).**

El estudio hizo una recopilación exhaustiva de todas las estaciones de monitoreo existiendo en la Región de Tarapacá, perteneciendo a instituciones públicas, privadas y académicas. Constató que varias cuencas y acuíferos de la región no registraban datos, a pesar de tener características hidrológicas e hidrogeológicas importantes: en la zona altiplánica, de un total de diez cuencas (PUC, 2009), cuatro no presentaban estaciones fluviométricas (siete no tenían estaciones DGA) y seis cuencas no tenían ningún pozo de monitoreo (nueve no tenían pozos de monitoreo DGA). En la zona Pampa del Tamarugal, de un total de 10 cuencas, cinco cuencas no t tenían monitoreo pluviométrico o meteorológico (seis no tenían estaciones meteorológicas DGA), ocho no tenían monitoreo fluviométrico (nueve cuencas no tenían estaciones fluviométricas DGA), siete no tenían monitoreo piezométrico (nueve cuencas no tenían pozos de monitoreo DGA). En la zona Salar de Llamara, de un total de 3 cuencas (DICTUC, 2006), dos no tenían estaciones meteorológicas y fluviométricas. No existían pozos de monitoreo de la DGA. En la zona de Camiña-Camarones, solo la Quebrada de Camiña tenía estaciones pluviométricas (2) y estaciones fluviométricas (una estación DGA y una estación privada). Existía un vacío de información hidrogeológica en todas las

cuencas y acuíferos de la región, a excepción de los acuíferos con interés productivo (Pampa del Tamarugal, Lagunilla, Coposa y Michincha). Las cuencas y subcuencas en las cuales se registraron datos y que fueron objeto de estudios, presentan información no siempre confiable, representativa y suficiente. La red de monitoreo existente de la Dirección General de Aguas (DGA) en la región de Tarapacá comprende un total de 92 estaciones, correspondiente a 25 meteorológicas, 12 fluviométricas, 38 piezométricas y 17 estaciones de calidad de agua. En resumen, se observa que, a nivel regional, se encuentran vigentes 25 estaciones meteorológicas DGA versus 50 estaciones meteorológicas privadas, académicas y otras instituciones públicas. Existen 12 estaciones fluviométricas de la DGA versus 10 estaciones fluviométricas pertenecientes a empresas privadas. Existen 38 pozos de monitoreo de la DGA versus 515 pozos monitoreados por empresas mineras. Finalmente la DGA cuenta con 17 estaciones de monitoreo de calidad de agua (subterráneo y superficial) versus 179 pertenecientes a entidades privadas. Aunque no repartido espacialmente de manera homogénea (se ubican en las zonas de interés particulares), analizados en conjunto con la red pública, reducirían la incertidumbre de los modelos y estudios.

1.2. Presentación del proyecto

1.2.1. Objetivos del proyecto

El análisis crítico de la red de monitoreo de los recursos hídricos de la Región de Tarapacá constituye un producto del proyecto titulado "Caracterización y Monitoreo de los Recursos Hídricos de la Región de Tarapacá", financiado por el Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC-R 2012) del Gobierno Regional de Tarapacá y ejecutado por el CIDERH.

Representa la primera etapa del Objetivo Específico Nº1 del proyecto: "Proponer un sistema de monitoreo de los recursos hídricos para su caracterización, cuantificación y predicción a corto, medio y largo plazo que asegure que todas la cuencas de la región cuenten con información meteorológica, fluviométrica, hidrogeológica y calidad de agua, suficiente, fiable y representativa". El proyecto FIC busca mejorar el monitoreo de los recursos hídricos de la Región de Tarapacá realizando un análisis crítico de la red de monitoreo de variables meteorológicas, fluviométricas e hidrogeológicas a cargo de la DGA por una parte. Por otra parte, y a partir de este análisis crítico, el proyecto quiere proponer una propuesta de red monitoreo mejorada y optimizada que permita obtener datos fiables, representativos y en tiempo oportuno, con el fin de reducir el error en los estudios y proyectos y apoyar la toma de decisiones sobre los recursos hídricos de la región de Tarapacá.

El análisis crítico de la red se realizó con la finalidad de generar una propuesta de red mejorada, tomando en cuenta y evaluando la totalidad de los elementos que componen un monitoreo óptimo de recursos hídricos: localización de estaciones de monitoreo, equipamiento de medición y transmisión de datos (en tiempo real, diferido), gestión de la red de monitoreo (operación y mantención), gestión de los datos, transferencia. CIDERH buscará presentar esta propuesta, validada por la DGA, al Gobierno Regional y otras entidades estrechamente vinculadas al recurso hídrico para generar una toma de decisión participativa en relación a la implementación de la red.

1.2.2. Metodología

De manera general, la metodología empleada para llevar a cabo el análisis crítico de la red de monitoreo de recursos hídricos de la Región de Tarapacá constó de las siguientes etapas:

Etapa 1: Obtención de los registros históricos.

Se recopilaron los registros de las diferentes estaciones de la red de monitoreo regional de la DGA y se analizaron los estudios recientes e históricos referente a las diferentes redes de monitoreo de la región.

Etapa 2: Campañas de reconocimiento de terreno.

Se efectuó una evaluación en terreno de todas las estaciones de la red de monitoreo de la DGA y de la estaciones pertenecientes a otros actores, privados y académicos. Se georeferenció cada estación visitada con GPS, se analizó la ubicación de la estación en la zona además de las características hidrográficas de la cuenca; se evaluó la infraestructura y tipo de instalación, tipo de

equipamiento, tecnología empleada, estado de funcionamiento, como también sus condiciones de acceso. En el caso de la estaciones fluviométricas, se realizó un plan de cada estación, con un registro fotográfico graficando las características de cada estación. Durante el año 2013, se visitaron 85 estaciones de un total de 92 estaciones vigentes de la DGA. Esto equivale a un 92% del total de la red de monitoreo vigente. De las estaciones visitadas, 12 corresponden a estaciones fluviométricas, 19 a estaciones meteorológicas, 37 a estaciones piezométricas y 17 a estaciones de calidad de agua vigentes de la DGA (Figura 1.3).

Etapa 3. Elaboración de fichas

A raíz del reconocimiento de terreno, se elaboró una ficha de análisis por cada estación visitada. Cada ficha recoge la información de las estaciones, tales como: ubicación y coordenadas, contexto, estado físico-estructural de la estación, instrumentación, tipo de transmisión, protocolo de muestreo, variables que mide, fotografías y otros datos como el tipo de estación, fecha de instalación, elementos faltantes y observaciones

Etapa 3: Análisis de la información.

Para cada red estudiada (meteorológica, fluviométrica, piezométrica y calidad de agua), la metodología tuvo enfoques específicos, dado las características de cada red:

Estaciones meteorológicas y fluviométricas

- **La calidad de los datos:** Los datos de cada estación meteorológica se analizaron mediante un análisis cruzado de datos de estaciones meteorológicas ubicadas en contexto similar (altura) y un análisis estadístico que permitió corroborar la coherencia de los datos. Los datos de caudal se verificaron comparándolos con los datos de estaciones fluviométricas en contexto similar (altura, sección del cauce) y datos meteorológicos simultáneos. Además se organizaron los datos de las estaciones de monitoreo vigente y no vigente que se encuentran en la región, como también un análisis de la serie cronológica de los datos para estaciones vigentes y no vigentes de la DGA.
- **La representatividad espacial:** Los datos meteorológicos a nivel de cuenca hidrográfica (localización, distribución espacial) se corroboraron haciendo un análisis cruzado con datos de otra estación en contexto similar y datos de estaciones fluviométricas. Además el análisis de la fisiografía de las cuencas hidrográficas permitió trabajar la representatividad de cada estación, complementado por un extenso reconocimiento del terreno. Para estaciones fluviométricas, se analizó la localización de la estación en el cauce, en base a los datos meteorológicos cuando existen (o los de una cuenca vecina). Se acompañó de un reconocimiento de terreno con un recorrido del cauce entero estudiando las secciones del cauce, los caudales entrantes y salientes.
- **El equipamiento (fiabilidad):** Se evaluó mediante el análisis temporal de los registros (horas, días o semanas sin registro o con datos incoherentes). Se trabajó estrechamente con la DGA ya que la experiencia de terreno proporciona un buen nivel de conocimiento y práctica de los equipos. En caso de los datos fluviométricos, se hizo hincapié en la repartición interanual, estacional y en los periodos de crecidas; se evaluó la capacidad de medición correcta del caudal tanto en estiaje como en crecida.

- Se realizó un levantamiento topográfico de todas las estaciones fluviométricas, con el cual se determinaron los parámetros hidráulicos de diseño, como perfiles topográficos, cortes transversales, planos arquitectónicos y pendientes media del cauce. Además, en cada estación se instaló un Punto de Referencia (PR) o Borne hidrológico para nivelar las escalas limnimétricas en el mismo nivel en caso de destrucción, con el fin de obtener series de datos continuas y homogéneas.

Estaciones piezométricas

- **Características generales:** Para la descripción de las características generales de las estaciones de monitoreo que definen la actual red de monitoreo, se registraron las diferentes características de las estaciones de la DGA en tablas respectivas donde se clasificó la estación con un código o ID CIDERH, UTM este, UTM norte, altitud, con la proyección WGS84, además del inicio de la estación y tipo de estación. Se realizó un levantamiento topográfico de un gran número de pozos de dicha red de monitoreo, lo que permitió definir con mayor precisión el resalto de los pozos. Debido a aspectos morfológicos del terreno circundante o de la propia construcción, no es posible determinar el resalto con una simple cinta métrica.

Además se realizó una tabla de valoración cualitativa de los pozos de la red de monitoreo visitados, en términos de accesibilidad, estado superficial del pozo (resalto) e instalaciones. Para esta valoración se ha empleado una escala de 1 a 4, en donde:

- 1 es *malo* (el pozo no tiene accesibilidad vehicular ni caminando, presenta deterioro generalizado en la tubería saliente en superficie o no presenta instalaciones de protección del pozo)
- 2 es *medianamente bueno* (el pozo no tiene accesibilidad vehicular pero se puede acceder caminando, la tubería saliente presenta deterioro localizado o sus instalaciones aledañas de protección presentan deterioro generalizado)
- 3 es *bueno* (el pozo tiene accesibilidad vehicular por huella, la tubería saliente presenta un deterioro mínimo o las instalaciones de protección del pozo se encuentran en buen estado con algunos daños particulares)
- 4 *es muy bueno* (el pozo tiene accesibilidad vehicular por carretera asfaltada, la tubería saliente se encuentra en perfecto estado o las instalaciones de protección del pozo se encuentran en perfecto estado).

A continuación se presenta un ejemplo para la valoración cualitativa de las características generales de los pozos de la red de monitoreo de la DGA.

CÓDIGO	ACCESIBILIDAD	ESTADO SUPERFICIAL DEL POZO	INSTALACIONES
PM_040_A	3	4	1

- **Representatividad espacial:** Se evaluó la representatividad espacial de cada pozo monitoreado por la DGA, para los análisis de los distintos acuíferos, en base a su georeferenciación a través del sistema de información geográfica ArcGIS V.10.2. Para este fin, se utilizaron herramientas de la plataforma con las cuales se desarrollaron polígonos de Thiessen para la

determinación del área de influencia (km^2) y las zonas de sombra o no influencia de los pozos en los acuíferos de la Pampa del Tamarugal, Pica, Sur Viejo, Llamara y Coposa.

- **Representatividad temporal de los datos:** Para la representatividad temporal de los datos se realizó una recopilación de los registros de los pozos utilizados por la DGA para lo cual se analizó la calidad de los datos a partir del estudio de las medidas de tendencia central, así como el comportamiento de los mismos en función del tiempo y la frecuencia de los datos.

Estaciones de calidad de agua

- **Representatividad espacial de las estaciones de calidad de agua superficial y subterránea:** Se realizó la evaluación y análisis de la distribución espacial de la red de monitoreo de calidad de agua superficial y subterránea de cada cuenca de la región para determinar la representatividad de las redes de calidad de la DGA con el método de georeferenciación a través del sistema de información geográfica ArcGIS V.10.2.

- **Representatividad temporal de las estaciones de calidad de agua superficial y subterránea:** Se recopilaron los registros históricos de las redes de monitoreo de agua superficial y subterránea para determinar el número de estaciones que existen en la región, el número de muestreos por estación y el número de parámetros muestreados, como también la frecuencia de registro a través de los años, para determinar la calidad de los datos de la red de monitoreo de calidad de aguas

- **Análisis de calidad de aguas:** Para realizar un análisis de los registros de calidad de aguas en las distintas estaciones visitadas se evaluaron y caracterizaron los siguientes parámetros para la caracterización de aguas: arsénico (As^{5+}), bicarbonato (HCO_3^-), boro (B^+), calcio (Ca^{2+}), carbonato (CO_3^{2-}), cloruro (Cl^-), cobre (Cu^+), conductividad (CE), cromo (Cr^{2+}), demanda química de oxígeno (DQO), fosfato (PO_4^{3-}), hierro (Fe^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), manganeso (Mn^{2+}), mercurio (Hg^{2+}), nitrato (NO_3^-), oxígeno disuelto (O_2), pH, potasio (K^+), sodio (Na^+), sulfato (SO_4^{2-}), temperatura (C°) y zinc (Zn^{2+}). Los datos obtenidos de cada estación de calidad se analizaron a través de la realización de gráficos de distribución temporal para cada variable analizada, un análisis estadístico básico (mínimo, máximo, media, mediana, desviación estándar, primero y tercero cuartiles), diagramas de cajas y diagramas de Piper y Stiff.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE MONITOREO METEOROLÓGICA

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE MONITOREO METEOROLÓGICA

2.1. Descripción General

La red de monitoreo meteorológica oficial de la región de Tarapacá es operada por la Dirección General de aguas (DGA). Esta red consta de 25 estaciones meteorológicas vigentes que incluyen, desde la más simple configuración (un pluviómetro manual tipo Hellmann), hasta estaciones más completas con sensores que recolectan información sobre la cantidad de lluvia, temperatura, humedad, radiación solar, evaporación, velocidad y dirección del viento (Figura 2.1). Sin embargo, existe un total de 34 estaciones meteorológicas de la DGA que presentan un registro histórico de datos de precipitación, las cuales se muestran en la Figura 2.1 y Tabla 2.1.

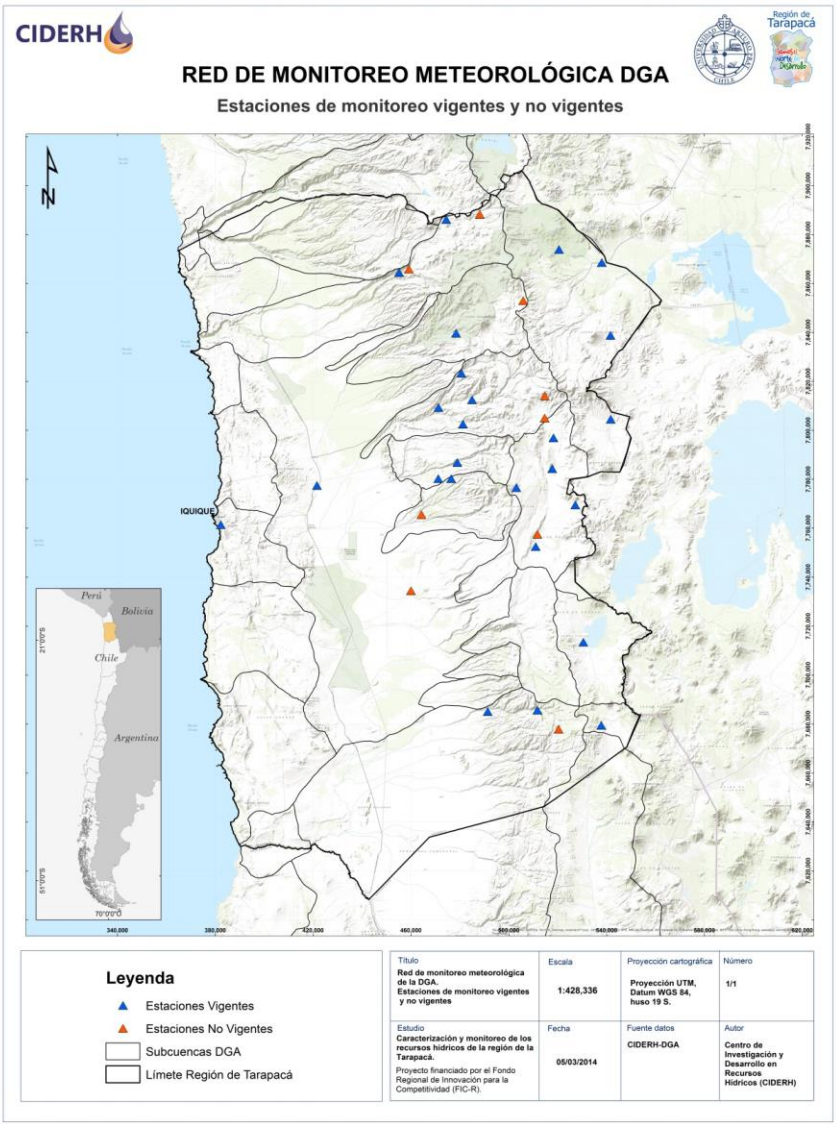


Figura 2.1. Estaciones meteorológicas vigentes y No vigentes de la DGA.

Tabla 2.1. Conjunto de estaciones DGA vigentes y no vigentes.

Nº	Estación*	Coordenadas*		Altitud*	Serie de datos	Estado actual
		UTM E*	UTM N*			
1	Altos del Huasco	524005	7769630	4044	01/11/2011- 31/10/2013	Vigente
2	Apamilca (Camiña)	459374	7866274	2600	01/01/1986- 27/11/2006	Suspendida
3	Camiña	456168	7864392	2500	01/01/1971 -31/10/2013	Vigente
4	Cancosa[1]	541707	7804456	3930	01/04/1976- 31/10/20143	Vigente
5	Cerro Colorado	471737	7781275	2510	01/12/1991- 31/10/2013	Vigente
6	Chiapa	478493	7839719	3155	01/02/2012- 31/10/2013	Vigente
7	Chuzmiza	480783	7823553	3400	01/10/1989- 31/10/2013	Vigente
8	Colchane (T. Isluga)	538062	7868524	3700	01/12/1975- 31/10/2013	Vigente
9	Collahuasi	520585	7678240	4250	01/11/1971- 27/11/2006	Suspendida
10	Copaquire[2]	511206	7685535	3540	01/09/1977- 31/10/2013	Vigente
11	Coposa	531847	7710041	3760	01/12/1982- 31/10/2013	Vigente
12	Collacagua	520130	7782608	4013	01/11/1961- 31/10/2013	Vigente
13	Diablo Marca	503339	7776932	4585	01/11/2011- 31/10/2013	Vigente
14	Enquelca (Ex Caraguano)	520554	7873808	3900	01/09/1984- 31/10/2013	Vigente
15	Esmeralda	460226	7734864	1115	01/09/1966- 27/11/2006	Suspendida
16	Guatacondo DGA	495262	7685876	2460	01/09/1977- 31/10/2013	Vigente
17	Huara en Fuerte Baquedano	421635	7773836	1100	01/12/1991- 31/10/2013	Vigente
18	Huaytani	544924	7788402	3950	01/09/1982- 31/10/2013	Vigente
19	Iquique	381308	7764260	50	01/08/1984- 31/10/2013	Vigente
20	Lagunillas (Pampa Lirima)	517064	7795860	4020	01/09/1982- 31/10/2013	Vigente
21	Mamiña	477548	7780115	2730	01/01/1986- 31/10/2013	Vigente
22	Mocha	471401	7809524	2150	01/01/1988- 31/10/2013	Vigente
23	Pampa Lirima	515241	7805390	4076	01/10/1977- 26/01/2010	Suspendida
24	Pampa Lirima DCP	514870	7814459	5100	01/12/1978- 27/11/2006	Suspendida
25	Parca	478731	7787125	2650	01/12/1977- 31/10/2013	Vigente
26	Poroma	480835	7802651	2880	01/04/1968- 31/10/2013	Vigente
27	Puchultiza	506066	7853378	4300	01/09/1982- 27/11/2006	Suspendida
28	Pumire	488340	7888600	4510	01/01/1962- 27/11/2006	Suspendida
29	Q. Camiña 3km. Arriba de Tarcavire	473198	7892764	3694	29/08/2006- 31/10/2013	Vigente
30	Q. Tarapacá en Sibaya	484985	7812491	2830	01/02/2004- 31/10/2013	Vigente
31	Sagasca	464507	7765953	1822	01/09/1977-27/01/2010	Suspendida
32	Salar Huasco	511892	7757931	3800	01/03/1981- 31/06/1982	Suspendida
33	Sillillica	511106	7752859	3840	01/11/2011- 31/10/2013	Vigente
34	Ujina	538722	7680944	4300	01/11/1973- 31/10/2013	Vigente

[1] En el año 2012, esta estación se suspendió por varios meses y durante este mismo año se desplazó hacia la estación Rio Cancosa en El Tambo (a 1 km de su lugar original).

[2]En el año 2011, esta estación se suspendió por varios meses y durante este mismo año se desplazó hacia la estación fluviométrica Rio Huatacondo en Copaquire (a 100 m de su lugar original).

*Proyección WGS84. La información descrita en esta tabla corresponde a la información de carácter público emitida por la DGA.

La información geográfica existente de las estaciones meteorológicas descrita en la Tabla 2.1 no tiene la precisión suficiente para este tipo de red. Esto, porque además de existir dificultades para llegar a ciertas estaciones (ejemplo: Chuzmiza, Enquelga, Camiña y Chiapa) con las coordenadas geográfica vigentes, existen diferencias centimétricas al comparar la coordenada oficial con la obtenida en terreno en el marco.de este trabajo. Significa que las coordenadas están desactualizadas. Cabe señalar que contar con una buena precisión de las coordenadas y altitud es clave para analizar la precipitación versus altura y para calcular la variabilidad espacial de la lluvia en una zona específica (Houston, 2006). Esto último se debe a que la altitud juega un rol fundamental en el comportamiento de la precipitación, sobre en una zona cuyas variables climáticas están gobernadas por diferentes factores: fenómeno del Niño/Southern Oscillation (ENSO), efecto de la Cordillera de los Andes, Invierno Boliviano o altiplánico, entre otros que conducen a un régimen hidrológico complejo.

Generalmente, las precipitaciones del altiplano del norte de Chile se caracterizan por su gran variabilidad espacial y temporal (Houston, 2006; Lictevout *et al.,* 2013). Los eventos hidromemeteorológicos son muy esporádicos con poca extensión espacial. Así mismo, las precipitaciones son anualmente independientes, es decir el comportamiento estadístico de la precipitación de un año no influye en el año siguiente (PUC, 2009). De hecho, algunas estaciones muestran discrepancia en los promedios anuales calculados por las diferentes fuentes, como es el caso de las estaciones meteorológicas de Colchane (varía de 137 a 181 mm/año), Coposa (varía de 95 a 134 mm/año) y Ujina (varía de 135 a 1852 mm/año) (Lictevout *et al.,* 2013).

2.2. Instrumentación y mediciones

Actualmente, existen:

- 17 estaciones meteorológicas (de un total de 25) que tienen un registro digital de datos horarios (Tabla 2.2) con una frecuencia de recogida de datos cada dos meses.
- De esas 17 estaciones, según la visita realizada a cada estación junto a la DGA, sólo cuatro poseen transmisión satelital (Colchane, Copaquire, Sibaya y Tarcavire) y sólo dos estaciones poseen transmisión GSM o celular (Coposa y Ujina).

Ahora bien, si clasificamos las estaciones de acuerdo al número de variables atmosféricas que mide cada estación como se muestra en la Tabla 2.2, se nota que:

- Sólo existen 12 estaciones del tipo “meteorológica” y 13 del tipo “pluviométrica”. Esto quiere decir que sólo el 48% de la red meteorológica cuenta con estaciones que permiten la medición de dos o más variables atmosféricas (meteorológica) y el 52% de las estaciones sólo registra la precipitación como variable atmosférica (pluviométrica).

Hay que señalar, que de las 13 estaciones pluviométricas, nueve tienen un registro manual con una frecuencia de recogida de datos cada 2 meses y medio (Chuzmiza, Enquelca, Guatacondo, Huaytani, Iquique, Mamiña, Mocha, Parca y Poroma) y sólo cuatro poseen un registro digital (Cancosa, Chiapa, Tarcavire y Sibaya).

A modo de resumen, se observa que la red de meteorológica actual de la Región de Tarapacá es insuficiente para evaluar el comportamiento de las variables atmosféricas: precipitación, temperatura, presión, humedad relativa, humedad del suelo, radiación solar y viento y por ende

realizar un balance hídrico preciso. Además, sólo hay cinco estaciones que registran "evaporación", una de las variables claves del balance hídrico en la región (Lictevout *et al.,* 2013).

Tabla 2.2. Conjunto de estaciones DGA vigentes y variables atmosférica medidas.

Nº	Estación	Coordenadas DGA		Altitud	Variables atmosféricas que mide la estación**	Nº de variables	Tipo de estación de acuerdo al nº de variables[1]	Registro de datos/Transmisión[2]
		UTM E	UTM N					
1	Altos del Huasco	524005	7769630	4044	PP/ Tº/ HR/HS/ TS	5	Meteorológica	Digital
2	Camiña	456168	7864392	2500	PP/Tº/ HR/RS/ P/ V	6	Meteorológica	Digital
3	Cancosa	541707	7804456	3930	PP	1	Pluviométrica	Digital
4	Cerro Colorado*	471737	7781275	2510	PP/ Tº/ E	3	Meteorológica	Digital
5	Chiapa	478493	7839719	3155	PP	1	Pluviométrica	Digital
6	Chuzmiza	480783	7823553	3400	PP	1	Pluviométrica	Manual
7	Colchane (T. Isluga)	538062	7868524	3700	PP/Tº/HS/RS	4	Meteorológica	Digital/Satelital
8	Copaquire	511206	7685535	3540	PP/Tº	2	Meteorológica	Digital/Satelital
9	Coposa	531847	7710041	3760	PP/ Tº/ HR/V/P/RS	6	Meteorológica	Digital/GSM
10	Collacagua	520130	7782608	4013	PP/ Tº/ E/RS	4	Meteorológica	Digital
11	Diablo Marca*	503339	7776932	4585	PP/ Tº/ HR/ HS/TS	5	Meteorológica	Digital
12	Enquelca (Ex Caraguano)	520554	7873808	3900	PP	1	Pluviométrica	Manual
13	Guatacondo DGA	495262	7685876	2460	PP	1	Pluviométrica	Manual
14	Huara en Fuerte Baquedano*	421635	7773836	1100	PP/ Tº/ E/ V	4	Meteorológica	Digital
15	Huaytani	544924	7788402	3950	PP	1	Pluviométrica	Manual
16	Iquique*	381308	7764260	50	PP	1	Pluviométrica	Manual
17	Lagunillas (Pampa Lirima)	517064	7795860	4020	PP/ Tº/ E/ V	4	Meteorológica	Digital
18	Mamiña	477548	7780115	2730	PP	1	Pluviométrica	Manual
19	Mocha	471401	7809524	2150	PP	1	Pluviométrica	Manual
20	Parca	478731	7787125	2650	PP	1	Pluviométrica	Manual
21	Poroma	480835	7802651	2880	PP	1	Pluviométrica	Manual
22	Q. Camiña 3km. Arriba de Tarcavire	473198	7892764	3694	PP	1	Pluviométrica	Digital/Satelital
23	Q. Tarapacá en Sibaya	484985	7812491	2830	PP	1	Pluviométrica	Digital/Satelital
24	Sillillica	511106	7752859	3840	PP/ Tº/ HR/HS/TS	5	Meteorológica	Digital
25	Ujina*	538722	7680944	4300	PP/ Tº/ E	3	Meteorológica	Digital/GSM

*Estas estaciones no fueron visitadas.

****Simbología variables atmosféricas:**

PP= Precipitación; Tº= Temperatura; HR= Humedad Relativa; HS= Humedad del Suelo; RS= Radiación Solar; P=Presión; V= Viento; TS=Temperatura del Suelo; E= Evaporación.

[1] En esta tabla una estación meteorológica es aquella que mide dos o más variables atmosféricas. En cambio, una estación pluviométrica es aquella que sólo mide precipitación.

[2] **Tipo de estaciones:**

Manual: Aquella estación que sólo tienen un pluviómetro tipo Hellmann sin datalogger y son atendidas por "Observadores meteorológicos".

Digital: Aquella estación que registra los datos por medio de un datalogger pero los datos se recolectan directamente en el sitio.

Digital/Satelital: Aquella estación que registra los datos por medio de un datalogger y los transmite vía satélite.

Digital/GSM: Aquella estación que registra los datos por medio de un datalogger y los transmite vía celular.

2.3. Organización y tratamiento de los datos

En la Tabla 2.3 se presenta la organización de los datos de las estaciones vigentes y no vigentes de la Región, considerando el número de datos que ha logrado medir cada estación. Es decir, dicha tabla resume la disponibilidad histórica de estadísticas de precipitación mensual en las estaciones meteorológica DGA desde el año 1960 hasta 2013. Antes de 1970, sólo las estaciones de Pumire y Collacagua poseen registros de precipitación. La primera, actualmente suspendida, registró datos a partir de 1962 hasta 1991 y la segunda, actualmente vigente, registra datos desde 1961. Para comparar las estadísticas con las ofrecidas por la DGA, los datos se han organizado según MOP (2012), considerando los siguientes rangos:

- Año completo (12 meses)
- 9 – 11 meses con datos al año
- 7 -8 meses con datos al año
- Menos 7 meses con datos al año

Los meses vacíos no han sido considerados en este análisis.

De acuerdo a estos rangos, en la Tabla 2.3 se observa una gran variabilidad en la extensión y período de registro, dado que las series de datos varían desde 1 hasta más de 50 años de datos. En dicha tabla, se puede apreciar que, **de las 25 estaciones meteorológicas vigentes, 19 estaciones tienen un registro de más de tres décadas**, desde 1980 hasta la fecha (65% de las estaciones analizadas) y tienen información completa (más de 9 meses con datos al año), lo que permite realizar análisis estadísticos estacionales. Sin embargo, la poca cobertura espacial, como se mostró en la figura 2.1, dificulta la realización de un análisis espacial de las precipitaciones en toda la región, ya que hay zonas o cuencas en las cuales no se cuenta con información meteorológica (Tabla 2.2).

Tabla 2.3. Disponibilidad histórica de estadística de precipitaciones mensuales de las estaciones DGA en la Región de Tarapacá

Nº	Estación	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2013
1	Altos del Huasco						
2	Apamilca (Camiña)						
3	Camiña						
4	Cancosa						
5	Cerro Colorado						
6	Chiapa						
7	Chuzmiza						
8	Colchane (T. Isluga)						
9	Collahuasi						
10	Copaquire						
11	Coposa						
12	Coyacagua						
13	Diablo Marca						
14	Enquelca (Ex Caraguano)						
15	Esmeralda						
16	Guatacondo DGA						
17	Huara en Fuerte Baquedano						
18	Huaytani						
19	Iquique						
20	Lagunillas (Pampa Lirima)						
21	Mamiña						
22	Mocha						
23	Pampa Lirima						
24	Pampa Lirima DCP						
25	Parca						
26	Poroma						
27	Puchultiza						
28	Pumire						
29	Q. Camiña 3km. A. Arriba de Tarcavire						
30	Q. Tarapacá en Sibaya						
31	Sagasca						
32	Salar Huasco						
33	Sillillica						
34	Ujina						

2.4. Análisis espacial y temporal

En la Tabla 2.4, se muestran las densidades mínimas de estaciones pluviométricas recomendadas por la OMM. Estos valores no se aplican a los grandes desiertos (Sahara, Gobi, Arabia, etc.) ni a las grandes extensiones de hielo (Antártico, Groenlandia, y las islas árticas) que no han organizado redes hidrográficas. En esas regiones, las precipitaciones no son medidas por redes pluviométricas de tipo estándar, sino por estaciones y métodos especiales de observación (OMM, 1994). Además, recomienda que la red o densidad de estaciones debe expandirse y/o ajustarse permanentemente hasta que las relaciones hidrológicas regionales puedan ser desarrolladas en zonas desaforadas para que proporcionen el nivel apropiado de información.

De manera general, la región se ha considerado como unidad fisiográfica "Zonas polares y árida", argumentando que la densidad mínima recomendada por la OMM (OMM, 1994) no es adaptada ya que consideraría una densidad demasiado baja (solo una estación sería necesaria en las regiones I y XV). Los autores del presente trabajo consideran que la Región no debe ser considerada en la unidad fisiográfica "Zonas polares y áridas" sino en la unidad fisiográfica "Zonas montañosas", con una densidad mínima de 2.500 km^2 por estación fluviométrica.

Tabla 2.4. Densidad mínima de estaciones pluviométricas por unidades fisiográficas recomendadas por la OMM

Unidad fisiográfica	Densidades mínimas por estación (Superficie en km^2 por estación)	
	Sin registro	Con registro
Zonas costeras	900	9000
Zonas montañosas	250	2500
Llanuras interiores	575	5750
Zonas escarpadas/onduladas	575	5750
Pequeñas islas	25	250
Zonas urbanas		10 a 20
Zonas polares y áridas	10000	100000

Fuente: OMM en "Guía de prácticas hidrológicas" (1994).

En la Tabla 2.5, se muestra la distribución de las estaciones por unidad de análisis y por subcuencas, en la cual se puede observar lo siguiente:

- La Unidad de análisis "Altiplano" presenta una densidad de estaciones acorde con la recomendación de la OMM (1994), ya que cada estación cubre una superficie media de 615 km^2.
- En las unidades de análisis de la Pampa del Tamarugal, Llamara-Rio Loa y Camiña-Camarones, la superficie de estaciones meteorológicas cumpliría con las recomendaciones de la OMM (1994) si todas las estaciones fueran digitales (con registro), lo que no es el caso actualmente. Por otra parte, la densidad no es el único criterio: la repartición y ubicación espacial son criterios claves en la evaluación de una red hidrométrica.

1) En la distribución espacial mostrada en la figura 2.2, se observa que las estaciones se concentran en la parte alta, a partir de los 1.800 m s.n.m. aproximadamente, con excepción de las estaciones Iquique (ubicada en el Litoral Costero, ~50 m s.n.m.) y Huara en Fuerte Baquedano (ubicada en la Depresión Central, ~1100 m s.n.m.). Esto se explica porque la altura de extinción de las precipitaciones es aproximadamente 2000 m s.n.m. (DICTUC, 2006). A alturas inferiores, las precipitaciones son prácticamente nulas (0,70 a 1,28 mm por año aproximadamente).

Tabla 2.5. Distribución de las estaciones por Unidad de análisis y subcuencas

Unidad de Análisis	Subcuenca	Nº de estaciones por subcuenca	Nº de estaciones por Unidad de Análisis	Área por Unidad de Análisis (km^2)	Densidad de estaciones por Unidad de Análisis (km^2/E)
ALTIPLÁNICA	Entre Estero Sencata y Río Sacaya	4	11	6772	615
	Salar del Huasco	5			
	Entre Salares del Huasco y Coposa	0			
	Salar de Coposa	1			
	Salar de Michincha	1			
PAMPA DEL TAMARUGAL	Pampa del Tamarugal	1	9	17353	1928
	Qda. Soga	0			
	Qda. Aroma	1			
	Qda. Tarapacá	4			
	Qda. Quipisca	2			
	Qda. Juan Morales	1			
	Qda. Quisma y Acuífero de Pica	0			
	Qda. Chacarilla	0			
	Qda. Ramada	0			
	Qda. Cahuisa y Chipana	0			
LLAMARA-RÍO LOA	Río Loa Alto	0	2	6004	3002
	Río Loa Medio	0			
	(Quebrada de Guatacondo)	2			
	Río Loa Bajo	0			
CAMIÑA-CAMARONES	Qda. Chiza	0	2	6277	3138
	Qda. Camiña	2			
	Entre Río Camarones y Q. Camiña	0			
COSTERAS	Entre Qda. Tiliviche y Pampa Orcoma	0	1	5839	5839
	Pampas Orcoma y Perdiz	0			
	Pampas del Carmen y la Unión	1			
	Salar de Soronel y Pampa Blanca	0			
	Pampa de las Zorras y Salar Grande	0			
Total: 25 estaciones meteorológicas					

*Las unidades de análisis y subcuencas consideradas en la tabla 2.3 han sido tomadas de Lictevout et al. (2013).

2) Por otro lado, siguiendo el eje norte-sur, se muestra una concentración de estaciones en el centro y en los límites de la región (Figura 2.2). Existen 10 unidades hidrográficas sin información meteorológica: Quebrada de Soga, Quebrada de Juan Morales (Juan Morales, Sagasca y El Tambillo), Quebrada de Quisma, Quebrada de Chacarilla, Quebrada de Ramada, Quebrada de Cahuisa y Chipana, Quebrada de Chiza, Río Loa Alto, Río Loa Medio (Quebrada de Pintados, Quebrada de Maní y Salar de Llamara) y Entre salares Huasco y Coposa. Además, cinco cuencas costeras tampoco tienen estaciones meteorológicas: Entre Quebrada Tilviche y Pampa Orcoma, Pampas Orcoma y Perdiz, Salar de Soronel y Pampa Blanca, Pampa de las Zorras y Salar Grande, Entre Quebrada Amarga y Desembocadura. En total son 15 unidades hidrográficas sin información meteorológica.

3) Sin embargo, casi todas las cuencas carecen de estaciones meteorológicas en sus cabeceras, sobre todo en la zona de Precordillera. Según la Tabla 2.4:

- En la zona altiplánica, de las 5 subcuencas sólo una no tiene estación meteorológica: Entre salares del Huasco y Coposa.
- En la zona de Camiña – Camarones de tres cuencas dos no cuentan con estaciones meteorológicas: Quebrada Chiza y Entre Río Camarones y Quebrada de Camiña.
- En la zona Pampa del Tamarugal, de un total de 10 cuencas, cinco no tienen estaciones meteorológicas: Quebrada de Soga, Quebrada de Quisma y acuífero de Pica, Quebrada de Chacarilla, Quebrada de Ramada y quebradaq de Cahuisa y Chipana. En la zona Salar de Llamara, de un total de 3 cuencas (DICTUC, 2006), dos no tienen estaciones meteorológicas: Río Loa Alto y Río Loa Bajo.

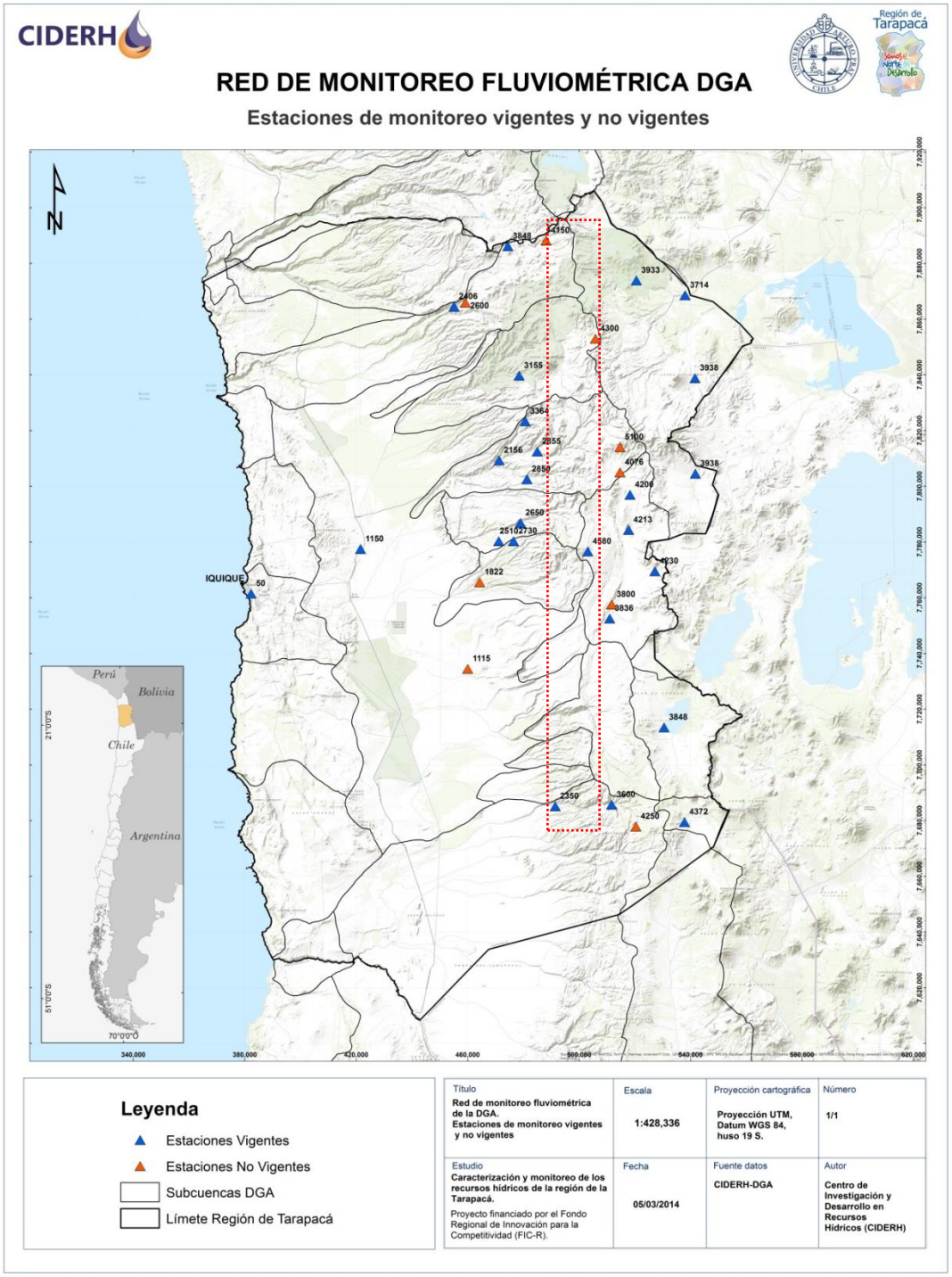


Figura 2.2. Distribución espacial de las estaciones DGA (vigentes y no vigentes). Las etiquetas representan las altitudes de las estaciones y el recuadro rojo intermitente la zona Precordillera carente de estaciones meteorológicas.

Analizando el registro histórico de precipitaciones de las 34 estaciones meteorológicas de la DGA en la Región de Tarapacá, se aprecian diferencias en la longitud de los registros que hacen pertinentes algunas consideraciones o aspectos claves. En primer lugar, no pueden considerarse todos los puntos de medición de igual calidad o relevancia, ya que un mayor número de mediciones implica una mayor confiabilidad de los parámetros estimados a partir de los modelos estocásticos (media, desviación estándar, correlación espacial, etc.). En segundo lugar, los datos faltantes en las series de cada estación no están aleatoriamente distribuidos, por lo cual se genera un sesgo o problema que debe ser corregido adecuadamente. Los datos faltantes en los registros se deben a varios causas: a) que la estación de medición no existía en ese período, b) pérdida de funcionamiento de la estación por días, meses o años, c) suspensión total en la medición de la estación, entre otros.

Para considerar estos aspectos y trabajar adecuadamente con las series de datos, se separaron las series de precipitaciones mensuales en tres tipos (Tabla 2.6), luego de revisar el registro histórico de los datos meteorológicos de la DGA en la región (Figura 2.3):

> *Series Tipo I*: aquellas series que presentan un registro de datos igual o superior a 30 años de datos (*≥ 30 años*).
>
> *Series Tipo II*: aquellas series que presentan un registro de datos superior a 10 años de datos y menor que 30 *(>10 y < 30 años*).
>
> *Series Tipo III*: aquellas series que presentan un registro de datos inferior a 10 años de datos (*≤ 10 años*).

Se observa que:

- La estación que presenta una mayor longitud de la serie de datos continua es la estación de Collacagua con 52 años de datos, seguido por las estaciones de Poroma y Camiña con 45 y 42 años de datos.
- Del conjunto de estaciones, existe un total de
    - 11 estaciones tipo III que presentan un registro de datos inferior a 10 años (32% de las estaciones; 5 suspendidas);
    - 11 estaciones tipo II con un registro entre 10 y 30 años (32% de las estación; 4 suspendidas)
    - 12 estaciones tipo I con un registro superior o igual a 30 años (35% de las estaciones; todas vigentes).

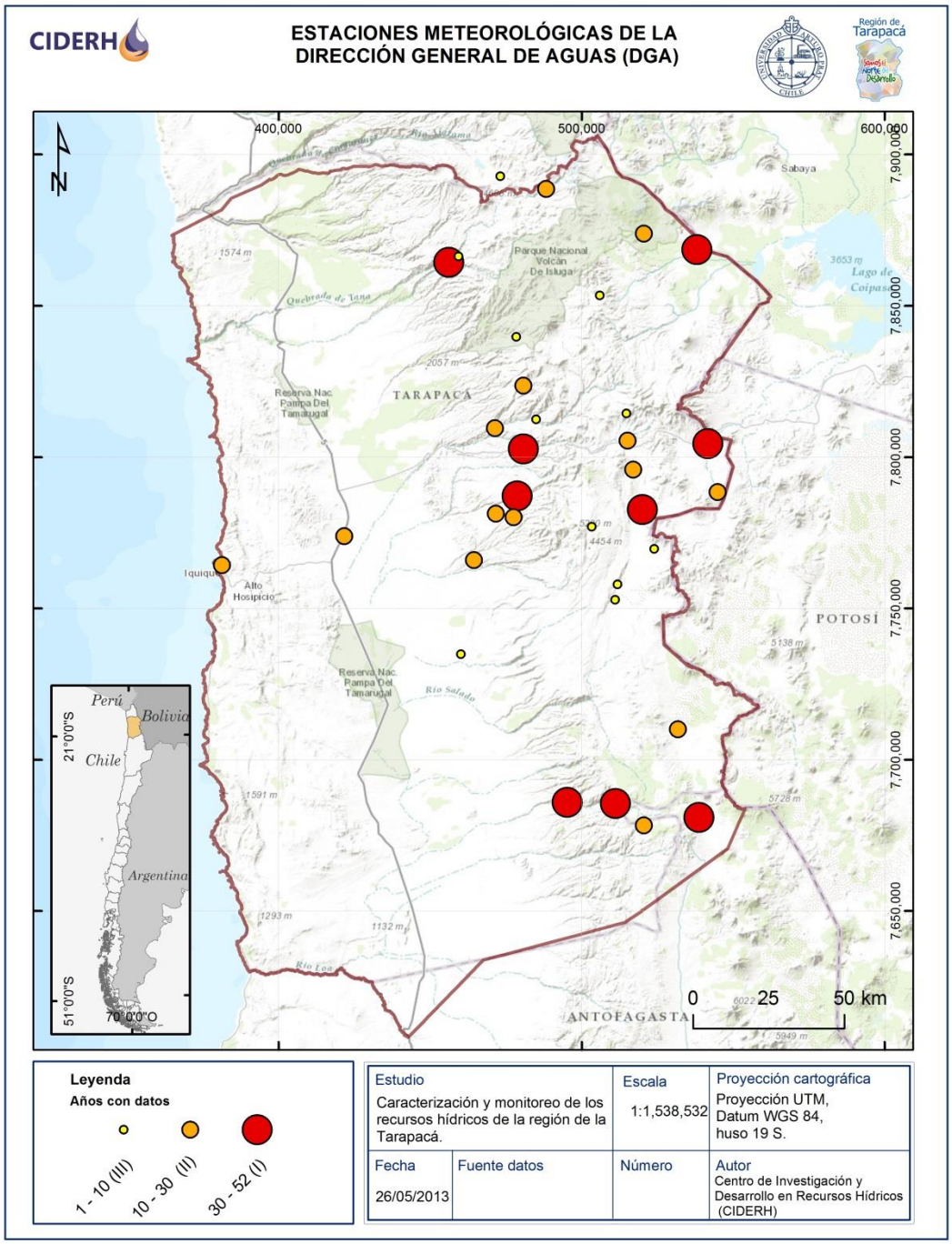


Figura 2.3. Clasificación de las estaciones meteorológicas DGA de acuerdo a las series de datos consideradas.

No obstante, es importante mencionar que existen:

- 18 estaciones con un registro superior o igual a 25 años que representa una serie tipo II (53% de las estaciones; 1 suspendida)
- 22 estaciones también del tipo II presentan un registro de datos superior o igual a 20 años (65% de las estaciones; 3 suspendida), siendo este último el rango disponible que ofrece mejor representatividad para analizar la serie histórica de datos meteorológicos de la DGA en la región.

- 10 estaciones son del tipo III con un registro de datos de 1 a 9 años
- 12 estaciones son del tipo I con un registro de datos entre 30 y 50 años. De esta última sólo una estación tiene un registro de 52 años de datos (estación de Collacagua).

Tabla 2.6 Estadística disponible de las estaciones meteorológicas DGA

Nº	Estación	Serie de datos		Longitud de la serie de datos (años)	Nº de años sin datos en la serie	Años completos	Tipo de estación
		Año inicio	Año fin				
1	Altos del Huasco	2011	2013	2	0	2	III
2	Apamilca (Camiña)	1986	2006	4	0	4	III
3	Camiña	1971	2013	42	3	39	I
4	Cancosa	1976	2013	37	1	36	I
5	Cerro Colorado	1991	2013	20	0	20	II
6	Chiapa	2012	2013	1	0	1	III
7	Chuzmiza	1989	2013	25	0	25	II
8	Colchane (T. Isluga)	1975	2013	38	1	37	I
9	Collahuasi	1971	2006	20	0	20	II
10	Copaquire	1977	2013	36	3	33	I
11	Coposa	1982	2013	31	11	20	I
12	Collacagua	1961	2013	52	0	52	I
13	Diablo Marca	2011	2013	2	0	2	III
14	Enquelca (Ex Caraguano)	1984	2013	28	4	24	II
15	Esmeralda	1966	2006	6	2	4	III
16	Guatacondo DGA	1977	2013	36	0	36	I
17	Huara en Fuerte Baquedano	1991	2013	20	0	20	II
18	Huaytani	1982	2013	31	2	29	I
19	Iquique	1984	2013	29	0	29	II
20	Lagunillas (Pampa Lirima)	1982	2013	31	1	30	I
21	Mamiña	1986	2013	27	0	27	II
22	Mocha	1988	2013	25	1	24	II
23	Pampa Lirima	1977	2010	12	0	12	II
24	Pampa Lirima DCP	1978	2006	2	0	2	III
25	Parca	1977	2013	36	0	36	I
26	Poroma	1968	2013	45	4	41	I
27	Puchultiza	1982	2006	6	0	6	III
28	Pumire	1962	2006	29	0	29	II
29	Q. Camiña 3km. A. Arriba de Tarcavire	2006	2013	7	0	7	III
30	Q. Tarapacá en Sibaya	2004	2013	9	0	9	III
31	Sagasca	1977	2010	21	3	18	II
32	Salar Huasco	1981	1982	1	0	1	III
33	Sillillica	2011	2013	2	0	2	III
34	Ujina	1973	2013	39	6	33	I

En el anexo 2 se encuentran las series cronológicas de los registros de precipitación media anual en las estaciones meteorológicas DGA vigentes y no vigentes, como el gráfico mostrado en la Figura 2.5.

En la Figura 2.4 se puede observar un ejemplo de análisis del comportamiento de las precipitaciones en función de la frecuencia en que ocurren dichas precipitaciones, las cuales presentan distribuciones no normales.

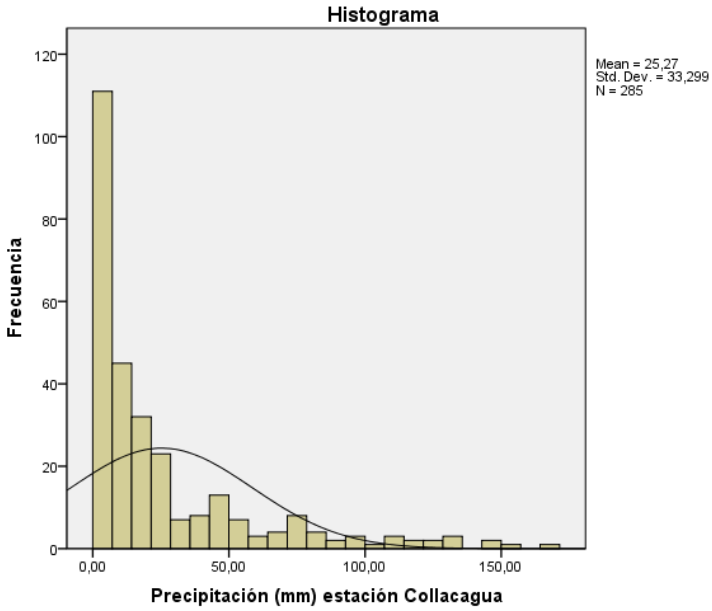


Figura 2.4. Frecuencia de las precipitaciones en la estación de Coscaya.

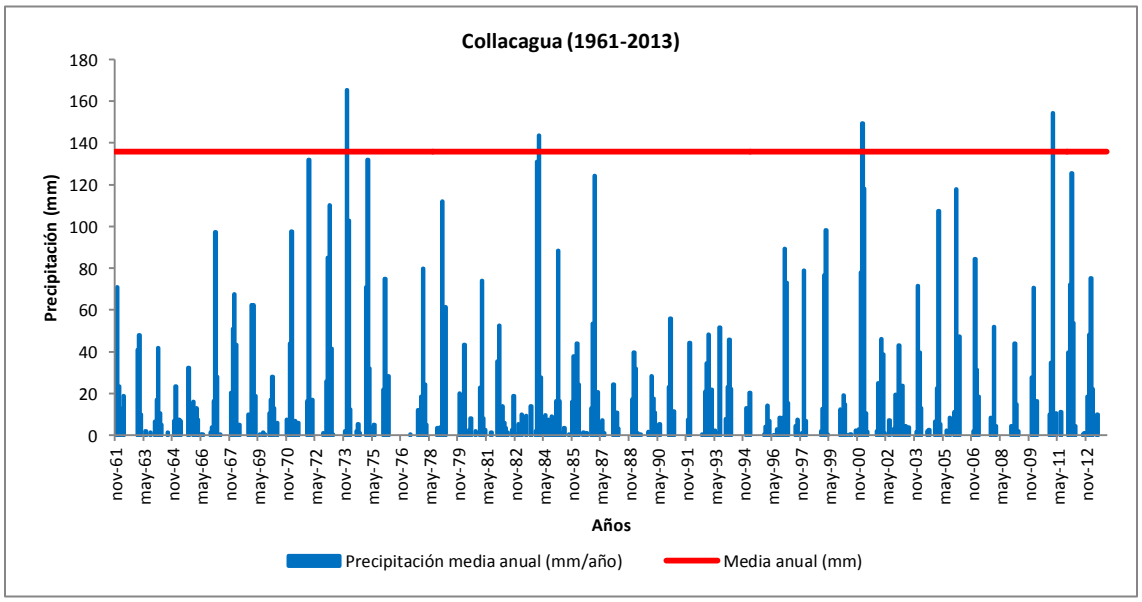


Figura 2.5. Serie cronológica de los registros de precipitación media anual en la estación de Collacagua. Ejemplo de aplicación.

2.4.1. Análisis de la precipitación versus Altura

Se realizó el análisis de las precipitaciones versus la altitud de todas las estaciones de la Región de Tarapacá, tomando en cuenta solo aquellas con una longitud de datos mayor o igual a 10 años. Como se puede observar en la Figura 2.6, la relación altitud versus precipitación media anual,

sigue una curva logarítmica, con una gran pendiente, y por lo tanto una gran variación, a bajas altitudes; a partir de los 3.500 aproximadamente la pendiente es menor, siendo más estable esta relación. Además, se aprecia que las estaciones ubicadas sobre los 3.500 m s.n.m registran una precipitación media anual cercana a los 135 mm anuales, mientras que las ubicadas bajo esta cota presentan valores significativamente menores y que bordean los 25 mm anuales. Es decir, a medida que aumenta la altura aumenta la precipitación, hasta valores estables que rondan los 135 mm anuales.

Sin embargo, eliminando aquellos puntos que más se alejan de la curva logarítmica y aquellas estaciones con registros inferiores a 2 años (Figura 2.7), se aprecia que 22 estaciones ofrecen una buena correlación con la altitud con un $R^2 = 0.9066$.

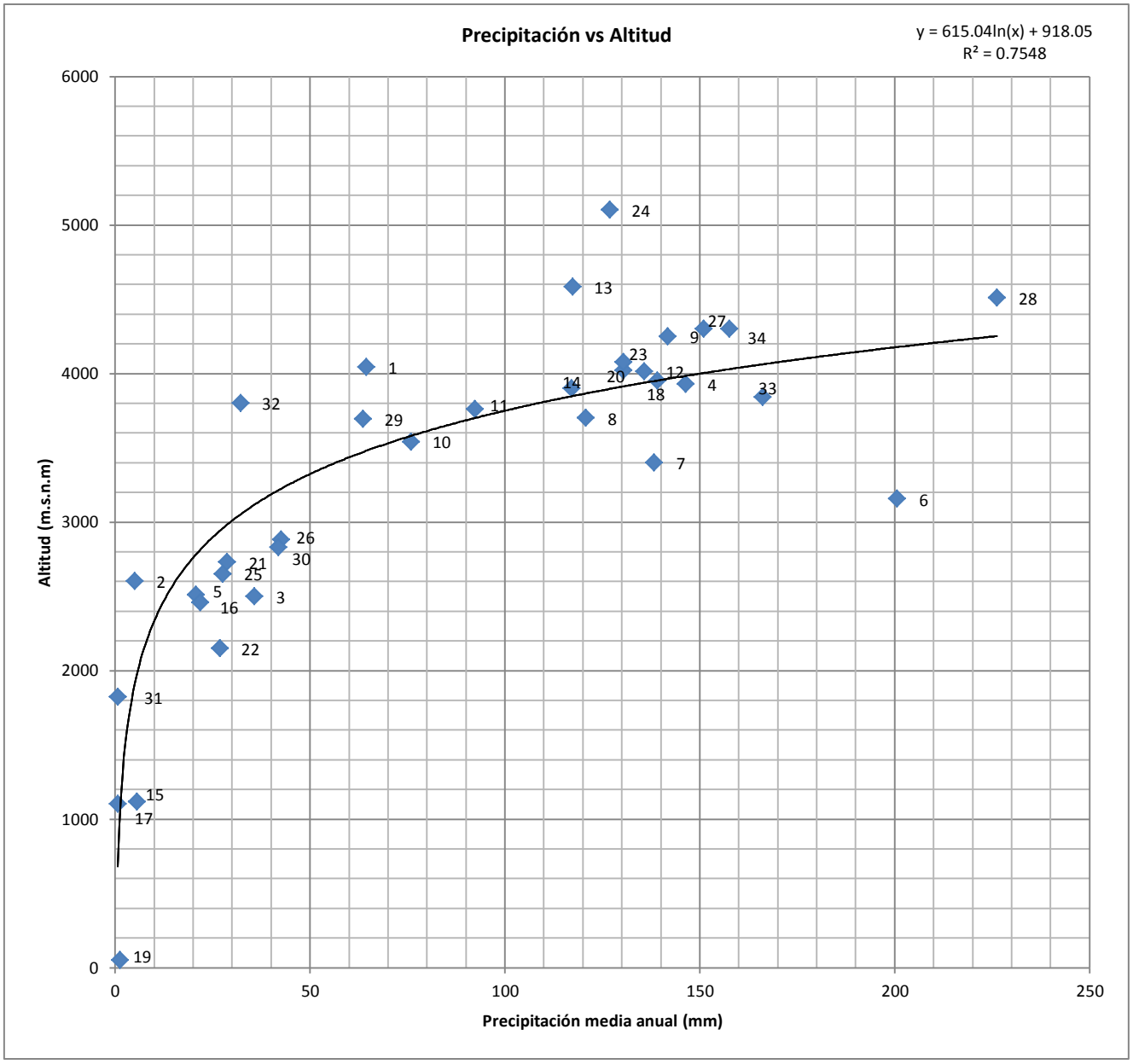


Figura 2.6. Comportamiento de la precipitación media anual versus la altitud en las 34 estaciones DGA de la Región de Tarapacá.

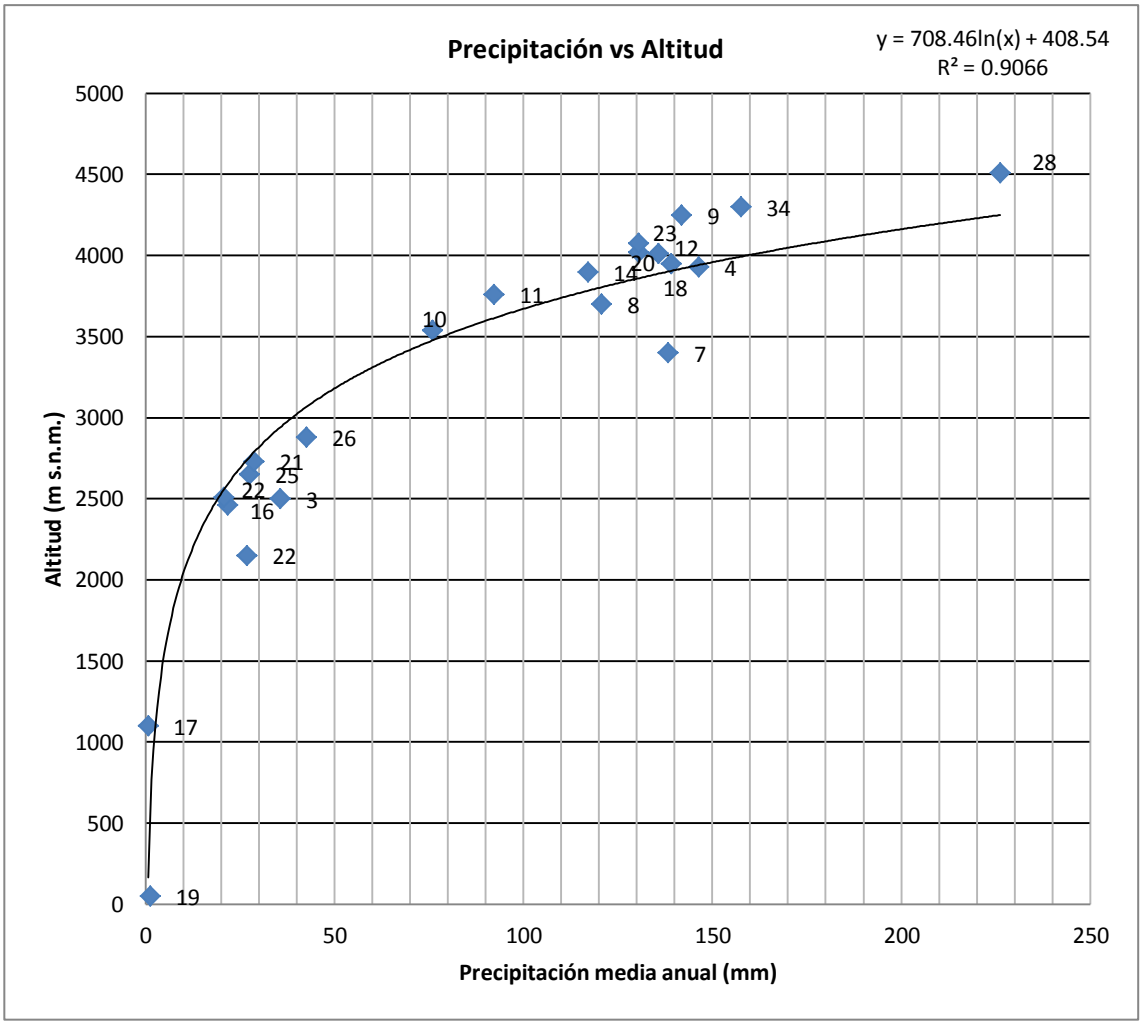


Figura 2.7. Comportamiento de la precipitación media anual versus la altitud en las 22 estaciones DGA de la Región de Tarapacá que mejor se correlacionan.

Es importante mencionar, que, en la zona altiplánica, el MOP (2012) ha identificado áreas en las que la precipitación no está siendo registrada. Es el caso del sector comprendido entre las estaciones Enquelca y Chusmiza o la zona entre las estaciones Coyacagua y Coposa (Subcuenca Salar del Huasco), considerando además que es una zona de mayor altitud por lo que, de acuerdo al gradiente de altura, se registran mayores precipitaciones (PUC, 2009). Por lo tanto, es necesario densificar la red de monitoreo en aquellas zonas donde la altitud es igual o superior 3.000 m s.n.m. (ver recuadro rojo intermitente en la figura).

2.4.2. Análisis del porcentaje de lluvia anual por mes

Según el PUC (2009), en el norte de Chile se observa que el 80% de la precipitación anual está concentrada en el periodo de diciembre a marzo, la cual tiene un carácter convectivo donde el alto contenido de humedad del aire juega un papel importante en el aporte de energía en forma latente (Fuenzalida & Rutillant, 1986 en Lictevout *et al.,* 2013).

De acuerdo a los gráficos de distribución porcentual de la lluvia anual por mes de las estaciones vigentes y no vigentes de la DGA en la Región de Tarapacá (ver anexo 3), **se confirma que más del 90% de la precipitación anual está concentrada durante los meses diciembre-marzo, con máximas precipitaciones en los meses de Enero y Febrero.**

A menores altitudes, como en el caso de Iquique o Huara, la media oscila entre 0,70 y 1,28 mm (DICTUC, 2006) y un alto porcentaje de estas precipitaciones ocurre en el mes de julio. A medida que aumenta la altura, también aumenta el efecto del denominado "Invierno Boliviano o Altiplánico" (diciembre-marzo). No obstante, la estación de Puchultiza tiene un comportamiento diferente con un registro de precipitaciones durante casi todos los meses del año, debido a la gran amplitud térmica de esa zona.

Por otro lado, las estaciones de Iquique y Poroma presentan un registro de precipitaciones en el mes de mayo.

En las Figuras 2.8 a 2.11, se presenta un ejemplo del análisis porcentual de la lluvia anual por mes. En el anexo 3 se presentan los porcentajes de lluvia mensual de todas las estaciones.

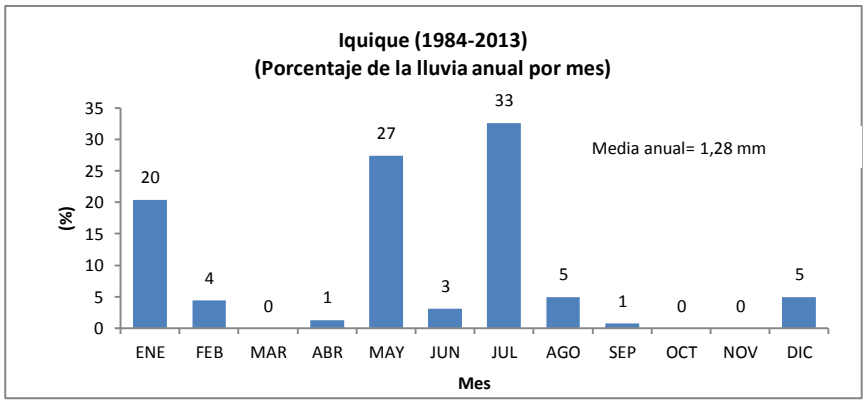


Figura 2.8. Análisis porcentual de la lluvia anual por mes en la estación pluviométrica Iquique (Zona Costera).

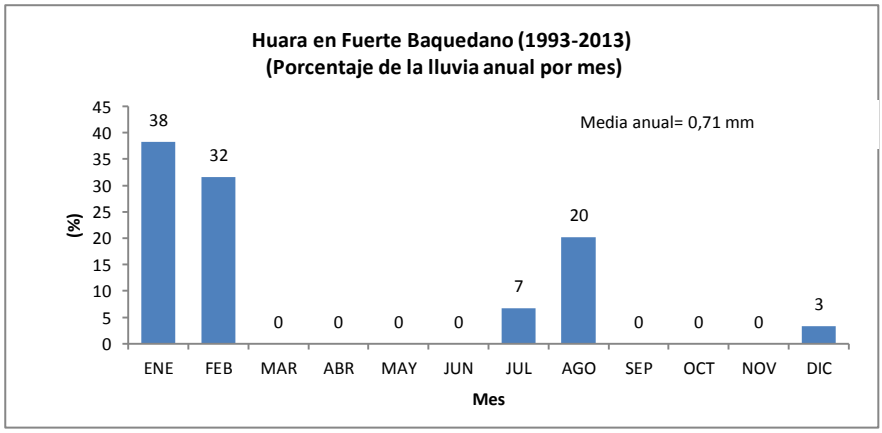


Figura 2.9. Análisis porcentual de la lluvia anual por mes en la estación meteorológica Huara en Fuerte Baquedano (Depresión Intermedia).

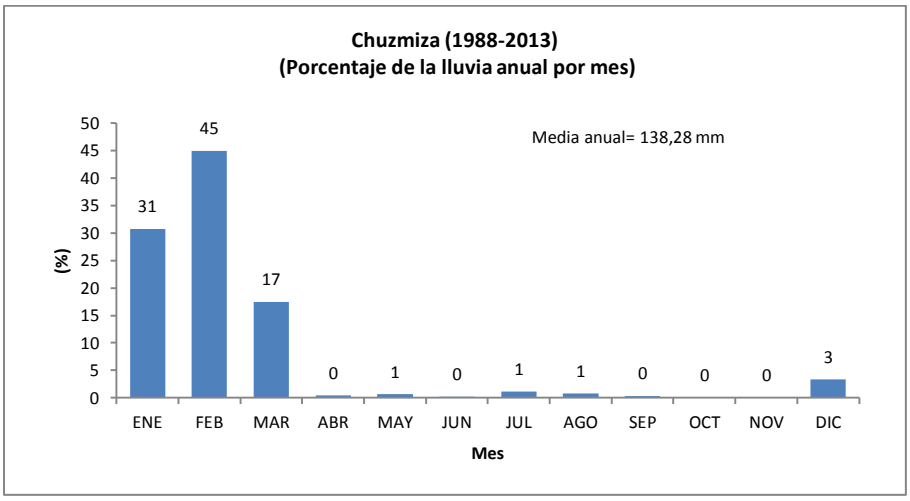


Figura 2.10. Análisis porcentual de la lluvia anual por mes en la estación pluviométrica Chuzmiza (Zona Precordillera).

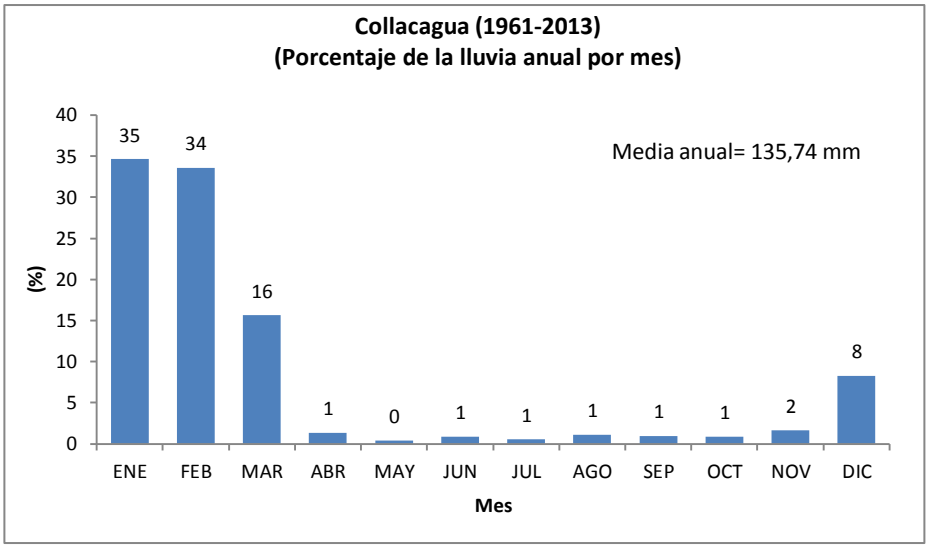


Figura 2.11. Análisis porcentual de la lluvia anual por mes en la estación meteorológica Collacagua (Zona Altiplánica)

2.4.3. Análisis de Correlación entre Precipitaciones de distintas estaciones

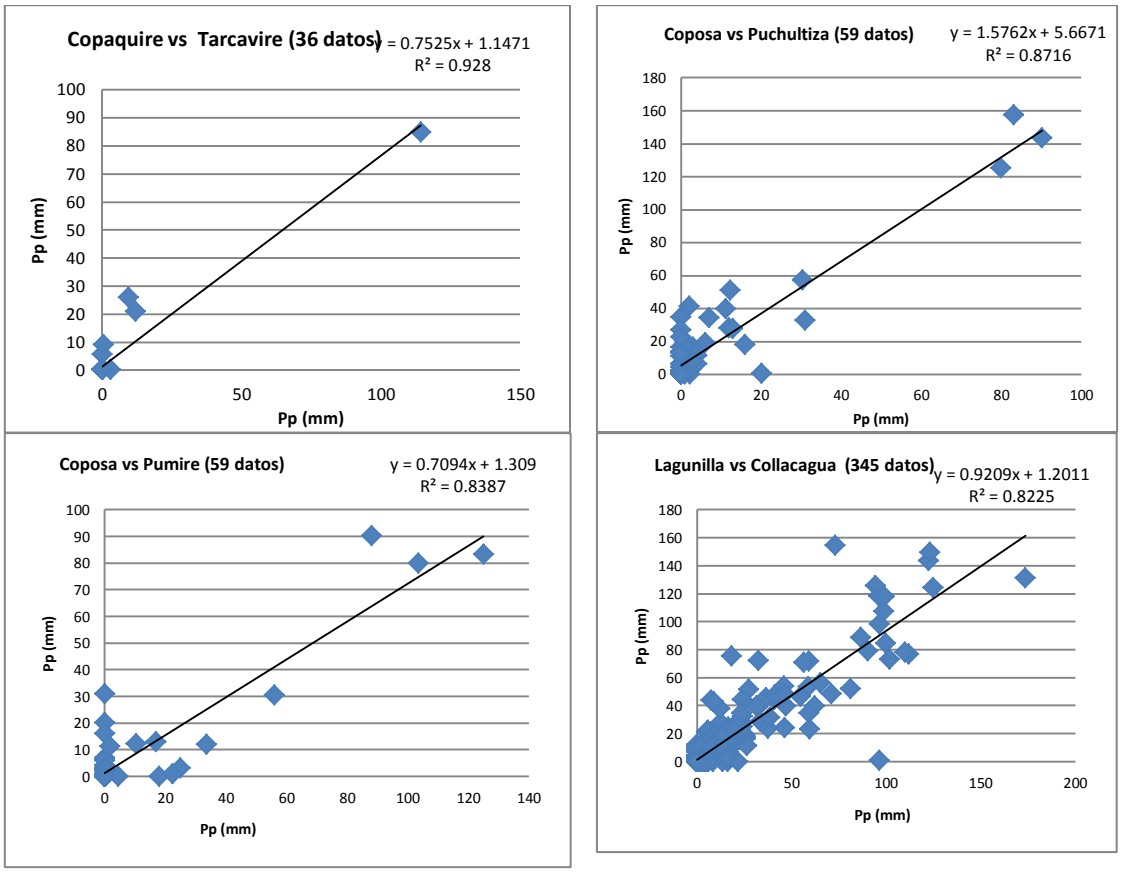
Una vez analizado el comportamiento de la precipitación con la altura y el porcentaje de lluvia por mes es necesario analizar la correlación entre estaciones. Con ello, podemos determinar la estacionalidad de las precipitaciones y relaciones entre una estación y otra respecto a su ubicación. Además, este análisis es útil para determinar precipitaciones de diseño cuando se

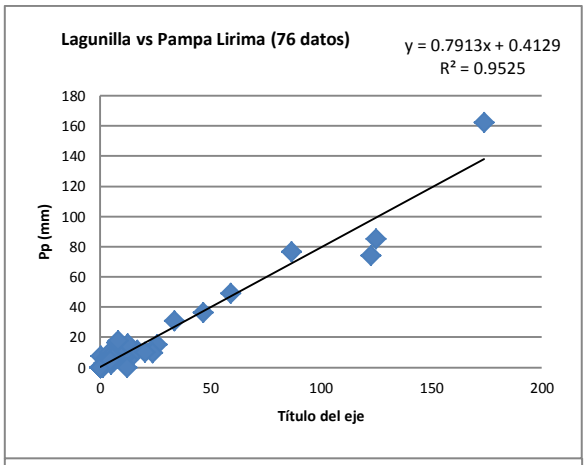
quiere proyectar obras hidráulicas como puentes, embalses, diques, muros de protección de cauces y otros.

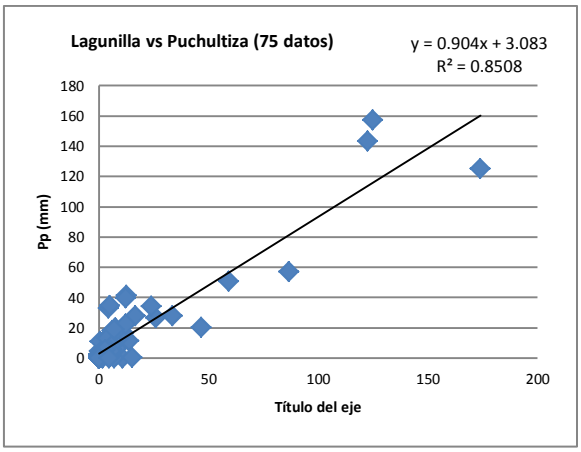
En la Figura 2.12 se muestra el conjunto de estaciones que presentan la mejor correlación entre sus datos, considerando un valor de R^2 mayor a 0,8 y con una correspondencia mínima de 36 datos (3 años). Esto es producto de una matriz de análisis donde se realizó la correlación entre todas las estaciones DGA.

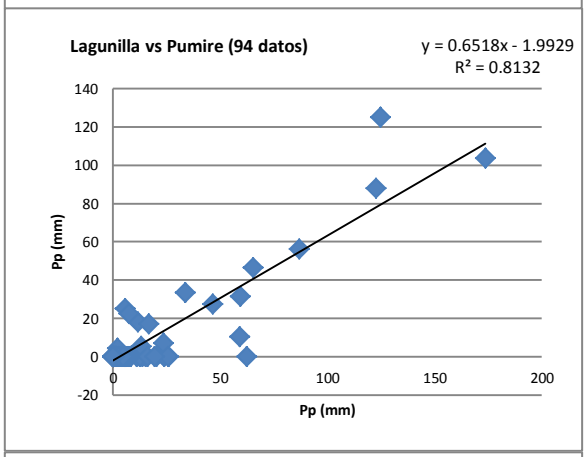
Del conjunto analizado, queremos señalar que:

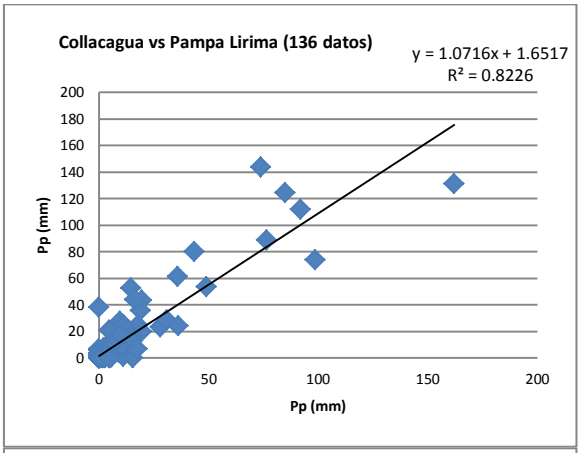
- La estación de Collacagua presenta una buena correlación con las estaciones de Lagunillas (R^2= 0,822; 345 datos), Pampa Lirima (R^2= 0,82, 136 datos) y Puchultiza (R^2= 0,899; 76 datos), las cuales están separadas por respectivamente 13, 21 y 70 km aproximadamente y 20 a 70 m de diferencia de altitud (sobre los 4000 m)..
- Las estaciones que presentan una baja correlación (R^2 < 0,5) están influenciadas por algunos factores tales como: localidad y espacialidad de las precipitaciones, ubicación de la estación y representatividad de los datos.

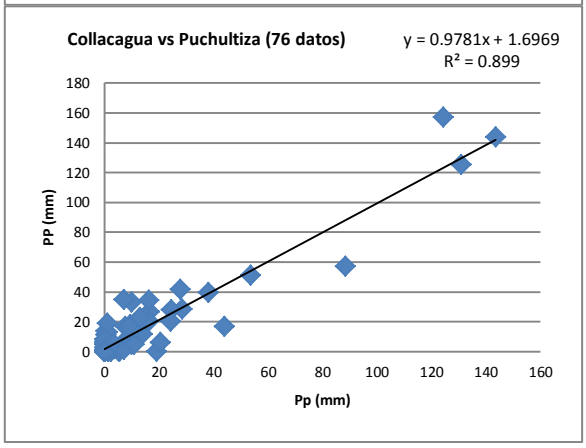


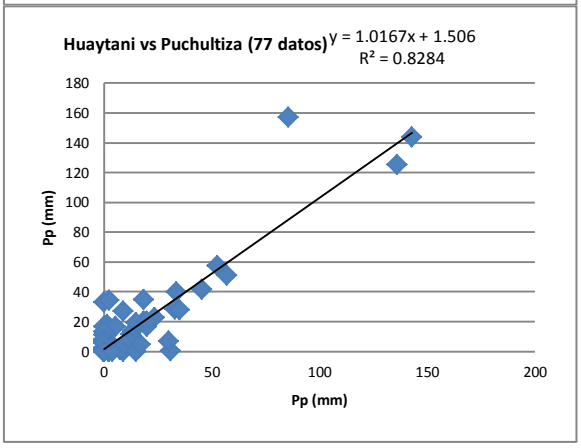

Lagunilla vs Pampa Lirima (76 datos)
y = 0.7913x + 0.4129
R² = 0.9525
Pp (mm)
Título del eje


Lagunilla vs Puchultiza (75 datos)
y = 0.904x + 3.083
R² = 0.8508
Pp (mm)
Título del eje


Lagunilla vs Pumire (94 datos)
y = 0.6518x - 1.9929
R² = 0.8132
Pp (mm)
Pp (mm)


Collacagua vs Pampa Lirima (136 datos)
y = 1.0716x + 1.6517
R² = 0.8226
Pp (mm)
Pp (mm)


Collacagua vs Puchultiza (76 datos)
y = 0.9781x + 1.6969
R² = 0.899
PP (mm)
Pp (mm)


Huaytani vs Puchultiza (77 datos)
y = 1.0167x + 1.506
R² = 0.8284
Pp (mm)
Pp (mm)

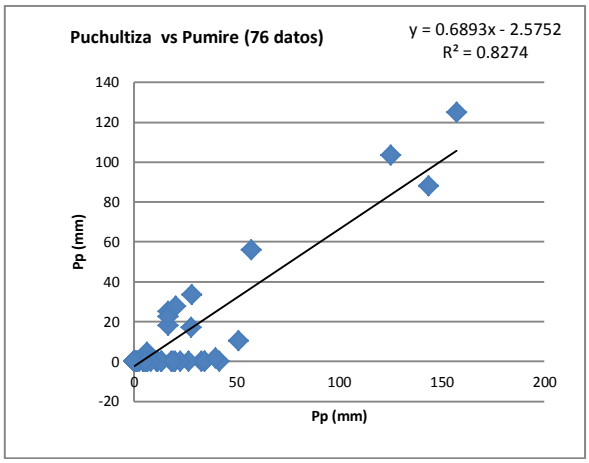


*Figura 2.12. Estaciones que mejor se correlacionan (R^2 > 0,8)**

**Se consideró un R^2> 0,8 para lograr una mayor representatividad en el análisis de las correlaciones al criterio de los autores*

La Tabla 2.7 recopila las estaciones que muestran una correlación de las precipitaciones con R^2mayor o igual a 0,80. Como se aprecia en dicha tabla, todas las estaciones que presentan una mejor correlación están sobre los 3500 m s.n.m, siendo la estación con menor altitud Copaquire con una altitud de 3540 m s.n.m.

Tabla 2.7. Estaciones con correlación versus altitud R^2>0,8

Estaciones		Altitud A (m)	Altitud B (m)	Δ Altitud (m)	Distancia Aprox. (km)	Datos	R^2
Estación A	Estación B						
Copaquire	Tarcavire	3540	3694	154	204.5	36	0.928
Coposa	Puchultiza	3760	4300	540	142.2	59	0.8716
Coposa	Pumire	3760	4510	750	180	59	0.8387
Lagunilla	Collacagua	4020	4013	7	12.7	345	0.8225
Lagunilla	Pampa Lirima	4020	4076	56	9	76	0.9525
Lagunilla	Puchultiza	4020	4300	280	57.4	75	0.8508
Lagunilla	Pumire	4020	4510	490	96.2	94	0.8132
Collacagua	Pampa Lirima	4013	4076	63	21	136	0.8226
Collacagua	Puchultiza	4013	4300	287	69.7	76	0.899
Huaytani	Puchultiza	3950	4300	350	38.4	77	0.8284
Puchultiza	Pumire	4300	4510	210	39.5	76	0.8274

Por lo tanto, al existir una menor variación en las precipitaciones conforme se aumenta la altitud, las estaciones de mayor altitud están más correlacionadas. Es importante también resaltar que las correlaciones más representativas son aquellas que interpolan un mayor volumen de datos siempre y cuando exista una relación directa entre los datos analizados. Por esta razón las estaciones que tienen mejor correlación son aquellas ubicadas en el Altiplano, pero tres de ellas están suspendidas actualmente (Pampa Lirima, Puchultiza y Pumire). Es importante mencionar que: a) las precipitaciones en la región son muy locales, pues estaciones ubicadas a poca distancia registran precipitaciones muy diferentes (ejemplo estaciones de Colchane y Huaytani); b) hay

zonas estratégicas que carecen de estaciones (ejemplo: cabeceras de cuencas y zona de Precordillera), la ubicación de las estaciones y la falta de series cronológicas extensas, etc. Sin embargo, existen otros factores que también afectan las precipitaciones, tales como: el clima de estepa de altura (ETH), la temperatura, presión atmosférica, los vientos, el relieve, la latitud, la orografía, las oscilaciones de la niña y el niño, la humedad relativa, la insolación, los vientos y a baja escala la vegetación.

Dado lo expuesto anteriormente, en este análisis no se cuantifica el gradiente de la precipitación con relación a la altura, ya que esto demanda de un estudio más integrado y de una mejor cobertura de estaciones meteorológicas que la existente. Sin embargo, ya en Lictevout *et al.* (2013) se analizó lo siguiente: "Los gradientes promedio de precipitación se han estimado en 3,5 mm cada 100 m de altitud entre los 2.000 y 3.000 m s.n.m. y 20 mm por cada 100 m sobre los 3.000 m s.n.m. Se observa que, para estaciones cercanas, el valor del coeficiente de correlación varía entre 0,2 y 1,0 evidenciando una variabilidad espacial del fenómeno (PUC, 2009). No obstante, Chadwick *et al.* (2012) demuestran que, a nivel local (cuenca Salar de Coposa) el gradiente es mayor que el gradiente regional para alturas mayores a 3.500 m s.n.m.: 16 mm/año cada 100 m de altura. Este gradiente local de precipitación se calculó en base a una densa red de estaciones meteorológicas de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi en la cuenca Salar de Coposa, aunque con registros de corta duración. La diferencia con el gradiente regional puede explicarse por la distorsión causada por el efecto de la altitud".

Vargas *et al.* (2000) identifica otro factor importante que afecta la precipitación en la región, el *Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental (APSO),* que somete gran parte del margen oeste de América del Sur a una gran estabilidad atmosférica, originada en la subsidencia de aire seco y cálido que contrasta con el aire marino fresco y húmedo (figura 2.9). Las tormentas de invierno se generan por actividad frontal de aire polar con aire cálido proveniente del Pacífico y del Amazona y las tormentas de verano por actividad convectiva en masas de aire provenientes de la cuenca amazónica (MOP, 2012).

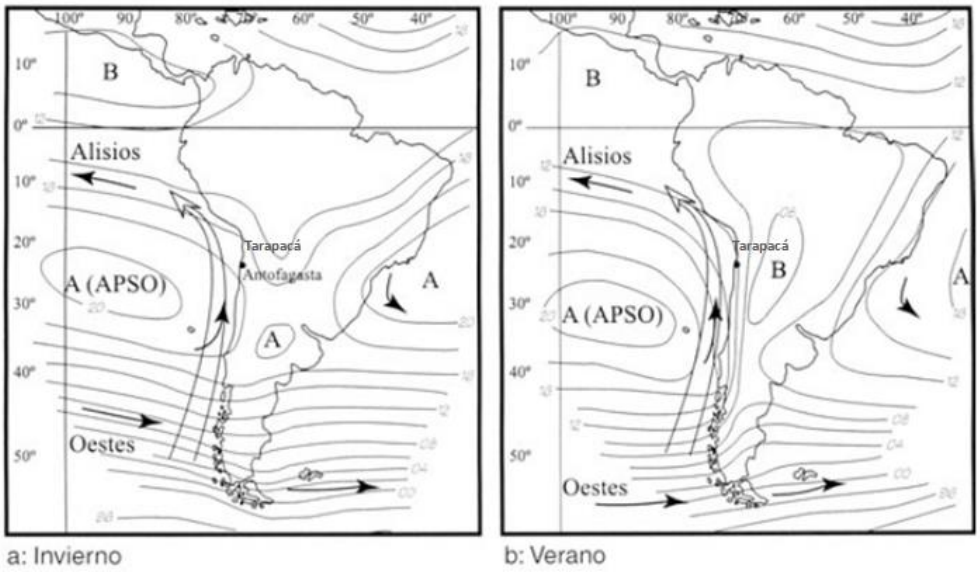


*Figura 2.9. Distribución de la presión atmosférica superficial (a nivel del mar) promediada para los meses de: a) invierno austral (junio, julio, agosto), y b) verano austral (diciembre, enero y febrero) (20=1.020 mb, 96=960 mb . **A:** zona de divergencia superficial, o de alta presión; **B:** zona de convergencia superficial, o de baja presión). Las flechas negras indican la dirección del viento geostrófico. La flecha vacía indica la ubicación aproximada de la corriente oceánica fría de Humboldt. Fuente: Vargas et al. (2000).*

Sin embargo, durante la visita a cada estación meteorológica de la red de monitoreo DGA, hemos notado que en un gran número de estaciones, existen una series de factores que no permiten una buena captación y registro de los datos de precipitación, tales como: la ubicación de las estaciones (la mayoría están instaladas en el fondo de las quebradas), la correcta distribución de los elementos en la estación, la verticalidad y horizontalidad de los pluviómetros, interferencia por árboles, cables eléctricos, laderas, etc. Estos factores influyen en el dato final, subestimando la precipitación real.

En el anexo 1 se presentan los problemas encontrados en cada estación visitada.

2.4.4. Precipitación versus Caudal

Según la OMM (1994), el ciclo hidrológico es continuo y sus interconexiones permiten la transferencia parcial de la información obtenida en una parte del ciclo hacia otra. Por ejemplo, los registros de precipitación en una cuenca de drenaje o cerca de ella permiten la reconstrucción de registros de flujo fluvial durante períodos en los que funcionan mal los aforos de caudal, si ha sido calibrado un modelo válido de precipitación–escorrentía durante el tiempo en que todos los medidores estuvieron funcionando bien. Es decir, los eventos de precipitación deberían reflejarse en un aumento del caudal en el río.

Sin embargo, debido a la alta intensidad y torrencialidad de las precipitaciones, el corto recorrido de los ríos, la inestabilidad de los lechos y las altas pendientes en las quebradas (Brown & Saldivia,

2010), los tiempos de concentración de caudales resultan menores, originando hidrogramas de corta duración cuya escorrentía provoca erosión del suelo y crecidas intensas con un volumen importante de sedimentos que producen aluviones y remoción en masa que afectan a la población local. Además, faltan estaciones fluviométricas ubicadas en las salidas de las cuencas. Las correlaciones actuales de lluvia y caudal (R^2) están por debajo de 0,50. Esto significa que **no hay una correlación representativa en los datos de precipitación y escurrimiento registrado en las estaciones de monitoreo de la DGA.**

2.5. Análisis por estación

Los problemas principales encontrados en las estaciones DGA visitadas y que son detallados en el anexo 1, se resumen a continuación:

- **Verticalidad y horizontalidad del pluviómetro**: Cuando la estación no está totalmente vertical y horizontal o "no está a 90 grados"; presenta un cierto grado de inclinación que tiene que corregirse para tener una mejor captación de la lluvia. Esto puede provocar un una subestimación de las precipitaciones. **Existen 7 estaciones de las 25 vigentes que presentan este tipo de problema: Mocha, Collacagua, Huaytani, Chuzmiza, Enquelga, Poroma y Parca**.
- **Obstáculos en la estación:** Cuando existe una alta interferencia alrededor de la estación, debido a obstáculos como cables y postes eléctricos, laderas, árboles, muros y otros que dificultan la captación de la lluvia. Esto puede provocar una subestimación de las precipitaciones. **Existen 8 estaciones de las 25 vigentes que presentan este tipo de problema: Colchane, Camiña, Chiapa, Mamiña, Chuzmiza, Guatacondo, Enquelga y Sibaya**.
- **Estaciones ubicadas en el fondo de las quebradas, con presencia de cerros que provocan una "sombra"** e interfieren en la cantidad de lluvia que puede captar la estación: Puede provocar una subestimación de las precipitaciones. **Existen 7 estaciones de las 25 vigentes que presentan este tipo de problema: Mocha, Cancosa, Guatacondo, Sibaya, Camiña, Parca y Copaquire**.
- **Instrumentación y tecnología:** Cuando las estaciones presentan diferentes tipos de tecnologías para la recolección de datos. Este problema se agudiza cuando las tecnologías son muy diferentes una de otras. Como se explicó anteriormente, **todavía existen ocho estaciones manuales con un observador meteorológico,** frente a 17 estaciones con registro digital de datos, de las cuales cuatro tienen transmisión satelital. Aparte de no existe una homogeneidad coherente en el tipo de tecnología utilizada en la red de estaciones de monitoreo, la recogida de datos en forma manual introduce mucha incertidumbre en el dato registrado.

Al contrario, las estaciones pertenecientes a otras instituciones tanto privadas como académicas no presentan este tipo de problemas. Es el caso de Aguas verdes y Coposa (Compañía Minera Doña Inés Collahuasi), La Tirana, Apamilca, Carora y Pica (Universidad Arturo Prat) y Salar del Huasco (Centro de Estudios de Humedales)

En el anexo 4 se presentan las fichas por estación y las principales observaciones y propuestas de las visitas realizadas las estaciones DGA. Las otras redes que se visitaron y que registran datos de precipitación en la región se encuentran en el anexo 1.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE MONITOREO FLUVIOMÉTRICA

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE MONITOREO FLUVIOMÉTRICA

3.1. Descripción General

El objetivo principal de la red fluviométrica o aforo de caudales es obtener información sobre la disponibilidad de recursos hídricos superficiales, su distribución geográfica y su variabilidad en el tiempo (OMM, 1994). En este sentido, la red de monitoreo fluviométrica oficial de la región de Tarapacá es operada por la Dirección General de aguas (DGA). Esta red consta de 12 estaciones fluviométricas vigentes en las cuales se realizan dos tipos de mediciones: *aforo manual* mediante molinete hidrométrico y *sistemático* a través de sensores de nivel que registran las alturas de agua de forma automática, que luego se asocian a una curva de descarga. Sin embargo, existe un total de 25 estaciones fluviométricas de la DGA que presentan un registro histórico de datos fluviométricos (caudal, sedimentos, alturas de agua superficial, etc.), las cuales se han organizado en la Figura 3.1 y Tabla 3.1.

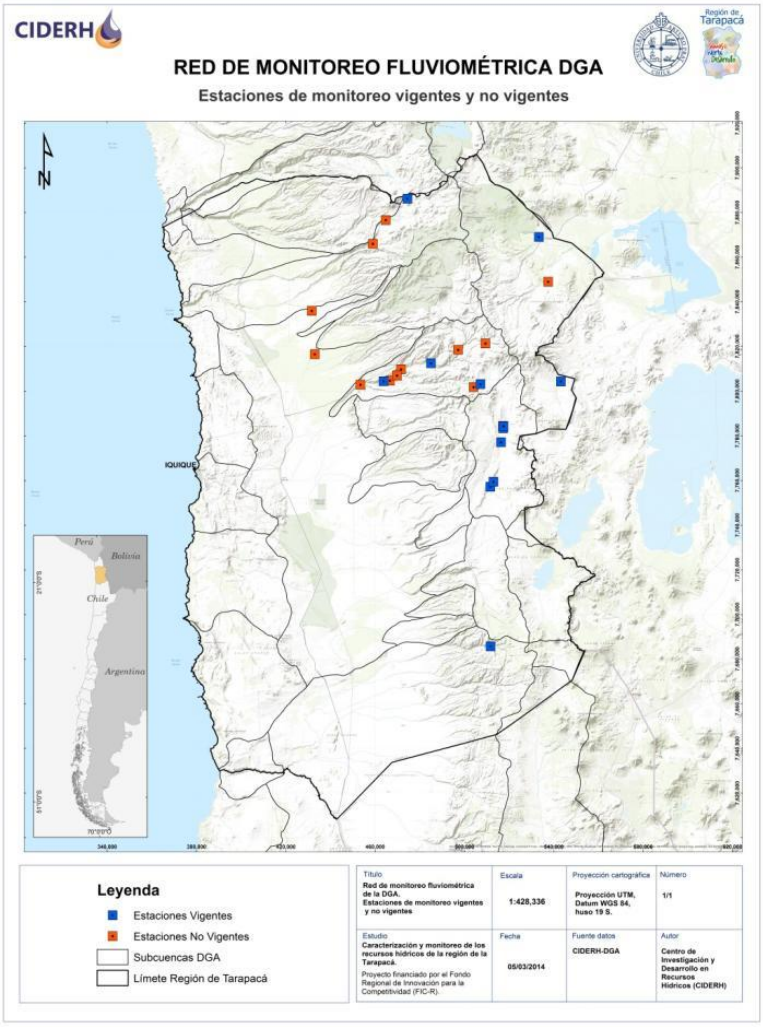


Figura 3.1. Estaciones fluviométricas vigentes y no vigentes de la DGA.

Tabla 3.1. Conjunto de estaciones DGA con registro histórico de datos hidrométricos.

Nº	Estación	Coordenadas		Altitud	Serie de datos	Estado actual
		UTM E	UTM N			
1	Q. CAMIÑA 3 KM. ARRIBA DE TARCAVIRE	474443	7886163	3848	01/10/1994 - 30/06/2004	Vigente
2	Q. TARAPACA EN LAONSANA	463738	7804430	1811	01/022003 - 31/10/2013	Vigente
3	Q. TARAPACA EN SIBAYA	484992	7812506	2855	01/10/1994 - 31/10/2013	Vigente
4	Q. AROMA EN PALCA	509401	7821327	4198	01/02/1929 - 30/05/2002	Suspendida
5	Q. CAMIGNA EN PACAGUA	431613	7835954	1630	01/09/1928 - 30/10/1931	Suspendida
6	Q. CAMIGNA EN UMIGNA	464752	7876623	2580	01/06/1962 - 30/06/1965	Suspendida
7	Q. CAMIÑA EN ALTUSA	458984	7865990	2543	01/10/1929 - 30/10/2006	Suspendida
8	Q. PIGA EN OJOS DE AGUA	517224	7784435	3920	01/11/1959 - 30/04/1965	Suspendida
9	Q. TARAPACA EN MOCHA	471601	7809751	2168	01/08/1928 - 30/01/1931	Suspendida
10	Q. TARAPACA EN MULLI-MULLI	497145	7818501	3961	01/04/1931 - 30/05/2002	Suspendida
11	Q. TARAPACA EN PACHICA	453378	7802888	1616	01/12/1928 - 30/11/1930	Suspendida
12	Q. TARAPACA EN PUCHURCA	466637	7804701	1982	01/09/1928 - 30/05/2002	Suspendida
13	R. AROMA EN ALAGNUSCA	432939	7816563	1363	01/09/1928 - 30/08/1931	Suspendida
14	R. BATEA EN CONFLUENCIA	517346	7783373	3903	01/08/1980 - 31/10/2013	Vigente
15	R. CANCOSA EN EL TAMBO	543152	7804320	3893	01/10/1994 - 31/10/2013	Vigente
16	R. CARIQUIMA EN CARIQUIMA	537457	7848968	4000	01/10/1994 - 30/06/2004	Suspendida
17	R. COLLACAGUA EN PEÑABLANCA	516363	7777131	3856	01/09/1980 - 31/10/2013	Vigente
18	R. COSCAYA EN PAMPA LIRIMA	504089	7801793	3540	01/12/1975 - 30/06/1995	Suspendida
19	R. COSCAYA EN SAITOCO	507123	7803181	3970	01/06/1985 - 31/10/2013	Vigente
20	R. HUATACONDO EN COPAQUIRE	511691	7685700	3526	01/08/1980 - 31/10/2013	Vigente
21	R. ISLUGA EN BOCATOMA	533335	7869011	3744	01/08/1994 - 31/10/2013	Vigente
22	R. PIGA EN COLLACAGUA	517458	7784315	3915	01/09/1978 - 31/10/2013	Vigente
23	R. TARAPACA EN MINA SAN JUAN	469765	7806932	2079	01/12/1984 - 30/01/2004	Suspendida
24	V. EL ERMITAÑO EN LAGUNA HUASCO	511565	7757187	3787	01/10/1994 - 31/10/2013	Vigente
25	V. HUASCO NORTE LAGUNA HUASCO	512993	7759429	3792	01/10/1994 - 31/10/1994	Vigente

Nota: Q= Quebrada; R= Río; V= Vertiente

El molinete hidrométrico utilizado por la DGA para la medición manual del caudal es un instrumento que tiene una hélice o rueda de cazoletas, que gira al introducirla en una corriente de agua. Dicho molinete es de tipo de taza cónica que gira sobre un eje vertical. La DGA realiza las mediciones de caudal de acuerdo a los parámetros y normativa para molinete hidrométrico propuesta por la Organización Mundial de Meteorología (OMM, 1994). Sin embargo, durante las visitas a terreno con el equipo de la Unidad de Hidrología de la DGA Tarapacá, se ha observado que el molinete presenta ciertos daños en las hélices que inducen errores en las mediciones.

La red de monitoreo actual de la región no está registrando bien los eventos hidrometeorológicos extremos, lo cual dificulta la realización de modelos de predicción de crecidas e información sobre amenazas y vulnerabilidad de la población localizada en las quebradas de las cuencas, principalmente (Payano, 2013): Camiña, Tarapacá, Quipisca, Quisma y Huatacondo. Según MOP (2011), la razón se encuentra en el hecho que las estaciones están diseñadas para la generación de una estadística normal, es decir para cubrir un alto porcentaje de los eventos que se producen en el cauce. Aunque el conjunto de estaciones fluviométricas fueron diseñadas para controlar y

registrar caudales hasta períodos de retorno de 70 años aproximadamente (MOP, 2011), sólo las estaciones de Piga en Collacagua, Collacagua en Peña Blanca, Coscaya en Pampa Lirima (suspendida) y Huataconddo en Copaquire han logrado medir algunos eventos de crecidas del orden de 0,37; 0,41; 0,55 y 1,38 m^3/s en los años 1984 y 2001. De hecho, las estaciones vigentes de Laonzana, Camiña en Tarcarvire, Sibaya y Copaquire han sido destruidas o dañadas por eventos de crecida; por lo cual, necesitan nuevos diseños, infraestructuras y emplazamientos.

Las estaciones fluviométricas de la DGA en la región no han sido diseñadas ni para el control de crecidas ni la alerta temprana, sino que su instalación ha sido impulsada por la necesidad de información en un lugar específico, priorizando sólo algunos sectores: es el caso de la medición de las concentraciones de agua y sedimentos en Laonzana; de la medición del caudal de vertientes en Huasco Norte y Ermitaño; medición del caudal de un río internacional en el caso de Cancosa; o del control de sequía en Coscaya (Consulta realizada por CIDERH a la DGA el día 04 de marzo 2014).

3.2. Instrumentación y Mediciones

La frecuencia anual de medición manual del caudal (aforo) en las estaciones fluviométricas es de 6 veces al año (cada 2 meses se realiza una medición), salvo en las estaciones *Coscaya en Saitoco* por el control de sequía del sector y *Laonzana* por el control de sedimentos; en estos dos casos, la frecuencia es de 12 veces al año (una medición por mes) (Tabla 3.2).

En la Tabla 3.3 y Figura 3.2 se presenta la cantidad de aforos realizado en cada estación fluviométrica vigente de la DGA:

- La estación fluviométrica que presenta el mayor número de aforos (1978-2013) es la estación de Coscaya en Saitoco con 278 aforos, seguido de las estaciones de Piga en Collacagua con 272 aforos (35 años de datos), Collacagua en Peñablanca (270 aforos), Batea en Confluencia (269 aforos) y Huatacondo en Copaquire (241 aforos).
- Es importante señalar que sólo tres (3) estaciones tienen transmisión automática por satélite: Colchane, Quebrada de Camiña en Tarcavire y Quebrada de Tarapacá en Sibaya.

Tabla 3.2. **Frecuencia de mediciones mensual y anual de las estaciones fluviométricas DGA.**

Estación	Frecuencia mensual*												Frecuencia Anual*		
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	C	Q	S
Rio Isluga de Bocatoma	Q		Q/C		Q		Q/C		Q		Q/C		3	6	
Rio Cancosa en el Tambo	Q		Q/C		Q		Q/C		Q		Q/C		3	6	
Rio Piga en Collacagua		Q		Q/C		Q		Q/C		Q		Q/C	3	6	
Rio batea en Confluencia		Q		Q		Q		Q		Q		Q		6	
Rio Collacagua en Peñablanca		Q		Q/C		Q		Q/C		Q		Q/C	3	6	
Vertiente Huasco El Ermitaño	Q		Q		Q		Q		Q		Q			6	
Vertiente Huasco Norte	Q		Q		Q		Q		Q		Q			6	
Q. Camiña 3 km arriba en Tarcavire		Q		Q		Q		Q		Q		Q		6	
Rio Coscaya en Saitoco	Q	Q	Q	Q/C	Q	Q	Q	Q/C	Q	Q	Q	Q/C	3	12	
Qda. Tarapaca en Sibaya	Q		Q		Q		Q		Q		Q			6	
Qda. Tarapaca en laonsana	Q/S	Q/S	Q/S/C	Q/S	Q/S	Q/S	Q/S/C	Q/S	Q/S	Q/S	Q/S/C	Q/S	3	12	12
Rio Huatacondo en Copaquire		Q		Q/C		Q		Q/C		Q		Q/C	3	6	

***Simbología**

Q= Caudal; C= Calidad de Agua en el río; S= Sedimentos presentes en el agua.

Fuente: Elaborado a partir de consulta DGA durante febrero y 2014. Programación labores hidrológicas DGA año 2014.

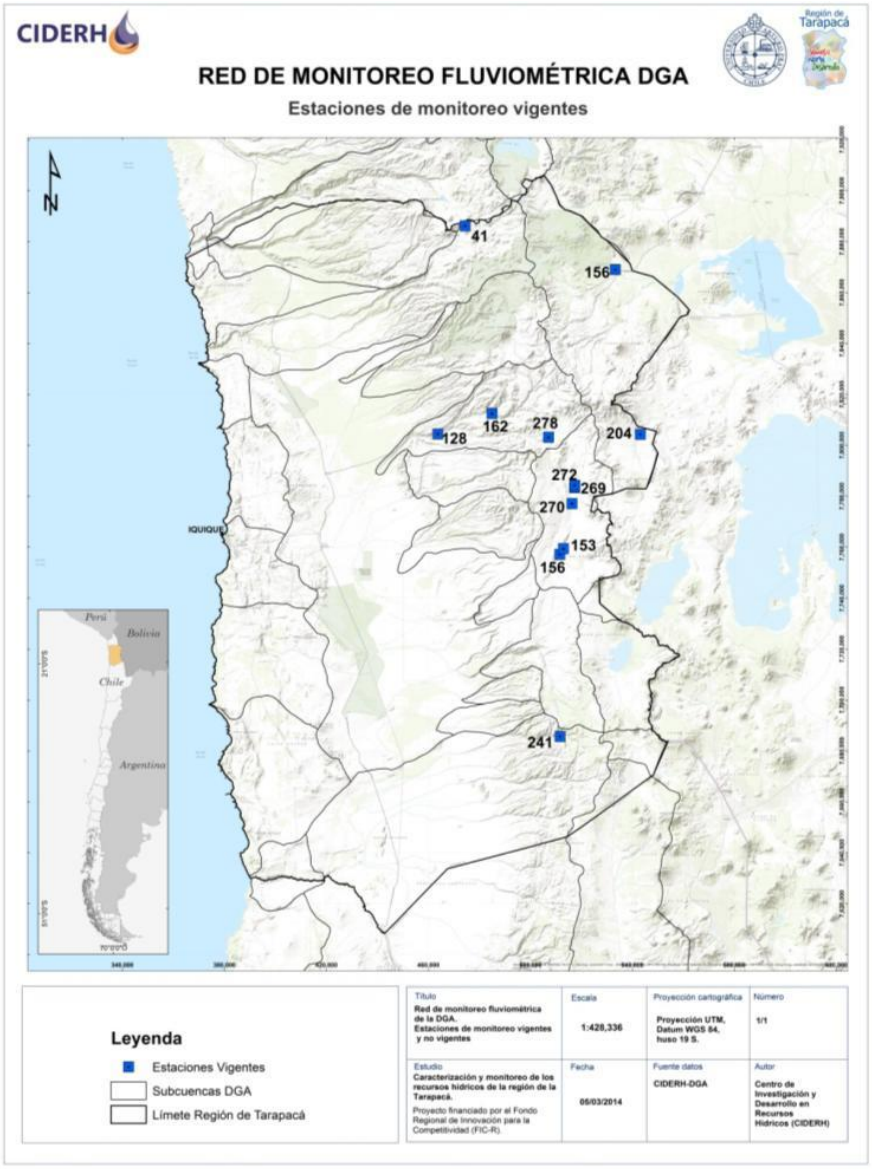


Figura 3.2. Estaciones fluviométricas vigentes de la DGA. Las etiquetas representan la cantidad de aforos realizados en cada estación.

Actualmente, existen:

- Seis (6) estaciones fluviométricas (de un total de 12) que cuentan con sensores de nivel en funcionamiento y con un registro de datos horario. Dichas estaciones son: Coscaya en Saitoco, Rio Piga en Collacagua, Huatacondo en Copaquire, Tarapacá en Sibaya, Isluga en Bocatoma y Tarapacá en Laonzana. Es decir, **sólo la mitad de las estaciones de la red de monitoreo fluviométrica tiene un registro de datos horario**.
- Cinco (5) estaciones con limnígrafo en funcionamiento: Coscaya en Saitoco, Rio Piga en Collacagua, Huatacondo en Copaquire, Cancosa en el Tambo y Collacagua en Peña Blanca. Sin embargo, los sensores y los limnígrafos instalados no han logrado bien medir los

eventos de crecidas, ya que la estación es superada cuando se produce un caudal mayor al flujo base o cuando el caudal alcanza un cierto rango de medición.

Curvas de Descarga o Calibración

El nivel del agua medido por el sensor se transforma en caudal mediante la curva de descarga o curva de calibración. Esta curva es producto de una serie de aforos que se realizan por un largo periodo de tiempo, creando una relación entre el caudal y el nivel del agua en un tramo determinado de un cauce. Los caudales se ajustan mejor al comportamiento del cauce cuando se dispone de series cronológicas de aforo más largas, con caudales mínimos y máximos dentro de las mediciones. **Sin embargo, se ha notado una desactualización de las curvas de descargas de las estaciones fluviométricas de la DGA**, la cuales son muy dinámicas debido a los periodos de crecidas en verano, la alta acumulación de sedimentos en las estaciones y el congelamiento de los pozos limnimétricos en épocas de invierno. **Por las condiciones y características propias de la región esta curva necesita ser calibrada cada año**.

Tabla 3.3. Conjunto de estaciones DGA vigentes e instrumentación

Estación	Unidad hidrográfica	Serie de datos	Nº de aforos realizados	Variables* medidas por la estación	Limnígrafo	Sensor de nivel	Otros elementos en la estación	Registro de datos/Transmisión
Q. Tarapacá en Sibaya	Qda. Tarapacá	27/10/1994 – 30/11/2013	162	Q/PP	No	Sí	Pluviómetro digital, Datalogger, Satélite con antena y GPS, Regulador de voltaje, Batería y Caseta	Digital/Satelital
Q. Tarapacá en Laonzana	Qda Tarapacá	09/02/2003 – 30/11/2013	128	Q/S/C	No	Sí*	Datalogger, Panel Solar, Batería y Caseta	Manual
Río Coscaya en Saitoco	Qda. Tarapacá	12/06/1985 – 30/11/2013	278	Q/C	Sí	Sí	Datalogger	Digital
Q. Camiña 3 km arriba de Tarcavire	Qda. Camiña	3/10/2006 – 30/11/2013	41	Q/PP	No	No	Pluviómetro digital, Datalogger, Satélite con antena y GPS, Regulador de voltaje, Batería y Caseta	Digital***
Río Cancosa en el Tambo	Entre Estero Sencata y Río Sacaya	26/10/1994 – 30/11/2013	204	Q/PP/C	Sí	No	Pluviómetro digital, Datalogger, Panel solar, Batería y Caseta	Digital
Río Isluga en Bocatoma	Entre Estero Sencata y Río Sacaya	25/08/1994 – 30/11/2013	156	Q/C	No	Sí	Datalogger, Batería y Caseta	Digital
Río Batea en Confluencia	Salar del Huasco	21/08/1980 - 30/11/2013	269	Q	Sí	No	Caseta	Digital
Río Piga en Collacagua	Salar del Huasco	23/09/1978 – 30/11/2013	272	Q/C	Sí	Sí	Datalogger	Digital

Río Collacagua en Peñablanca	Salar del Huasco	24/09/1980 – 30/11/2013	270	Q/C	Sí	No	Caseta	Digital
Vertiente Huasco Norte	Salar del Huasco	26/10/1994 – 25/11/2013	153	Q	No	No	No	Manual
Vertiente Huasco El Ermitaño	Salar del Huasco	26/10/1994 – 25/11/2013	156	Q	No	No	No	Manual
Río Huatacondo en Copaquire	Qda. Huatacondo	19/08/1980 – 30/11/2013	241	Q/PP/Ca	Sí	Sí	Pluviómetro digital, Datalogger, Satélite con antena y GPS, Regulador de voltaje, Batería y Caseta	Digital/Satelital

*****_Simbología de las variables:_
Q= Caudal; PP= Precipitación; C= Calidad de Agua en el río; S= Sedimentos presentes en el agua.
**La crecida del año 2012 ha modificado el cauce dejando el sensor fuera de alcance del agua. El lugar donde está instalada la estación no es un sitio idóneo, dado que el cauce se desvía en épocas de lluvias. Actualmente, se realizan aforos mensuales en la estación.
***Actualmente la estación fluviométrica está dañada, registrándose aforos manuales mensuales en la estación.
Fuente: Elaborado a partir de las visitas a terreno y consulta DGA durante febrero/marzo 2014.

Las dificultades encontradas en las mediciones de continuas de caudales se deben en parte a las características intrínsecas del régimen hidrológico en una zona árida como la Región de Tarapacá. Los eventos lluviosos son de corta duración y alta intensidad, provocan crecidas o aluviones, con flujos máximos que transportan una carga de sedimentos importante, la cual se deposita en las zonas más bajas y anchas del río. Cuando el escurrimiento vuelve a su flujo base mínimo, el agua se escurre entre los sedimentos depositados, independientemente del lecho previo a la crecida, dejando en muchas ocasiones el sensor parcial o totalmente fuera del alcance del agua (i.e. estaciones de Laonzana y Copaquire, anexos 1 y 5). Por otra parte, existe una dificultad en medir un rango de caudales inter o intra-anuales que puede ser nulo o extremadamente bajo en estiaje (flujo base) y aumentar hasta varios metros cúbicos por segundo (m^3/s) durante crecidas. Por último, cuando suceden los eventos hidrometeorológicos extremos que generan crecidas, es común que se destruya parcial o totalmente la estación, que necesita entonces ser reconstruida (ejemplo: estaciones de Tarcavire y Laonzana).

Finalmente, sólo cuatro unidades hidrográficas tienen estaciones fluviométricas: Entre Estero Sencata y Río Sacaya, Salar del Huasco, Qda. Tarapacá y Río Loa Medio (Quebrada de Guatacondo). Por lo tanto la gran mayoría de las cuencas y subcuencas de la región tiene poco o ningún control hidrométrico (figura 3.2). La sub-cuenca Quebrada de Tarapacá es la cuenca de la región que está mejor instrumentalizada desde el punto de vista hidrométrico, es decir, es la única cuenca de la región que cuenta con un registro de datos fluviométrico y meteorológico referencial. Por esta razón, dicha cuenca ha sido utilizada como la única referencia en los diferentes estudios para estimar la recarga total del acuífero Pampa del Tamarugal (Lictevout *et al.,* 2013).

3.3. Análisis espacial y temporal

A continuación, en la Tabla 3.4, se muestran las densidades mínimas de estaciones de flujo fluvial recomendadas por la Organización Mundial de Meteorología (OMM, 1994).

Tabla 3.4. Densidad mínima de estaciones por unidades fisiográficas recomendadas por la Organización Mundial de la Meteorología

Unidad fisiográfica	Densidad mínima por estación (Superficie en Km^2/estación)
Zonas costeras	2.750
Zonas montañosas	1.000
Zonas polares y áridas	20.000

Fuente: WMO en "Guía de prácticas hidrológicas" (1994)

De manera general, la región se ha considerado como unidad fisiográfica "Zonas polares y árida", argumentando que la densidad mínima recomendada por la OMM (OMM, 1994) no es adaptada ya que consideraría una densidad demasiado baja (dos estaciones fluviométricas para la Región de Tarapacá). Los autores del presente trabajo consideran que la Región no debe ser considerada en la unidad fisiográfica "Zonas polares y áridas" sino en la unidad fisiográfica "Zonas montañosas", con una densidad mínima de 1.000 km^2 por estación fluviométrica. En este caso, en la Tabla 3.5 en la cual se muestra la distribución de las estaciones por unidad de análisis y por subcuencas, se puede observar lo siguiente:

- La Unidad de análisis "Altiplano" presenta una densidad de estaciones acorde con la recomendación de la OMM (OMM, 1994), ya que cada estación cubre una superficie media de 967 km^2.
- En las unidades de análisis de la Pampa del Tamarugal, Llamara-Rio Loa y Camiña-Camarones, las densidades por estaciones fluviométricas (superficie en Km^2/estación) son muy superiores a las recomendaciones de la OMM (OMM, 1994), en media 6 veces superiores. En estas unidades de análisis, la red existente no es representativa.

En general, se recomienda que un número suficiente de estaciones fluviométricas deberían estar ubicadas a lo largo de las ramificaciones principales de las grandes corrientes y en los tramos más bajo de los cauces para permitir la interpolación de la descarga entre las estaciones. Sin embargo, en la región esto no se cumple, ya que:

- Existen cauces permanentes que no cuentan con estaciones fluviometrica (Chacarilla, Aroma, Quipisca, Parca, Guataguata, Cariquima);
- Cauces permanentes principales carecen de estaciones de monitoreo (Camiña y Guatacondo).
- Ninguna cuenca con cauce no permanente cuenta con estaciones fluviométricas, las cuales se activan en crecidas y cuya importancia ya ha sido señalada por otros estudios anteriores (Lictevout *et al.,* 2013), tal es el caso de Juan Morales, Sagasca y El Tambillo.

Tabla 3.5. Distribución de las estaciones por unidad de análisis y subcuencas

Unidad de Análisis	Cuenca/Subcuenca	Nº de estaciones por subcuenca	Nº de estaciones por Unidad de Análisis	Área por Unidad de Análisis (km^2)	Densidad de estaciones por Unidad de Análisis (km^2/E)
ALTIPLÁNICA	Entre Estero Sencata y Río Sacaya	2	7	6772	967
	Salar del Huasco	5			
	Entre Salares del Huasco y Coposa	0			
	Salar de Coposa	0			
	Salar de Michincha	0			
PAMPA DEL TAMARUGAL	Pampa del Tamarugal	0	3	17353	5784
	Qda. Soga	0			
	Qda. Aroma	0			
	Qda. Tarapacá	3			
	Qda. Quipisca	0			
	Qda. Juan Morales	0			
	Qda. Quisma y Acuífero de Pica	0			
	Qda. Chacarilla	0			
	Qda. Ramada	0			
	Qda. Cahuisa y Chipana	0			
LLAMARA-RÍO LOA	Río Loa Alto	0	1	6004	6004
	Río Loa Medio	0			
	(Quebrada de Guatacondo)	1			
	Río Loa Bajo	0			
CAMIÑA-CAMARONES	Qda. Chiza	0	1	6277	6277
	Qda. Camiña	1			
	Entre Río Camarones y Q. Camiña	0			
COSTERAS	Entre Q. Tiliviche y Pampa Orcoma	0	0	5839	-
	Pampas Orcoma y Perdiz	0			
	Pampas del Carmen y la Unión	0			
	Salar de Soronel y Pampa Blanca	0			
	Pampa de las Zorras y Salar Grande	0			
Total: 12 estaciones fluviométricas					

En resumen:

14 unidades hidrográficas no tienen información hidrométrica (Tabla 3.5):

- Zona altiplánica (2): Salar de Coposa y Salar de Michincha.
- Pampa del Tamarugal (8): Soga, Aroma, Quipisca, Chacarilla (con caudal permanente), Juan Morales, Quisma, Ramada, Cahuisa y Chipana (con caudal no permanente).
- Llamara-Río Loa (2): Río Loa medio (Quebrada de Maní) y Río Loa Bajo
- Camiña-Camarones (2): Chiza y Entre Río Camarones y Quebrada de Camiña.

Por otro lado, la estandarización (caudal medio sobre la desviación estándar) en el registro histórico de las estaciones fluviométricas de la DGA (Figura 3.3) permite apreciar variaciones significativas en el comportamiento de los datos, los cuales pueden ser debido a eventos importantes de posibles crecidas registradas. Las mayores variaciones suceden durante el año 1984, registradas por la estaciones de Piga en Collacagua, Coscaya en Pampa Lirima y Collacagua en Peñablanca y en el año 2001, en el cual se aprecian variaciones en las 11 estaciones mostradas en la figura 3.3, siendo las más mayores aquellas registradas por las estaciones de Piga en Collacagua y Guatacondo en Copaquire. Sin embargo, no hay una buena correspondencia en los registros de datos de caudales de las estaciones, debido a la variabilidad y espacialidad de las precipitaciones. Por ejemplo: la estación de Piga en Collacagua registra una alta variación estandarizada de 18,76 para enero del 2001 (Q=0,50 m3/s), pero para esa misma fecha el resto de las estaciones no presenta una variación similar.

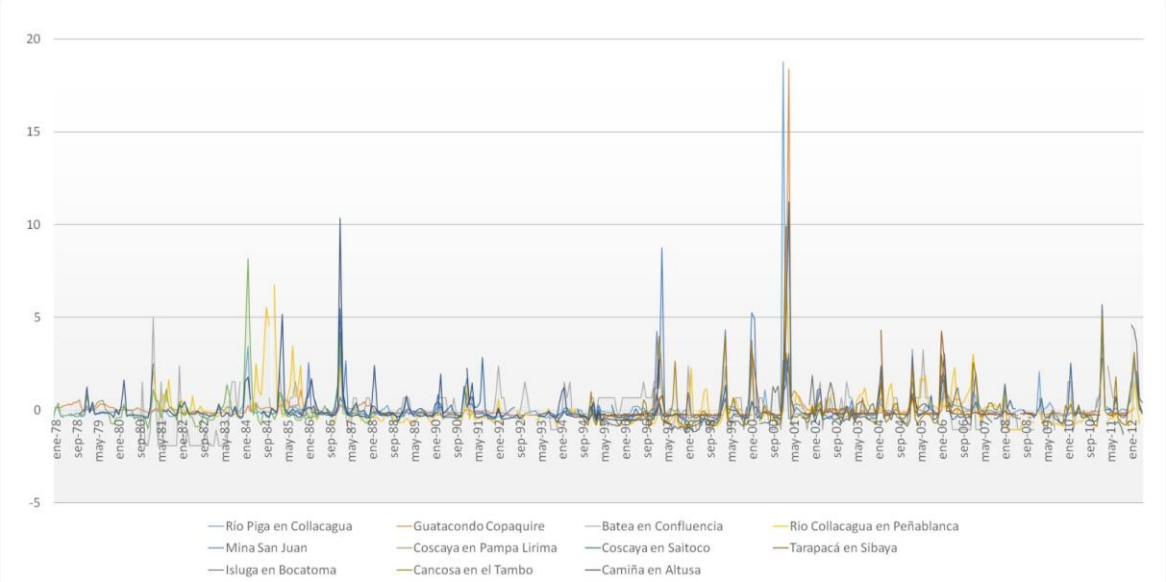


Figura 3.3. Comparación de los caudales estandarizados de 8 estaciones fluviométricas DGA vigentes y 3 no vigentes.

3.4. Análisis por estación

En el anexo 5 se presentan las fichas por estación y las principales observaciones, análisis estructural y propuestas de las visitas realizadas a cada estación.

Los problemas más comunes encontrados en las estaciones DGA visitadas (anexo 1) se mencionan a continuación:

- **Problemas estructurales de la estación**: son provocados por la mala construcción, eventos de crecidas, la acción propia del agua circulante o las condiciones ambientales. Estos problemas se denominan "*problemas graves o de contingencias*" y van desde la rotura de muros y losas hasta la socavación del lecho o fondo de la sección de aforo. Las estaciones

que presentan estos problemas son ocho (8): Isluga, Coscaya en Saitoco, Tarcavire, Huasco Norte, Cancosa, Sibaya, Batea en Confluencia y Collacagua en Peñablanca.

- **Fatiga y desgaste del hormigón o "*problemas menores*":** Cuando la estructura de la estación está desgastada o deteriorada al punto que el hormigón empieza a caerse por sí solo. Las 12 estaciones fluviométricas existentes presentan este tipo de problemas.
- **Control hidráulico:** Cuando no existe un buen control de la entrada y salida de agua de la estación o existen obstáculos que no permiten que el agua entre y salga de la sección de aforo sin impedimentos. Las estaciones que presentan estos problemas son siete (7): Isluga, Copaquire, Coscaya en Saitoco, Collacagua en Peñablanca, Cancosa, Piga en Collacagua, Sibaya y Huasco Norte.
- **Diseño de la estación adaptado al contexto local:** Incluye el emplazamiento de la estación y la estructura diseñada in situ. Estos problemas se pueden ver en 4 estaciones existentes: Laonzana, Isluga, Cancosa y Copaquire.
- **Tecnología:** Cuando las estaciones presentan diferentes tecnologías para la recolección de datos. En este caso, se nota que las tecnologías aplicadas no permiten una medición de flujo en épocas de crecidas. Como se explicó anteriormente, sólo existen seis (6) estaciones que presentan sensores de nivel y seis (6) limnígrafos. Existen tres (3) estaciones que combinan limnígrafo y sensor de nivel (Huatacondo en Copaquire, Piga en Collacagua y Coscaya en Saitoco). Además, sólo dos (2) estaciones tienen transmisión satelital: Sibaya y Huatacondo en Copaquire. Por lo cual, no existe una homogeneidad coherente en el tipo de tecnología utilizada en la red de estaciones de monitoreo.

Por otro lado, en la región, sólo la Compañía Minera SCM Bullmine cuenta con dos (2) estaciones fluviométricas tipo Parshall a la salida de la Quebrada de Camiña, las cuales fue imposible visitar dado que la compañía no facilitó el acceso a las estaciones. Además, las compañías mineras Doña Inés Collahuasi y Cerro Colorado cuentan con puntos de monitoreo manual del caudal.

En el anexo 5 se presentan las fichas por estación y las principales observaciones y propuestas de las visitas realizadas las estaciones DGA.

CAPÍTULO 4. RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICA

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICA

4.1. Descripción General

Las mediciones de pozos de observación son la principal fuente de información sobre los condicionantes que pueden afectar o influir en la recarga, en la capacidad de almacenamiento y en la descarga de los acuíferos. A largo plazo, las mediciones sistemáticas del nivel del agua son necesarias para proveer de información esencial necesaria para evaluar cambios en el recurso en el tiempo, para el desarrollo y ejecución de modelos y la determinación de tendencias, así como para diseñar, implementar y monitorear efectivamente la gestión del recurso subterráneo y la propuesta de programas de protección (Taylor & Alley, 2001).

Bajo este punto de vista, la DGA realiza la medición de niveles de agua subterránea por parte de la oficina regional, para posteriormente enviar la información a Santiago a la oficina central, y finalmente someterla a un proceso de validación por parte de dicha entidad.

Por otro lado, debido a los diversos compromisos asociados a los respectivos DIA (Declaraciones de Impacto Ambiental) o EIA (Evaluaciones de Impacto Ambiental), las empresas que se abastecen del recurso subterráneo para el desarrollo de sus actividades industriales, deben suministrar mediciones trimestrales en los pozos que son de su propiedad, con el fin de monitorear las posibles afecciones de estas actividades sobre el recurso.

De esta manera, la red de monitoreo del recurso no solo es de carácter público, sino que hay una participación de los grandes proyectos económicos en la región. Por normativa, estas mediciones deben ser comunicadas a la Superintendencia de Medio Ambiente perteneciente al Ministerio de Medio Ambiente, por lo que el acceso a esta información es de carácter público si se recurre a la Ley de Transparencia N°20.285. Adicionalmente, la solicitud de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA), en algunos casos, está asociada a un pozo o una perforación independientemente si dicha solicitud es aprobada o no, por lo que en ocasiones se podría considerar alguna de estas perforaciones con alumbramiento de agua para una red de monitoreo a proponer.

En resumen, la actual red de monitoreo piezométrica se puede estructurar por una red actualmente activa y oficialmente reconocida, compuesta por la red pública distribuida en toda la Región de Tarapacá y una red de carácter semipúblico perteneciente a las empresas privadas (minería y sanitaria) comprometidas con el monitoreo del recurso debido a las actividades que desarrolla; así como una red potencial a proponer considerando los pozos o perforaciones que han sido desarrolladas en el marco de una solicitud de DAA, una Variación de Punto de Captación (VPC), asociados a un DAA o un EIA y que en la actualidad no están en uso aparente.

Bajo este punto de vista, el análisis de la red de estaciones piezométricas se realizará en base a la red actual de la DGA debido a su fácil acceso a la información, sin dejar de considerar la red de las empresas mineras y de la empresa sanitaria.

En la región, se reconocen oficialmente (entiéndase por oficial lo determinado por la DGA), cinco Unidades Hidrogeológicas de Aprovechamiento (UHA), las cuales son la Pampa del Tamarugal,

Pica, Salar de Sur Viejo, Salar de Llamara (Figura 4.1). Estas Unidades, definidas mediante resolución administrativa, no responden obligatoriamente a los límites hidrogeológicos del acuífero, sino que su definición se ha contemplado con el fin de definir una superficie de aprovechamiento; en varias situaciones, las UHA difieren realmente de los límites naturales del acuífero. Para fines prácticos, en este documento se citará las respectivas UHA como acuíferos, entendiendo las consideraciones anteriormente expuestas.

Aun así, bajo el anterior supuesto técnico, existen en la región 38 pozos de monitoreo de la DGA (Figura 4.1), de los cuales 31 pozos se localizan en el acuífero Pampa del Tamarugal, dos en el acuífero Salar Sur Viejo, tres en el acuífero de Pica y dos en el Salar del Huasco. Este ultimo, a pesar de no estar considerado como una UHA oficial debido a su carácter legal vigente (zona protegida), acepta su característica hidrogeológica de acuerdo a lo estipulado por Magaritz *et al.* (1989), JICA (1995), Grilli *et al.* (1999), Troger & Gerstner (2004), Acosta & Custodio (2008), entre otros.

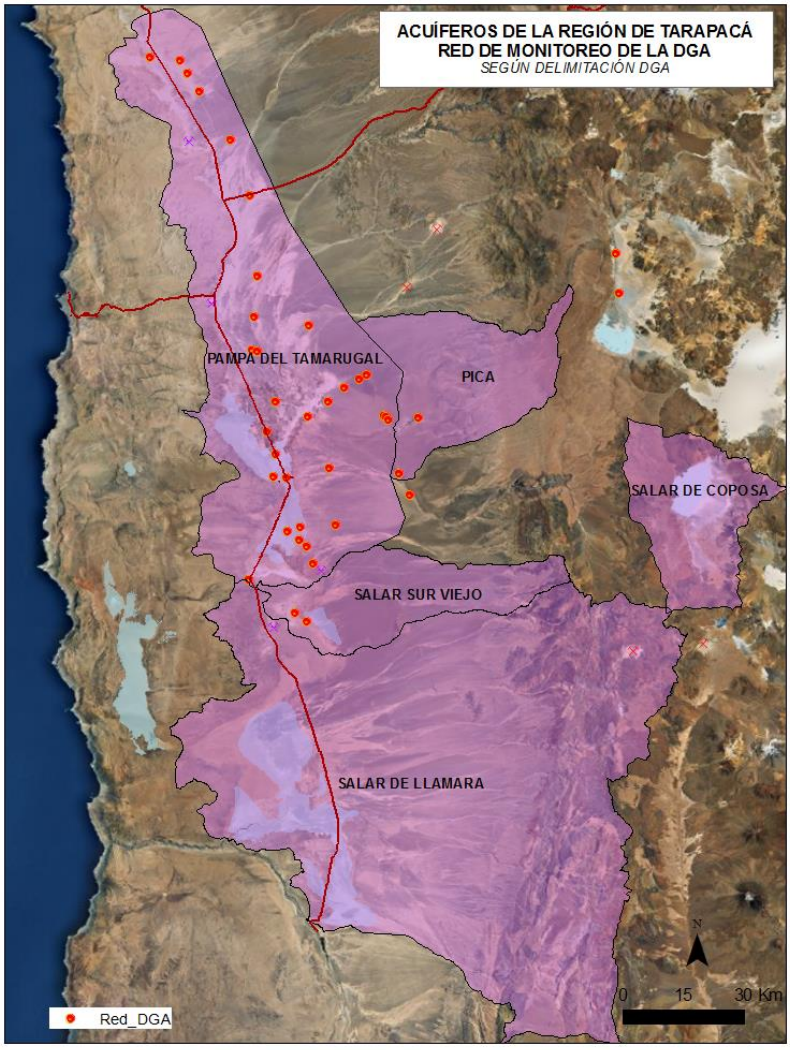


Figura 4.1. Red de Monitoreo de la Dirección General de Aguas

De esta manera, se puede expresar esta distribución de la actual red de monitoreo de la DGA en función de su UHA definida, teniendo los siguientes valores (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Densidad de pozos en las principales Unidades Hidrogeológicas de Aprovechamiento (UHA) definidas por la DGA[1]

UHA	DENSIDAD DE POZO
Pampa del Tamarugal	1 pozo por 156,3 km^2
Pica	1 pozo por 433,33 km^2
Sur Viejo	1 pozo por 546,5 km^2
Salar de Llamara	NO HAY POZOS
Salar de Coposa	NO HAY POZOS

Los pozos que definen la actual red de monitoreo de agua subterránea se recogen en la Tabla 4.2.

A partir de esta descripción generalizada de la red de monitoreo piezométrica de la DGA, son varios los factores intrínsecos de la red necesarios para determinar la calidad de la misma en base a los objetivos por los cuales una red de este tipo ha sido definida (su utilidad para la gestión del recurso hídrico en una región o zona de interés). El análisis crítico de la red piezométrica de la DGA ha percibido la necesidad de detallar los tópicos que se presentan a continuación, y por los cuales es posible cualificar la actual red definida:

- ***Características Generales*** relacionadas con el emplazamiento de la perforación así como del estado actual aparente de la estación piezométrica.
- ***Representatividad espacial de los datos*** lo cual se determina por el contexto hidrogeológico que se compromete con el monitoreo de un pozo y su respectiva área de influencia.
- ***Representatividad temporal de los datos*** lo cual se analiza por el comportamiento estadístico de los datos, así como la frecuencia de las respectivas mediciones.

4.1.1. Características Generales de las Estaciones de Monitoreo

Para la descripción de las características generales de las estaciones de monitoreo que definen la actual red de monitoreo, en el anexo 8 se recogen las características principales de cada una de las estaciones de monitoreo de la red DGA en las tablas respectivas. A modo general, inicialmente se puede indicar que la información geográfica existente de estos puntos no es la esperada para este tipo de red. Bajo este punto de vista, la precisión de las coordenadas y de la altitud (o altura dependiendo de cuál sea el nivel de referencia) para la transformación de los valores de profundidad del nivel en alturas piezométricas, son indispensables para validar técnicamente y espacialmente el dato medido. Por consiguiente, esta información permitirá identificar posibles fluctuaciones y variaciones con precisión en el flujo del acuífero, lo cual es posible con la consideración de las alturas piezométricas bajo los supuestos físicos que así lo determinan.

[1] Sin embargo, existen otros acuíferos no reconocidos oficialmente por la DGA.

Tabla 4.2. Estaciones piezométricas de la red de monitoreo vigente de la DGA

ID_CIDERH	NOMBRE	UTM_ESTE*	UTM_NORTE*	ALTITUD*	INICIO	TIPO
PM_009_A	SALAR PINTADOS	432326	7720575	966	mar-88	PIEZOMÉTRICA
PM_013_A	SALAR BELLAVISTA	426236	7695371	945	abr-88	PIEZOMÉTRICA
PM_015_A	SALAR BELLAVISTA	441994	7699154	964	mar-88	PIEZOMÉTRICA
PM_020_A	SALAR PINTADOS (SARA - TIRANA)	426836	7751866	1008	abr-88	PIEZOMÉTRICA
PM_022_A	SALAR PINTADOS 2	435285	7720321	972	mar-88	PIEZOMÉTRICA
PM_031_A	BELLAVISTA	438772	7708111	966	mar-88	PIEZOMÉTRICA
PM_032_A	SALAR SUR VIEJO	440303	7685003	917	feb-92	PIEZOMÉTRICA
PM_033_A	PUNTA DOLORES	401718	7824249	1115	mar-88	PIEZOMÉTRICA
PM_038_A	CONCOVA	468013	7735137	1472	jun-00	PIEZOMÉTRICA
PM_039_A	LA CALERA 3	455171	7745881	1105	feb-92	PIEZOMÉTRICA
PM_040_A	LA CALERA 2	453299	7744812	1055	feb-00	PIEZOMÉTRICA
PM_041_A	ESMERALDA 6	449653	7742623	994	jun-00	PIEZOMÉTRICA
PM_042_A	ESMERALDA 11	459519	7735752	1096	abr-92	PIEZOMÉTRICA
PM_045_A	ESMERALDA 28	460136	7735493	1114	jun-93	PIEZOMÉTRICA
PM_047_A	ESMERALDA 34	460596	7734578	1117	jun-93	PIEZOMÉTRICA
PM_051_A	PLANTA AP. HISPANIA	432833	7739176	991	mar-92	PIEZOMÉTRICA
PM_056_A	PUQUIO NUNEZ	463283	7721558	1184	jun-00	PIEZOMÉTRICA
PM_057_A	SALAR PINTADOS	432710	7726292	964	abr-92	PIEZOMÉTRICA
PM_063_A	SALAR BELLAVISTA	440396	7703579	969	mar-88	PIEZOMÉTRICA
PM_066_A	LUIS QUISPE	440611	7735599	970	jun-00	PIEZOMÉTRICA
PM_070_A	REMOLINO	410925	7820114	1153	mar-92	PIEZOMÉTRICA
PM_071_A	REMOLINO	409142	7823328	1138	ene-80	PIEZOMÉTRICA
PM_074_A	SALAR SUR VIEJO	437606	7686957	922	jun-99	PIEZOMÉTRICA
PM_075_A	JICA 5	427467	7760047	1023	mar-98	PIEZOMÉTRICA
PM_076_A	JICA 7	430539	7731731	975	mar-98	PIEZOMÉTRICA
PM_077_A	JICA 9	438495	7705014	964	mar-98	PIEZOMÉTRICA
PM_078_A	JICA 8	445891	7722691	1009	mar-98	PIEZOMÉTRICA

PM_079_A	JICA 6	445636	7739238	986	mar-98	PIEZOMÉTRICA
PM_080_A	JCA 4	421753	7803816	1163	mar-98	PIEZOMÉTRICA
PM_081_A	JICA 3	413907	7815718	1143	mar-98	PIEZOMÉTRICA
PM_082_A	JICA C	426482	7790035	1108	mar-98	PIEZOMÉTRICA
PM_083_A	CARMELO 2	440824	7757975	1059	mar-88	PIEZOMÉTRICA
PM_085_A	JICA G	516566	7775678	3847	ene-00	PIEZOMÉTRICA/ CALIDAD
PM_086_A	JICA 10	517483	7766001	3844	mar-98	PIEZOMÉTRICA
PM_087_A	CHACARILLA	465954	7716212	1276	feb-92	PIEZOMÉTRICA/ CALIDAD
PM_088_A	JICA D	428238	7770096	1062	ene-00	PIEZOMÉTRICA/ CALIDAD
PM_089_A	JICA E	428123	7751680	1001	ene-00	PIEZOMÉTRICA/ CALIDAD
PM_090_A	JICA F	447451	7708706	1010	ene-00	PIEZOMÉTRICA/ CALIDAD

- Proyección WGS84. La información descrita en esta tabla corresponde a la información de carácter público y que es emitida por la Dirección General de Aguas.

El Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) en el marco del proyecto del Fondo de Innovación para la Competitividad Regional (FIC-R), realizó una serie de visitas a los pozos de la red de monitoreo de la DGA. Junto con los resultados de un proyecto financiado por CIDERH, se realizó un levantamiento topográfico de un gran número de pozos de dicha red (Córdoba *et al.,* 2013), cuyas mediciones se incorporaron en las fichas técnicas consignadas en el anexo 8. A simple vista, la precisión de las coordenadas obtenidas mediante el levantamiento topográfico difiere de las mediciones realizadas por las DGA. Por otro lado, la determinación de coordenadas de precisión facilita no solo la localización más exacta del pozo sino además, aplicar transformaciones simples para convertir los datos de profundidad de nivel en alturas piezométricas.

De igual forma, es recomendable definir para cada uno de los pozos su cota como altura (en metros respecto al nivel de referencia elipsoidal) preferiblemente, la cual puede venir acompañada por su respectiva cota como altitud (metros sobre el nivel del mar). La razón principal de esta recomendación se debe a que la primera altura se calcula a partir de conceptos matemáticos procedente de la aplicación de modelos geodésicos acordes con la morfología terrestre, por lo que su determinación obedece a un factor estable en el tiempo en comparación con el nivel medio del mar. Esto facilitaría que los datos de monitoreo, al transformarse en alturas piezométricas, cuenten con la precisión necesaria para la generación de modelos de flujo conceptuales actualizados de calidad desde el punto de vista técnico, acompañados por un nivel de precisión estándar para la red determinada.

Asimismo, la realización de un levantamiento topográfico de precisión, permite definir con mayor precisión el resalto de los pozos, ya que en ocasiones por aspectos morfológicos del terreno circundante o de la propia construcción, no es posible determinar el resalto con una simple cinta métrica. Bajo esta consideración, el resalto es de gran importancia ya que las mediciones realizadas en las respectivas campañas de monitoreo se realizan sobre la corona de los pozos, por lo que es necesario restarle (en caso de que la corona del pozo esté por encima del pozo) o sumarle (en caso de que la corona del pozo esté por debajo de la superficie del suelo) a la medición el respectivo resalto de la tubería, consiguiendo que la medición realizada quede ajustada al nivel del suelo. Por esta razón, con el levantamiento topográfico realizado se logró evidenciar que los valores de resalto para los pozos de monitoreo de la DGA no estaban correctamente definidos desde el punto de vista técnico. Los pozos que presentaron esta anomalía se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Anomalías en el resalto definido por la DGA

ID_CIDERH	REFERENCIA	RESALTO DGA	RESALTO CIDERH
PM_020_A	Sara-Tirana	0 m	+0,363 m
PM_039_A	La Calera 3	0 m	-0,265 m
PM_042_A	Esmeralda 11 (183)	0 m	-0,181 m
PM_047_A	Esmeralda 34 (203)	0 m	-0,176 m
PM_051_A	Hispania	0 m	-0,054 m
PM_087_A	Chacarilla	0 m	+0,552

Aun así, en los otros pozos de la red de monitoreo, existe una gran incertidumbre en cuanto a los criterios que utiliza la DGA para la definición del resalto de los pozos, lo cual se puede testificar en saltos fácilmente reconocibles en las series temporales de datos.

Asimismo, la falta de definición en la mayoría de los pozos de una referencia única e inamovible de la medición en cada una de los pozos, dificulta los procesos comparativos de los datos de medición para un mismo pozo, lo cual se ve exacerbado en ocasiones por las posibles alteraciones físicas que pueden sufrir los pozos en su estructura.

Lo considerado anteriormente es de gran importancia, ya que al percibir que los datos geográficos así como la información del resalto y referencia de medición de los pozos no está definida correctamente, se pone de manifiesto la necesidad de corregir la información histórica en base a los lineamientos técnicos alcanzados hasta ahora, para así lograr estandarizar las mediciones. Seguramente, lo difícil será justificar irregularidades en las mediciones pasadas, ya que se desconoce los protocolos de medición de ese entonces debido a la ausencia de un informe de cada campaña de monitoreo y de protocolos de medición en los pozos de la red de la DGA.

Por otro lado, en las tablas 4.4 y 4.5, así como en las figuras 4.2A y 4.2B, se recoge la valoración cualitativa de los pozos de la red de monitoreo visitados, en términos de accesibilidad, estado superficial del pozo (resalto), instalaciones, conocimiento de las características técnicas del pozo y de la estratigrafía asociada a la perforación. Para esta valoración se ha empleado una escala de 1 a 4, en donde:

- 1 es *malo* (el pozo no tiene accesibilidad vehicular ni caminando, presenta deterioro generalizado en la tubería saliente en superficie, no presenta instalaciones de protección del pozo, no se conocen en totalidad las características técnicas del pozo o no se conoce la estratigrafía de la perforación). Un pozo con una calificación 1 significa que debería de considerarse su continuidad.

- 2 es *medianamente bueno* (el pozo no tiene accesibilidad vehicular pero se puede acceder caminando, la tubería saliente presenta deterioro localizado, sus instalaciones aledañas de protección presentan deterioro generalizado, se conoce la profundidad del pozo únicamente o se conoce la estratigrafía de la perforación aunque su resolución es muy generalizada). Un pozo con una calificación 2 significa que el pozo presenta serios condicionantes que pueden influir en la representatividad de las mediciones que allí se realicen, por lo que no se puede garantizar que una red con un pozo de este tipo pueda constituir una red de calidad técnica.

- 3 es *bueno* (el pozo tiene accesibilidad vehicular por huella, la tubería saliente presenta un deterioro mínimo, las instalaciones de protección del pozo se encuentran en buen estado con algunos daños particulares, se conoce la profundidad y las características de la entubación, o bien se conoce la estratigrafía de la perforación con una resolución aceptable).

- 4 *es muy bueno* (el pozo tiene accesibilidad vehicular por carretera asfaltada, la tubería saliente se encuentra en perfecto estado, las instalaciones de protección del pozo se encuentran en perfecto estado, se conoce la profundidad, las características de la entubación y los resultados obtenidos de una prueba de bombeo, o bien se conoce la estratigrafía con una resolución lo suficiente tanto para una buena interpretación hidrogeológica como hidráulica).

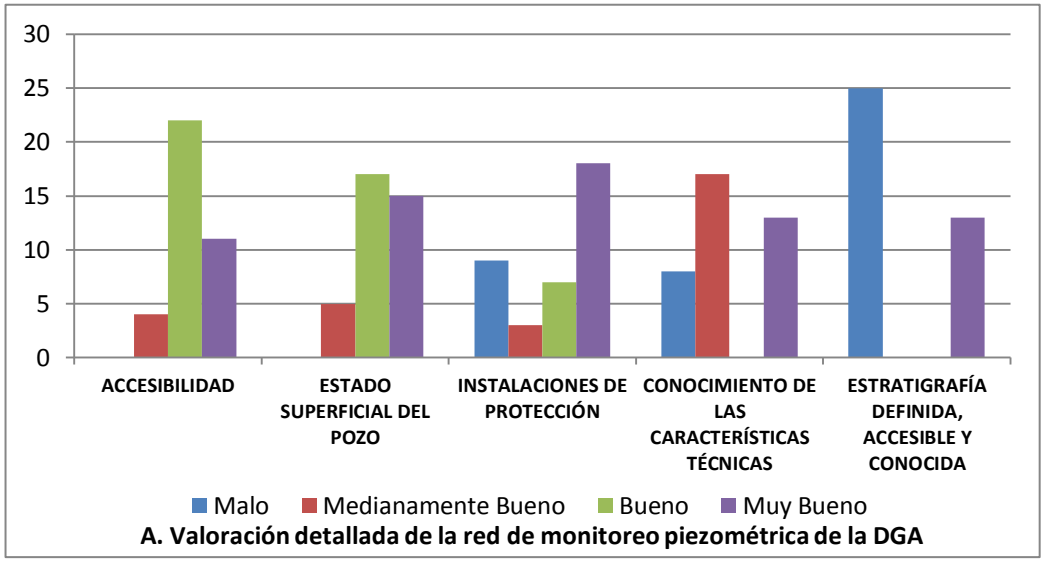
Tabla 4.4. Valoración cualitativa detallada de las características generales de los pozos de la red de monitoreo de la DGA

CÓDIGO	ACCESIBILIDAD	ESTADO SUPERFICIAL DEL POZO	INSTALACIONES	CONOCIMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ESTRATIGRAFÍA DEFINIDA, ACCESIBLE Y CONOCIDA	CÓDIGO	ACCESIBILIDAD	ESTADO SUPERFICIAL DEL POZO	INSTALACIONES	CONOCIMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	ESTRATIGRAFÍA DEFINIDA, ACCESIBLE Y CONOCIDA
PM_009_A	3	3	3	1	1	**PM_066_A**	2	2	1	1	1
PM_013_A	4	3	3	1	1	**PM_070_A**	3	3	3	2	1
PM_015_A	3	3	2	1	1	**PM_071_A**	3	3	2	2	1
PM_020_A	4	4	1	2	1	**PM_074_A**	3	3	3	1	1
PM_022_A	3	2	1	2	1	**PM_075_A**	4	4	4	4	4
PM_031_A	3	3	3	2	1	**PM_076_A**	4	4	4	4	4
PM_032_A	3	3	1	1	1	**PM_077_A**	3	4	4	4	4
PM_033_A	3	3	4	2	1	**PM_078_A**	4	4	4	4	4
PM_038_A	3	2	4	1	1	**PM_079_A**	4	4	4	4	4
PM_039_A	3	3	3	2	1	**PM_080_A**	4	4	4	4	4
PM_040_A	3	4	1	2	1	**PM_081_A**	4	4	4	4	4
PM_041_A	3	2	1	1	1	**PM_082_A**	4	4	4	4	4
PM_042_A	2	3	4	2	1	**PM_083_A**	*	*	*	1	1
PM_045_A	2	3	2	2	1	**PM_085_A**	3	4	4	4	4
PM_047_A	2	3	1	2	1	**PM_086_A**	3	4	4	4	4
PM_051_A	3	3	4	2	1	**PM_087_A**	3	3	4	2	1
PM_056_A	3	3	1	2	1	**PM_088_A**	3	4	4	4	4
PM_057_A	4	2	1	2	1	**PM_089_A**	4	4	4	4	4
PM_063_A	3	3	3	2	1	**PM_090_A**	3	4	4	4	4

* Este pozo no fue visitado y no se tiene antecedentes al respecto.

Tabla 4.5. Valoración global de los pozos que constituyen la actual red de monitoreo piezométrica de la DGA

CÓDIGO	VALORACIÓN GLOBAL	CÓDIGO	VALORACIÓN GLOBAL	CÓDIGO	VALORACIÓN GLOBAL	CÓDIGO	VALORACIÓN GLOBAL	CÓDIGO	VALORACIÓN GLOBAL
PM_009_A	2.2	**PM_038_A**	2.2	**PM_056_A**	2	**PM_076_A**	4	**PM_085_A**	3.8
PM_013_A	2.4	**PM_039_A**	2.4	**PM_057_A**	2	**PM_077_A**	3.8	**PM_086_A**	3.8
PM_015_A	2	**PM_040_A**	2.2	**PM_063_A**	2.4	**PM_078_A**	4	**PM_087_A**	2.6
PM_020_A	2.4	**PM_041_A**	1.6	**PM_066_A**	1.4	**PM_079_A**	4	**PM_088_A**	3.8
PM_022_A	1.8	**PM_042_A**	2.4	**PM_070_A**	2.4	**PM_080_A**	4	**PM_089_A**	4
PM_031_A	2.4	**PM_045_A**	2	**PM_071_A**	2.2	**PM_081_A**	4	**PM_090_A**	3.8
PM_032_A	1.8	**PM_047_A**	1.8	**PM_074_A**	2.2	**PM_082_A**	4	**TOTAL RED**	**2.74**
PM_033_A	2.6	**PM_051_A**	2.6	**PM_075_A**	4	**PM_083_A**	*		



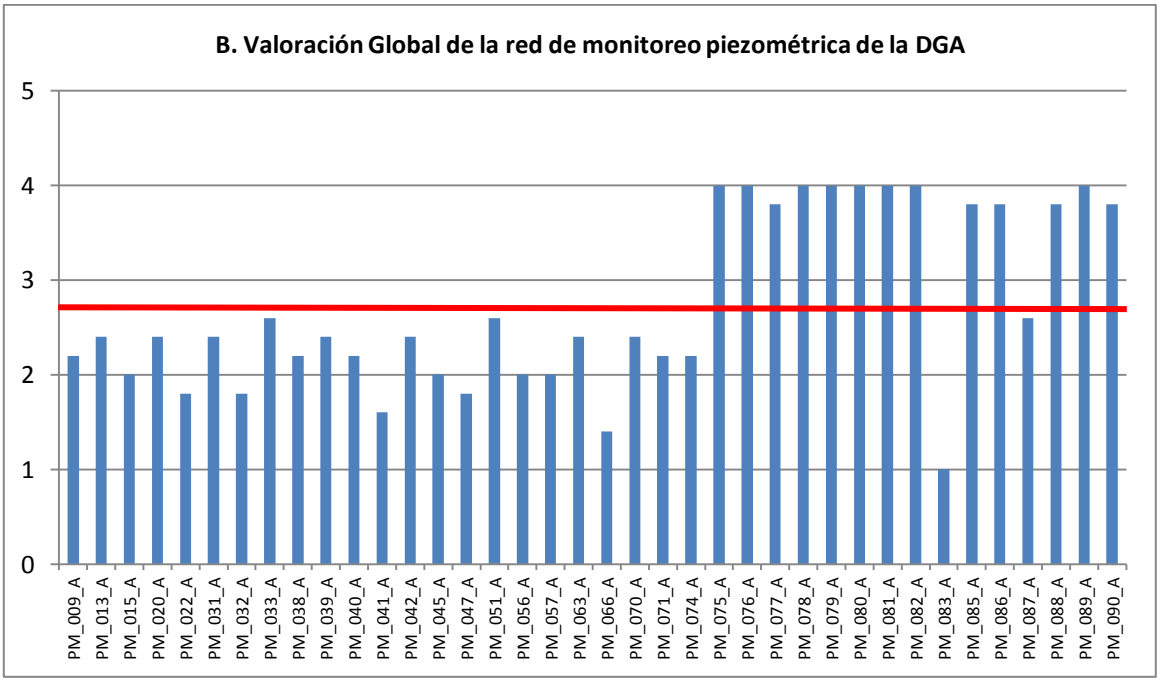


Figura 4.2. Resumen de la valoración cualitativa a los pozos de la red de monitoreo de la DGA

A partir de esta valoración, se observa que en cuanto a términos de *accesibilidad* el 60% de los pozos presentan una buena accesibilidad caracterizada por caminos de tierra de fácil acceso. En cuanto al *estado superficial del pozo* se refiere, el 45% de los pozos se encuentran en buen estado. De igual forma, se destaca el medianamente bueno *conocimiento de las características técnicas* del 45% de las perforaciones que constituyen la red.

Es preciso aconsejar como propuesta de un trabajo complementario al realizado con este análisis, caracterizar la profundidad de la perforación de los otros pozos de monitoreo de la red DGA, así como el espesor de la columna de agua albergada en cada pozo actual para identificar el estado de cada una de las restantes perforaciones.

Por otro lado, el porcentaje significativo de "muy bueno" para las *instalaciones menores* se gana debido a que los pozos JICA presentan unas instalaciones ideales para pozos que hacen parte de una red de monitoreo: encerramiento perimetral para protección de acceso al pozo, caseta o tapa de protección del pozo para instalación de sensores, así como de protección contra material particulado u otros elementos que pueden caer al pozo y amenazar el periodo de vida del mismo. Asimismo, en algunos pozos que al no ser un JICA, se catalogan como "muy bueno" debido a que presentan una tapa de protección y elementos de señalización para detallar la ubicación, nombre y organismo al que pertenece el pozo.

De igual forma, los pozos JICA son los únicos pozos de la red de monitoreo que cuentan con la estratigrafía definida, accesible y conocida, así como las características técnicas de la perforación en las cuales se detalla no solo las características de la perforación y la entubación, sino las respectivas pruebas de bombeo realizadas en cada uno de los pozos.

Finalmente, la información de las respectivas mediciones realizadas en cada uno de los respectivos pozos es de carácter público y puede ser descargada a través de la página web de la DGA. Las respectivas campañas de monitoreo se basan en el proceso de medición en el terreno, el envío de los datos a la central de la DGA en Santiago para su validación y posteriormente, subirlo a la página web. Este proceso puede tardar alrededor de tres meses desde el periodo de medición hasta la incorporación a la base de datos web, lo cual es un limitante dependiendo del uso para el cual se destinarán los datos. En el apartado siguiente se analizaran los datos de carácter público, es decir, todas aquellas mediciones que son posibles de descargar a partir del entorno web de la DGA.

4.2. Unidades Hidrogeológicas de Análisis: representatividad espacial y temporal de los datos

Para proseguir con los tópicos propuestos para el análisis crítico de la red de monitoreo piezométrica de la DGA, se desarrollarán los respectivos ítems de acuerdo a la UHA definida por la DGA (Figura 4.1).

4.2.1. UHA Pampa del Tamarugal

La UHA Pampa del Tamarugal es la unidad que contiene el 82% (31) de los pozos de la red de monitoreo de la DGA. La posible razón de que la UHA Pampa del Tamarugal acapare prácticamente todos los pozos de la red de monitoreo, se debe a las dimensiones de dicha Unidad y la importancia que representa para la región debido a su oferta como recurso para la población regional e industrial.

4.2.1.1. Representatividad Espacial de los Datos

Desde el punto de vista hidrogeológico, un pozo en una red de monitoreo debe cumplir la tarea de suministrar la información necesaria del acuífero atravesado por dicha perforación, en un área significativa. Esta área significativa o de otra forma, área de influencia, se define como el área definida teóricamente (i.e. Poligonos de Thiessen) en la cual se asume que el monitoreo de un pozo contenido en esta misma es representativo para toda esta superficie. Lo significante que puede ser esa área obedece a las características geológicas del acuífero, o bien a criterios de interés como puede ser el caracterizar el acuífero en alguna de sus variables hidrogeológicas particulares de importancia (como la recarga), el monitoreo de zonas de explotación masiva o la protección de la riqueza biológica hidrodependiente. Si aplicáramos polígonos de Thiessen como metodología práctica y objetiva desde el punto de vista de la distribución espacial de los pozos, el resultado obtenido sería el que se presenta en la Figura 4.3.

Como se puede apreciar en la Figura 4.3, la distribución de los pozos no presenta áreas de influencia equivalentes: existen áreas desde los 11 km^2 en el sector de Esmeralda hasta los 420 km^2 en el sector que comprende Huara-Baquedano. Asimismo, la localización de los pozos de monitoreo no guarda ninguna representatividad espacial con la extensión de la superficie del acuífero, lo cual obedece exclusivamente a la distribución no uniforme de los pozos en el acuífero, dejando en evidencia la existencia de "zonas de sombra" o de "incertidumbre" en el monitoreo del acuífero. Como ejemplo de lo anterior, se puede citar que existen zonas donde hay una densidad alta de pozos de monitoreo como ocurre en el sector de la Calera o en Esmeralda, donde la aglomeración ya es exagerada, mientras que existen otras zonas como al norte del acuífero, en donde hay una distancia significativa entre pozos de monitoreo.

De esta forma se puede concluir que la distribución espacial de los pozos en el acuífero parece no guardar ninguna representatividad espacial de acuerdo a los condicionantes que puedan inferir en la ubicación de los pozos dentro de la UHA, ya que al cruzar estos datos con otras capas de información de carácter regional (como las actividades industriales, zonas forestales, zonas de explotación de agua subterránea, etc.) se nota una componente fuertemente aleatoria en la distribución de los pozos.

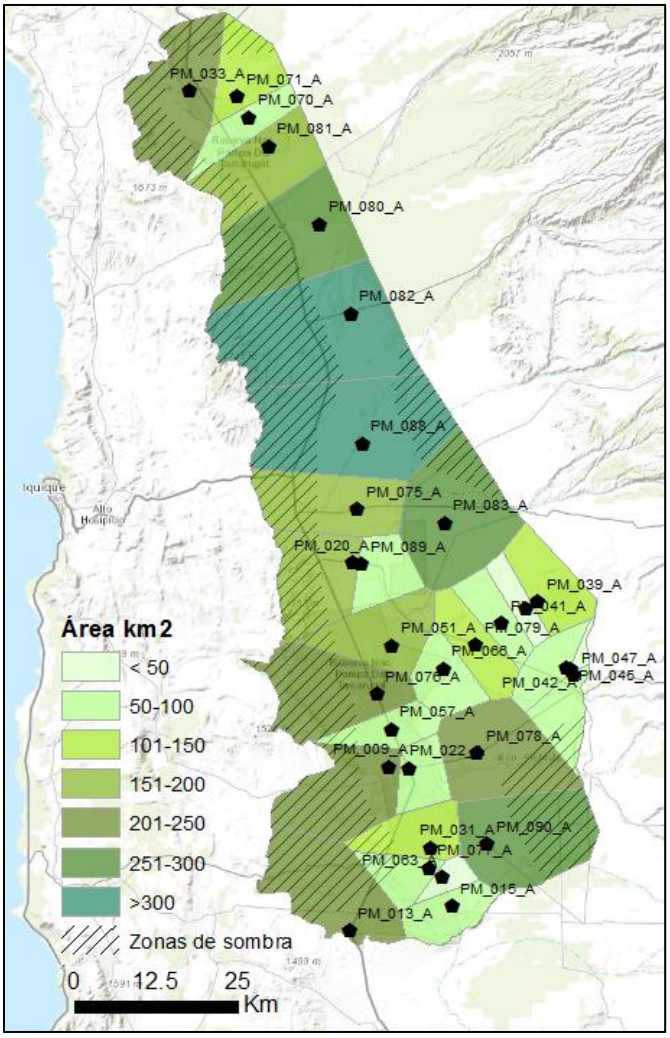


Figura 4.3. Área de influencia de los pozos de monitoreo de la red DGA en la UHA Pampa del Tamarugal

4.2.1.2. Representatividad temporal de los datos

Para el análisis de la representatividad temporal de los datos, es necesario estudiar por un lado la calidad de los datos a partir del estudio de las medidas de tendencia central así como el comportamiento de los mismos en función del tiempo. Bajo este punto de vista, los estadísticos de los datos de los pozos de la red de monitoreo de la UHA Pampa del Tamarugal, se recogen en la Tabla 4.6. Previamente, se debe de considerar que los registros de los pozos inician en periodos diversos, teniendo en común la frecuencia de las mediciones, las cuales se desarrollan en periodos trimestrales o cuatrimestrales, permitiendo contar de todas formas con un registro de datos con información completa en un porcentaje considerable. Sin embargo, se debe de considerar otros aspectos más específicos que se detallan a continuación.

El análisis inicial consistió en visualizar el comportamiento de los datos a partir del estudio de las medidas de tendencia central con la definición de la media aritmética y la mediana para cada

conjunto de datos de acuerdo al pozo de interés. El objetivo inicial de este primer análisis consistía en visualizar como el conjunto de datos se relacionaba con el valor promedio. A continuación, se prosiguió con la definición de normalidad del conjunto de datos, con el fin principal de visualizar el comportamiento global de los datos para percibir una interdependencia a factores únicos y no a eventos de carácter extraño. Se han definido los valores típicos para este tipo de análisis, como lo son la media, mediana (percentil 50%) y la desviación estándar, así como los percentiles para la descripción numérica de la distribución de los datos junto con la aplicación de un test de normalidad de Kolmogorov-Smirnoff. Finalmente, a partir de lo alcanzado hasta el momento, permitió identificar valores anómalos y extremos en la serie de datos, por lo cual fue necesario realizar un análisis temporal de los mismos para percibir alguna correlación con eventos hidrogeológicos de índole natural o bien, por errores en la definición de los protocolos de medición.

El análisis inicial permitió visualizar que en la mayoría de los casos los valores presentan un valor promedio estable en cuanto a su comportamiento a pesar de guardar una tendencia al descenso (en la mayoría de los pozos; ver anexo 8 fichas pozos) en los niveles monitoreados. Aun así, en algunos pozos, la información suministrada presenta varias inconsistencias en cuanto a la presentación de los datos se refiere: en el análisis de normalidad, fue claramente perceptible la presencia de valores tipificados como “0.00”, originando distribuciones no-normales como la que se presentan en la Figura 4.4.

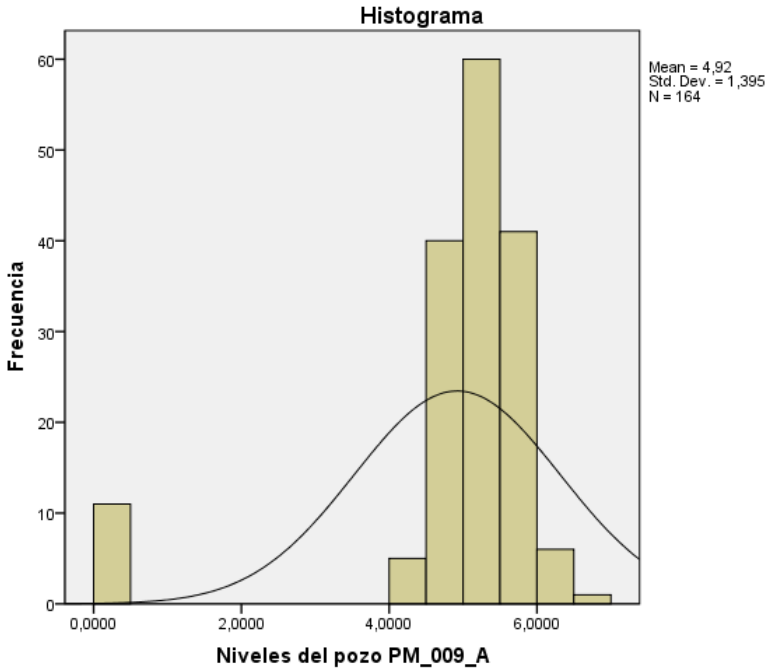


Figura 4.4. Distribución de los datos consignados en las series de datos del pozo PM_009_A

Tabla 4.6. Estadísticos básicos de los datos de niveles en los pozos de la red de monitoreo en la UHA Pampa del Tamarugal

POZO	N	PERIODO DE DATOS	MEDIA	MEDIANA	DESV. ESTAND.	MÍNIMO	MÁXIMO	PER. 25%	PER.75%	K-S NORMAL
PM_009_A	153	1988/PTE	5.274	5.22	0.456	4.26	6.52	4.925	5.715	0.215
PM_013_A	143	1988/PTE	2.731	2.66	0.206	2.32	3.41	2.560	2.910	0.008
PM_015_A	143	1988/PTE	19.830	19.65	0.443	17.97	20.84	19.570	20.110	0.000
PM_020_A	109	1988/PTE	16.739	16.66	1.114	13.41	21.45	16.110	17.485	0.034
PM_022_A	118	1988/PTE	8.841	8.66	0.626	7.48	9.98	8.340	9.453	0.059
PM_031_A	166	1988/PTE	15.969	15.88	0.440	14.97	18.47	15.780	16.080	0.000
PM_033_A	59	1988/PTE	10.265	10.51	1.565	6.9	18.63	10.090	10.870	0.000
PM_039_A	149	1992/PTE	18.991	19.51	1.360	14.17	20.88	19.075	19.695	0.000
PM_040_A	66	2000/PTE	67.764	67.87	0.841	62.03	68.62	67.498	68.195	0.040
PM_041_A	64	2000/PTE	19.791	19.8	0.443	16.79	20.42	19.640	19.925	0.000
PM_042_A	112	1992/PTE	25.643	25.68	0.643	24.44	26.58	25.003	26.270	0.002
PM_045_A	122	1993/PTE	41.809	41.91	1.040	40.05	43.24	40.795	42.845	0.001
PM_047_A	117	1993/PTE	46.705	46.78	0.593	45.6	47.6	46.155	47.215	0.015
PM_057_A	141	1992/PTE	6.436	6.45	0.372	5.78	7.43	6.135	6.760	0.043
PM_063_A	158	1988/PTE	18.373	18.34	0.216	17.47	19.16	18.240	18.530	0.011
PM_066_A	59	2000/PTE	12.465	12.39	0.599	11.61	14.1	11.790	12.900	0.324
PM_070_A	126	1992/PTE	12.386	12.35	0.260	12.01	13.98	12.190	12.553	0.025
PM_071_A	50	2003/PTE	14.089	14.15	0.437	11.1	14.29	14.100	14.193	0.000
PM_083_A	114	1988/PTE	26.263	25.245	2.095	21.23	30.87	24.968	28.715	0.000
PM_088_A	70	1998/PTE	46.775	46.615	0.555	45.72	47.79	46.295	47.330	0.013
PM_075_A	69	1998/PTE	30.395	30.2	0.698	29.47	31.82	29.805	30.945	0.135
PM_089_A	68	1998/PTE	14.695	14.355	0.823	13.69	16.22	13.963	15.545	0.021
PM_076_A	67	1998/PTE	8.324	8.25	0.251	7.44	8.76	8.160	8.570	0.022
PM_077_A	70	1998/PTE	13.484	13.36	0.285	13.09	14	13.238	13.753	0.007
PM_090_A	70	1998/PTE	54.693	55.065	1.582	50.13	57.7	54.845	55.515	0.000
PM_078_A	70	1998/PTE	38.862	38.915	0.366	38.34	40.38	38.553	39.113	0.802
PM_079_A	70	1998/PTE	14.931	14.48	1.172	13.3	17.49	14.023	15.418	0.032
PM_080_A	70	1998/PTE	46.535	46.34	0.484	45.26	47.4	46.150	47.013	0.020
PM_081_A	70	1998/PTE	10.300	10.41	0.433	9.56	11.11	9.960	10.623	0.317
PM_082_A	70	1998/PTE	50.021	50.125	0.710	47.5	50.99	49.790	50.408	0.127
PM_051_A	147	1998/PTE	9.217	9.09	0.561	8.3	10.29	8.820	9.720	0.002

PER.: Percentil; PTE: Presente; K-S: Kolmogorov Smirnoff; DESV.: Desviación.

La definición de estos valores tipificados no se esclarece en los respectivos informes, por lo que se deja a la incertidumbre si dicho valores obedecen a un error en el dato (despreciado en el proceso de validación), a la ausencia de la medición para el periodo considerado o bien, que el pozo en el momento de la medición se encontraba seco, por lo que nuevamente se resalta la importancia de definir con precisión las características estructurales de los pozos de la red de monitoreo.

Una vez despreciados los valores tipificados como “0.00”, se realizó el análisis estadístico definitivo, obteniendo que más de la mitad de los registros de los respectivos pozos, siguen una distribución normal (con el nivel de confianza del 90, 95 o el 99% según corresponda; Tabla 6 y Figura 4.5). Los restantes pozos no tienen una distribución normal debido principalmente a la existencia de valores anómalos y/o extremos en la serie de datos, a excepción de los pozos PM_042_A, PM_045_A y PM_051_A, los cuales sin presentar valores anómalos o extremos, no presentan una distribución normal. Este hecho se puede deber a una dependencia con un algún fenómeno no esclarecido en el presente (i.e. los pozos PM_042_A y PM_045_A pueden presentar este comportamiento debido a que se encuentran en un sector del acuífero de gran incertidumbre, es decir, próximo al límite de la UHA Pampa del Tamarugal con la UHA Pica).

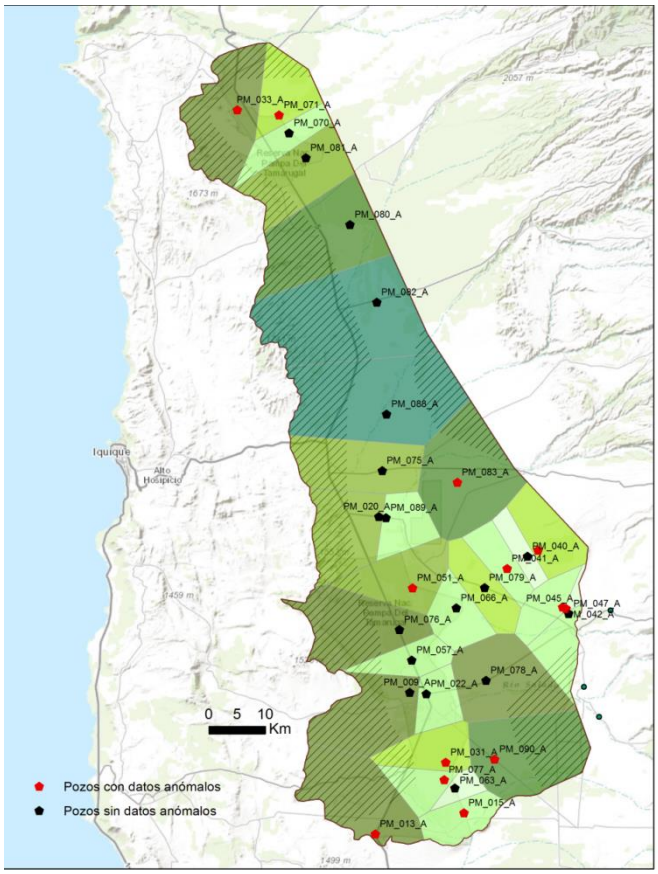


Figura 4.5. Pozos de monitoreo cuyos registros presentan un comportamiento normal (en negro) o no normal (en rojo)

Aun así, la presencia de valores extremos o anómalos en otras series de datos no imposibilitaron que el conjunto de datos tuviera una distribución normal, por lo que seguramente habrán algunas inconsistencias en los valores no normales asociadas a la calidad y representatividad del dato dentro de la serie considerada. Esta particularidad puede asociarse a errores en la medición, en el procesamiento de datos, en la validación de la información, o simplemente a procesos desconocidos.

Sin embargo, se han analizado los datos anómalos y extremos para visualizar posible asociatividad temporal o bien, particularizar los mismos de acuerdo a posibles hipótesis, lo cual se puede evidenciar con los "ruidos" que se perciben en las gráficas de tendencia de cada uno de los pozos (anexo 8 fichas pozos). Del conjunto de pozos con valores anómalos, los años que presentan valores anómalos en los respectivos registros son 1988, 1991, 1992, 1994, 1995, 1996, 1998, 1999, 2000, 2004, 2006, 2007 y 2008 (posterior al 2008 no se identifican valores anómalos o extremos). La reincidencia de los pozos con datos extremos o anómalos en función del año considerado se detalla en la Fig. 6.

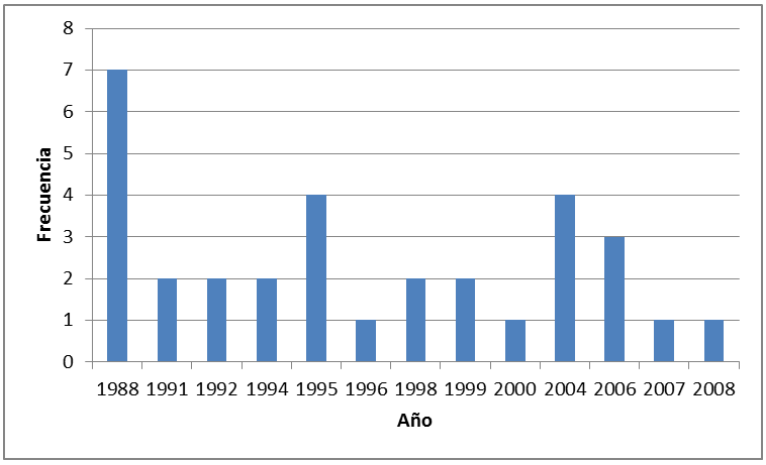


Figura 4.6. Número de pozos con datos anómalos en función del año considerado

En total se han obtenido 18 pozos con datos anómalos, de los cuales siete presentan dato anómalo en 1988. En general, los datos anómalos se presentan en los primeros registros de niveles en cada una de los pozos, salvo algunas excepciones. A pesar de que las series de datos no presentan por lo general el mismo rango de tiempo de medición, los valores anómalos y/o extremos no guardan ninguna correspondencia entre pozos salvo por los inicialmente monitoreados en 1988. Bajo este supuesto, la calidad de las mediciones se puede considerar relativamente buena salvo a comienzos del periodo de medición para algunos pozos, lo cual se puede deber, posiblemente, a un error en la consideración del punto de referencia de medición en los pozos correspondientes. Para los pozos restantes, no se identificaron valores anómalos o extremos en sus registros correspondientes.

Una vez más, la definición con precisión de un punto de referencia en cada uno de los pozos es de gran importancia, ya que de esta manera se garantizará la calidad de las mediciones así como su representatividad a lo largo del tiempo considerado en cada serie. A la fecha, la DGA ha venido corrigiendo las respectivas mediciones de los pozos JICA al homogenizar para toda la serie de medición, un punto de referencia obtenido con la medición de dicho valor con un GPS

de precisión (Córdoba *et al.,* 2013*)*. Aun así, es necesario hacer lo mismo con los otros pozos para de esta forma garantizar la representatividad de la serie de datos en los pozos de monitoreo de la UHA Pampa del Tamarugal.

4.2.2. UHA Pica

A diferencia de la UHA Pampa del Tamarugal, la UHA Pica presenta solo dos pozos de monitoreo, lo que representa el 5% de los pozos de monitoreo de la red DGA. Dicho porcentaje se puede considerar como "muy bajo" debido no solo a las dimensiones del acuífero, sino por la importancia que tiene el recurso subterráneo en el sustento de las actividades económicas del sector, con fuertes implicaciones a nivel regional, ya que en esta misma Unidad se asienta una producción agrícola de importancia así como por la oferta turística que ofrece.

En el caso del pozo PM_038_A, en la actualidad presenta un aterramiento a causas desconocidas. La DGA, hasta la fecha, no ha. Seleccionado otro pozo para reemplazarlo y proseguir con el monitoreo de la UHA. Esto se debió posiblemente a los trámites administrativos que esto puede implicar. Bajo este punto de vista, el modelo de monitoreo de variables hidrometeorológicas debe tener incorporado un sistema de atención a imprevistos, capaz de responder ante cualquier eventualidad con el fin de no perder el fin último de una red de monitoreo: monitorear y caracterizar en el tiempo y espacio los cuerpos de agua de interés.

4.2.2.1. Representatividad espacial de los datos

Aplicando la misma metodología propuesta en la UHA Pampa del Tamarugal, se obtiene el resultado de la Figura 4.6.

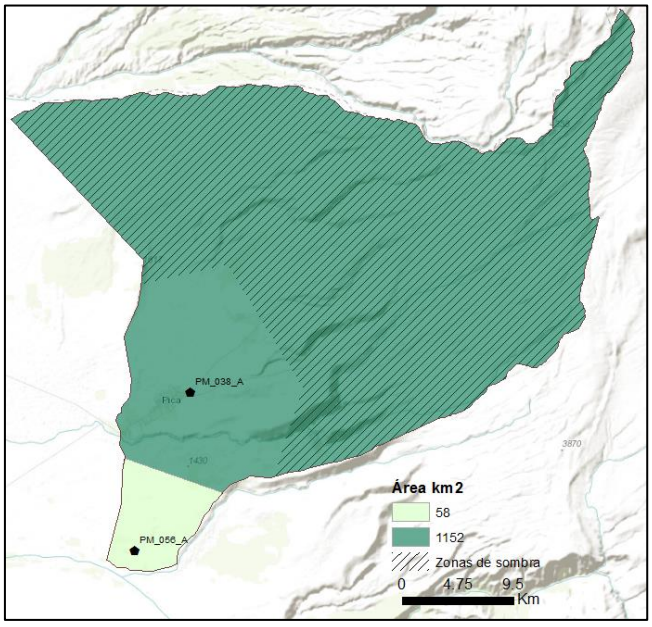


Figura 4.7. Área de influencia de los pozos de monitoreo de la red DGA en la UHA Pica

En la Figura 4.6, se aprecia que el único componente que define la ubicación de los pozos de monitoreo, es el aleatorio y posiblemente oportunista, ya que a pesar de que la mayoría de los pozos que hay en la UHA Pica están localizados en el sector del Oasis de Pica, posiblemente se escogieron estos pozos dado la posibilidad de contar con ellos para la red propuesta en la respectiva UHA. Sin embargo, la definición de las áreas de influencia mediante polígonos de Thiessen, dejan evidenciar que hay una superficie considerable de acuífero no monitoreada, y que desde el punto de vista regional, es de gran importancia debido a que allí se localiza el área de recarga del acuífero. Sin embargo, se puede entender que, en la actualidad, no existen pozos en estas zonas de sombra, pero como previo análisis crítico, se puede proponer en la nueva red de monitoreo, la localización de pozos en este sector para la definición de una red ideal. Aun así, como bien se señaló anteriormente, todo lo expuesto hasta el momento va ligado previamente a la definición de unos límites más asertivos desde el punto de vista hidrogeológico que administrativo.

4.2.2.2. Representatividad temporal de los datos

Al igual que en la UHA Pampa del Tamarugal, se ha aplicado un análisis estadístico de los datos bajo el mismo planteamiento anteriormente descrito. Los estadísticos se reúnen en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Estadísticos básicos de los datos de niveles en los pozos de la red de monitoreo en la UHA Pica

POZO	N	PERIODO DE DATOS	MEDIA	MEDIANA	DESV. ESTAND.	MÍNIMO	MÁXIMO	PER. 25%	PER.75%	K-S NORMAL
PM_038_A	64	2000/PTE	39.682	40.195	1.020	38.360	40.830	38.560	40.668	0
PM_056_A	66	2000/PTE	19.888	19.860	0.093	19.750	20.260	19.820	19.943	0.111

PER.: Percentil; PTE: Presente; K-S: Kolmogorov-Smirnoff; DESV.: Desviación.

Los dos pozos considerados en esta Unidad presentan valores con un comportamiento frecuente sin algún evento de carácter extraordinario que demarque un comportamiento diferente. En cuanto a la normalidad de los datos, se aprecia que los datos del pozo PM_056_A presenta una distribución normal mientras que el pozo PM_038_A no presenta esta distribución. La explicación a esta discrepancia no se debe a valores extremos ya que no se registra ninguno, ni a valores anómalos significativos. A pesar de lo anterior, el pozo PM_038_A en la actualidad se encuentra aterrado, por lo que parte de este comportamiento se puede explicar a factores externos desconocidos que estarían participando en este pozo y que llevarían al aterramiento actual del pozo.

Sin embargo, las consideraciones citadas en la UHA Pampa del Tamarugal para el ítem correspondiente (4.2.1.1), son aplicables en la UHA Pica.

4.2.3. UHA Sur Viejo

De igual forma a la UHA Pica, la UHA Sur Viejo alberga el 5% de los pozos de la red de monitoreo de la DGA, es decir, dos pozos de los 38 definidos para la red regional. En la descripción general, en el apartado de características generales de los pozos de la red, se detalló que los pozos PM_032_A y PM_074_A presentan una columna de agua de 0,30 m de

espesor, los cuales se ubican en la UHA Sur Viejo, por lo que se evidencia la necesidad de replantear los puntos de monitoreo a corto plazo, con el fin de garantizar una red de monitoreo estable en el tiempo capaz de suministrar una serie de datos suficiente para la caracterización y monitoreo del acuífero.

4.2.3.1. Representatividad espacial de los datos

Aplicando la misma metodología que en las otras dos UHA, se obtienen las respectivas áreas de influencia para la UHA Sur Viejo en la Figura 4.7.

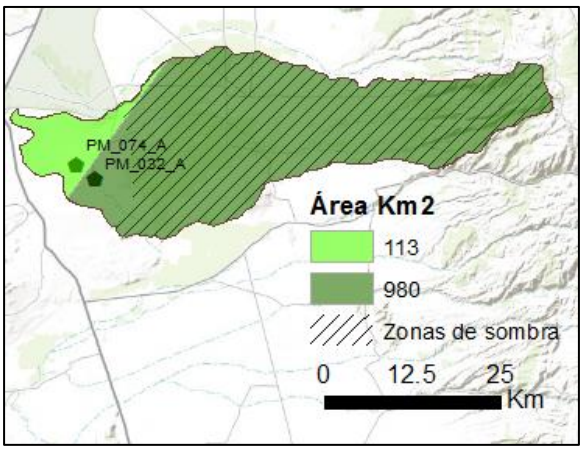


Figura 4.8. Área de influencia de los pozos de monitoreo de la red DGA en la UHA Sur Viejo

A diferencia de la UHA Pica, parece ser que los pozos de la red se han definido con el fin de monitorear la afección de la única actividad económica del sector desarrollada por la Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) con la explotación del nitrato en la faena minera Nueva Victoria. Sin embargo, desde el punto de vista de otros intereses hidrogeológicos, hay una zona de sombra en donde no se está monitoreando los niveles respectivos y por ende, se está dejando en dos pozos la responsabilidad de caracterizar una UHA de dimensiones considerables. Aun así, al igual que en los casos anteriores, es necesario definir con precisión los límites de la UHA teniendo en cuenta criterios hidrogeológicos.

4.2.3.2. Representatividad Temporal de los Datos

Al igual que en las dos anteriores UHA, se ha procedido a realizar un análisis estadístico de los datos de los registros de niveles en los pozos de la UHA Sur Viejo. Los resultados se recogen en la Tabla 6.

Tabla 4.8. Estadísticos básicos de los datos de niveles en los pozos de la red de monitoreo en la UHA Sur Viejo

POZO	N	MEDIA	MEDIANA	DESV. ESTAND.	MÍNIMO	MÁXIMO	PER. 25%	PER.75%	K-S NORMAL
PM_074_A	135	12.643	12.490	0.359	12.290	13.920	12.380	12.950	0
PM_032_A	126	14.470	14.085	1.802	0.000	16.840	13.450	15.893	0

Los dos pozos considerados en esta Unidad presentan valores con un comportamiento frecuente sin algún evento de carácter extraordinario que demarque un comportamiento diferente. Aun así, los datos no siguen una distribución normal, algo que se evidencia por los valores de desviación estándar y del respectivo test de Kolmogorov-Smirnoff. Las razones de la

interdependencia a factores desconocidos se puede deber a que como bien se dijo en el apartado 4.2.3.1., los pozos se localizan en la zona próxima al área de bombeo de la faena minera de la Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) Nueva Victoria, lo cual estaría infiriendo en el comportamiento de los datos a lo largo del tiempo.

Sin embargo, aunque posiblemente la localización de estos pozos es estratégica, para fines de caracterización del acuífero es conveniente tener información representativa y fiable, por lo que la consideración de nuevos pozos en el acuífero es necesaria teniendo en cuenta que su nueva localización debe responder al interés de caracterizar hidrogeológicamente el acuífero correspondiente. Asimismo, la información obtenida de esta red debe ser consistente en el tiempo e independiente de factores o fenómenos aleatorios y puntuales como puede ser un bombeo.

4.2.4. UHA Salar de Llamara

La UHA Salar de Llamara no posee pozos de monitoreo, por lo tanto es preciso decir que no se está monitoreando esta Unidad por parte de la DGA.

4.2.5. UHA Salar de Coposa

La UHA Salar de Coposa no posee pozos de monitoreo, por lo tanto es preciso decir que no se está monitoreando esta Unidad por parte de la DGA.

4.2.6. Otros Acuíferos

Próximo a la UHA Pampa del Tamarugal, en el sector sur-oriental, se localiza el pozo PM_087_A el cual es considerado como pozo de la red de monitoreo de la UHA Pampa del Tamarugal por parte de la DGA a pesar de que se localiza fuera de la delimitación de la misma (ver anexo 8 fichas pozos). Posiblemente este pozo pertenece al acuífero aluvial de la Quebrada de Chacarilla o bien, al acuífero de Pica.

Por otro lado, existen dos pozos JICA en el sector del Salar del Huasco a pesar de que la DGA no lo reconoce oficialmente como una UHA, lo cual se entiende por el hecho de que dicho sector es un espacio protegido, y por ende, no es apto para ser una UHA.

Bajo los dos planteamiento anteriores, se deja en evidencia la necesidad de definir los límites de los cuerpos de agua subterráneo con el fin de monitorearlos y caracterizarlos mediante una red que no solo responde en el sentido del aprovechamiento, sino también bajo las ópticas de otros intereses de gran importancia, sabiendo de ante mano que el ciclo hidrológico considera un gran número de componentes.

Asimismo, en la actualidad se reconocen otros cuerpos de aguas subterráneas en la región que no están siendo monitorizados en el presente pero que si tienen pozos de extracción asociados, lo cual se puede identificar mediante los DAA subterráneo otorgados a nivel regional (Figura 4.9). Por esta razón, se deja en evidencia la necesidad de monitorear estos cuerpos, ya que de presentarse la explotación de los mismos, es necesario monitorear su evolución.

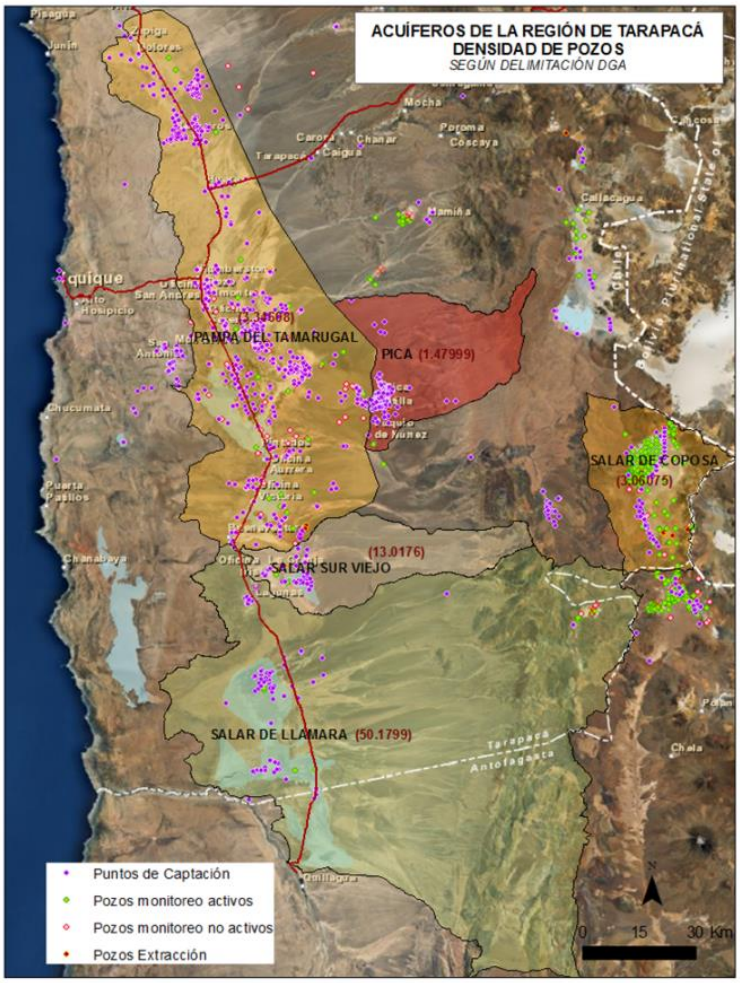


Figura 4.9. Localización de pozos a nivel regional. Se puede apreciar que hay pozos que están excluidos de la actual delimitación de las UHA definidas por la DGA.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA

5.1. Red de Monitoreo de Calidad de Agua

La planificación y gestión de los recursos hídricos requiere un conocimiento adecuado del estado de las aguas y las presiones a que están sometidos para permitir la identificación y caracterización de los posibles problemas así como la definición, implementación y seguimiento de medidas eficaces para su resolución. La base de este conocimiento es provista por programas de monitoreo que recopilan sistemáticamente una amplia gama de variables físicas, químicas y biológicas en distintos lugares de la región.

La implementación de una red de calidad del agua tiene como objetivo establecer un sistema de monitoreo que reunirá los elementos necesarios para una evaluación de la calidad de los recursos hídricos de una región. En general, se pueden enumerar los siguientes objetivos para la red de calidad de agua:

- Calificación del medio acuático de acuerdo con el uso;
- Evaluación de la calidad de las aguas continentales superficiales;
- Verificación del cumplimiento de la legislación nacional y comunitaria;
- Control de calidad de las fuentes de abastecimiento público de agua;
- Control de las fuentes de contaminación puntuales y difusas más significativas;
- Evaluación de la eficacia de los programas para reducir la contaminación;
- Identificación de los episodios de contaminación;
- Evaluación de la carga contaminante total descargada;
- Información base para establecimiento de modelos de calidad.

Para implementar una red de calidad es necesario recopilar información de base, incluyendo las fuentes de contaminación, el uso del suelo, la presión demográfica, los usos actuales y potenciales del agua y la definición de áreas sensibles. También la sistematización de diversas estaciones de calidad existentes en varias redes o estudios debe ser considerada y analizada (Rodier *et al.,* 2011).

El monitoreo debe ser programado con el objetivo de proporcionar los datos necesarios para el análisis de factores como la variabilidad de los parámetros en condiciones naturales o antrópicas y la variabilidad estacional de los mismos. También tiene como objetivo garantizar que los resultados del monitoreo reflejan los cambios causados por la actividad humana (Rodier *et al.,* 2011).

Por lo tanto, existe un interés evidente en la agrupación de los parámetros descriptores en conjuntos homogéneos para permitir una interpretación pertinente de los resultados analíticos. Consecuentemente, los parámetros físico-químicos se pueden organizar de acuerdo con el aspecto físico, la carga orgánica y los elementos minerales presentes en el agua.

Como las aguas naturales son un medio complejo, sus composiciones están directamente relacionadas con los constituyentes de las capas geológicas que atraviesan y su calidad se ve muy afectada por la vegetación, las prácticas agrícolas, la urbanización y en general por la actividad económica desarrollada en los lugares donde fluye el agua. Dado el desarrollo de la

química en el siglo XX y la comercialización de varias decenas de miles de sustancias sintéticas se ha observado la contaminación de las aguas naturales. Esto explica el gran aumento durante las últimas décadas del número de parámetros utilizados para definir la calidad del agua. En este contexto, es útil establecer en función de los usos del agua un grupo de parámetros que incluya la gama de posibles riesgos ocurrido (Pinto, 2012).

Las redes de monitoreo de calidad son fundamentales para el seguimiento de la evolución cualitativa de los acuíferos, permitiendo la planificación y gestión de estos recursos. Posibilitan la aplicación de medidas para minimizar la degradación cada vez que las situaciones de contaminación lo justifican. Las redes pueden ser de dos tipos: *de referencia* para caracterizar cualitativamente los diferentes medios y *específicos* para controlar situaciones puntuales de mayor riesgo, como las zonas de riego, zonas industriales y vertederos (Ribeiro et al., 1999).

También hay que señalar que las redes de monitoreo son dinámicas y, por lo tanto, los puntos a monitorear, las frecuencias y los parámetros a analizar deben ser ajustados de acuerdo a los resultados. De acuerdo a los conocimientos hidrogeológicos y/o la ocupación del suelo puede ser necesario aumentar o disminuir la densidad de la red.

Teniendo en cuenta las cuencas existentes en la región y las estaciones de monitoreo de las aguas superficiales y subterráneas de la DGA, se han analizado los datos de calidad. Los datos fueron tratados individualmente para una mejor detección de posibles errores y deficiencias, logrando así uno de los principales supuestos del análisis estadístico, que es la calidad de los datos. También hay que señalar que, en general, el tiempo de monitoreo estudiado fue de abril de 1970 hasta abril de 2013 (más de cuarenta años), con tres campañas al año. Por lo tanto, fue posible la preparación de mapas para las cuencas con estaciones y un mapa general de todas las cuencas y de las estaciones de muestreo estudiados, así como el estudio y el análisis de sus principales características.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que la DGA regional no toma las muestras según un protocolo de muestreo de agua. Se adjuntan ácido nítrico y ácido sulfúrico al agua en terreno, sin embargo no la transportan refrigerada al laboratorio. El proceso de acidificación protege las concentraciones de algunos elementos, es decir, retarda los cambios químicos y biológicos que ocurren al remover la muestra de la fuente original; no obstante, la refrigeración o almacenamiento a baja temperatura es la mejor manera de preservar la mayoría de las muestras por 24h, dado que ayuda a mantener las condiciones naturales de los iones.

En junio del 2007, el departamento de conservación y protección de recursos hídricos de la DGA publicó un *Manual de normas y procedimientos* (SIT Nº 132). En este manual, están descritas las acciones generales que las Direcciones Regionales realizaran para dar cumplimento con el Programa de monitoreo de las redes de calidad de aguas superficiales y subterráneas (DGA, 2007), que se enumeran a continuación.

1. Aguas superficiales

a) La sección muestreada debe tener aguas corrientes, homogénea y representar el mayor caudal, debiendo ser evitados los sectores de rápidos o saltos y cualquier lugar con alta turbulencia; además los lugares muy cercanos a las orillas o remansos con aguas detenidas no son lugares apropiados.

b) Las direcciones regionales deben medir "*in situ*" la temperatura, pH, conductividad específica (25ºC), turbiedad y oxígeno disuelto, con un equipo multiparámetro (DGA, 2007. Anexo 1 de la norma).
c) La botella para tomar la muestra se debe ambientar junto con la tapa por tres veces, enjaguándolas con la misma agua a ser muestreada. Se debe llenar las ¾ partes de la botella, a contracorriente, tapar firmemente y etiquetar registrando: nº de muestra, estación de muestreo, fecha y hora del muestreo.
d) A las muestras obtenidas se les adiciona el preservante (NCh 411/3) correspondiente de acuerdo al análisis a efectuar en el laboratorio ambiental (DGA, 2007. Anexo 2 de la norma).

2. Aguas subterráneas

a) Las direcciones regionales deben medir "in situ" la temperatura, pH, conductividad específica (25ºC), turbiedad y oxígeno disuelto, con un equipo multiparámetro (DGA, 2007. Anexo 1 de la norma).
b) El procedimiento de muestreo se efectúa de acuerdo a la norma NCh 411/11, Parte 11 y depende del tipo de pozo, sea de producción (con bomba) o de exploración (observación).
c) En el muestreo de un pozo con bomba se debe abrir la válvula de purga por un tiempo que permita evacuar toda el agua dentro de la tubería (volumen dentro de la tubería y el flujo máximo de la bomba). Se debe purgar 3 veces dicho volumen.
d) En los pozos sin bomba se debe purgar el volumen completo del pozo (conociendo el nivel estático, diámetro y la profundidad del pozo).

De las acciones presentadas es necesario tener en cuenta que la conductividad específica "*in situ*" se debe registrar para la temperatura ambiente y en el laboratorio medir para 25ºC (standard). Las botellas se deben rellenar en su totalidad, para evitar la presencia de burbujas y la alteración de los valores de los gases disueltos, bien como la velocidad de las reacciones que pueden ocurrir dentro de la botella.

Además, en la purga de los pozos, el volumen mínimo a remover no es fijo, sino un valor consignado como 3 a 5 veces el volumen de la columna de agua alojada en el pozo. La inclusión de la medición continua de parámetros indicadores de calidad (pH, conductividad eléctrica, temperatura, turbiedad y potencial redox) en esta práctica permitiría calibrar en cada caso el volumen a extraer. Así, la purga podría darse por finalizada cuando se cumple primero uno de los siguientes criterios:

- La remoción del volumen mínimo de purga (usualmente 3 volúmenes de la columna de agua)
- o las mediciones de los parámetros sean estables. El conjunto mínimo de parámetros a analizar son los dos primeros y turbiedad; la frecuencia de medición debería ser establecida entre 3 y 5 minutos, dándose por alcanzada la estabilización cuando tres lecturas sucesivas registradas presentan variaciones cercanas a: ± 0,3 para pH, ± 3% para conductividad eléctrica, ± 10% para turbidez, ± 10 mv para potencial redox y ± 0,2 ºC para temperatura (Appelo y Postma, 2010).

5.2. Red de Monitoreo de Calidad de Agua Superficial

La evaluación de la representatividad de las redes de monitoreo resultan de la verificación de su capacidad para cumplir con los objetivos establecidos para su funcionamiento. La red de monitoreo de la calidad del agua superficial tiene como objetivos principales:

- Evaluar la evolución temporal de la calidad del agua;
- Detectar las tendencias y los cambios en la calidad del agua a mediano y largo plazo;
- Identificar los factores que afectan la calidad, sus modificaciones y tendencias.

Los criterios para la selección de los sitios de monitoreo deben tener como premisa principal la implementación de estaciones en un conjunto de cuerpos de agua superficiales suficientes para proporcionar una evaluación global del estado de las aguas.

La red de monitoreo de la calidad de aguas superficiales en la región de Tarapacá (Figura 1) comprende 10 estaciones de muestreo (Tabla 5.1). Sin embargo, a finales de los años 70 e inicio de los 80, la red contaba con 27 estaciones siendo más representativa de la región, ya que se podía analizar la calidad de más cuencas (Figura 1). Las estaciones actuales de la red de monitoreo de las aguas superficiales cubren 6 cuencas, habiendo que 22 no son monitoreadas o sea el 79% de la región.

De la observación de la Figura 5.10. 1, se puede concluir que ninguna de las redes (actual y no vigente) es representativa de la región, ya que más de la mitad de las unidades hidrográficas (Soga, Quipisca, Juan Morales, Quisma, Chacarilla, Ramada y Chipana y cuencas costeras) no son monitoreadas y en general, en las unidades monitoreadas, los puntos se encuentran agrupados en determinadas zonas, sin alcanzar la cobertura total de la cuenca.

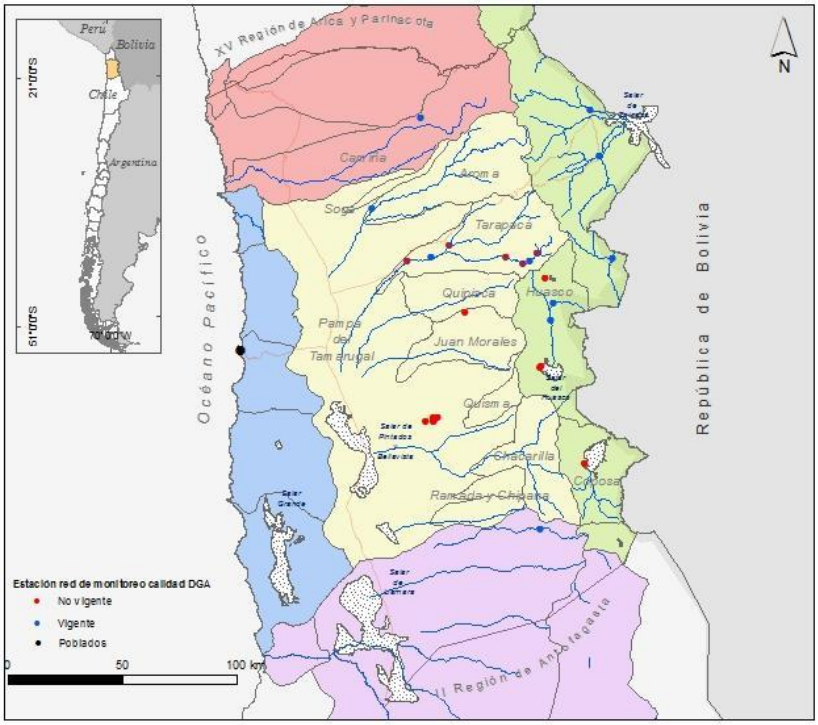


Figura 5.10. Red de monitoreo de calidad de agua superficial

Tabla 5.1. Características de las estaciones vigentes de la red de monitoreo de calidad de agua superficial (DGA, 2014)

Cuenca o Subcuenca	Río	Estación	Objetivo	Código	Entrada en funcionamiento
Camiña	Camiña	Camiña en Altusa	Calidad	C_001_A	Abril de 1970
Entre estero Sencata y rio Sacaya	Isluga	Isluga de Bocatoma	Calidad y Fluviométrica	CF_003_A	Abril de 1970
Entre estero Sencata y rio Sacaya	Cariquima	Cariquima en Cariquima	Calidad	C_002_A	Abril de 1976
Entre estero Sencata y rio Sacaya	Cancosa	Cancosa en el Tambo	Calidad y Fluviométrica	CF_007_A	Abril de 1976
Aroma	Aroma	Aroma en Ariquilda	Calidad	C_003_A	Enero de 1994
Tarapacá	Tarapacá	Tarapacá en Laonsana	Calidad y Fluviométrica	CF_001_A	Mayo de 1985
Tarapacá	Coscaya	Coscaya en Saitoco	Calidad y Fluviométrica	CF_005_A	Junio de 1985
Salar del Huasco	Piga	Piga en Collagua	Calidad y Fluviométrica	CF_006_A	Enero de 1960
Salar del Huasco	Collacagua	Collacagua en Penablanca	Calidad y Fluviométrica	CF_004_A	Febrero de 1981
Loa Medio	Huatacondo	Huatacondo en Copaquire	Calidad, Fluviométrica y Meteorológica	CFM_001_A	Junio de 1977

Además de la representatividad de la red de monitoreo, es necesario verificar si la misma se adecua al propósito para que fue implementada, teniendo en cuenta algunas características: tipo de red; sus objetivos; parámetros a monitorear; necesidades de monitoreo mínimas.

Los parámetros generalmente analizados en las aguas superficiales son: aluminio (Al^{3+}), arsénico (As^{5+}), bicarbonato (HCO_3^-), boro (B^+), calcio (Ca^{2+}), carbonato (CO_3^{2-}), cloruro (Cl^-), cobre (Cu^+), conductividad (CE), cromo (Cr^{2+}), demanda química de oxígeno (DQO), fosfato (PO_4^{3-}), hierro (Fe^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), manganeso (Mn^{2+}), mercurio (Hg^{2+}), nitrato (NO_3^-), oxígeno disuelto (O_2), pH, potasio (K^+), sodio (Na^+), sulfato (SO_4^{2-}), temperatura (T) y zinc (Zn^{2+}). Las muestras son analizadas trimestralmente (Diciembre, abril, agosto y noviembre). No obstante, en la actualidad y **desde el año 2006, la DGA no analiza el HCO_3^-** que junto con Cl^-, SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, NO_3^{-2i}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, suele ser uno de los iones mayoritarios que forman las sales disociadas en las aguas.

El anhídrido carbónico (CO_2) disuelto en el agua y los diversos compuestos que forma en ella juegan un papel importante en su química. Se disuelve en el agua en función de la presión parcial del CO_2, con una parte que permanece en estado gaseoso mientras otra reacciona con el agua dando origen al ácido carbónico que se disocia parcialmente en los iones carbonato y bicarbonato (Custodio & Llamas, 2001). En aguas con pH inferior a 8.3, que corresponde a la mayoría de las aguas naturales, la especie carbonatada dominante es el ion bicarbonato y la secuencia iónica normal de una agua recién infiltrada es: $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$, que después de un largo tiempo de residencia se tiende a invertir. Por lo tanto, cualquier estudio de aptitud del

[2] No siempre este elemento es considerado como mayoritario para la realización del balance de iones; por su origen es generalmente asociado a fenómenos antrópicos.

agua para un determinado uso, información sobre el origen y flujo del agua subterránea, los procesos físico-químicos que la afectan y el estudio de las causas de contaminación, sus efectos y control, debería presentar el contenido en el ion bicarbonato.

Además del análisis de los parámetros monitoreados, son verificadas algunas brechas en la red de monitoreo: no hay análisis del elemento esencial fluoruro, de algunas sustancias no esenciales (cadmio y cianuro) y parámetros organolépticos (color, olor, sabor, amoníaco y compuestos fenólicos), de todas las sustancias y componentes orgánicas, productos secundarios de la desinfección, elementos radioactivos y plaguicidas (Decreto Nº 131 de marzo de 2007).

5.2.1. Análisis de Datos

La etapa de análisis de datos consistió en la realización de gráficos de distribución temporal para cada parámetro analizado (anexo 6), un análisis estadístico básico (número de muestras, mínimo, máximo, media, mediana, desviación estándar, primero y tercero cuartiles) (Tabla 5.2) diagrama de caja (Figura 5.2) y diagramas de Piper (Figura 5.3) y Stiff (Figura 5.4). En el anexo 7 se presentan las fechas de monitoreo de los parámetros físico-químicos medidos en cada una de las estaciones.

Para hacer la clasificación y determinar la calidad del agua, se debe hacer primero una evaluación del análisis químico comprobando la consistencia de los análisis realizados en laboratorio a través de un balance iónico, lo cual indica que la muestra de agua fue analizada correctamente y los resultados son confiables.
El balance iónico mide la diferencia entre el total de aniones y cationes expresados en mili equivalentes por litro (meq/L). El error del balance iónico, se define según la ecuación siguiente (Custodio & Llamas, 2001):

$$Error\ (\%) = \frac{(\sum cationes - \sum aniones)}{(\sum cationes + \sum aniones)} \times 100$$

Los rangos de error para aceptar o no el análisis de una muestra de agua, dependen del valor de conductividad eléctrica (Custodio & Llamas, 2001), o de la suma de aniones (Crites & Tchobanoglous, 2000). Estos valores son conservadores y por lo tanto, se acepta un valor máximo de 10%, siendo que el 5% es el valor más común.
En los análisis de las aguas de la región de Tarapacá realizados por la DGA, en más de 50% de los casos se obtuvo un valor de error de balance iónico inferior a 5%. Sin embargo, en este documento se utilizaron todos los análisis realizados, para no disminuir la cantidad de datos siempre que los errores no fueran mayores a un 10%.

Tabla 5.2 – Estadísticos básicos de las aguas superficiales (red de monitoreo DGA)

Estación	Estadistico	pH	T	CE	Na^{+}	K^{+}	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}	CO_3^{2-}	NO_3^{2-}
C_001_A	Nº Analisis	70	58	69	69	69	69	69	56	64	49	48	42
	Mínimo	5.62	5.20	304.00	38.62	6.10	2.80	36.95	48.57	90.30	7.78	0.00	0.01
	Máximo	8.58	25.30	6530.00	234.03	83.64	27.54	148.30	299.36	411.78	128.00	0.00	1.46
	Media	7.52	16.61	1131.98	127.21	21.48	13.40	60.64	189.73	199.72	50.80	0.00	0.23
	Mediana	7.54	16.88	1033.50	125.00	19.90	11.81	54.17	189.91	181.67	45.76	0.00	0.10
	Desv. Estándar	0.61	4.57	721.60	36.65	9.57	4.87	20.33	52.82	60.44	28.83	0.00	0.31
	1º Cuartil	7.09	13.05	894.00	107.50	17.40	10.84	48.10	154.09	164.50	33.70	0.00	0.06
	3º Cuartil	7.97	19.93	1187.00	147.20	23.90	13.70	62.00	222.15	212.00	54.90	0.00	0.25
C_002_A	Nº Analisis	58	50	56	56	56	56	56	53	50	39	39	41
	Mínimo	7.09	0.50	0.47	165.69	25.10	15.30	14.05	61.30	255.53	234.92	0.00	0.02
	Máximo	8.96	26.31	6250.00	911.39	96.50	96.27	152.65	1081.30	738.00	748.30	87.00	3.03
	Media	8.00	15.14	3446.98	616.65	68.96	44.10	90.03	628.57	468.80	496.71	14.80	0.27
	Mediana	7.95	14.95	3491.00	594.99	69.11	44.75	92.82	618.39	469.86	511.40	0.00	0.17
	Desv. Estándar	0.42	6.03	995.58	158.70	12.64	11.42	28.87	187.30	107.49	138.80	24.98	0.49
	1º Cuartil	7.73	10.14	3069.25	527.91	62.30	37.40	80.30	529.60	392.60	397.85	0.00	0.09
	3º Cuartil	8.26	19.38	4142.50	738.55	76.62	47.98	107.28	747.80	546.82	603.11	22.20	0.25
CF_001_A	Nº Analisis	32	29	32	32	32	32	32	32	32	32	32	26
	Mínimo	7.49	10.50	1214.00	135.41	13.49	10.20	65.69	105.46	240.76	84.64	0.00	0.01
	Máximo	9.20	28.00	3530.00	356.34	41.10	38.76	160.00	365.50	720.02	249.00	27.90	0.48
	Media	8.20	19.39	1823.06	237.65	21.92	22.38	107.69	194.99	466.40	191.74	2.87	0.20
	Mediana	8.21	19.94	1781.00	231.21	20.83	21.54	105.29	188.20	459.44	203.48	0.00	0.18
	Desv. Estándar	0.37	4.95	461.95	50.72	5.12	6.01	19.84	53.61	98.19	41.07	6.62	0.15
	1º Cuartil	7.91	15.50	1492.75	200.15	19.59	19.52	95.23	160.91	398.50	176.21	0.00	0.07
	3º Cuartil	8.38	22.97	1963.50	270.48	22.58	25.18	118.73	215.50	526.40	215.87	0.00	0.29
CF_003_A	Nº Analisis	53	50	53	52	52	52	52	49	46	33	33	39
	Mínimo	7.40	5.98	2.78	22.12	12.78	15.50	81.20	2.33	329.05	97.30	0.00	0.00
	Máximo	9.76	21.06	11160.00	162.10	39.10	72.93	150.15	139.30	527.60	202.11	14.94	9.71
	Media	8.24	13.36	1396.03	96.76	19.84	40.85	103.32	78.19	409.08	141.07	2.83	0.39
	Mediana	8.27	13.39	1228.00	93.83	19.18	40.06	98.15	75.10	407.50	138.20	0.00	0.15
	Desv. Estándar	0.40	3.97	1400.98	22.71	4.93	7.55	13.66	24.08	39.42	23.13	4.63	1.53
	1º Cuartil	8.05	11.18	1099.00	82.26	16.55	36.89	95.79	60.90	381.13	126.00	0.00	0.08
	3º Cuartil	8.43	15.73	1331.00	110.75	22.32	42.91	107.60	92.50	427.21	159.80	4.78	0.19
CF_004_A	Nº Analisis	63	56	62	61	61	61	61	61	56	41	41	41
	Mínimo	7.45	3.00	210.00	44.60	5.09	16.70	20.90	3.40	47.00	169.00	0.00	0.00
	Máximo	10.11	26.76	1314.70	89.00	19.20	36.80	53.42	49.00	125.00	333.70	50.10	5.54
	Media	8.22	15.53	608.88	67.58	9.91	21.79	39.28	25.68	80.63	262.28	6.56	0.34
	Mediana	8.13	15.91	618.15	65.40	9.70	21.46	39.35	25.97	77.75	268.00	0.00	0.17
	Desv. Estándar	0.52	5.93	150.10	9.60	2.42	2.87	5.86	7.49	15.76	33.59	12.46	0.85
	1º Cuartil	7.88	10.99	565.25	60.92	8.70	20.00	36.65	22.58	71.05	251.90	0.00	0.13
	3º Cuartil	8.45	20.41	660.00	74.50	10.20	23.11	42.10	29.10	87.50	285.20	7.60	0.24
CF_005_A	Nº Analisis	47	47	48	48	48	48	48	45	42	27	26	36
	Mínimo	7.33	0.45	122.30	74.17	10.89	4.76	50.60	49.38	195.00	70.25	0.00	0.01
	Máximo	9.85	19.91	2480.00	163.88	36.80	56.80	113.63	119.36	575.00	160.70	22.81	12.61
	Media	8.37	12.45	1046.68	122.08	18.46	9.81	72.93	94.57	281.05	116.48	4.15	0.50
	Mediana	8.25	13.10	1023.50	122.90	18.09	8.65	70.68	96.00	273.06	113.70	0.00	0.12
	Desv. Estándar	0.58	4.68	307.89	16.57	4.25	7.08	11.51	13.35	55.91	18.43	6.85	2.08
	1º Cuartil	7.90	8.83	964.50	111.10	16.18	7.91	66.91	84.00	256.25	108.50	0.00	0.09
	3º Cuartil	8.80	16.22	1079.25	131.97	19.22	9.70	75.97	104.20	299.37	129.50	6.20	0.19
CF_006_A	Nº Analisis	51	50	50	49	49	49	49	47	44	29	29	38
	Mínimo	7.09	6.07	57.90	36.23	4.16	17.50	28.70	4.25	10.00	169.60	0.00	0.03
	Máximo	9.96	24.07	1356.20	74.06	28.31	33.31	55.65	47.74	118.14	273.90	42.00	0.80
	Media	8.02	15.94	556.84	48.17	8.58	23.91	39.21	16.64	73.20	239.38	10.91	0.17
	Mediana	7.90	15.71	565.34	46.40	7.85	23.78	38.10	15.17	72.43	247.58	0.00	0.14
	Desv. Estándar	0.54	4.80	150.50	7.82	3.31	3.27	5.85	6.40	17.25	27.30	13.72	0.14
	1º Cuartil	7.61	12.58	525.50	42.94	7.43	21.89	35.69	13.46	64.68	222.80	0.00	0.11
	3º Cuartil	8.50	20.15	582.75	52.87	8.50	25.10	43.05	18.40	85.00	260.57	20.87	0.18
CF_007_A	Nº Analisis	59	55	59	58	58	58	58	55	52	37	36	43
	Mínimo	7.29	6.34	717.00	338.00	3.54	23.50	13.90	4.70	192.00	226.40	0.00	0.01
	Máximo	9.23	23.36	6310.00	1299.00	148.00	57.01	174.30	1445.00	826.74	803.66	114.60	4.67
	Media	8.10	14.77	4449.90	797.04	81.04	37.67	109.12	898.66	451.78	550.95	8.66	0.30
	Mediana	8.04	16.00	4580.00	807.11	86.00	36.64	111.01	955.00	460.58	552.24	0.00	0.20
	Desv. Estándar	0.33	4.45	1028.75	207.17	21.96	6.52	36.56	270.27	101.33	128.16	22.16	0.70
	1º Cuartil	7.90	10.82	3702.50	626.24	68.00	33.13	95.44	741.22	384.10	507.40	0.00	0.10
	3º Cuartil	8.24	18.57	5210.30	973.19	94.08	41.27	136.28	1064.57	500.00	643.80	2.61	0.28
CFM_001_A	Nº Analisis	60	52	59	58	58	58	58	58	54	39	37	39
	Mínimo	7.29	5.00	372.10	30.80	4.02	10.80	15.03	20.06	150.00	15.90	0.00	0.02
	Máximo	9.43	22.70	4848.00	515.00	25.00	361.98	601.00	642.00	2101.00	246.60	16.10	0.94
	Media	8.12	16.26	1255.53	83.02	7.23	35.21	156.51	85.02	460.64	158.96	1.42	0.20
	Mediana	8.11	16.24	1034.00	54.90	5.93	18.55	144.75	50.95	361.80	158.30	0.00	0.14
	Desv. Estándar	0.42	3.87	850.03	102.59	4.09	63.06	79.43	128.96	395.23	42.22	3.72	0.21
	1º Cuartil	7.90	14.03	984.78	50.31	5.31	16.46	123.90	48.17	320.07	138.00	0.00	0.09
	3º Cuartil	8.29	19.02	1186.00	63.89	7.12	20.90	166.66	57.60	400.45	175.68	0.00	0.19

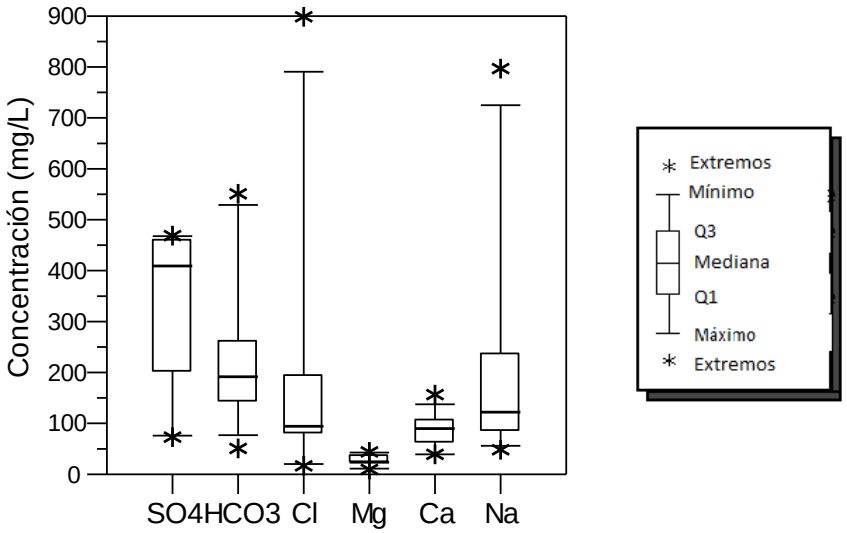


Figura 5.2. Diagrama de caja de las aguas superficiales (estaciones de monitoreo DGA)

Del análisis del diagrama de caja (Figura 5.2) se verifica que el ion dominante dentro de los mayoritarios es el sulfato; sin embargo su distribución no es simétrica, ya que la mediana se encuentra desplazada hacia los valores más altos. El elemento que presenta la mayor dispersión de los valores es el cloruro, porque los valores más altos (el bigote) representan más de cuatro veces la mediana, presentado también valores atípicos (aquellos valores apartados del cuerpo principal de los datos de 1,5 a 3 veces el valor del rango inter cuartil) que pueden representar los efectos de causas extrañas o algún error de medición o registro.

La clasificación por iones dominantes utiliza herramientas gráficas para su representación para simplificar la representación de una gran cantidad de datos, en especial cuando se hace comparaciones entre varios análisis de aguas de un mismo lugar en épocas diferentes o lugares diferentes (Custodio & Llamas, 2001). Se denomina el agua por el anión y catión que sobrepasa el 50% de sus sumas, cuando esto no ocurre, se indican los dos más abundantes.

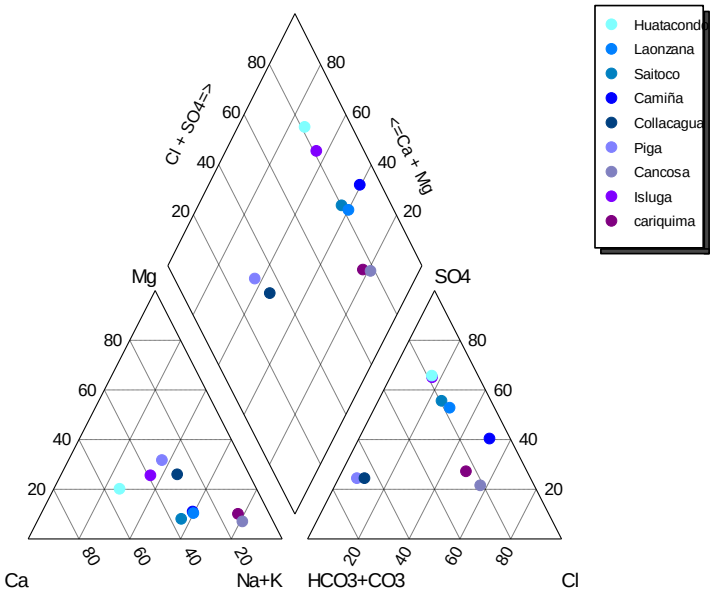


Figura 5.3. Diagrama de Piper de las aguas superficiales (estaciones de monitoreo DGA)

La figura 5.3 representa el diagrama de Piper para cada punto de muestreo y muestra la composición química de las aguas de la región. La figura 5.4 es el diagrama de Stiff en el cual se representa la variación de la composición química de las aguas. De la observación de las *Figura 5.*figuras se puede concluir que las aguas superficiales de la región presentan una composición muy variada, que va desde aguas sulfatadas cálcicas (Huatacondo) y magnésicas (Isluga), hasta aguas cloruradas sódicas (Laonzana, Saitoco, Camiña, Cariquima y Cancosa) y bicarbonatadas magnésicas (Piga y Collacagua). Sin embargo, las aguas presentan una concentración de elementos mayoritarios muy baja, lo que se puede ver por la dimensión de los diagramas de Stiff.

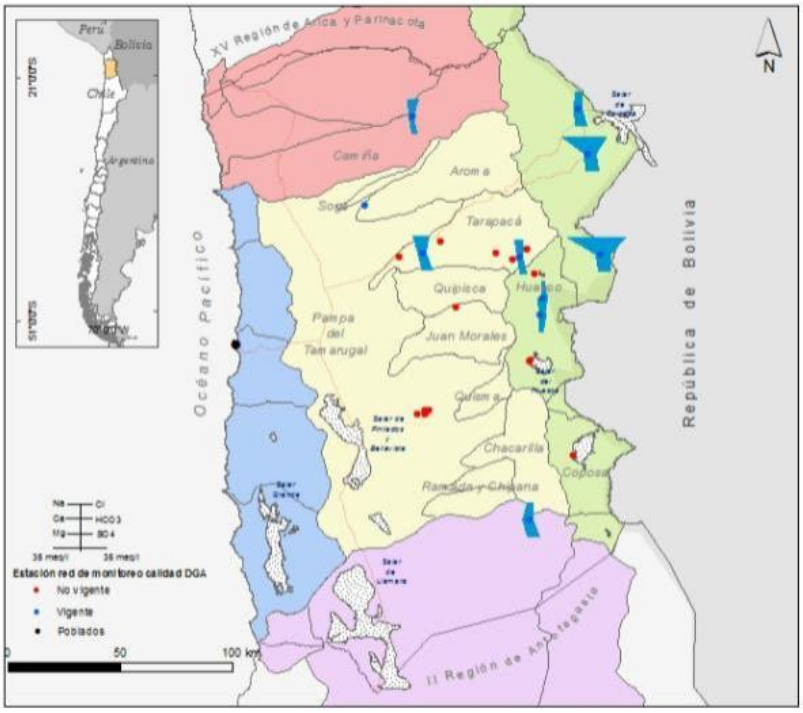


Figura 5.4. Diagrama de Stiff de las agua superficiales (red de monitoreo DGA)

5.2.2. Análisis Espacial de Datos

La cuenca de Camiña tiene una superficie de 2.800 km^2 y presenta conexión al mar. Tiene sólo una estación de monitoreo. De este modo, se puede decir que esta cuenca tiene un número insuficiente de estaciones, que no cubren toda la zona. La cuenca arreica de Aroma, con una superficie total de 1.759 km^2, presenta igualmente una estación de monitoreo. La cuenca de Tarapacá (1.735 km^2), con dos estaciones de monitoreo un afluente principal sin monitoreo. La cuenca entre Estero Sencata y el río Sacaya es la cuenca de la región que más estaciones tiene (tres), para una área de 3.626 km^2. No obstante, la presencia de ecosistemas especiales como el salar de Coposa y la frontera con Bolivia llevan a decir que el número de estaciones no es suficiente. El salar de Huasco tiene dos estaciones y la cuenca Loa medio sólo una.

En conclusión, el número de estaciones no es representativo de la calidad de las aguas superficiales, ya que no están cubiertas todas las cuencas de la región y las estaciones que

existen en un número muy bajo de cuencas (seis) no presenta una distribución homogénea ni una cobertura total de la cuenca, donde algunos afluentes con aporte de agua importante no tienen estaciones de monitoreo. Además, los parámetros analizados no siempre se ajustan a las actividades existentes, no se realizan análisis de coliformes totales, sabiendo que la mayoría de los pueblos de la Región de Tarapacá no tienen red de alcantarillado ni análisis de los pesticidas utilizados en las cuencas con uso agrícola.

5.3. Red de Monitoreo de Calidad de Agua Subterránea

La red de monitoreo de calidad del agua subterránea, que consta de 7 puntos de muestreo (Figura 5.5 y Tabla 5.3) tiene como objetivos:

- Evaluar la calidad de las aguas subterráneas;
- Identificar los cambios en la calidad del agua;
- Proporcionar información de base para los modelos de calidad;
- Identificar las situaciones de contaminación difusa y puntual;
- Ayudar a la interpretación de los datos de cantidad.

Los objetivos de la red de monitoreo deben permitir una análisis sistemática y amplia del estado del agua.

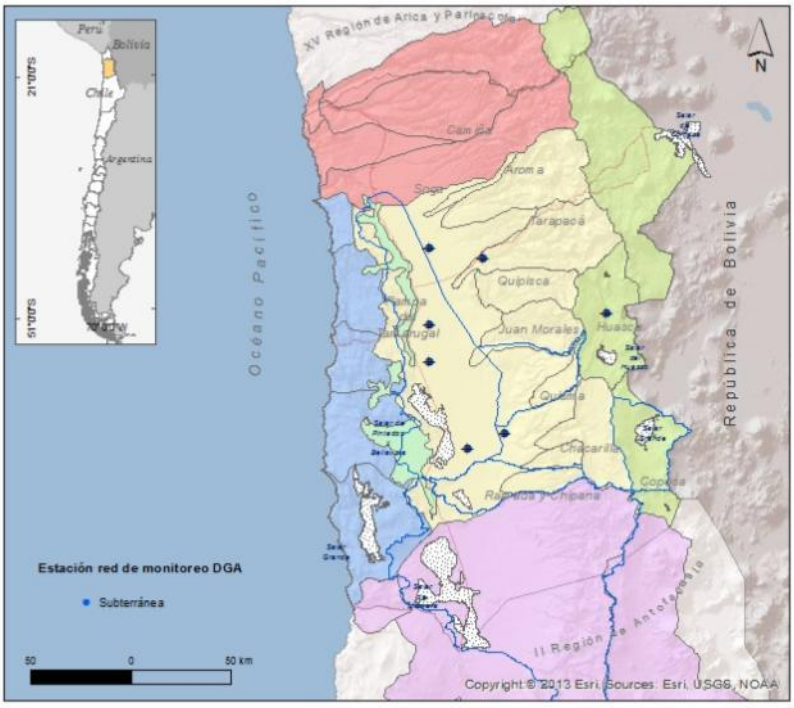


Figura 5.5. Red de Monitoreo de Calidad de Aguas Subterráneas

Tabla 5.3 - Características de las estaciones vigentes de la red de monitoreo de calidad de agua subterránea

Estación	Objetivo	Código	Entrada en funcionamiento
Quebrada Aroma	Calidad	PM_093_A	Diciembre 1997
Quebrada Tarapacá en Pachica	Calidad	PM_092_A	Septiembre 2000
Pozo JICA D	Calidad y Piezométrica	PM_088_A	Diciembre 1997
Pozo JICA E	Calidad y Piezométrica	PM_089_A	Diciembre 1997
Quebrada Chacarilla	Calidad y Piezométrica	PM_087_A	Diciembre 1997
Pozo JICA F	Calidad y Piezométrica	PM_090_A	Enero 1994
Pozo JICA G	Calidad y Piezométrica	PM_085_A	Enero 1994

La red de monitoreo de las aguas subterráneas es muy deficiente en la región de Tarapacá, como se puede ver en la Figura 5.6. Sólo la unidad hidrogeológica de aprovechamiento (definida por la DGA) Pampa del Tamarugal tiene 3 puntos de monitoreo, las otras masas de agua identificadas no presentan puntos de monitoreo.

5.3.1. Análisis de datos

Para el análisis de datos se realizaron gráficos de distribución temporal para cada parámetro analizado (anexo 6), un análisis estadístico básico (número de muestras, mínimo, máximo, media, mediana, desviación estándar, primero y tercero cuartiles) (Tabla 5.4), diagrama de caja (Figura 5.6) y diagramas de Piper (Figura 5.7) y Stiff (Figura 5.8). En el anexo 7 se puede observar las fechas en las cuales se realizó el monitoreo de los parámetros físico-químicos en cada una de las estaciones.

Tabla 5.4 - Estadísticos básicos de las aguas superficiales (red de monitoreo DGA)

Estación	Estadistico	pH	T	CE	Na^{+}	K^{+}	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}	CO_3^{2-}	NO_3^{2-}
PM_085_A	Nº Analisis	48	47	49	48	48	48	48	48	43	28	28	36
	Mínimo	6,05	8,30	482,00	52,11	8,96	3,70	6,74	43,80	19,00	206,61	0,00	0,00
	Máximo	8,77	18,10	1593,00	163,90	28,39	28,40	56,70	112,54	400,00	338,20	33,40	2,03
	Média	8,18	11,84	803,28	134,95	13,91	7,27	16,25	79,27	67,16	260,46	8,30	0,14
	Mediana	8,32	11,10	812,00	144,12	14,00	6,55	14,63	84,23	53,57	257,00	0,00	0,05
	Desv. Estándar	0,51	2,36	176,13	24,18	2,89	3,82	8,75	16,48	56,88	38,05	11,14	0,34
	1º Cuartil	7,96	10,28	757,20	124,10	12,40	5,55	10,34	77,97	43,90	227,09	0,00	0,03
	2º Cuartil	8,51	13,12	851,00	149,65	14,88	8,01	17,54	88,25	73,75	291,41	12,50	0,11
PM_087_A	Nº Analisis	46	45	46	46	46	34	46	46	42	26	26	35
	Mínimo	8,31	17,62	551,00	233,52	2,96	0,00	0,06	2,33	213,10	56,42	13,50	0,01
	Máximo	10,51	34,68	2588,20	339,00	50,00	8,19	5,08	156,87	400,00	236,20	74,50	0,87
	Média	9,27	27,69	1373,22	295,97	7,36	0,93	2,69	130,71	275,63	143,44	41,78	0,22
	Mediana	9,31	27,85	1390,50	292,67	5,91	0,12	2,61	131,36	269,82	139,31	42,64	0,13
	Desv. Estándar	0,47	2,45	240,83	21,29	7,03	2,22	1,06	20,52	31,24	42,19	17,83	0,23
	1º Cuartil	9,10	27,05	1334,00	283,36	5,45	0,10	2,15	128,92	262,23	119,78	29,28	0,05
	2º Cuartil	9,52	29,06	1412,67	312,44	6,40	0,20	3,28	135,14	285,63	179,44	53,46	0,30
PM_088_A	Nº Analisis	46	46	47	46	46	46	46	45	40	20	21	33
	Mínimo	7,62	21,35	2550,00	356,93	18,77	4,53	116,11	523,77	130,20	0,00	0,00	0,00
	Máximo	10,18	28,56	4970,00	702,91	111,44	48,90	450,61	1024,00	675,30	151,05	55,90	6,20
	Média	8,93	24,49	3605,23	455,28	51,56	14,80	235,17	947,74	265,91	34,09	17,97	0,47
	Mediana	9,07	24,11	3550,00	447,92	49,30	11,21	221,24	953,77	230,39	24,90	13,80	0,07
	Desv. Estándar	0,58	1,66	430,12	50,71	13,87	8,71	58,08	71,94	111,72	36,68	16,98	1,19
	1º Cuartil	8,56	23,61	3415,00	428,21	46,95	9,54	207,63	933,43	191,63	9,87	3,00	0,02
	2º Cuartil	9,29	25,14	3675,74	472,09	51,61	16,84	253,34	978,75	310,20	45,60	25,80	0,26
PM_089_A	Nº Analisis	47	47	47	47	47	47	47	45	32	26	25	34
	Mínimo	3,47	18,79	1468,86	3,45	16,15	0,18	113,26	735,40	0,00	0,00	0,00	0,01
	Máximo	9,67	33,41	4320,00	391,64	144,76	20,60	278,83	1206,20	75,00	46,40	11,20	0,56
	Média	7,68	23,73	2646,87	298,94	41,70	5,10	163,90	806,29	13,27	14,77	1,48	0,13
	Mediana	8,02	23,55	2580,00	301,82	39,09	3,74	160,15	794,60	4,30	12,23	0,00	0,06
	Desv. Estándar	1,33	2,19	429,87	52,29	17,55	4,14	26,99	71,04	20,40	11,96	3,50	0,16
	1º Cuartil	7,12	22,83	2525,00	288,76	36,95	2,94	149,61	772,85	2,23	6,08	0,00	0,02
	2º Cuartil	8,51	24,33	2673,00	321,18	41,00	5,80	169,04	817,49	9,30	20,47	0,00	0,11
PM_090_A	Nº Analisis	48	46	48	47	47	47	47	47	42	27	27	37
	Mínimo	7,34	18,76	2004,70	205,82	17,56	0,16	69,00	405,23	45,00	115,44	0,00	0,03
	Máximo	8,52	31,25	3930,30	433,63	316,62	32,75	154,01	530,00	563,39	232,54	19,00	0,73
	Média	7,92	27,11	2596,86	365,26	65,12	26,81	98,86	440,47	442,31	185,32	1,56	0,41
	Mediana	7,94	27,30	2546,50	366,50	58,00	27,70	97,87	431,50	457,63	198,00	0,00	0,38
	Desv. Estándar	0,27	1,84	350,95	38,33	39,75	5,76	17,31	26,76	86,78	30,88	4,50	0,17
	1º Cuartil	7,73	26,70	2484,50	351,66	55,39	27,20	92,05	427,05	426,81	162,45	0,00	0,31
	2º Cuartil	8,13	27,90	2581,55	385,43	60,98	28,46	102,82	443,55	475,00	206,55	0,00	0,51
PM_092_A	Nº Analisis	36	36	36	36	36	36	36	36	31	15	15	26
	Mínimo	7,02	16,26	1161,48	6,12	4,95	1,37	294,51	384,98	681,00	69,90	0,00	0,08
	Máximo	8,63	34,60	6540,00	863,42	288,33	30,81	1122,76	1031,81	2300,00	180,14	0,00	79,69
	Média	7,52	24,68	4420,23	488,58	14,75	7,20	617,03	516,34	1681,55	106,29	0,00	22,71
	Mediana	7,37	24,84	4410,00	461,59	6,35	6,58	620,83	477,90	1698,70	88,50	0,00	21,32
	Desv. Estándar	0,38	2,61	923,25	133,16	46,94	4,30	169,25	138,75	376,19	37,99	0,00	16,85
	1º Cuartil	7,27	23,70	4205,00	432,42	5,98	6,07	525,02	441,45	1558,74	79,67	0,00	17,48
	2º Cuartil	7,84	25,36	4764,75	528,45	7,03	7,37	708,81	553,84	1929,32	131,50	0,00	25,95
PM_093_A	Nº Analisis	47	47	48	47	47	47	47	44	40	25	25	36
	Mínimo	7,09	21,66	4130,00	345,42	2,52	0,25	2,30	1108,31	1,00	29,90	0,00	0,01
	Máximo	9,41	30,93	6550,00	1336,72	100,00	34,40	166,00	1611,80	550,00	180,30	69,60	6,83
	Média	8,56	26,01	4938,92	914,59	78,42	11,29	35,44	1379,39	162,95	101,54	17,60	0,29
	Mediana	8,56	25,76	4819,15	897,00	81,77	7,81	24,99	1375,79	103,84	97,70	13,60	0,04
	Desv. Estándar	0,47	1,69	543,37	153,63	17,94	9,71	35,04	119,15	177,12	36,44	21,03	1,13
	1º Cuartil	8,33	25,14	4572,50	852,96	73,98	2,05	10,63	1302,75	7,99	82,40	0,00	0,02
	2º Cuartil	8,80	26,82	5271,25	987,79	86,07	19,00	51,54	1447,39	302,29	124,38	25,60	0,10

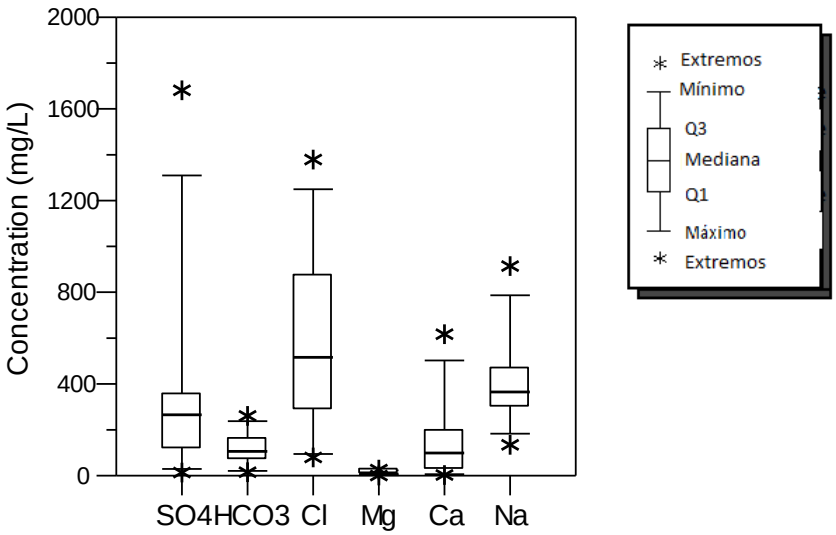


Figura 5.6. Diagrama de caja de las aguas subterráneas (red de monitoreo DGA)

Por la observación del diagrama de caja (Figura 5.6) se verifica que el ion dominante dentro de los mayoritarios es el cloruro; sin embargo, su distribución no es simétrica, ya que la mediana se encuentra desplazada hacia los valores más bajos. Los elementos que presentan mayor dispersión de los valores son el cloruro y el sulfato, porque los valores más altos (el bigote) es más de cuatro veces la mediana; todos los elementos presentan valores atípicos (apartados del cuerpo principal – caja - 1.5 a 3 veces el valor del rango inter cuartil), lo que puede tener causas extrañas o algún error de medición o registro.

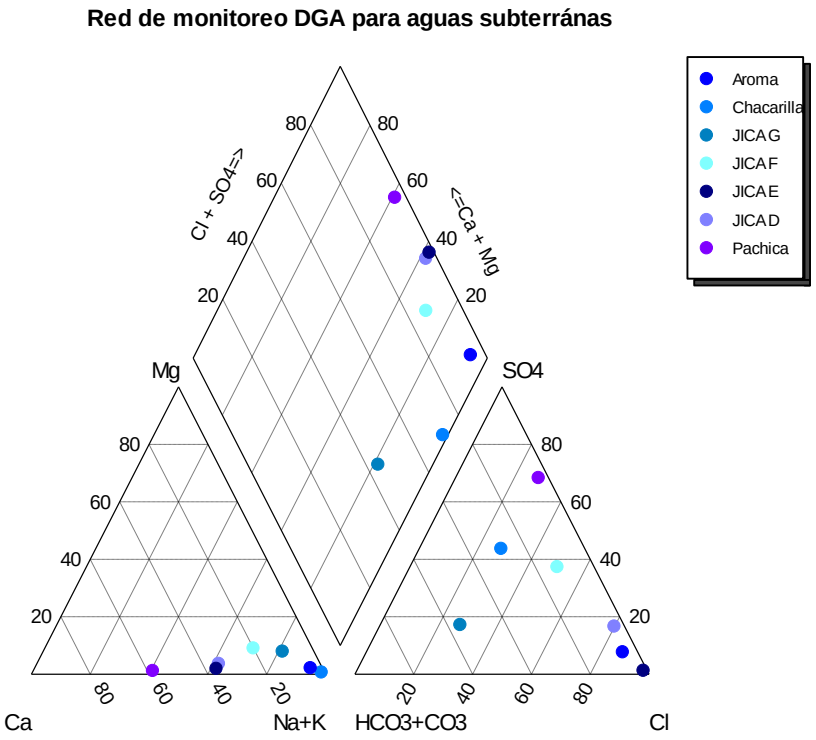


Figura 5.7. Diagrama de Piper de las aguas subterráneas (estaciones de monitoreo DGA)

La Figura 5.7 representa el diagrama de Piper para cada punto de muestreo y la Figura 5.8 es el diagrama de Stiff. De la observación de las figuras se puede concluir que las aguas subterráneas de la región presentan una composición más homogénea que las aguas superficiales. Las aguas son aguas sulfatadas cálcicas en la Quebrada de Tarapacá y cloruradas sódicas en las quebradas de Aroma, Pampa del Tamarugal, Chacarilla y Huasco. También se verifica que las concentraciones de sales son distintas, debido a la gran diferencia entre los diagramas stiff, muy desarrollados en un extremo y poco en los otros dos.

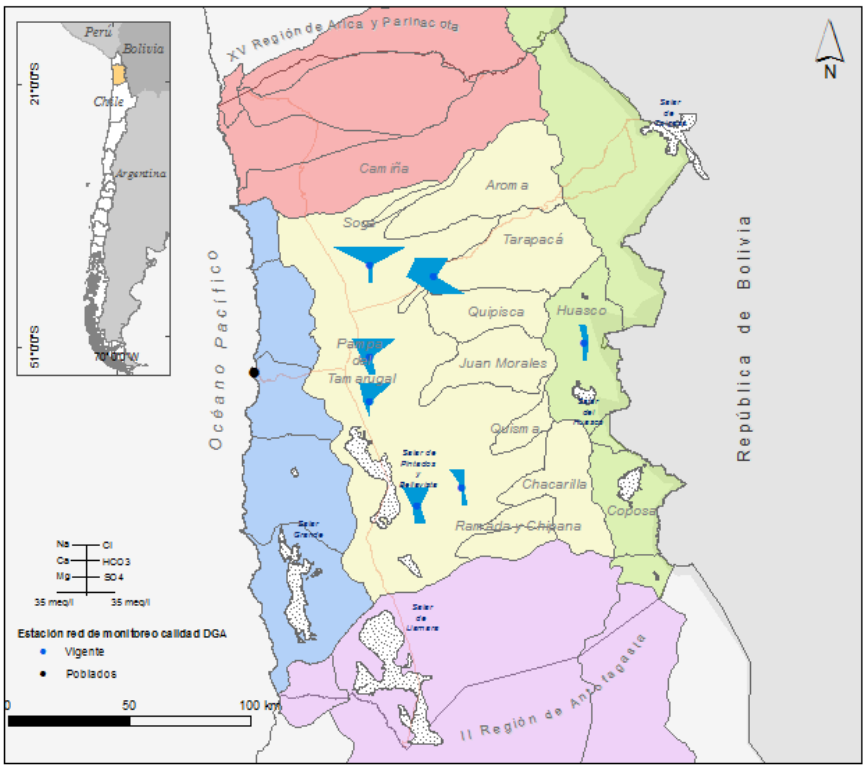


Figura 5.8. Diagramas de Stiff de las aguas subterráneas (estaciones de monitoreo DGA)

5.3.2. Metodologías para evaluar la representatividad de la red

Para evaluar la representatividad de las redes de monitoreo de las aguas subterráneas, se han combinado tres criterios diferentes, para así tener una metodología robusta tanto en medios homogéneos como en medios heterogéneos.

El primer criterio se basa en el cálculo del Índice de Representatividad (IR), según la metodología de Grath *et al.,* (2001), que se basa en la homogeneidad o representatividad espacial de la red de monitoreo para así se permitir un análisis estadístico exploratorio.

Para establecer la homogeneidad de la red de monitoreo por el cálculo del IR se considera que la distancia promedia mínima entre cualquier punto en el área del sitio de muestreo tiene que ser calculado y expresado como un porcentaje de la distancia mínima promedio para una red óptima. Por lo tanto, para una red de patrón triangular teórico con sitios de muestreo optimizados, el IR tendrá un valor máximo de 100%. Para considerar una red homogénea el IR debe ser mayor o igual que 80% (Grath *et al.,* 2001).

Para acuíferos con un cierto grado de heterogeneidad, no se recomienda el uso del IR, ya que esta metodología se desarrolló para cuerpos homogéneos, en que las características del medio son constantes para toda la región.

Una vez que el IR sólo identifica la mayor o menor distribución espacial de los puntos de muestreo, se consideran dos criterios adicionales: el número de puntos de muestreo y la densidad de estos puntos por área del acuífero.

El criterio utilizado para determinar el número de puntos de muestreo por acuífero fue el propuesto por Scheidleder (2004), que establece un mínimo de tres puntos, siendo considerado representativo cinco o más, siempre que se obtenga un IR superior a 80%.

Se consideró para la densidad de muestreo la metodología presentada por EFMND (1996), que establece un mínimo de un punto por cada 100 km^2 para los acuíferos que no están sujetos a presiones y punto por cada 25 km^2 para zonas sometidas a presiones.

Los principales criterios utilizados se resumen a continuación (

Tabla 5.9).

Tabla 5.9. Criterios para evaluar la representatividad de la red de monitoreo de las aguas subterráneas

Índice de Representatividad (IR)	Densidad <1/100 km^2	Densidad >1/100 km^2		
		< 3	3 ≤ n < 5	≥ 5
< 50%	No representativa	No representativa	No representativa	No representativa
50% ≤ IR < 80%	No representativa	No representativa	Parcialmente representativa	Parcialmente representativa
≥ 80%	No representativa	No representativa	Parcialmente representativa	**Representativa**

De la aplicación de los criterios anteriormente mencionados a la red de monitoreo de la DGA para las unidades de aprovechamiento de la región, se concluye que ninguna presenta una red representativa, ya que la única unidad definida que presenta estaciones es la Pampa del Tamarugal (Tabla 5.103).

Tabla 5.10. Representatividad de la red de monitoreo de la DGA

Unidad de aprovechamiento	Área (km^2)	Puntos de muestreo	Densidad	IR	Representatividad
Pampa del Tamarugal	4845	3	1615	0	No representativa
Pica	1240	0	0	0	No representativa
Sur Viejo	1093	0	0	0	No representativa
Salar de Llamara	8832	0	0	0	No representativa
Salar de Coposa	1111	0	0	0	No representativa

Además, se debe tener en cuenta si el pozo de monitoreo ha sido utilizado recientemente ya que el agua que se queda almacenada en un pozo puede sufrir cambios en su composición química y ya no es representativa del agua del acuífero. Por ello, se aconseja bombear (purgar) el pozo antes de tomar la muestra.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

6.1. RECOMENDACIONES GENERALES

La red de monitoreo de los recursos hídricos de la Región de Tarapacá, gestionada por la DGA, presenta varias deficiencias que han sido identificadas mediante una evaluación precisa y un análisis crítico plasmados en el presente documento.

Si bien son necesarias más estaciones de monitoreo para poder generar información representativa de del agua superficial y subterránea, para realizar estudios, definir proyectos y gestionar los recursos hídricos de la región, se ha podido demostrar que una distribución de la estaciones en base a criterios predefinidos y una mejorar infraestructura y tecnología de las estaciones, mejoraría de manera significativa la red, sin necesariamente involucrar grandes recursos adicionales para la operación y mantenimiento de la red.

Además, en la región existen instituciones públicas, académicas, centros de investigación y compañías mineras que tienen instaladas diferentes tipos de estaciones que pueden incorporarse a la red de monitoreo de variables hidrológicas, hidrogeológicas y calidad de agua de la DGA.

ESTACIONES METEOROLÓGICAS

- Asegurarse que los pluviómetros y otros sensores disponen de suficiente espacio despejado alrededor con el fin de limitar las influencias sobre las medidas.
- Para los pluviómetros digitales, es necesario medir la lluvia con un intervalo de tiempo más pequeño que el utilizado actualmente. La OMM recomienda 6 minutos. Esto permite un mejor conocimiento del fenómeno precipitación. En el caso de implementar un sistema de alerta temprana, permitirá mejorar la reactividad.
- Asegurar que los instrumentos están instalados correctamente (horizontalidad de los pluviómetros por ejemplo) y en lugares representativos.

ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS

- Asegurarse que las estaciones disponen de un “borne o punto de referencia” hidrológica para nivelar las escalas. Además, este punto de referencia podrá vincularse al sistema de nivelación de Chile con el fin de trabajar en Alturas Absolutas; es también indispensable para reinstalar las escalas limnimétricas en el mismo nivel en caso de destrucción, con el fin de obtener series de datos continuas y homogéneas.
- Plantear la posibilidad de instalar escalas de crecidas llamadas “de nivel máximo” (marcan el nivel de agua con una marcación en color o en cubos), herramienta simple a instalar y muy útil para tener una buena estimación del nivel más alto alcanzado por la crecida.

- Todas las estaciones deberían tener acceso en caso de crecidas. Se recomienda mejorar los accesos.
- Las frecuencias de adquisición pueden ser moduladas en función de las estaciones. Un intervalo de tiempo más corto, del orden de 3 minutos por ejemplo, podría ser adoptado para la época de lluvia, y un intervalo más grande, del orden de 30 minutos para la época seca.
- Si la transmisión automática se instala en todas las estaciones, es posible modular la frecuencia de transmisión, más pequeña en periodo de lluvia, más grande para la temporada seca.

Recomendaciones comunes a la red de estaciones meteorológicas y fluviométricas:

- Para las estaciones equipadas con datalogger, es imprescindible que las centrales estén conectadas a tierra para minimizar el riesgo de descarga eléctrica.
- Las centrales equipadas con un panel solar deben tener igualmente un regulador de carga para proteger las baterías.
- Cuando es posible, designar un observador que puede asegurar un mínimo de mantenimiento (limpiar el panel solar, limpiar el pluviómetro, etc.) y hacer los pequeños trabajos si necesarios (ajuste del nivel del agua por ejemplo).
- Hacer un plan del conjunto de la estación (implantación, obra, localización de las escalas, borne, etc.).
- Cada estación debe tener una bitácora con el fin de conocer las actividades de la estación (es el carnet de salud o carnet de mantenimiento). Permite una mejor gestión y un mejor seguimiento.

ESTACIONES PIEZOMÉTRICAS

- La nivelación de las estaciones piezometricas es imprescindible para comparar los niveles en Altura Absoluta.
- Tener cuidado con la lectura manual: leer la medida subiendo la sonda (cuando el sonido se detiene) y no bajando la sonda (cuando inicia el ruido). El error puede ser de varios centímetros.
- Es necesaria una limpieza (o purga) de los sondeos y pozos.

ESTACIONES DE CALIDAD DE AGUA

- Se sugiere que toda estación hidrométrica y piezométrica sea una estación de calidad de agua.
- Sería necesario que las estaciones de calidad de agua tengan, por lo mínimo, una escala limnimétrica para relacionar las medidas a niveles, incluso a caudales.
- La frecuencia de medición debería ser estacional, cuatro veces al año.

- La toma y transporte de las muestras debe ser realizado según un protocolo de técnicas de muestreo y analíticas para aguas.
- Por menos los iones mayoritarios (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, HCO_3^{-}, SO_4^{2-}, Cl^{-}) deben ser analizados en cada campaña de toma de muestras.
- Los pozos sin bombeo deben ser purgados antes de la toma de muestras de agua.

6.2. BIBLIOGRAFÍA

Acosta O. & Custodio E. (2008*) Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (norte de Chile)*. Revista Boletín Geológico y Minero de España, volumen 119 (1), pp. 33-50.

Alamos & Peralta Ingenieros Consultores Ltda. (1987) *Análisis crítico de la red de medición de niveles de agua subterránea*. Región I, II, III, IV y V. Dirección General de Agua (DGA). Chile.

Appelo C.A.J. & Postma D. (2010) *Geochemistry, groundwater and poollution*. CRC Press, 2nd edition. 649pp.

Aravena R. (1995). *Isotope Hidrology and Geochemistry of Northern Chile Groundwaters*. Bulletin de l'Institut Français d´Études Andines, 24 (3): 495-503.

Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. (1994). *Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres estadística hidroquímica nacional, Etapa I, Primera región*. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. 48 p.

Banco Mundial (2011) *Chile: Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos*.

BF Ingenieros Civiles (1984) *Análisis crítico de la red fluviométrica nacional. Red de calidad de aguas I y II región*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.

BF Ingenieros Civiles (1985) *Análisis de la red hidrometeorológica nacional. Regiones I, II, III y IV*. Tomo I. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.

Boiten W. (2000) *Hydrometry*. Taylor and Francis, Philadelphia, Pa.

Brown Fernández E. & Saldivia Medina J.E (2010) *Informe nacional sobre la gestión del agua en Chile*. 117 pp. En: http://www.eclac.cl/DRNI/proyectos/samtac/InCh01100.pdf

Castillo V.M., A. Gomez M., Martinez-Mena & Albaladejo J. (2000) *Respuesta hidrológica me medios semi-áridos: las cuencas experimentales de la Sierra del Picarcho, Murcia (España)*. Cuadernos de Investigación Geográfica, n°26, pp. 81-94. ISSN 0211-6820. © Universidad de La Rioja.

Chadwick F., Acosta O., Rengifo P., Uribe J. & Delgado J.L. (2012) *Generation of long-term hidrometeorological information to improve knowledge of the local wáter cycle*. Collahuasi, Chile.

Córdoba D., Rodríguez J., González J., Mass C. & Amaro S. (2013) *Levantamiento topográfico de pozos del acuífero Pampa del Tamarugal*. Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos. EN EDICIÓN.

Crites R. & Tchobanoglous G. (2001) *Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones*. Mc Graw Hill. 1082pp.

Custodio E. & Llamas M.R. (2001) *Hidrologia subterránea*. Tomo I y II. Ediciones Omega, S.A. 2350pp.

Decreto Supremo Nº 131 de 26 de marzo de 2007. Regalmento de los servicios de agua destinados al consumo humano. Republica de Chile, Ministerio de Salud, Departamento Asesoria Juridica. Modifica el Decreto Supremo Nº 735 de 1969.

Dingman R. & Galli C. (1965) *Geology and Ground-Water Resources of the Pica Área, Tarapacá Province, Chile*. Geological Survey Bulletin 1189, Washington, United States of America. 129 p.

Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC) (2005). *Estudio hidrogeológico conceptual y numérico del funcionamiento de la cuenca del salar de Coposa*. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, Santiago, Chile.

Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC) (2006). *Actualización de la estimación de la recarga acuíferos de Pampa Tamarugal y Llamara*. En: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa Anexo VII.2 Hidrología. Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), Santiago, Chile.

Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile –DICTUC- (2007a) *Modelación de la evolución del nivel de la napa en la Pampa del Tamarugal*. En: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa Anexo VIII.2 Hidrogeología. Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), Santiago, Chile.

Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile –DICTUC- (2007b) *Modelación de la evolución del nivel de la napa en el salar de Llamara*. En: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa Anexo VIII.3 Hidrogeología. Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas -DGA- (1978) *Calidad de Agua Primera región*. Chile. 130 p.

Dirección General de Aguas & IRH Ingeniería y Recursos Hidráulicos (1983) *Análisis crítico de la red fluviométrica nacional: I región*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Planeamiento, Santiago de Chile.

Dirección General de Aguas -DGA- (2007) *Manual de normas y procedimientos del departamento de conservación y protección de recursos hídricos*. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas. SIT. Nº 132. 182pp.

Dirección General de Aguas –DGA- (2009) *Reevaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Llamara*. SDT Nº 281. Santiago, Chile. 10 p.

Dirección General de Aguas -DGA- (2011) *Actualización de la oferta y la demanda de recursos hídricos subterráneos del sector hidrogeológico de aprovechamiento común Pampa del Tamarugal.* SDT Nº 311. Santiago, Chile. 46 p.

EFMND – European Freshwater Monitoring Network Design (1996) *European topic Centre on Inland waters*. Topic report nº 10/96. Edited by S. C. Nixon.

Fuenzalida H. & Rutllant J. (1986) *Estudio sobre el origen del vapor de agua que precipita en el invierno altiplánico*. Chile.

GCF Ingenieros Ltda. (2010) *Metodología para la estimación de recarga de cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica en el norte de chile, XV, I, II y III regiones*. SIT Nº221. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. 167 p.

Grath J., Scheidleder A., Uhlig S., Weber K., Kralik M., Keimel T. & Gruber D. (2001) *The EU water framework directive: Statistical aspects of the identification of groundwater pollution trends, and aggregation of monitoring results*. Final report. Austrian Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management.

Grilli A., Aguirre E., Duran M., Townsend F. & Gonzáles A. (1999) *Origen de las aguas subterráneas del sector Pica–Salar del Huasco, provincia de Iquique, I región de Tarapacá*. XIII Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS, Antofagasta, Chile.18 p.

Houston J. (2006) *Variability of precipitation in the Atacam Desert: Causes and hydrological impact*. Int. J. Climatol., 26, 2181–2198, doi:10.1002/joc.1359.

Japan International Cooperation Agency (JICA); Pacific Consultants International & Dirección General de Aguas -DGA- (1995) *The study on the development of water resources in northern Chile (El estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte norte de Chile)*. Gobierno de la República de Chile, Chile.

Lictevout E., Maass C., Córdoba D., Herrera V. & Payano R. (2013) *Recursos Hídricos de la Región de Tarapacá: Diagnostico y sistematización de la información,* CIDERH, UNAP, Santiago de Chile.

Magaritz M., Aravena R., Peña H., Suzuki O. & Grilli A. (1989) *Water chemistry and isotope study of streams and springs in northern Chile*. Journal of Hidrology, tomo 108, pp. 323-341.

Magaritz M., Aravena R., Peña H., Suzuki O. & Grilli A. (1990) *Source of Groundwater in the Desert of Northern Chile: Evidence of Deep Circulation of Groundwater from the Andes*. Ground Water 28: 513-517.

Ministerio de Obras Públicas (2006) *Análisis y valoración de la funcionalidad de la red fluviométrica y asignación de derechos de aprovechamiento*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Planeamiento, Santiago, Chile.

Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas & CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores (2011) *Mejoramiento de la red fluviométrica para el control de crecidas*. Ministerio de Obras Públicas, División de estudios y planificación, Santiago, Chile.

Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas & Geohidrología Consultores Ltda. (2012) *Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos, Región de Tarapacá*. Ministerio de Obras Públicas, División de estudios y planificación, Santiago, Chile.

Mishra A. K. and Coulibaly P. (2009) *Developments in Hydrometric Network Design: a review*. Review of Geophysics 47, RG2001, doi:10.1029/2077RG000243.

Niemeyer H. & Cereceda P. (1984). *Geografía de Chile*. Tomo VIII, Hidrografía. Chile.

Norma Chilena 411/3 de 1996. Calidad del agua - Muestreo - Parte 3: Guía sobre la preservación y manejo de las muestras.

Norma Chilena 411/11 de 1998. Calidad del agua - Muestreo - Parte 11: Guía para el muestreo de aguas subterráneas.

Organización Meteorológica Mundial (OMM) & United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization -UNESCO- (2012) *Glosario Hidrológico Inetrnacional*. WMO-N°385.

Organización Meteorológica Mundial, OMM (1994) *Guía de prácticas hidrológicas. Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones*. OMM nº 168.

Payano R. (2013) *Integración de la Ecohidrología en la red fluviométrica e hidrometeorológica de la región de Tarapacá para el uso eficiente de los recursos hídricos en zonas áridas*. Poster. I Congreso en Ecohidrología para América Latina y El Caribe (CELAPHI). USACH. Santiago de Chile.

Pinto F. (2012) *A rede de monitorização da qualidade da agua da ARH Norte, I. P.: análise espacio-temporal dos dados obtidos em algunas sub-bacias (La red de monitoreo de la calidad del agua de la ARH Norte, IP: análisis espacio-temporal de los datos obtenidos en algunas subcuencas)*. Tese para obtenção do grau de Mestre em ciencias e tecnologia do ambiente (Tesis para el grado de Maestría en ciencias y tecnología ambiental). Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Pontificia Universidad Católica de Chile -PUC- (2009) *Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de aguas en áreas prioritarias de la zona norte de chile, regiones XV, I, II y III. Etapa II Informe Final Parte IV*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.

Ribeiro L., Lopes A.R., Rodrigues F. & Cupeto C. (1999) *Critérios e metodologias para optimização das redes de monitorização piezométrica dos sistemas aquíferos de Portugal (Criterios y metodologías para la optimización de las redes de monitoreo piezométrico de los sistemas acuíferos de Portugal) in IV Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA)*. 24 a 26 de Maio, Coimbra, Portugal.

Rodier J., Legube B., Merlet N. & colaboradores. (2011) *Análisis del agua*. 9. ª edición, Ediciones Omega. Barcelona.

Scheidleder A. (2004) *Representative groundwater quality monitoring network in Austria* – Austrian experience in implementation of Directive 2000/60/EC requirements.

Taylor C.J. & Alley W. (2001) *Groundwater level monitoring and the importance of long-term wáter level data* . U.S. Geological Survey. GB1015.T28 2001.

Tröger U. & D. Gerstner (2004) *Estudio de investigación de la situación hidrogeológica en la formación Altos de Pica*. SDT N° 174. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. 27 p.

Vargas G., Ortleib L. y Rutland J. (2000) *Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/oscilación de Sur*. Revista Geológica de Chile 27, 157– 176.

World Hydrological Cycle Observing System WHYCOS (n.d.) *Design and optimization of hydrological networks.* World Meteorological Organization, viewed 30 January 2014, http://www.whycos.org/whycos