



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Civil

ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE ALTERNATIVAS PASIVAS DE RESTITUCIÓN DE QUEBRADAS EN MINERA DEL NORTE DE CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL

EMILIANA ANDREA PINTO CIFUENTES

PROFESOR GUÍA:
DANIEL BENITEZ GÁLVEZ

PROFESOR CO-GUÍA:
ADOLFO OCHOA LLANGATO

COMISIÓN:
YARKO NIÑO CAMPOS

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL HIDRÁULICA, SANITARIA Y AMBIENTAL
POR: EMILIANA ANDREA PINTO CIFUENTES
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: DANIEL BENITEZ GÁLVEZ

ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE ALTERNATIVAS PASIVAS DE RESTITUCIÓN DE QUEBRADAS EN MINERA DEL NORTE DE CHILE

Chile es el mayor productor y exportador de cobre a nivel mundial, siendo esta industria el pilar fundamental de la economía nacional. Dada la gran presencia de faenas mineras en el país, es de suma importancia velar por el cumplimiento de normativas ambientales tanto en sus operaciones como en etapas de cierre, de manera que se garantice la preservación del medio ambiente natural en el cual se emplazan sus actividades.

Para la normal operación de las faenas mineras, se requiere el uso de pozos de desaguado en el rajo que extraigan el agua subterránea de la zona, lo cual provoca el descenso del nivel de los acuíferos, y con ello, también la disminución de caudal en ciertas quebradas de afloramiento. Esta agua, es actualmente restituida con los mismos pozos de desaguado, según los compromisos de mitigación establecidos en el proyecto original de la compañía minera y hasta su etapa de cierre el año 2040. Así, con el fin de entregar una respuesta a esta problemática en la etapa de post cierre, la investigación de esta memoria tiene por objetivo proponer y analizar soluciones de mitigación pasivas a largo plazo, en una minera del norte de Chile, para reestablecer los niveles de caudal en las quebradas, es decir, que estas cumplan con ser autosostenibles en el tiempo, y que requieran la menor intervención antrópica para su mantenimiento.

Las propuestas analizadas corresponden a sistemas de captación subterránea, almacenamiento de precipitaciones asociadas al invierno altiplánico, tecnologías de captación de agua atmosférica.

Posteriormente, se aplica un estudio de factibilidad técnica a las alternativas presentadas anteriormente, con el fin de dimensionar las estructuras y/o equipos necesarios a incorporar, y así tener una noción de las longitudes, extensiones, magnitudes, tamaños, etc., necesarios a abarcar en cada propuesta para suplir la demanda de caudal requerida para las restituciones. También se realiza un análisis de factibilidad económica, donde se estiman los costos que suponen la implementación de cada alternativa propuesta, considerado un horizonte de evaluación de 20 años y una tasa de descuento del 12% anual.

Luego de haber realizado los estudios correspondientes, se concluye acerca de la factibilidad técnica y económica de implementar las alternativas propuestas y se otorgan recomendaciones sobre su aplicación. Se destaca la construcción de embalses de almacenamiento de precipitaciones como la medida económicamente más factible de implementar, seguida de sistemas de captación de agua subterránea.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	MOTIVACIÓN	1
1.2.	ANTECEDENTES	2
1.2.1.	PROYECTO DE DESARROLLO Y MEJORAMIENTO DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA COMPAÑÍA.....	3
1.2.2.	CLIMA Y METEOROLOGÍA.....	5
1.2.3.	CONTEXTO HÍDRICO EN CHILE Y EL MUNDO.....	5
1.2.4.	BOFEDALES Y SU IMPORTANCIA AMBIENTAL Y SOCIAL.....	6
1.2.5.	NORMATIVA AMBIENTAL EN CHILE.....	7
1.3.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	9
1.4.	OBJETIVOS.....	9
1.5.	ALCANCES.....	10
2.	MARCO TEÓRICO.....	11
2.1.	CAPTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	11
2.2.	CAPTACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA	14
2.2.1.	AWN NANOTECH.....	17
2.2.2.	ZERO MASS WATER.....	18
2.2.3.	AIREX.....	18
2.2.4.	DRUPPS.....	19
2.2.5.	WATERGEN (GEN-L).....	20
2.3.	CAPTACIÓN DE PRECIPITACIONES	21
	EMBALSES DE ALMACENAMIENTO DE PRECIPITACIONES.....	21
3.	METODOLOGÍA Y BASES DE DISEÑO.....	23
3.1.	CARACTERÍSTICAS DEL ANÁLISIS DE PRE FACTIBILIDAD.....	24
3.2.	DISEÑO DE GALERÍAS FILTRANTES Y DRENES	25
	DISEÑO DE TRAMO DE ADUCCIÓN DE GALERÍAS FILTRANTES Y DRENES.....	25
	DISEÑO DE CONDUCTO FILTRANTE.....	29
3.3.	DISPOSITIVOS DE CAPTACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA.....	30
3.4.	DISEÑO DE EMBALSES DE ALMACENAMIENTO DE PRECIPITACIONES	30

3.5. CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA	31
4. DESARROLLO Y RESULTADOS	34
4.1. ANÁLISIS DE PRE FACTIBILIDAD.....	34
4.2. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD	36
4.2.1. CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	36
4.2.2. CAPTACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA	40
4.2.3. ALMACENAMIENTO DE PRECIPITACIONES	41
4.3. ANÁLISIS DE PERTINENCIA AMBIENTAL.....	45
4.4. ANÁLISIS ECONÓMICO	46
4.4.1. COSTOS DE LAS ALTERNATIVAS DE RESTITUCIÓN	46
4.4.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA	50
5. DISCUSIÓN.....	51
6. CONCLUSIONES.....	54
BIBLIOGRAFÍA	56
7. ANEXOS.....	58
ANEXO A: PERFILES LONGITUDINALES DE ADUCCIÓN DESDE CAPTACIÓN A RESTITUCIÓN	58
ANEXO B: COORDENADAS DE PUNTOS DE CAPTACIÓN Y TRANSMISIVIDAD.....	75
ANEXO C: LARGOS DE POZOS DE INSPECCIÓN Y VENTILACIÓN	76
ANEXO D: DIMENSIONAMIENTO DE EMBALSES DE ALMACENAMIENTO DE PRECIPITACIONES	77
ANEXO E: ESTIMACIÓN TOTAL DE INVERSIÓN.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Caudales a restituir en puntos comprometidos. Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Adenda 3 del EIA 2019.	4
Tabla 2.1. Nombres con los que fueron conocidas las galerías filtrantes en distintas civilizaciones. Fuente: (Valipour <i>et al.</i> , 2020).	11
Tabla 2.2. Tecnologías de generación de agua atmosférica. Fuente: Elaboración propia en base a Reporte técnico Drupps, 2020.	16
Tabla 3.1. Caudales de restitución en sector poniente.	23
Tabla 3.2. Caudales de restitución en sector norte.	24
Tabla 3.3. Caudales de restitución en sector suroriente.	24
Tabla 3.4. Puntuación a considerar para evaluación conceptual de alternativas de restitución.	24
Tabla 3.5. Elevación de terreno y niveles freáticos 2040 según punto de restitución.	26
Tabla 3.6. Estadísticos de promedio, mínimo, máximo y desviación estándar para la estación Ujina en el período futuro (2020 – 2060). Fuente: (CONIC-BF, 2020).	31
Tabla 3.7. Costos referenciales para la estimación del CAPEX asociado a la red de drenes. Fuente: Compañía minera.	32
Tabla 3.8. Costos referenciales para la estimación del OPEX asociado a la red de drenes. Fuente: Compañía minera.	32
Tabla 3.9. Costos referenciales para la estimación del CAPEX asociado a la excavación de túneles mediante explosivos.	32
Tabla 3.10. Costos referenciales para la estimación del CAPEX asociado a los embalses. Fuente: Collahuasi.	33
Tabla 4.1. Cuadro de evaluación de tecnologías de restitución.	35
Tabla 4.2. Largos de aducción y captación asociados a cada punto de restitución del sector poniente.	36
Tabla 4.3. Largos de aducción y captación asociados a cada punto de restitución del sector norte.	38
Tabla 4.4. Largos de aducción y captación asociados a cada punto de restitución del sector suroriente.	39
Tabla 4.5. Pozos de inspección asociados a cada punto de restitución.	40
Tabla 4.6. Dispositivos y superficie necesaria para la instalación de cada tecnología AWG.	41
Tabla 4.7. Área aportante a puntos de restitución en la zona norte.	42
Tabla 4.8. Área aportante a puntos de restitución en la zona poniente.	42
Tabla 4.9. Área aportante a puntos de restitución de la zona suroriente.	44
Tabla 4.10. Volúmenes y área superficial de embalses de almacenamiento de precipitaciones.	45

Tabla 4.11. CAPEX del sistema de drenes.....	46
Tabla 4.12. OPEX del sistema de drenes.....	47
Tabla 4.13. CAPEX de túneles de aducción y drenes de captación.....	47
Tabla 4.14. CAPEX de embalses de acumulación de precipitaciones y drenes de captación.	48
Tabla 4.15. CAPEX de embalses de acumulación de precipitaciones, túneles de aducción y drenes de captación.	48
Tabla 4.16. CAPEX de embalses de acumulación de precipitaciones (incluyendo botadero) y drenes de captación.....	49
Tabla 4.17. CAPEX de tecnología AIREX.....	49
Tabla 4.18. Resultados de evaluación económica por cada alternativa de restitución.....	50
Tabla 7.1. Transmisividad y coordenadas de puntos de captación.....	75
Tabla 7.2. Largos de pozos de inspección y ventilación en cada punto de restitución.....	76
Tabla 7.3. Dimensionamiento de embalse de precipitaciones en punto de restitución Quebrada 5.....	77
Tabla 7.4. Dimensionamiento de embalse de precipitaciones en punto de restitución Quebrada 10.....	78
Tabla 7.5. Dimensionamiento de embalse de precipitaciones en punto de restitución Quebrada 11.....	79
Tabla 7.6. Dimensionamiento de embalse de precipitaciones en punto de restitución Quebrada 12.....	80
Tabla 7.7. Dimensionamiento de embalse de precipitaciones en punto de restitución Quebrada 13.....	81
Tabla 7.8. Dimensionamiento de embalse de precipitaciones en punto de restitución Quebrada 14.....	82
Tabla 7.9. Dimensionamiento de embalse de precipitaciones en punto de restitución Quebrada 15.....	83
Tabla 7.10. Estimación de costo total de la inversión para construcción de una red de drenes para el tramo de captación y aducción.....	84
Tabla 7.11. Estimación de costo total de la inversión para construcción de túneles para la aducción y drenes para el tramo de captación.....	85
Tabla 7.12. Estimación de costo total de la inversión para construcción de embalses de almacenamiento de precipitaciones y drenes para los puntos de restitución del sector poniente y en las Quebradas 8 y 9.....	86
Tabla 7.13. Estimación de costo total de la inversión para construcción de embalses de almacenamiento de precipitaciones, y qanats en el sector poniente y en las Quebradas 8 y 9.....	87
Tabla 7.14. Estimación de costo total de la inversión para construcción de embalses de almacenamiento de precipitaciones e impermeabilizar área del botadero proyectada al año 2040 para recuperar el agua proveniente de lluvias y así restituir el sector poniente.....	88

Tabla 7.15. Estimación de costo total de la inversión para instalación de sistema AIREX.
..... 89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de la región de Tarapacá y ubicación de la compañía minera. Fuente: https://cea.epn.edu.ec/	2
Figura 1.2. Puntos de restituciones de quebradas en torno al rajo. Fuente: Elaboración propia.	4
Figura 1.3. Mapa de estrés hídrico a nivel mundial. Fuente: (<i>AWN Nanotech</i> , 2018).	6
Figura 1.4. Sectores en los que se ubican las quebradas en torno al rajo. Sector norte: verde, sector poniente: rojo, sector sur: azul. Fuente: Elaboración propia.	10
Figura 2.1. Acueductos de Cantalloc (galerías filtrantes) vistos desde la superficie. Construidos por la cultura Nazca, Perú.	12
Figura 2.2. (A) Ilustración de una típica galería subterránea. (B) Sección transversal de una galería subterránea. (C) Vista en planta de una galería subterránea. Fuente: (<i>Loctevout et al.</i> , 2020).....	13
Figura 2.3. Drenes californianos.....	14
Figura 2.4. Agua atmosférica presente a nivel mundial.	15
Figura 2.5. Sistema AWG que condensa el vapor de agua para convertirlo en agua líquida.	15
Figura 2.6. (A) Tejido nanotecnológico flexible de <i>AWN Nanotech</i> que absorbe el vapor de agua de la atmósfera y lo convierte en agua líquida que se recoge en un dispositivo. (B) Imagen a través de un microscopio electrónico que muestra las fibras de carbono adheridas al material “nano-tratado” (C) Imagen de las aristas de cactus que utilizan una adaptación similar de condensación de agua para prosperar en entornos desérticos. Fuente: <i>AWN Nanotech</i>	17
Figura 2.7. Hidropanel producido por Zero Mass Water.	18
Figura 2.8. Dispositivo E-350 de AIREX Ingeniería.....	19
Figura 2.9. Prototipo de sistema Drupps. Fuente: Reporte técnico de Drupps, 2020.	19
Figura 2.10. Izquierda: Esquema del funcionamiento del sistema Drupps. Derecha: Captación de humedad con líquido disecante FLOW. Fuente: (<i>Reporte técnico Drupps</i> , 2020).....	20
Figura 2.11. Prototipo de equipo Watergen GEN-L capaz de producir 6.000 L/día con las condiciones atmosféricas adecuadas.	20
Figura 2.12. Imágenes de bolas de sombra o <i>shade balls</i>	22
Figura 3.1. Perfil longitudinal de aducción al punto de restitución de la Quebrada 11.	27
Figura 4.1 Mapa del trazado de las restituciones del sector poniente. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 4.2. Mapa del trazado de las restituciones del sector norte. Fuente: Elaboración propia.	38

Figura 4.3. Mapa del trazado de las restituciones del sector suroriente. Fuente: Elaboración propia.....	39
Figura 4.4. Cuencas aportantes a puntos de restitución de la zona norte. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 4.5. Cuencas aportantes a puntos de restitución de la zona poniente. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 4.6. Superficie de botadero 2040 propuesto a impermeabilizar. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 4.7. Cuencas aportantes a puntos de restitución de la zona suroriente. Fuente: Elaboración propia.....	44
Figura 7.1. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 1.	59
Figura 7.2. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 2.....	60
Figura 7.3. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 3.....	61
Figura 7.4. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 4 - 1.	62
Figura 7.5. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 4 - 1.	63
Figura 7.6. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 5.	64
Figura 7.7. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 6.....	65
Figura 7.8. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 7.....	66
Figura 7.9. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 8.	67
Figura 7.10. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 9.	68
Figura 7.11. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 10.	69
Figura 7.12. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 11.	70
Figura 7.13. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 12.	71
Figura 7.14. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 13.	72
Figura 7.15. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 14.	73
Figura 7.16. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 15.	74

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

Chile es el mayor productor y exportador de cobre a nivel mundial, siendo esta industria el pilar fundamental de la economía nacional. Dada la gran presencia de faenas mineras en el país, es de suma importancia velar por el cumplimiento de las normativas ambientales pertinentes, donde los proyectos susceptibles a causar un impacto al medio ambiente deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), y este autorizar el inicio de actividades por medio de una Resolución de Calificación Ambiental (RCA).

Esta investigación se centra en el estudio de una de las medidas de mitigación comprometidas en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del proyecto de desarrollo y mejoramiento de la capacidad productiva de una compañía minera ubicada en el norte del país. Este compromiso ambiental tiene por fin velar por la conservación de caudales superficiales en quebradas ubicadas en torno al rajo, las cuales abastecen aguas abajo un sector de bofedales (humedales de alta montaña), y cuyo afloramiento se ve afectado por el descenso del nivel freático de los acuíferos debido al desaguado del rajo necesario para operar la mina de forma segura.

En la actualidad, las restituciones en esta zona se realizan con agua proveniente de los mismos pozos de desaguado, y se pretende continuar con este sistema hasta la etapa de cierre de la faena, aproximadamente el año 2040, o cuando ya no se disponga del recurso hídrico de estos pozos.

De esta manera, la investigación tratada en este trabajo de título busca dar una solución a largo plazo para la restitución de quebradas en la etapa de post cierre de las faenas, con la intención que estas nuevas medidas sean pasivas, es decir, que cumplan con ser sostenibles en el tiempo y requieran la menor intervención antrópica posible para su mantención. Así, dentro de las alternativas preliminarmente factibles, se considera la extracción de agua subterránea con aducción gravitacional directa desde acuíferos, la posible captación de vapor de agua del aire y el aprovechamiento de precipitaciones del invierno altiplánico; opciones que pueden considerarse como medidas individuales o combinadas para lograr obtener el caudal solicitado para las restituciones. Asimismo, es importante señalar que este estudio corresponde a un análisis a nivel de ingeniería conceptual, donde los valores presentados entregan una primera noción de los parámetros técnicos y económicos de las alternativas planteadas, marcando la pauta para el posterior desarrollo de la ingeniería básica e ingeniería de detalle, donde serán necesarios diversos estudios para llegar a diseños materializables, tales como la topografía del terreno, geotecnia, mediciones hidrológicas, etc.

Conforme a lo señalado, el estudio plantea analizar la factibilidad técnica, económica y ambiental de la implementación de las alternativas sugeridas, y de esta forma poder brindar

algunas recomendaciones sobre cómo abordar este tipo de compromisos a largo plazo, en la etapa de post cierre de la minera.

1.2. ANTECEDENTES

La compañía minera en estudio históricamente se ha dedicado a la extracción y producción de concentrado de cobre y molibdeno.

Sus instalaciones industriales y yacimientos se encuentran ubicados en el norte grande de Chile, donde la minera divide sus sectores comenzando por el Área Cordillera (**Figura 1.1**), ubicada a 185 km de la costa, entre los 4.000 y 4.800 m.s.n.m. Por otra parte, desde la planta concentradora, nace un sistema de mineroductos de 203 km de extensión, a través del cual el concentrado de cobre es trasladado hasta el terminal marítimo, ubicado al sur de la ciudad de Iquique. Desde este recinto, se embarcan los productos hacia los mercados internacionales. En este lugar se encuentran también las plantas de molibdeno y de filtrado de concentrado (Bluedot, 2020).

Sus niveles de producción, sumado a sus recursos de mineral, su extensión y emplazamiento, lo sitúan dentro de las seis principales productoras cupríferas del mundo. Asimismo, cuenta con uno de los depósitos de cobre más grandes del planeta, con 10.380 millones de toneladas.



Figura 1.1 Mapa de la región de Tarapacá y ubicación de la compañía minera. Fuente: <https://cea.epn.edu.ec/>

1.2.1. PROYECTO DE DESARROLLO Y MEJORAMIENTO DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LA COMPAÑÍA

El Estudio de Impacto Ambiental (EIA) realizado para el proyecto original de la compañía minera fue aprobado en junio de 1995. Posteriormente se tramitaron varios EIA y declaraciones de impacto ambiental (DIA) en el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) para aumentar la capacidad de producción de minerales sulfurados y oxidados.

Dentro de los compromisos ambientales adquiridos en el EIA del proyecto original se encuentra la restitución de caudales variables de agua superficial en las quebradas en torno al rajo, para lo cual se ha usado históricamente el agua extraída desde los pozos de drenaje ubicados en torno a este.

En enero de 2019, la compañía presentó al SEA un nuevo proyecto de expansión que considera dentro de sus principales objetivos lo siguiente:

- Asegurar la continuidad de las operaciones de la minera por un periodo de 20 años.
- Mejora de capacidad de procesamiento de minerales sulfurados de 170 a 210 mil toneladas día.
- Extensión de la depositación de relaves convencionales.
- Modificación de la tecnología de lixiviación convencional por una de biolixiviación
- Fuente hídrica complementaria por medio de la construcción y operación de una planta desaladora en el sector de puerto.

En el EIA recientemente expuesto, en actual estado de calificación, se propuso una serie de medidas de mitigación, entre las cuales, se aborda en este estudio la de mitigar el efecto de ampliación del cono de depresión de los niveles freáticos en torno al rajo debido a la acción del desaguado. Lo anterior, produce una disminución en el caudal de las vertientes que alimentan las quebradas ubicadas en torno al rajo, y, por ende, la escorrentía superficial que circula por ellas. Adicionalmente, se verían afectadas aquellas quebradas con presencia de bofedales y pajonales hídricos (vegetación azonal), suelo y ambientes de fauna asociados, junto con alteración de la vitalidad en la vegetación, que potencialmente afectaría las condiciones de los lugares de pastoreo tradicional.

Los puntos y respectivos caudales a restituir para el período del invierno altiplánico (diciembre a marzo), y para el periodo de abril a noviembre se presentan en la **Tabla 1.1**, así como una imagen satelital que detalla la ubicación de cada uno de ellos en la **Figura 1.2**.

Tabla 1.1. Caudales a restituir en puntos comprometidos. Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Adenda 3 del EIA 2019.

#	Punto de restitución	Caudal a restituir [L/s]		
		Dic-Mar	Abr-Nov	Promedio anual
1	Quebrada 1	25,4	24,5	24,9
2	Quebrada 2	2,9	2,7	2,8
3	Quebrada 3	6,6	6,0	6,2
4	Quebrada 4	5,3	4,8	5,0
5	Quebrada 5	2,3	2,0	2,1
6	Quebrada 6	1,0	1,0	1,0
7	Quebrada 7	1,6	1,6	1,6
8	Quebrada 8	0,9	0,7	0,8
9	Quebrada 9	11,7	11,0	11,3
10	Quebrada 10	0,5	0,4	0,4
11	Quebrada 11	0,9	0,7	0,8
12	Quebrada 12	2,1	1,9	2,0
13	Quebrada 13	0,9	0,7	0,8
14*	Quebrada 14	1,2	1,0	1,1
15*	Quebrada 15	0,6	0,5	0,5
Caudal de restitución total		63,9	59,5	61,3

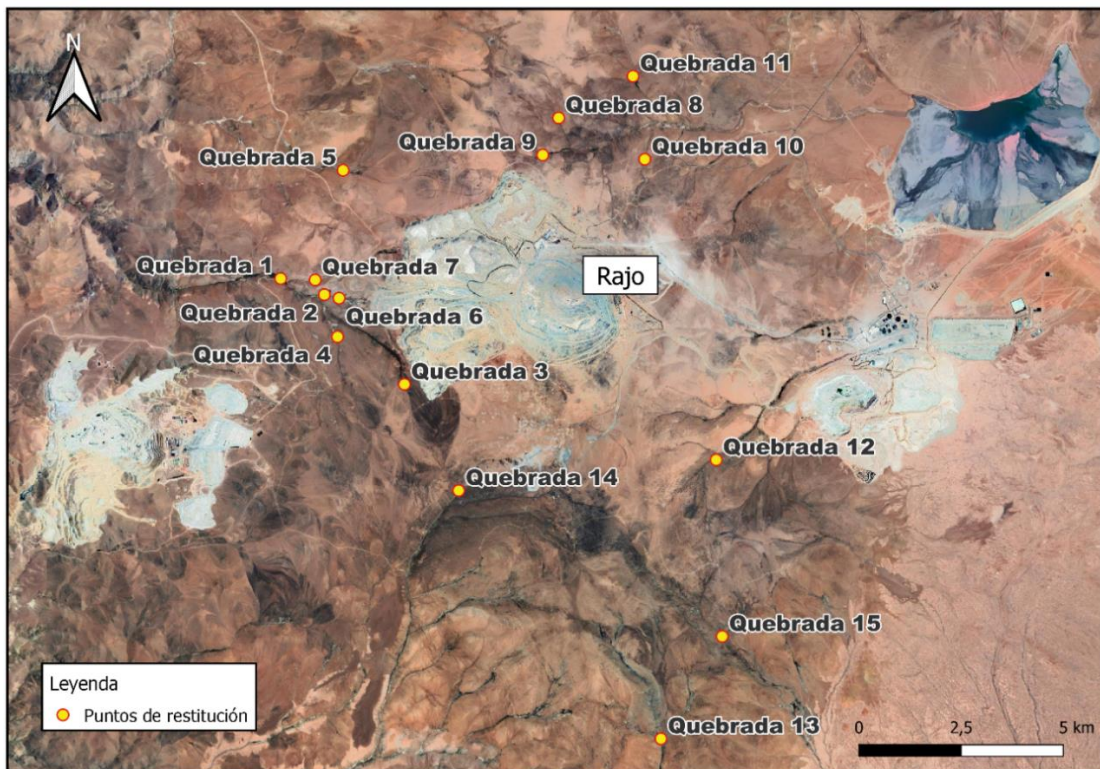


Figura 1.2. Puntos de restituciones de quebradas en torno al rajo. Fuente: Elaboración propia.

1.2.2. CLIMA Y METEOROLOGÍA

La zona donde se emplaza el rajo, se caracteriza a modo general por presentar un clima altiplánico. En la cordillera, y particularmente en el altiplano, se presentan normalmente lluvias de verano relativamente elevadas (hasta 400 – 500 mm durante este período), que confirman la característica en general tropical de la región en este sector. El hecho de que las precipitaciones se localicen en verano, además, es de gran importancia biológica, pues corresponden al periodo de mayor eficiencia térmica (Arcadis, 2019a)

La zona cordillerana se caracteriza por un clima de estepa de altura (ETH). Se presenta sobre los 3.500 metros de altitud, lo que produce que las temperaturas medias no sobrepasen los 5°C, produciéndose gran amplitud térmica entre el día y la noche. Las precipitaciones de tipo convectivo aumentan, pero simultáneamente las temperaturas descienden. Normalmente un suavizamiento de las condiciones desérticas debe originar un ambiente estepario, sin embargo, en el presente caso, el descenso de la temperatura hace que en el desierto suceda una tundra de altura. No obstante, la vegetación típica de la alta cordillera en el sector es propia de un clima de estepa, pero esta no se extiende hacia el sur porque el descenso de la temperatura limita el desarrollo vegetal (Arcadis, 2019a).

1.2.3. CONTEXTO HÍDRICO EN CHILE Y EL MUNDO

La escasez de agua dulce es un problema que afecta directamente a las personas e industrias en Chile y el mundo, acentuándose cada vez más esta problemática con el tiempo. Considerando las fluctuaciones estacionales en el consumo y disponibilidad, estudios recientes indican que dos tercios de la población mundial, es decir, aproximadamente 4 billones de personas viven en condiciones de escasez hídrica por al menos un mes al año (Tu *et al.*, 2018), y con el existente escenario de cambio climático, cerca de la mitad de la población mundial vivirá en zonas con alto estrés hídrico para el año 2030. Así, las consecuencias del calentamiento global provocarán el aumento de la brecha hídrica entre las zonas con mayor y menor disponibilidad del recurso, junto con disminuir la calidad del agua e incrementar la temperatura a nivel global (AWN *Nanotech*, 2018). En la **Figura 1.3** es posible observar un mapa del contexto hídrico a nivel mundial, donde destaca la alta vulnerabilidad en zonas cercanas al ecuador, al igual que localmente en el norte de Chile, donde las cuencas presentan claros signos de estrés del río Aconcagua hacia el norte (Ayala, 2010).

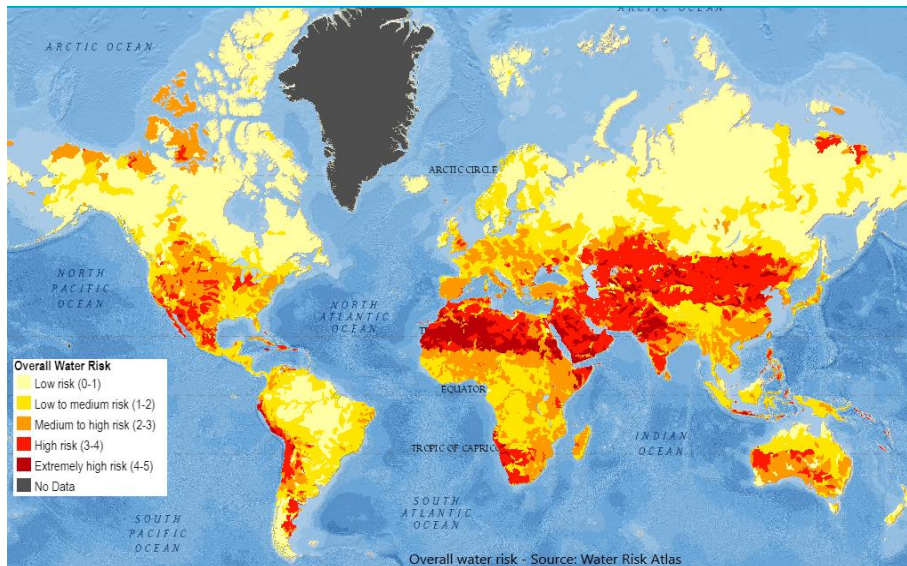


Figura 1.3. Mapa de estrés hídrico a nivel mundial. Fuente: (AWN Nanotech, 2018).

1.2.4. BOFEDALES Y SU IMPORTANCIA AMBIENTAL Y SOCIAL

Como se ha mencionado, la ejecución de las obras del nuevo proyecto de expansión de la compañía minera traería consigo la disminución del nivel freático del acuífero, y con ello, la afectación de ciertos afloramientos que abastecen zonas de bofedales. Estos humedales tienen una gran importancia social, cultural, ambiental y económica.

Los bofedales corresponden a formaciones vegetales que se establecen en un ambiente edáfico, principalmente orgánico, caracterizado por una condición hídrica de saturación permanente, presentando una gran diversidad biológica respecto del entorno y un mayor número de especies vegetales, las cuales son propias de estos sistemas. Estos humedales son zonas de forraje y abrevadero de valiosas especies amenazadas en su conservación (vicuña, guanaco, llama, alpaca, entre otros) (Alegría y Lillo, 1996).

La flora de los bofedales está adaptada a las condiciones ambientales extremas de la Puna Altoandina y se caracterizan por presentar un microrelieve fuertemente ondulado con una red intrincada de canales o cursos de agua corriente. Se relaciona con la dominancia de especies herbáceas en “cojines” compactos por sobre las especies rizomatosas que forman los céspedes planos o regulares. Además, están asociados a cursos de agua corriente permanente, con mayor concentración de oxígeno y baja salinidad. No obstante lo anterior, es posible encontrar bofedales en laderas de montañas o conos volcánicos, donde existen vertientes o nacen ríos superficiales o subsuperficiales (Alegría y Lillo, 1996).

Asimismo, comunidades indígenas de la zona altiplánica se dedican a la crianza de auquénidos, persistiendo zonas de pastoreo en los sectores cercanos al salar de Coposa.

En síntesis, los bofedales corresponden a ecosistemas únicos los cuales deben ser estudiados en profundidad con el fin de reconocer la compleja interacción de sus componentes básicos como la tierra, el agua, su flora y fauna, y de esta manera velar por su conservación.

1.2.5. NORMATIVA AMBIENTAL EN CHILE

Siguiendo el objetivo de este estudio, para analizar una de las medidas de mitigación presentadas en el EIA, se hace necesario profundizar en la normativa ambiental chilena, abordando la institucionalidad encargada de gestionar los permisos ambientales, mediante la evaluación de proyectos susceptibles a causar un daño al medio ambiente.

El organismo encargado de velar por lo anterior, corresponde al Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), institución pública funcionalmente descentralizada creada por la Ley N° 20.417, publicada en el Diario Oficial el 26 de enero de 2010, que modificó la Ley N°19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (*SEA Chile, 2021*).

Su principal objetivo es tecnificar y administrar el instrumento de gestión ambiental denominado Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), cuya gestión se basa en la evaluación ambiental de proyectos ajustada a lo establecido en la norma vigente, fomentando y facilitando la participación ciudadana en este proceso (*SEA Chile, 2021*).

De esta manera, el SEA especifica que un proyecto o actividad que se somete al SEIA debe hacerlo presentando una Declaración de Impacto Ambiental (DIA), a menos que dicho proyecto genere o presente alguno de los siguientes efectos, características o circunstancias contemplados en el artículo 11 de la Ley, caso en el cual deberá presentar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

1. Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones y residuos.
2. Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluido el suelo, agua y aire.
3. Reasentamiento de comunidades humanas, o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de los grupos humanos.
4. Localización en o próxima a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, glaciares, susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar.
5. Alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona.
6. Alteración de monumentos, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural.

En el escenario que el proyecto incurra en alguno de los impactos señalados, la empresa u organización deberá presentar un plan de medidas de mitigación, reparación y/o compensación ambiental.

Las medidas de mitigación ambiental tienen por finalidad evitar o disminuir los efectos adversos del proyecto o actividad, cualquiera sea su fase de ejecución. Se expresarán en un Plan de Medidas de Mitigación que deberá considerar, a lo menos, una de las siguientes medidas:

- a) Las que impidan o eviten completamente el efecto adverso significativo, mediante la no ejecución de una obra o acción, o de alguna de sus partes.
- b) Las que minimizan o disminuyen el efecto adverso significativo, mediante una adecuada limitación o reducción de la magnitud o duración de la obra o acción, o de alguna de sus partes, o a través de la implementación de medidas específicas.

Las medidas de reparación y/o restauración tienen por finalidad reponer uno o más de los componentes o elementos del medio ambiente a una calidad igual o superior a la que tenían con anterioridad al daño causado o, en caso de no ser ello posible, restablecer sus propiedades básicas. Dichas medidas se expresarán en un Plan de Medidas de Reparación y/o Restauración.

En cuanto a las medidas de compensación ambiental, estas tienen por finalidad producir o generar un efecto positivo alternativo y equivalente a un efecto adverso identificado. Dichas medidas se expresarán en un Plan de Medidas de Compensación, el que incluirá el reemplazo o sustitución de los recursos naturales o elementos del medio ambiente afectados, por otros de similares características, clase, naturaleza y calidad.

Las medidas de reparación y compensación ambiental sólo se llevarán a cabo en las áreas o lugares en que los efectos adversos significativos que resulten de la ejecución o modificación del proyecto o actividad, se presenten o generen.

Por otra parte, si de la predicción y evaluación del impacto ambiental del proyecto o actividad se deducen eventuales situaciones de riesgo al medio ambiente, el titular del proyecto o actividad deberá proponer medidas de prevención de riesgos y de control de accidentes.

1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El proyecto de mejoramiento y expansión de la capacidad productiva de la minera trae consigo ciertas externalidades negativas que son necesarias de considerar y mitigar dado su impacto en el medio ambiente.

La medida en estudio, tiene por fin atenuar el efecto de ampliación del cono de depresión de los niveles piezométricos en torno al rajo, producto de la acción de desaguado mediante pozos de extracción, necesaria para el desarrollo de las actividades mineras. Lo anterior podría producir una disminución en el caudal de las vertientes que alimentan las quebradas ubicadas en torno al rajo, algunas con presencia de bofedales y pajonales hídricos (vegetación azonal), suelo y ambientes de fauna asociados, y con ello, alterar las condiciones de lugares de pastoreo tradicional (Arcadis, 2019c).

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la factibilidad técnica y económica de implementar alternativas pasivas de restitución de caudales superficiales sostenibles a largo plazo, que permitan dar cumplimiento a los compromisos de mitigación ambiental del proyecto de expansión y mejoramiento de la compañía minera.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos que se plantean a considerar en esta investigación son los siguientes:

- Evaluar condiciones hídricas y climáticas para una situación base con el fin de establecer un escenario para el análisis de factibilidad de alternativas.
- Investigar y proponer alternativas de captación de agua para el escenario futuro evaluado.
- Analizar la factibilidad técnica y económica de implementar las alternativas propuestas.
- Realizar trade-off de alternativas con los resultados obtenidos para poder brindar recomendaciones sobre su uso.

1.5. ALCANCES

Esta investigación presenta un análisis a nivel de ingeniería conceptual de alternativas pasivas y autosostenibles de restitución de caudales superficiales, aplicado sobre quebradas naturales ubicadas en torno al rajo, las cuales se ven afectadas debido al descenso del cono del nivel freático producto del desaguado necesario para la expansión de las faenas. Al tratarse de una ingeniería conceptual, esta tiene por objetivo fundamental identificar la viabilidad técnica y económica de las alternativas contempladas, desarrollando elementos técnicos que permitan definir el alcance del proyecto.

Para el análisis de alternativas se diferencian zonas de restitución (**Figura 1.4**). Estas corresponden al sector poniente, que incluye los afluentes vinculados a la Quebrada 1, Quebrada 2, Quebrada 3, Quebrada 4, Quebrada 5, Quebrada 6 y Quebrada 7; el sector suroriente, que contempla los puntos Quebrada 8, Quebrada 9, Quebrada 10 y Quebrada 11; y finalmente el sector norte que incluye la Quebrada 12, Quebrada 13, Quebrada 14 y Quebrada 15.

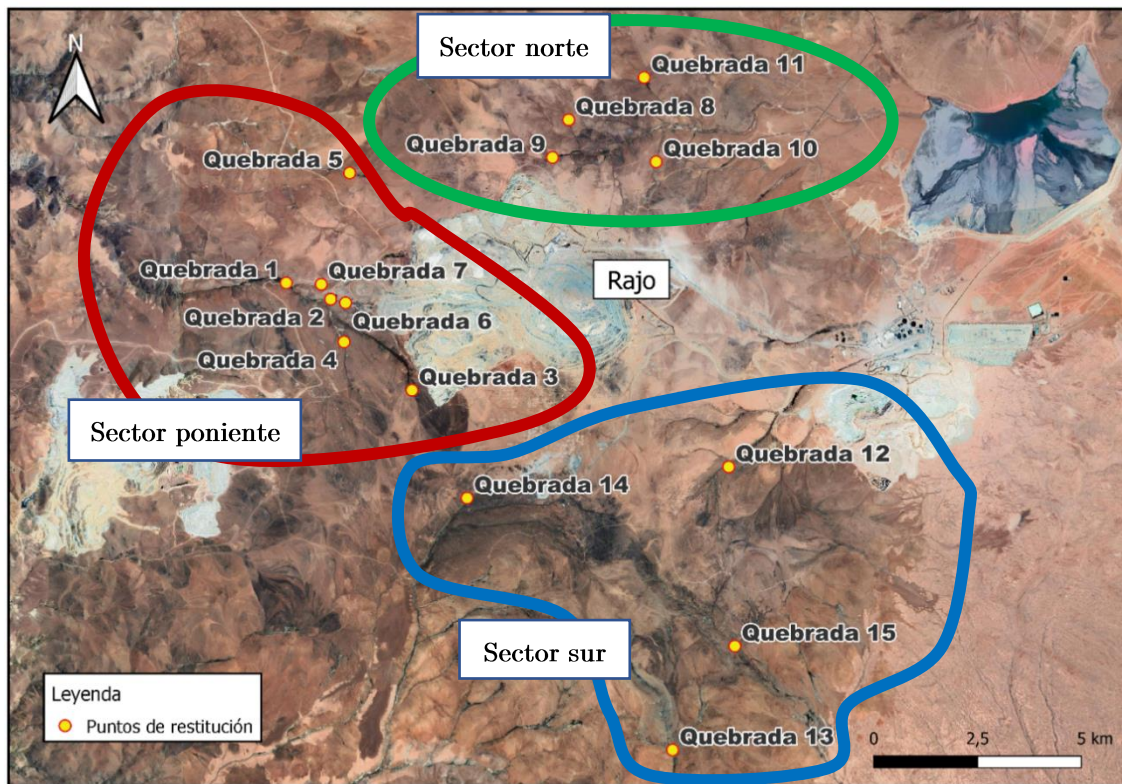


Figura 1.4. Sectores en los que se ubican las quebradas en torno al rajo. Sector norte: verde, sector poniente: rojo, sector sur: azul. Fuente: Elaboración propia.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. CAPTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

A lo largo de la historia, civilizaciones asentadas en zonas áridas han desarrollado diversos sistemas para suplir la desertificación y escasez de agua. Entre ellos, las galerías filtrantes corresponden a tecnologías utilizadas para la captación y aducción de agua subterránea conducida gravitacionalmente directamente desde un acuífero hasta la zona donde se requiera el recurso. Se destacan por ser de los sistemas hidráulicos más antiguos, eficientes y sostenibles en zonas áridas (Loctevout *et al.*, 2020). Se utilizaron en gran parte de Oriente Medio, extendiéndose por el norte de África, España, Asia central y meridional, hasta zonas más alejadas como Perú y Japón (Valipour *et al.*, 2020). Los nombres con que fueron conocidas estas construcciones en distintas civilizaciones se presentan en la **Tabla 2.1**.

Tabla 2.1. Nombres con los que fueron conocidas las galerías filtrantes en distintas civilizaciones.

Fuente: (Valipour *et al.*, 2020).

Zona	Nombre de acueducto subterráneo
Medio oriente	Qanat o Falaj
Mediterráneo	Foggara o Khattara
Asia central	Karez
España	Galería o socavón
Perú	Puquío
Japón	Manbo

Las galerías filtrantes corresponden a grandes pasillos construidos bajo la superficie del suelo, donde a lo largo del trazado del túnel se excavan pozos verticales cada 20 a 200 m visibles desde la superficie (ejemplo en **Figura 2.1**), para proporcionar ventilación y poder realizar las mantenciones correspondientes. Así, estas estructuras captan agua subterránea desde un acuífero y la transportan a zonas de menor altitud, donde afloran normalmente en llanuras con baja disponibilidad de agua.



Figura 2.1. Acueductos de Cantalloc (galerías filtrantes) vistos desde la superficie. Construidos por la cultura Nazca, Perú.

Aunque parecen relativamente sencillos, estos túneles pueden extenderse varios kilómetros. Su construcción comienza excavando desde la salida hasta la zona de la fuente del agua, es decir, el acuífero o napa donde se encuentra el pozo madre. La parte inferior de la galería se encuentra ubicada por debajo del nivel freático, y la parte superior en la zona de saturación. La sección transversal tiene dimensiones suficientes como para permitir el desplazamiento de los equipos y de las personas encargadas de su construcción (CEPIS, 2002). Además, la pendiente del túnel subterráneo debe estar comprendida entre el 0,2 % y 0,5 % para permitir el flujo continuo de agua desde la fuente hacia el asentamiento urbano donde se necesite el recurso, y al mismo tiempo, minimizar la erosión de su superficie interior (Valipour *et al.*, 2020). De cualquier forma, las dimensiones estructurales de los túneles, así como la profundidad de los pozos verticales y su longitud, pueden variar en función de la profundidad de los acuíferos, la topografía del relieve y las condiciones geográficas y geológicas de la zona. En la **Figura 2.2** es posible observar una vista de perfil, transversal y en planta de un esquema de galería subterránea o qanat.

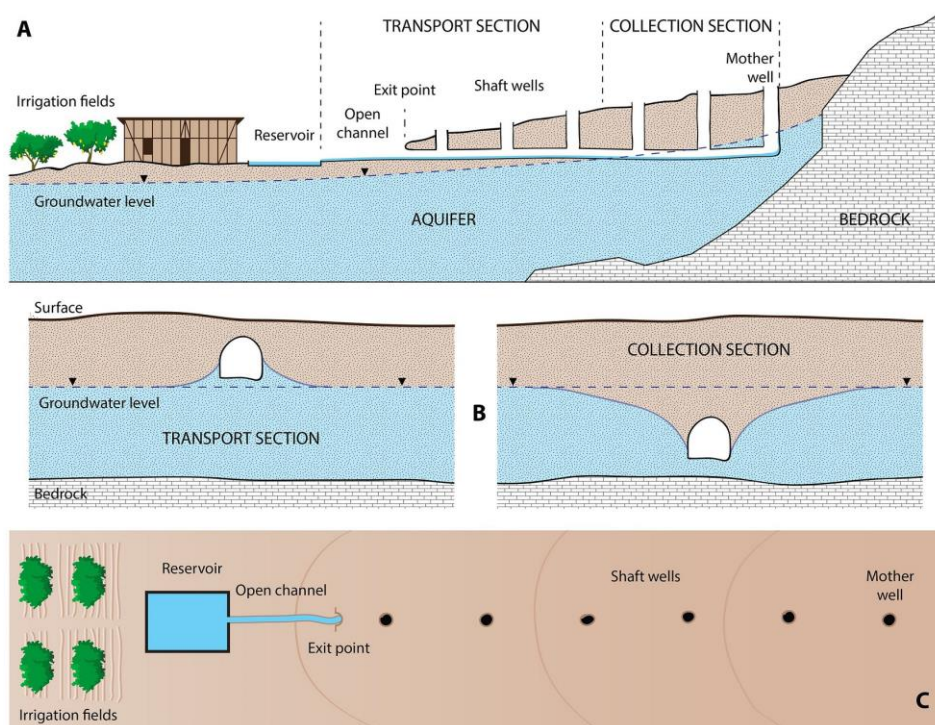


Figura 2.2. (A) Ilustración de una típica galería subterránea. (B) Sección transversal de una galería subterránea. (C) Vista en planta de una galería subterránea. Fuente: (Loctevout *et al.*, 2020)

En Chile también se encuentran este tipo de sistemas en el oasis de Pica, ubicados en la región de Tarapacá, a una altitud de 1.500 m.s.n.m, en la unión entre la precordillera (Altos de Pica) y la depresión central (Pampa del Tamarugal). Han sido utilizados principalmente para riego en la zona. Así, se han identificaron 24 túneles (qanats) que suman una longitud total de 18,2 km entre el túnel principal y ramales laterales. Teniendo en cuenta las galerías no identificadas, se cree que la red total de socavones cubra una distancia de 20 km. Por otra parte, la característica más original de los socavones de la zona de Pica, en comparación con los de otras regiones del mundo, son los pozos de ventilación, ya que no están situados verticalmente sobre el túnel principal, sino a la derecha o izquierda de las galerías, sin ninguna lógica aparente. Además, estos socavones no disponen de un pozo madre (Loctevout *et al.*, 2020).

Por otro lado, una alternativa análoga que se propone a analizar, corresponde a la instalación de una red de drenes subterráneos, que consisten en tuberías perforadas o ranuradas desde donde se capta agua. Estos drenes se instalan en la zona saturada del acuífero y se encuentran cubiertos con material seleccionado para garantizar un adecuado rendimiento. Normalmente, los diámetros de los drenes son mayores a 200 mm, con pendientes que fluctúan entre uno y cinco por mil (CEPIS, 2002). A continuación, en la **Figura 2.3**, se presenta una imagen de drenes de penetración transversal, conocidos como drenes californianos.



Figura 2.3. Drenes californianos.

Finalmente, se presenta otra propuesta donde las galerías y drenes pueden combinarse, dando como resultado captaciones del tipo mixto, representadas por pozos radiales, que se ejecutan cuando el nivel freático se encuentra a mucha profundidad y hace económicamente inviable la instalación de cualquier otro tipo de galería. La obra consiste en la construcción de un pozo vertical que se prolonga hasta llegar al nivel freático, desde donde se inicia la construcción de una o más bocas de entrada, mayormente en sentido perpendicular a la dirección del flujo de aguas subterráneas. En el caso de las galerías, las secciones y pendientes son similares a las señaladas anteriormente, y si la longitud de cada ramal es mayor a 50 m, es conveniente la construcción de pozos de ventilación (CEPIS, 2002).

2.2. CAPTACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA

El agua contenida en la atmósfera terrestre se puede presentar en los tres estados de la materia. La forma principal de esta fuente corresponde al vapor de agua o rocío, y, aunque no sea tan visible como las formas líquidas en nubes y neblina, ni en forma sólida, como nieve y granizo, el vapor de agua está siempre presente en la atmósfera, incluso en zonas áridas (Mart, 2007) como lo es el caso de estudio en el desierto de Atacama.

Según se estima, en todo el planeta, el aire húmedo presente en la atmósfera contiene 12.900 km^3 de agua, cifra superior a los 11.600 km^3 que conforman el volumen del Lago Superior, el más grande de América del Norte, y que los 2.700 km^3 del Lago Victoria, el más grande de África (Smedley, 2018). En la **Figura 2.4** se presenta un mapa con la distribución de agua atmosférica a nivel mundial, observándose mayor presencia de esta en las zonas ecuatorianas con climas tropicales.

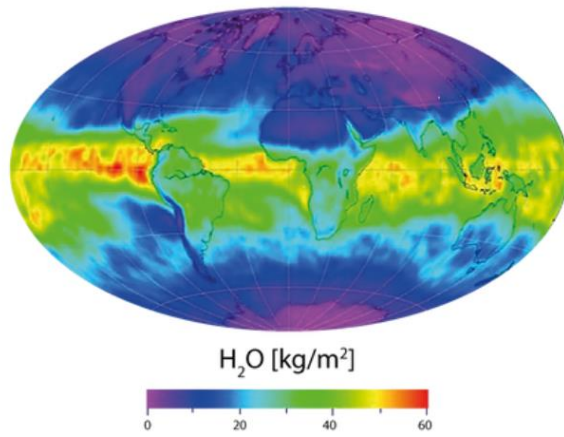


Figura 2.4. Agua atmosférica presente a nivel mundial.

En la atmósfera, la troposfera corresponde a la parte inferior, abarcando hasta aproximadamente 12 kilómetros de altura y donde se desarrollan el clima y la vida. Contiene tres cuartas partes de la masa de la atmósfera y alrededor del 99% del agua atmosférica (Mart, 2007). De esta manera, la humedad en el aire es una potencial fuente de agua dulce accesible en todas partes, inclusive en zonas muy áridas, que es posible condensar con una tecnología que se pueda sustentar con energías renovables como la solar o eólica.

Dando respuesta a lo anterior, las tecnologías AWG (Atmospheric Water Generation) consisten en dispositivos que producen agua limpia y potable a partir de la humedad del aire. Su funcionamiento consiste en que el agua vaporizada en el aire (vapor de agua) se absorbe y se condensa debajo de su punto de rocío para generar agua líquida (Moghimi *et al.*, 2021). Este sistema se esquematiza en la **Figura 2.5**.

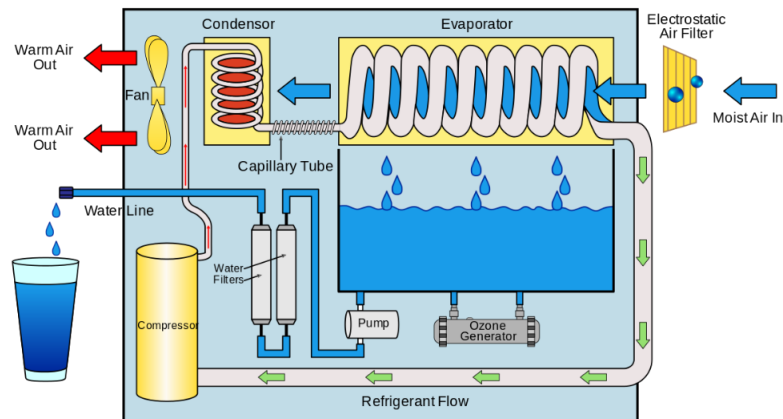


Figura 2.5. Sistema AWG que condensa el vapor de agua para convertirlo en agua líquida.

Dentro de las ventajas de estos dispositivos se encuentra que pueden ser usados en múltiples locaciones y estos pueden producir agua en el mismo lugar de su instalación, el sistema también se utiliza para el suministro de agua de emergencia en tiempos de desastres naturales, como alternativa para casos urbanos donde existen potenciales riesgos a la salud y para uso en bases militares. Sin embargo, a pesar de su potencialidad, la difusión de este

tipo de tecnologías ha sido lento, correspondiendo a una industria emergente (Moghimi *et al.*, 2021).

La eficiencia de los AWGs varía en un amplio rango dependiendo de factores como la humedad, temperatura y la tecnología usada en el sistema de membrana (Almusaied y Asiabanpour, 2017). De esta forma, un dispositivo puede variar ampliamente su producción de agua debido a las condiciones atmosféricas. Asimismo, existe una variedad de dispositivos de recolección de vapor de agua, donde es importante discutir sobre los materiales de captura, diseños de captación y ciclos termodinámicos empleados (Tu *et al.*, 2018).

A continuación, se presentan en la **Tabla 2.2** distintas tecnologías de generación de agua disponibles en el mercado o en fase de prototipo, con una potencial aparentemente escalable a la promisoría demanda existente.

Tabla 2.2. Tecnologías de generación de agua atmosférica. Fuente: Elaboración propia en base a Reporte técnico Drupps, 2020.

Tipo de generación	Compañía	Capacidad max de generación (L/día)	Ubicación
Absorción con líquido	Drupps	200000	Suecia
	H2oll	48	Israel
Absorción con sólido	AWN Nanotech	10000	Canadá
	Uravu	50	India
	Kara Water	10	
	SunToWater	36	USA
	Source (Zero Mass Water)	5	
	Sky River	20	UAE
	Majik Water	10	Kenya
Condensación	Gr8 water	13000	USA
	Ecoloblue	10000	
	EWDC*	10000	
	Sky Source	2000	
	Dew	5000	
	Island Sky	1100	
	Rainmaker	20000	Canadá
	DewPoint	10000	
	Genaq	10000	España
	Ray Agua	8400	
	Hogen System	5000	UK
	Planets Water	5000	
	Requench	4000	Israel
	Watergen	6000	
	Akvosphere	1000	India
	Bharat Electronics	1000	
	Eshara Water	1000	UAE
Hendrx	1000	China	

2.2.1. AWN NANOTECH

AWN Nanotech es un sistema que propone una solución limpia, que hace uso de una nanotecnología patentada para generar agua desde el aire, abasteciéndose de una fuente energética solar. Su prototipo de mayores dimensiones es capaz de producir hasta 10.000 L/día.

El sistema de AWN Nanotech se basa en la biomímesis o biomimética, que consiste en el estudio de la naturaleza como fuente de inspiración para elaborar tecnologías innovadoras, pudiendo resolver problemas humanos que la naturaleza ya es capaz de suplir (Riechmann, 2003). De esta manera, este sistema se inspira en la biomimétrica natural de una especie de lagarto que habita el desierto australiano, conocido como el “Diablo espinoso” o “Devil Lizard” (*Moloch horridus*), que puede recolectar la humedad del aire de manera efectiva debido a las propiedades de su superficie o piel del insecto (*AWN Nanotech*, 2018).

De esta forma, los científicos han replicado estas cualidades en un tejido de alta tecnología, que cumple una función similar a la de los cactus y a la piel absorbente del reptil antedicho, que puede “fabricar” agua. Así, se potencian las propiedades de estos elementos de la naturaleza en una membrana nano textil a base de carbono (**Figura 2.6**), que permite absorber el vapor de agua de la atmósfera y luego expulsarla tras ser extraída. Esto se explica ya que en un lado de la malla el material es hidrofílico, es decir, atrae el agua, y por el otro lado hidrofóbico o repelente al agua, por lo que a medida que las partículas de agua se depositan en la malla, son empujadas de un lado a otro, formando gotas. Esta membrana es semiflexible y se puede moldear para adaptarse a las necesidades de cualquier cliente.

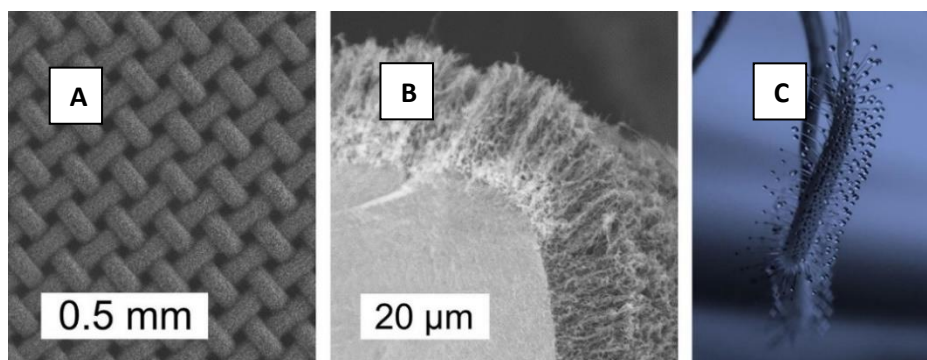


Figura 2.6. (A) Tejido nanotecnológico flexible de AWN Nanotech que absorbe el vapor de agua de la atmósfera y lo convierte en agua líquida que se recoge en un dispositivo. (B) Imagen a través de un microscopio electrónico que muestra las fibras de carbono adheridas al material “nano-tratado” (C) Imagen de las aristas de cactus que utilizan una adaptación similar de condensación de agua para prosperar en entornos desérticos. Fuente: *AWN Nanotech*.

Esta tecnología se abastece netamente de energía solar para llevar a cabo el proceso de condensación de vapor de agua captada en agua líquida, lo que lo convierte en uno de los sistemas más eficientes energéticamente del mercado. Consume entre 20 y 70 veces menos energía que las otras soluciones de condensación disponibles, pues, el sistema tiene un volumen de extracción de agua dulce a menos de 0,01 kWh por litro, considerándose el aporte energético casi nulo (*AWN Nanotech*, 2018).

2.2.2. ZERO MASS WATER

Zero mass water consiste en una tecnología que utiliza un sistema de hidropaneles para captar la humedad del aire y posteriormente condensarla para obtener agua líquida. En el proceso, unos ventiladores aspiran el aire ambiental y lo empujan a través de un material higroscópico o absorbente que atrapa el vapor de agua contenido en el aire. Luego, este se condensa pasivamente en líquido para luego recogerlo en un depósito. Una figura ilustrativa de este equipo se presenta en la **Figura 2.7**.

Cada unidad puede producir entre 2 a 5 litros por día y cuenta con un estanque de reserva para almacenar hasta 30 litros. La cantidad de agua que genera este sistema es variable en función de las condiciones de humedad y de la exposición al sol de lugar en el que se ubique. Sin embargo, sus creadores aseguran que estos paneles son capaces de convertir el vapor ambiental en agua apta para el consumo incluso en climas áridos y semiáridos.

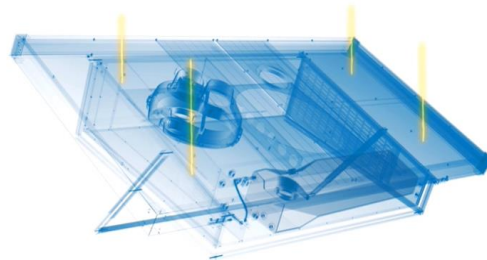


Figura 2.7. Hidropanel producido por Zero Mass Water.

2.2.3. AIREX

El dispositivo E-350 de AIREX Ingeniería (**Figura 2.8**) es capaz de generar hasta 900 litros de agua por día. La tecnología patentada de intercambio de calor EIUS utiliza 250 Wh por litro, necesitando abastecerse de electricidad para su funcionamiento. Tal como los otros dispositivos, la producción de agua queda sujeta a condiciones atmosféricas, temperatura y humedad relativa del lugar.

Esta alternativa incorpora un sistema de filtración de aire mediante múltiples barreras en cascada. Asimismo, cuenta con una tecnología de purificación de agua incorporada que contempla filtración de sedimentos, mineralización, carbón activado y tratamiento microbiológico.



Figura 2.8. Dispositivo E-350 de AIREX Ingeniería.

2.2.4. DRUPPS

La tecnología de Drupps consiste en la producción de agua en base a la tecnología de un líquido disecante patentado, que permite la producción eficiente de agua a través de un amplio rango de climas.

El sistema consiste en hacer fluir el aire a través de módulos absorbentes de humedad, en los cuales el aire circundante es absorbido por un líquido disecante llamado FLOW (Figura 2.10). Luego, FLOW transfiere la humedad absorbida a otro módulo para ser evaporada de este líquido disecante y poder destilarse como agua limpia. Posteriormente, FLOW regresa a los módulos absorbentes de humedad y comienza un nuevo proceso (Drupps, 2017).

El prototipo a menor escala de este sistema se muestra a continuación en la Figura 2.9.

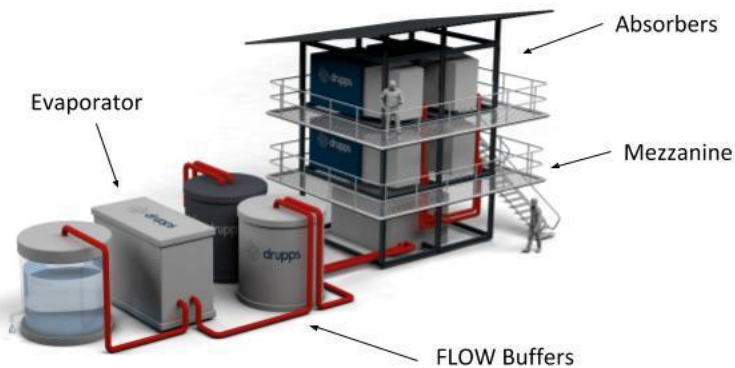


Figura 2.9. Prototipo de sistema Drupps. Fuente: Reporte técnico de Drupps, 2020.

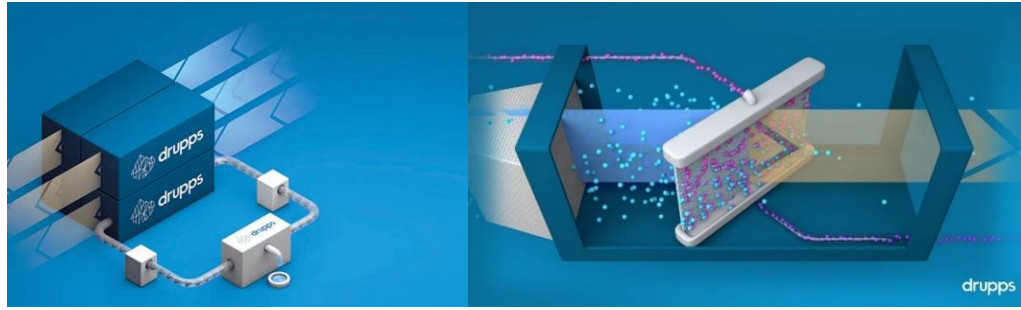


Figura 2.10. Izquierda: Esquema del funcionamiento del sistema Drupps. Derecha: Captación de humedad con líquido desecante FLOW. Fuente: (*Reporte técnico Drupps, 2020*)

El sistema Drupps se puede adaptar a requerimientos de volúmenes específicos y a determinadas condiciones climáticas, simplemente añadiendo la cantidad necesaria de módulos de humedad absorbente (*Drupps, 2017*).

2.2.5. WATERGEN (GEN-L)

Watergen es una empresa israelí que propone una tecnología AWG para producir agua a partir de la condensación del aire. El sistema consiste en que el aire pasa por un filtro, para posteriormente circular por un sistema patentado de intercambio de calor, donde el aire es condensado para producir agua. Luego, el agua pasa por un proceso de purificación y mineralización, donde utilizando un tratamiento UV, se eliminan microorganismos y se descomponen químicos dañinos. Finalmente, el agua es almacenada en un reservorio filtrante, donde pasa reiterativamente por el sistema de purificación UV (*Watergen, no date*).

El prototipo Watergen que ofrece mayor capacidad de producción de agua actualmente corresponde a un sistema modular llamado GEN-L (**Figura 2.11**), con potencial para generar máximo 6.000 L/día. Esta tecnología funciona con un mínimo de humedad relativa de 20%, variable de la cual depende directamente su producción (*Watergen, no date*).



Figura 2.11. Prototipo de equipo Watergen GEN-L capaz de producir 6.000 L/día con las condiciones atmosféricas adecuadas.

2.3. CAPTACIÓN DE PRECIPITACIONES

La recolección de precipitaciones (Rain Water Harvesting, RWH) se define como el proceso de concentrar el agua de lluvia sobre las cuencas de captación a través de la escorrentía para ser almacenada. Estos sistemas pueden controlar la erosión y restaurar tierras degradadas.

Se han probado sistemas que aumentan la escorrentía producida por las eventuales precipitaciones, disminuyendo la permeabilidad de la superficie y/o reduciendo el tiempo que el agua permanece en esta. Los métodos de impermeabilización de suelo más prometedores, que permiten la recolección de agua, en orden creciente de costos, corresponden a los siguientes:

- Suelo (tierra) compactado
- Suelo (tierra) compactado moldeada con cera
- Plástico cubierto de grava
- Asfalto cubierto con fibra de vidrio
- Asfalto recubierto con caucho

EMBALSES DE ALMACENAMIENTO DE PRECIPITACIONES

Para almacenar la escorrentía derivada de las precipitaciones, aprovechando en especial las asociadas al invierno altiplánico, se propone la construcción de embalses con presas de tierra que sirvan para aportar total o parcialmente el caudal demandado por las restituciones de quebradas.

Dado que el estudio presenta un análisis a nivel de ingeniería conceptual y no se dispone mayor información sobre la topografía del terreno, el dimensionamiento del embalse contempla un volumen de excavación para el almacenamiento de agua sin considerar la construcción de la presa de tierra.

Por otro lado, como método para disminuir pérdidas debido a la evaporación, se presentan las bolas de sombra o *shade balls* (**Figura 2.12**), elementos fabricados con polietileno de alta densidad, autorizado para entrar en contacto con el agua al no reaccionar químicamente con esta. Son de color negro, por lo general de unos 10 cm de diámetro, y son utilizadas en embalses para reducir la evaporación en un 80% a 90% al proporcionar sombra del sol.

Su propósito original era mantener alejadas a las aves de los estanques con residuos tóxicos en faenas mineras, y en aeropuertos, donde se deseaba alejarlas de las pistas cubriendo estanques y ríos cercanos con las bolas de sombra, entonces conocidas como bolas de pájaros. Asimismo, se utilizan en los embalses de agua potable para evitar la generación de bromato, compuesto que perjudica la salud y que se genera al reaccionar la radiación ultravioleta con el cloro utilizado para purificar el agua.



Figura 2.12. Imágenes de bolas de sombra o *shade balls*.

3. METODOLOGÍA Y BASES DE DISEÑO

En este apartado se presentan las bases del diseño y procedimientos a desarrollar para evaluar la factibilidad de implementar las alternativas pasivas de restitución propuestas en el capítulo anterior.

Con el objetivo de realizar un primer análisis, se evalúa la prefactibilidad de desarrollar las distintas alternativas propuestas, asignando un puntaje a cada ítem de evaluación conceptual, para poder finalmente ponderarlo y establecer qué propuestas son factibles de implementar.

Considerando las alternativas seleccionadas luego del análisis de prefactibilidad, se estudia, primeramente, el diseño de galerías filtrantes y drenes, lo cual requiere evaluar el escenario hidrogeológico para el año 2040, y así poder dimensionar las aducciones. Para lo anterior, se requiere comparar el nivel de terreno natural con el nivel freático futuro (2040) y así trazar un conducto que permita unir directamente el punto de captación con el de restitución, permitiendo que el agua sea transportada netamente por acción de la gravedad. También se presentan los parámetros de diseño del ducto filtrante que penetra el acuífero para captar el caudal necesario en cada restitución.

Con respecto a la evaluación de sistemas de generación de agua atmosférica (AWGs), se estima la cantidad de dispositivos necesarios para cubrir la demanda de caudales en cada sector.

En cuanto a la captación de precipitaciones, se calcula el área aportante de cada cuenca al punto de restitución correspondiente, y así poder evaluar si se es capaz de generar la escorrentía directa capaz de suplir los caudales necesarios.

El detalle de los caudales a restituir en el sector poniente, norte y suroriente se presenta a continuación en la **Tabla 3.1**, **Tabla 3.2** y **Tabla 3.3**, respectivamente.

Tabla 3.1. Caudales de restitución en sector poniente.

Sector	Punto de restitución	Caudal a restituir [L/s]
		Promedio anual
Poniente	Quebrada 1	24,86
	Quebrada 2	2,78
	Quebrada 3	6,24
	Quebrada 4	5,00
	Quebrada 5	2,12
	Quebrada 6	1,00
	Quebrada 7	1,60
Caudal de restitución total		43,60

Tabla 3.2. Caudales de restitución en sector norte.

Sector	Punto de restitución	Caudal a restituir [L/s]
		Promedio anual
Norte	Quebrada 8	0,78
	Quebrada 9	11,28
	Quebrada 10	0,44
	Quebrada 11	0,78
Caudal de restitución total		13,28

Tabla 3.3. Caudales de restitución en sector suroriente.

Sector	Punto de restitución	Caudal a restituir [L/s]
		Promedio anual
Suroriente	Quebrada 12	1,98
	Quebrada 13	0,78
	Quebrada 14	1,08
	Quebrada 15	0,54
Caudal de restitución total		4,38

3.1. CARACTERÍSTICAS DEL ANÁLISIS DE PRE FACTIBILIDAD

Las alternativas presentadas anteriormente en el capítulo 2 (**Marco teórico**) se estudian a nivel conceptual en este apartado, de manera que se pueda analizar la pre factibilidad de su implementación. Para ello, se asigna un puntaje a los siguientes ítems de evaluación: tipo de captación, tratamiento, fuente energética y producción diaria. Con esta información, se promedian los puntajes de cada alternativa para poder entregar una idea a priori de las opciones con mayor potencial de ser implementadas.

El puntaje de evaluación a considerar en este análisis, se presenta cuantitativa y cualitativamente en la **Tabla 3.4**.

Tabla 3.4. Puntuación a considerar para evaluación conceptual de alternativas de restitución.

Puntaje	Descripción
1	No factible de implementar
2	Escasamente factible de implementar
3	Potencialmente factible de implementar
4	Bastante factible de implementar
5	Factible de implementar

3.2. DISEÑO DE GALERÍAS FILTRANTES Y DRENES

Para el diseño de galerías filtrantes se contemplan dos opciones, en primer lugar una red de drenes que involucra la perforación del terreno y colocación de tuberías de acero inoxidable con un diámetro estándar de 20 cm, de manera que se pueda conducir el agua gravitacionalmente desde el punto de captación al de restitución; y otro sistema que consiste en las galerías filtrantes ya mencionadas, donde se sigue el mismo principio de aducción gravitacional, pero se excava un túnel con un diámetro mayor y pozos de ventilación cada cierto metraje de manera que permita el ingreso de personal para su inspección y/o mantención.

El diseño de estos sistemas se divide entre el conducto filtrante, el cual penetra la zona saturada para la captación, y el tramo de aducción que conduce el agua gravitacionalmente hasta el punto de restitución.

DISEÑO DE TRAMO DE ADUCCIÓN DE GALERÍAS FILTRANTES Y DRENES

Para el trazado de los tramos de aducción, tanto para la galería filtrante como para los drenes, es necesario evaluar el escenario hidrogeológico para el año de cierre de las faenas. De esta manera, con la información de los modelos hidrogeológicos aportados por la compañía minera y utilizando el software QGIS, fue posible trazar un mapa con las curvas de nivel freático y así determinar las cotas en los puntos de restitución para el año 2040, las cuales se presentan en la **Tabla 3.5**.

En cuanto a la elevación de terreno, se trabaja con los archivos ráster DEMs de la zona en estudio obtenidos de la base de datos de la NASA, los cuales corresponden a matrices donde cada pixel corresponde a la cota promedio del terreno cubierto. Luego, estos archivos se exportan al software QGIS con el cual es posible trazar un plano topográfico con las curvas de nivel, en base a las cuales se tienen las cotas de elevación del terreno para cada punto de restitución (**Tabla 3.5**).

Tabla 3.5. Elevación de terreno y niveles freáticos 2040 según punto de restitución.

Nombre	Este UTM [m]	Norte UTM [m]	Elevación terreno [m.s.n.m]	Nivel freático 2040 [m.s.n.m]
Quebrada 1	523853	7681519	4350,2	4331,9
Quebrada 2	524922	7681126	4367,9	4359,0
Quebrada 3	526880	7678937	4592,9	4516,5
Quebrada 4	525244	7680098	4444,7	4427,3
Quebrada 5	525380	7684165	4445,7	4356,0
Quebrada 6	525281	7681041	4376,7	4364,5
Quebrada 7	524697	7681486	4345,0	4336,3
Quebrada 8	530653	7685444	4550,0	4426,7
Quebrada 9	530263	7684538	4590,5	4419,1
Quebrada 10	532758	7684433	4516,0	4444,4
Quebrada 11	532471	7686463	4505,8	4398,1
Quebrada 12	534506	7677092	4670,9	4651,8
Quebrada 13	533155	7670280	4416,6	4422,0
Quebrada 14	528207	7676343	4556,8	4563,6
Quebrada 15	534654	7672780	4622,5	4604,4

Con la información anterior, fue posible trazar con el software QGIS la extensión de las tuberías desde los puntos de restitución hacia niveles freáticos ubicados a mayor altura, a modo de permitir que el agua fluya netamente por acción de la gravedad. De esta manera, se obtiene un perfil longitudinal del terreno y otro del nivel freático. Luego, estos datos se exportan a AutoCAD, donde se traza el perfil longitudinal del ducto, partiendo del punto de restitución hacia el acuífero con una pendiente de 1%. Utilizando las herramientas propias del software, es posible estimar el largo total de la aducción.

En la **Figura 3.1** se muestra a modo de ejemplo el perfil longitudinal del punto de restitución de la Quebrada 11, donde se presenta el nivel de terreno, el nivel freático del acuífero y el tramo de aducción que parte desde el punto de captación al afloramiento. El detalle de los demás perfiles se presenta en el **ANEXO A: PERFILES LONGITUDINALES DE ADUCCIÓN DESDE CAPTACIÓN A RESTITUCIÓN**.

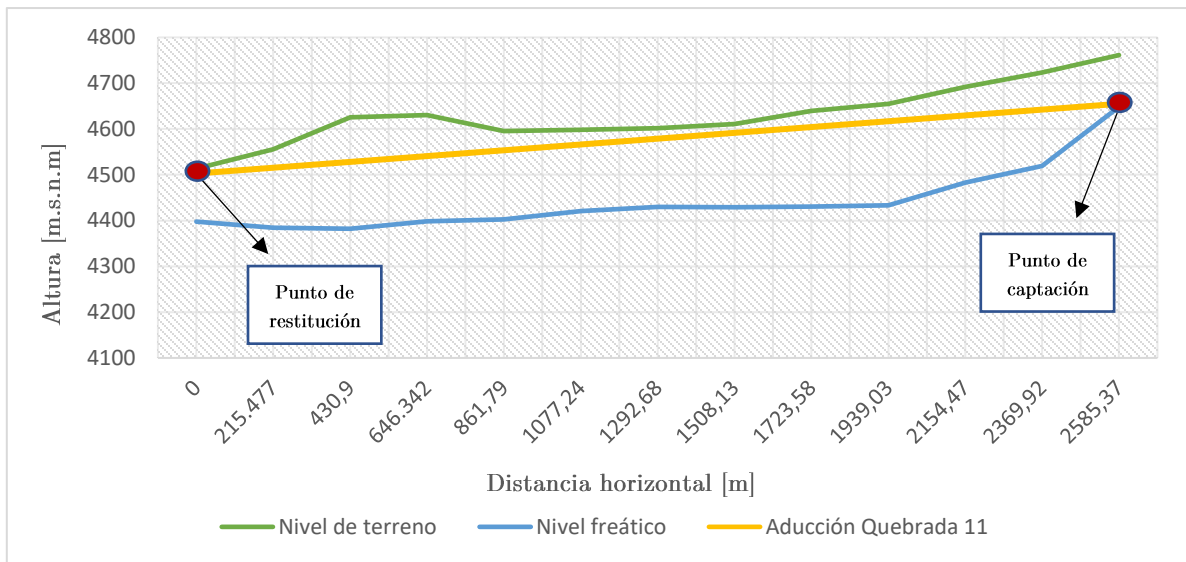


Figura 3.1. Perfil longitudinal de aducción al punto de restitución de la Quebrada 11.

En aquellos casos donde el trazado de la tubería supera el nivel de terreno, se implementará un sifón invertido que conduzca el agua por este tramo. Para su diseño se iguala el Bernoulli considerando las pérdidas friccionales y singulares propias de un sifón invertido, tomando en cuenta un coeficiente de seguridad del 10% en la evaluación de la pérdida total del mismo. Se considera la información disponible (caudal, cotas de entrada y salida) y como criterio de diseño se toma en cuenta que el caudal y la velocidad máxima permisible en la tubería determinan el diámetro de la misma. Generalmente la velocidad media en la tubería está comprendida entre 3 y 4 m/s. Estos datos, junto con la información supuesta sobre las cotas de fondo, ángulo de los codos y largo de la tubería, se usan para dimensionar el diseño de los sifones invertidos. Las ecuaciones que se utilizan para llevar a cabo este procedimiento corresponden a la **Ecuación 3.1**, **Ecuación 3.2**, **Ecuación 3.3**, **Ecuación 3.4** y **Ecuación 3.5** presentadas a continuación:

Ecuación 3.1
$$B_1 - 1,1 \cdot \lambda_{friccionales} - 1,1 \cdot \lambda_{singulares} = B_2$$

Donde:

B_1 : Bernoulli aguas abajo del sifón [m.s.n.m]

B_2 : Bernoulli aguas arriba del sifón [m.s.n.m]

$\lambda_{friccionales}$: Pérdidas friccionales [m]

$\lambda_{singulares}$: Pérdidas singulares [m]

Ecuación 3.2
$$B_1 = z_1 + \frac{v_{entrada}^2}{2g}$$

Donde:

z_1 : Cota a la entrada del sifón [m.s.n.m]

$v_{entrada}$: Velocidad a la entrada del sifón [m/s]

Ecuación 3.3
$$B_2 = z_2 + \frac{v_{salida}^2}{2g}$$

Donde:

z_2 : Cota a la salida del sifón [m.s.n.m]

$v_{tubería}$: Velocidad en la tubería y a la salida del sifón [m/s]

Ecuación 3.4
$$\lambda_{singulares} = \lambda_{entrada} + \lambda_{cambio\ de\ dirección} + \lambda_{salida}$$

$$= k_e \frac{(v_{salida} - v_{entrada})^2}{2g} + k \sum \frac{\Delta}{90^\circ} \frac{v_{salida}^2}{2g} + k_s \frac{(v_{salida} - v_{entrada})^2}{2g}$$

Donde:

$\lambda_{entrada}$: Pérdida a la entrada del sifón [m/s]

$\lambda_{cambio\ de\ dirección}$: Pérdida a la salida del sifón [m/s]

λ_{salida} : Pérdida a la salida del sifón [m/s]

Δ : Ángulo de los codos

Ecuación 3.5
$$\lambda_{friccionales} = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v_{salida}^2}{2g} \right)$$

Donde:

f : Factor de fricción

L : Largo de tubería [m]

$v_{tubería}$: Velocidad en la tubería y a la salida del sifón [m/s]

D : Diámetro de la tubería [m]

DISEÑO DE CONDUCTO FILTRANTE

En cuanto al diseño del conducto filtrante, ambos sistemas contemplan una tubería cribada que penetra el acuífero en la zona saturada al final del tramo de aducción. Para el dimensionamiento del largo de este trecho en ambos casos se aplica la **Ecuación 3.6**.

Ecuación 3.6
$$L = \frac{Q_d}{T}$$

Donde:

Q_d : Caudal de diseño

T : Transmisividad. Los valores se exponen en la sección de **ANEXOS - Tabla 7.1**

L : Longitud de la galería filtrante

Relativo al diseño de la sección transversal de estos tramos, el diámetro mínimo a utilizar es el que garantice el escurrimiento del caudal de diseño con una altura no mayor al 50%, pero en ningún caso que la tubería sea menor a 200 mm, pues este diámetro facilita la limpieza y mantenimiento de los drenes.

Asimismo, para evitar la acumulación del material fino que pueda entrar al conducto, la tubería del dren debe tener una pendiente adecuada que facilite su autolimpieza. Esto se logra con pendientes que varían de 0,001 m/m a 0,005 m/m. No se recomienda pendiente muy altas para evitar profundizaciones excesivas en casos de galerías de gran longitud.

En cuanto al tipo de material se recomienda utilizar acero inoxidable para su construcción.

Por otra parte, la velocidad de escurrimiento del agua en el dren debe ser menor a 3 m/s, con un valor mínimo de 0,60 m/s.

Para la estimación de estos parámetros y el chequeo de las condiciones mencionadas, se iteran las dimensiones para cumplir con los límites indicados utilizando la **Ecuación 3.7**.

Ecuación 3.7
$$V = \frac{R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n}$$

Donde:

R_h : Radio hidráulico [m]

S : Pendiente [-]

V : Velocidad en la tubería [m/s]

n : Coeficiente de Manning del acero inoxidable, 0,012 [s/m^{1/3}]

3.3. DISPOSITIVOS DE CAPTACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA

En cuanto a los sistemas de generación de agua atmosférica (Atmospheric Water Generator, AWGs), con la información proporcionada en sus respectivas especificaciones técnicas, se estudia la factibilidad de su implementación estimando la cantidad de dispositivos necesarios y la superficie abarcada por estos para cubrir la demanda de las restituciones. Estos resultados se presentan en el apartado 4.2.2 en la sección de **DESARROLLO**.

3.4. DISEÑO DE EMBALSES DE ALMACENAMIENTO DE PRECIPITACIONES

Para la implementación de un sistema de captación de precipitaciones, se contempla diseñar embalses aguas arriba de los puntos de restitución. En estos se pretende almacenar parte de la escorrentía proveniente de las precipitaciones asociadas principalmente al invierno altiplánico, para luego disponer del recurso en períodos de escasez.

De esta manera, para su diseño es necesario delimitar las cuencas aportantes a cada punto de restitución junto con determinar las condiciones hídricas y climáticas en el 2040, con el fin de estimar la precipitación efectiva que se transforma en escorrentía superficial.

Siguiendo el procedimiento descrito, las cuencas asociadas a cada punto de restitución se delimitan con el software GRASS GIS, empleando modelos digitales de elevación (DEM) obtenidos de la base de datos de la NASA. Con esta misma herramienta es posible estimar las áreas aportante de cada cuenca.

En cuanto a la estimación de precipitación para un escenario futuro, se utilizan las proyecciones de los modelos hidrológicos realizados por CONIC-BF en el estudio “Criterios de diseño hidrológico para la estimación de caudales de crecida en sectores de la compañía minera” presentados en la **Tabla 3.6**. Las proyecciones fueron realizadas con los modelos CCSM4, CSIRO, IPSL y MIROC. Se escoge trabajar con los resultados asociados a la mayor precipitación proyectada con el fin de no subestimar el diseño del embalse, los cuales corresponden al modelo IPSL con una precipitación acumulada anual de 152,62 mm.

Tabla 3.6. Estadísticos de promedio, mínimo, máximo y desviación estándar para la estación Ujina en el período futuro (2020 – 2060). Fuente: (CONIC-BF, 2020).

Modelo	Estadístico	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M
Histórico	Promedio [mm]	1,71	0,40	0,98	1,58	1,46	0,97	0,67	1,04	35,55	37,61	36,83	24,37
	Mínima [mm]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Máxima [mm]	6,30	3,64	8,32	30,19	21,96	10,72	12,85	9,13	176,26	81,60	151,24	97,98
	Desvest [mm]	2,15	0,91	1,96	5,58	4,01	2,62	2,33	2,28	54,29	23,70	43,18	27,57
IPSL	Promedio [mm]	1,11	0,18	0,55	1,38	1,13	0,49	0,28	1,98	39,14	44,20	43,25	18,93
	Mínima [mm]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,40	11,30	0
	Máxima [mm]	6,00	2,50	6,40	31,20	16,40	12,50	3,70	17,20	210,70	90,90	136,90	176,90
	Desvest [mm]	1,53	0,48	1,24	5,34	3,31	2,14	0,93	3,56	42,78	22,87	28,27	34,30

Considerando lo anterior, para conocer la precipitación efectiva que se transforma en caudal de escorrentía superficial en cada cuenca, se utiliza el método de la Curva Número. Este corresponde a un modelo empírico desarrollado por la US Soil Conservation Service (SCS), que determina el umbral de escorrentía a través de un número hidrológico que toma un valor de 0 a 100 según sea su capacidad de generar flujo superficial. Valores cercanos a 0 representan condiciones de permeabilidad muy alta, mientras que valores cercanos a 100 representan condiciones de impermeabilidad. Con este método es posible estimar la infiltración, y considera todas las pérdidas netas menos la evaporación real. Las expresiones utilizadas para el desarrollo de esta metodología corresponden a la **Ecuación 3.8** y a la **Ecuación 3.9**, expuestas a continuación.

Ecuación 3.8
$$P_{ef} = \frac{(P-0,2 \cdot S)^2}{P+0,8 \cdot S}$$

Donde:

P_{ef} : Precipitación efectiva [mm]

P : Precipitación [mm]

S : Parámetro S [mm]

Ecuación 3.9
$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Donde:

CN : Número de curva

3.5. CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para la evaluación económica es necesario estimar el costo de la inversión (CAPEX) y costos de operación y mantenimiento (OPEX) para cada alternativa considerada. Se toma en cuenta un horizonte de evaluación de 20 años con una tasa de descuento anual del 12%.

GALERÍAS FILTRANTES: RED DE DRENES

Para la valorización económica de la red de drenes se tomaron como referencia valores presentados en otros estudios sobre construcción de pozos que se han realizado con anterioridad en la compañía minera. La **Tabla 3.7** muestra el resumen de los parámetros económicos incluidos en el proyecto y utilizados para el cálculo del CAPEX, mientras que la **Tabla 3.8** presenta los costos asociados a la estimación del OPEX.

Tabla 3.7. Costos referenciales para la estimación del CAPEX asociado a la red de drenes. Fuente: Compañía minera.

Costos Directos	Unidad	Precio unitario [USD/m]
Construcción accesos y plataformas	-	\$375.000
Perforación y desarrollo 12"	m	\$1.503
Materiales de habilitación 12"	m	\$828
Consultor Informe Oficial	c/u	\$15.000
Instrumentación	c/u	\$14.000

Tabla 3.8. Costos referenciales para la estimación del OPEX asociado a la red de drenes. Fuente: Compañía minera.

Costos Directos	Unidad	Precio unitario [USD/m]
Mantenimiento de drenes	m	\$150
Supervisión técnica (con camioneta)	pp/año	\$80.000

GALERÍAS FILTRANTES: RED DE TÚNELES Y DRENES

Esta opción contempla la excavación de túneles mediante explosivos para los tramos de aducción, y perforación con sondajes para los tramos de captación. Para esta evaluación, se toma como referencia los costos asociados a obras subterráneas correspondientes al túnel de la central hidroeléctrica El Paso, construida en el sector cordillerano de San Fernando, con una sección transversal de 16 m^2 aproximadamente. El costo del uso de explosivos para esta excavación se presenta en la **Tabla 3.9**.

Tabla 3.9. Costos referenciales para la estimación del CAPEX asociado a la excavación de túneles mediante explosivos.

Costos Directos	Unidad	Precio unitario [USD/Unidad]
Excavación de túneles	m	\$3.924

EMBALSES DE ALMACENAMIENTO DE PRECIPITACIONES

Los costos asociados a la inversión (CAPEX) de los embalses de almacenamiento de precipitaciones corresponden a la excavaciones en suelo para su construcción y el suministro e instalación de geotextil en su base para evitar pérdidas por infiltración. Estos valores se presentan a continuación en la **Tabla 3.10**.

Tabla 3.10. Costos referenciales para la estimación del CAPEX asociado a los embalses. Fuente: Collahuasi.

Costos Directos	Unidad	Precio unitario [USD/Unidad]
Excavación estructural en suelo común	m3	\$13,34
Suministro e instalación de geotextil	m2	\$11,28

4. DESARROLLO Y RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE PRE FACTIBILIDAD

Esta sección presenta un análisis de pre factibilidad realizado a las alternativas de captación de agua propuestas anteriormente. Se sigue una metodología de asignación de puntaje, estudiando distintos aspectos de cada tecnología: método de captación, tipo de tratamiento para mejorar su calidad, fuente energética que requiere y producción diaria. Esta evaluación se presenta en la **Tabla 4.1**.

Observando los resultados, con respecto a las alternativas de captación de agua atmosférica, se evalúan mejor los sistemas AWN Nanotech y Drupps debido a que su sistema absorción mediante una superficie sólida y un líquido patentado, respectivamente, es más fácilmente reemplazable y duradero que un sistema de condensación por refrigeración (Watergen y AIREX).

En cuanto a los sistemas de tratamiento incorporados en las tecnologías AWGs, aquellos basados en UV, carbón activado y control de pH reciben mayor puntuación que aquellos que requieren la adición de componentes adicionales, pues, para este último caso es necesaria la intervención de personal para su mantención.

Con referencia a la fuente energética, aquellas alternativas que tienen incorporado un sistema de suministro de energía solar (AWN Nanotech, Zero Mass Water y Drupps) reciben mayor puntuación dada su autonomía de funcionamiento, contrario a Watergen y AIREX, donde es necesario instalar un sistema de energía renovable adicional al producto, o bien, conectarlo al sistema interconectado central, lo que se descarta al significar un gasto constante a perpetuidad.

Por otra parte, aquellas alternativas que consideran captar agua subterránea (qanats y drenes) y almacenar precipitaciones en embalses, son mejor evaluadas al no requerir una fuente energética para su funcionamiento, y al ser capaces a priori de satisfacer la demanda total de caudal. Además, los qanats y drenes cuentan con una vida útil mucho mayor que los dispositivos AWGs, al igual que los embalses de almacenamiento de precipitaciones, cuyo mantenimiento requerido es mínimo.

Tabla 4.1. Cuadro de evaluación de tecnologías de restitución.

Sistema	Modo de captación	Pje	Tratamiento	Pje	Fuente energética	Ptje	Producción media [L/día]	Pje	Pje total
AWN Nanotech	Adsorción con sólido	3	UV, carbon activado, control de pH	4	Energía solar	3	10.000	3	3,25
Zero Mass Water	Adsorción con sólido	2	Adición de calcio y magnesio, ozono	1	Energía solar	3	5	1	1,75
Drupps	Absorción con líquido FLOW	3	UV, carbón activado, control de pH	4	Energía térmica y solar	3	200.000	3	3,25
Watergen (GEN-L)	Condensación de vapor de agua	2	Eliminación de metales pesados, filtración de partículas, tratamiento biológico y mineralización.	2	Electricidad	2	6.000	3	2,25
Airex	Condensación de vapor de agua	2	Filtración de sedimentos, mineralización, carbón activado y tratamiento microbiológico	3	Electricidad	2	900	3	2,50
Qanats	Captación subterránea	4	Necesita incorporar tratamiento adicional	1	No requiere	5	Totalidad de demanda	5	3,75
Drenes	Captación subterránea	4	Necesita incorporar tratamiento adicional	1	No requiere	5	Totalidad de demanda	5	3,75
Embalses	Captación de precipitaciones	5	Necesita incorporar tratamiento adicional	1	No requiere	5	Totalidad de demanda	5	4,00
Impermeabilización de botadero 2040	Captación de precipitaciones	4	Necesita incorporar tratamiento adicional	1	No requiere	5	Totalidad de demanda	5	3,75

A partir de los resultados obtenidos, se consideran en el análisis de factibilidad a realizar en el apartado siguiente, aquellas alternativas evaluadas con una calificación mayor a 2 puntos. Siguiendo este criterio, queda descartada la tecnología Zero Mass Water, presentándose igualmente a nivel conceptual para volver a ser evaluada en un futuro.

4.2. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

4.2.1. CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

LONGITUD DE ADUCCIONES Y DRENES

En este apartado se presentan los resultados del dimensionamiento de las aducciones que permiten el escurrimiento gravitacional del agua desde el punto de captación hasta la zona de restitución, junto con la estimación de la extensión del dren que penetra el acuífero.

Este análisis es común para las dos alternativas consideradas para la captación de agua subterránea, pues ambas contemplan extensiones iguales para llegar al nivel freático y requieren de la misma longitud de drenes para extraer de los acuíferos los caudales demandados en cada restitución.

Para el sector poniente se cuenta con 7 puntos de restitución (Quebradas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7), cuyos largos de aducción en total suman 6164,6 m de longitud y los drenes 1550 m de extensión. El detalle de las dimensiones de cada sector se presenta en la **Tabla 4.2** y gráficamente en la **Figura 4.1**.

Tabla 4.2. Largos de aducción y captación asociados a cada punto de restitución del sector poniente.

Punto de restitución	Largo aducción [m]	Largo captación [m]	Largo total [m]
Quebrada 1	1340,2	122,4	1462,6
Quebrada 2	205,8		205,8
Quebrada 3	602,1	50,1	602,1
Quebrada 4 - 1	305,9	594,0	356,0
Quebrada 4 - 2	340,9	594,0	934,9
Quebrada 5	2592,6	133,1	3186,6
Quebrada 6	237,7	4,6	370,8
Quebrada 7	484,8	51,6	489,4

Cabe señalar que en los puntos de restitución asociados a la Quebrada 1 y Quebrada 5 fue necesario implementar un sifón invertido, pues parte de un tramo de la tubería superaba el nivel de terreno. Para el diseño se consideraron en ambos casos codos de 45°.

Las coordenadas de los puntos de captación junto con las transmisividades de los acuíferos de los cuales se extrae agua se presentan en el **Anexo B: Coordenadas de puntos de captación**.

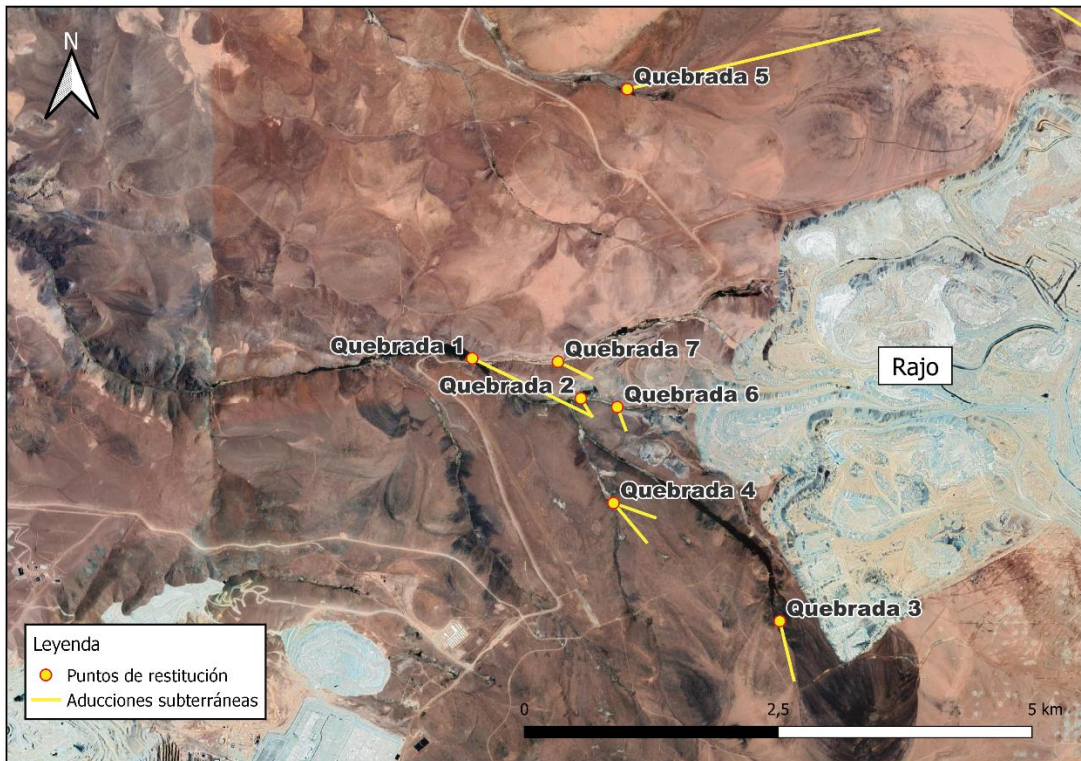


Figura 4.1 Mapa del trazado de las restituciones del sector poniente. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al sector norte, se consideran 4 puntos de restitución (Quebrada 8, 9, 10 y 11), que contemplan aducciones que en conjunto suman 8277,3 m de distancia y una longitud de 746,6 m para el tramo que penetra el acuífero. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 4.3**.

Tabla 4.3. Largos de aducción y captación asociados a cada punto de restitución del sector norte.

Punto de restitución	Largo aducción [m]	Largo captación [m]	Largo total [m]
Quebrada 8	2352,9	583,9	2936,8
Quebrada 9	1860,7		1860,7
Quebrada 10	2465,4		2465,4
Quebrada 11	1202,4	162,7	1365,1

En el ejercicio de buscar aquellas zonas con mayor transmisividad para requerir menores largos de captación en drenes, se unen los conductos de aducción de las Quebrada 9 y Quebrada 11 al de Quebrada 8, obteniéndose un único tramo de captación que alimenta a las tres restituciones mencionadas. Esto es posible de apreciar en la **Figura 4.2**.

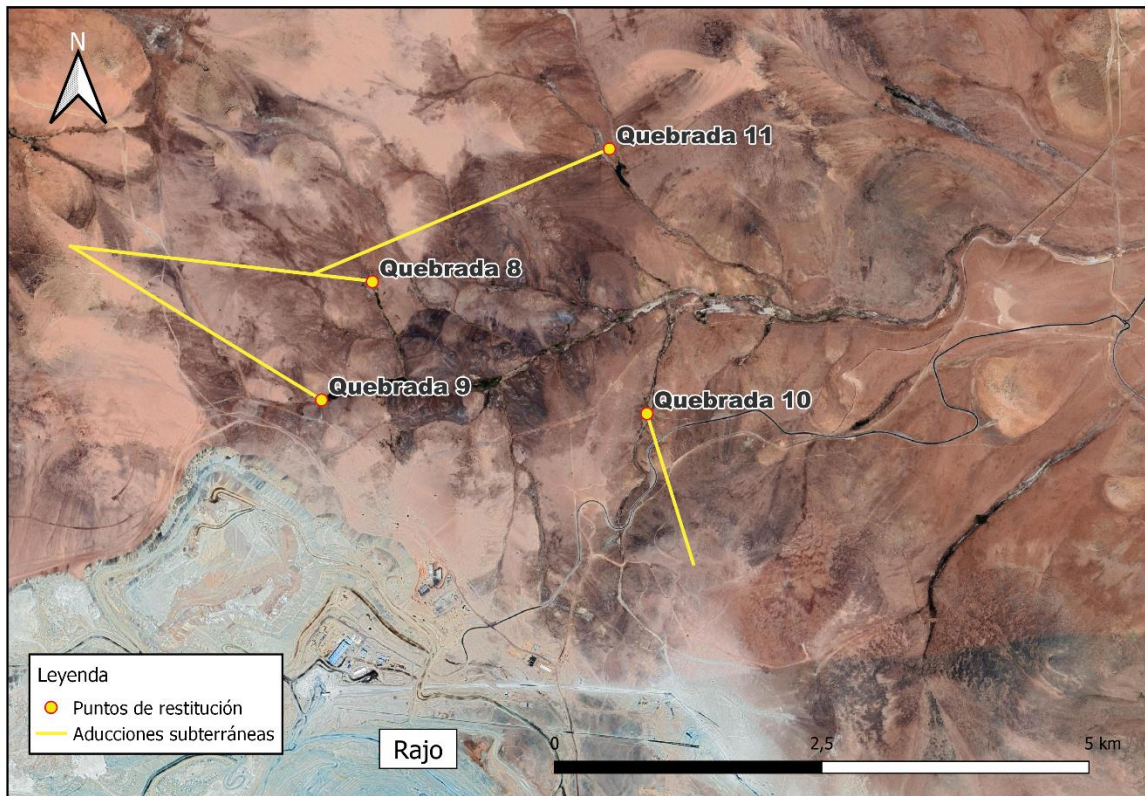


Figura 4.2. Mapa del trazado de las restituciones del sector norte. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, el sector suroriente se compone de 4 puntos de restitución, los cuales se asocian a las Quebradas 12, 13, 14 y 15, sumando la longitud de los tramos de aducción un total de 2796,9 m y los ductos de las captaciones 2028,9 m. Estos resultados se presentan en la **Tabla 4.4**, y se muestran gráficamente en la **Figura 4.3**.

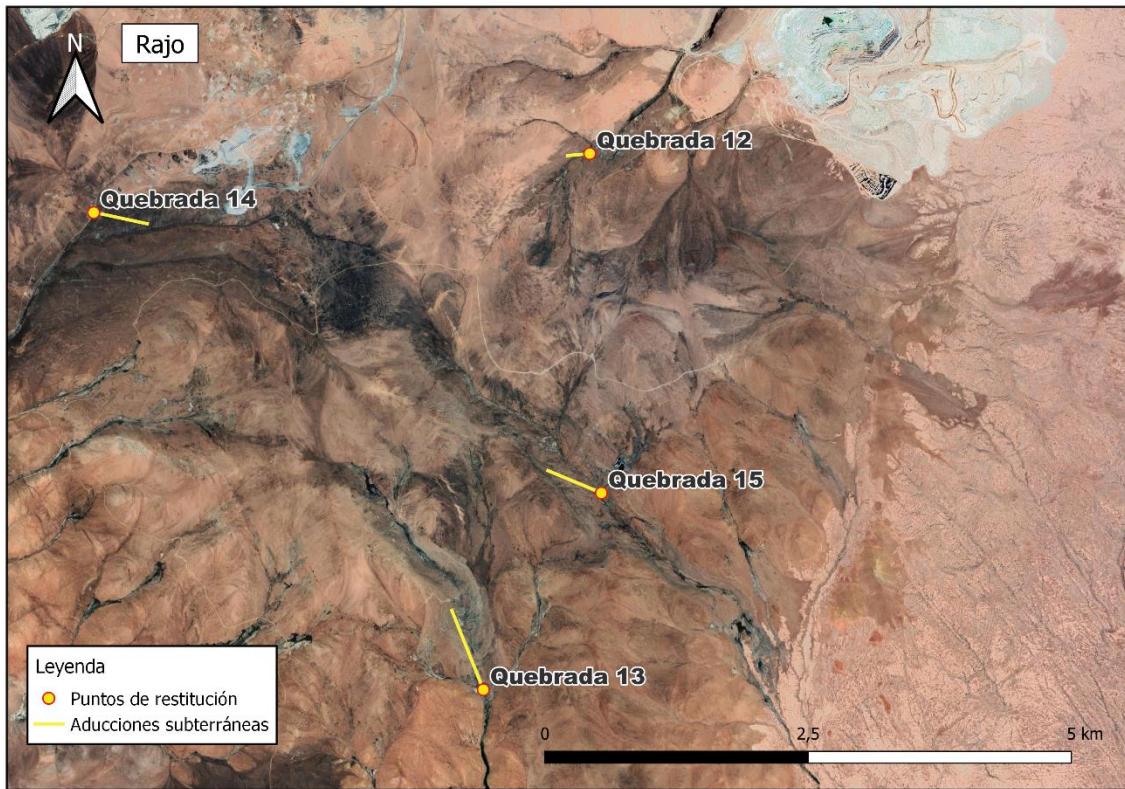


Figura 4.3. Mapa del trazado de las restituciones del sector suroriente. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.4. Largos de aducción y captación asociados a cada punto de restitución del sector suroriente.

Punto de restitución	Largo aducción [m]	Largo captación [m]	Largo total [m]
Quebrada 12	280	1769	2049
Quebrada 13	1092,7	4	1096,7
Quebrada 14	687,4	221,3	908,7
Quebrada 15	736,7	34,7	771,4

Con estos resultados se obtiene que el largo total de los tramos de aducción asociados a las tres zonas consideradas (poniente, norte y suroriente), suman aproximadamente 17,23 km y el total de los drenes filtrantes 4,33 km.

Los perfiles longitudinales de los tramos especificados en este apartado se presentan en detalle en el **Anexo A: Perfiles longitudinales de aducción desde captación a restitución.**

POZOS DE INSPECCIÓN DE GALERÍAS FILTRANTES

El diseño de las galerías filtrantes con túneles de aducción contempla la construcción de pozos de inspección y ventilación instalados cada 200 m aproximadamente (CEPIS, 2002). La cantidad de pozos a construir se presenta a continuación en la **Tabla 4.5**, y el detalle de sus dimensiones en la sección de **Anexos - Tabla 7.2**.

Tabla 4.5. Pozos de inspección asociados a cada punto de restitución.

Punto de restitución	Nº pozos inspección
Quebrada 1	7
Quebrada 2	1
Quebrada 3	3
Quebrada 4 - 1	2
Quebrada 4 - 2	2
Quebrada 5	13
Quebrada 6	1
Quebrada 7	2
Quebrada 8	12
Quebrada 9	9
Quebrada 10	6
Quebrada 11	12
Quebrada 12	5
Quebrada 13	3
Quebrada 14	4
Quebrada 15	1

4.2.2. CAPTACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA

Concordante con lo expuesto en apartados anteriores, para captar agua atmosférica se plantea utilizar diversas tecnologías AWGs que contemplan distintos procesos para captar vapor de agua. Considerando su capacidad de producción y dimensiones, se estima la cantidad de dispositivos y superficie necesaria para cubrir la demanda total de caudal.

En este análisis cabe destacar que no se incorpora la tecnología AWN Nanotech, pues, no se dispone de la información necesaria para realizar estas estimaciones.

Tabla 4.6. Dispositivos y superficie necesaria para la instalación de cada tecnología AWG.

Sistema	Dispositivos necesarios	Dimensiones unitarias [m3]	Superficie necesaria [m3]
Water-GEN	49000	2,4 x 2,4 m	282240,0
Drupps	22	42,24 x 16,0 m	14868,5
Airex	5848	1,4 x 1,4 m	11462,1

4.2.3. ALMACENAMIENTO DE PRECIPITACIONES

Siguiendo el procedimiento descrito en la metodología, se delimitan las cuencas aportantes a los distintos puntos de restitución y se estima su área.

En el sector norte, las cuencas y áreas aportantes se presentan en la **Figura 4.4** y **Tabla 4.7**, respectivamente. Sin embargo, para el diseño de los embalses sólo se es capaz de suplir la demanda de caudal en los puntos de restitución Quebrada 10 y Quebrada 11.

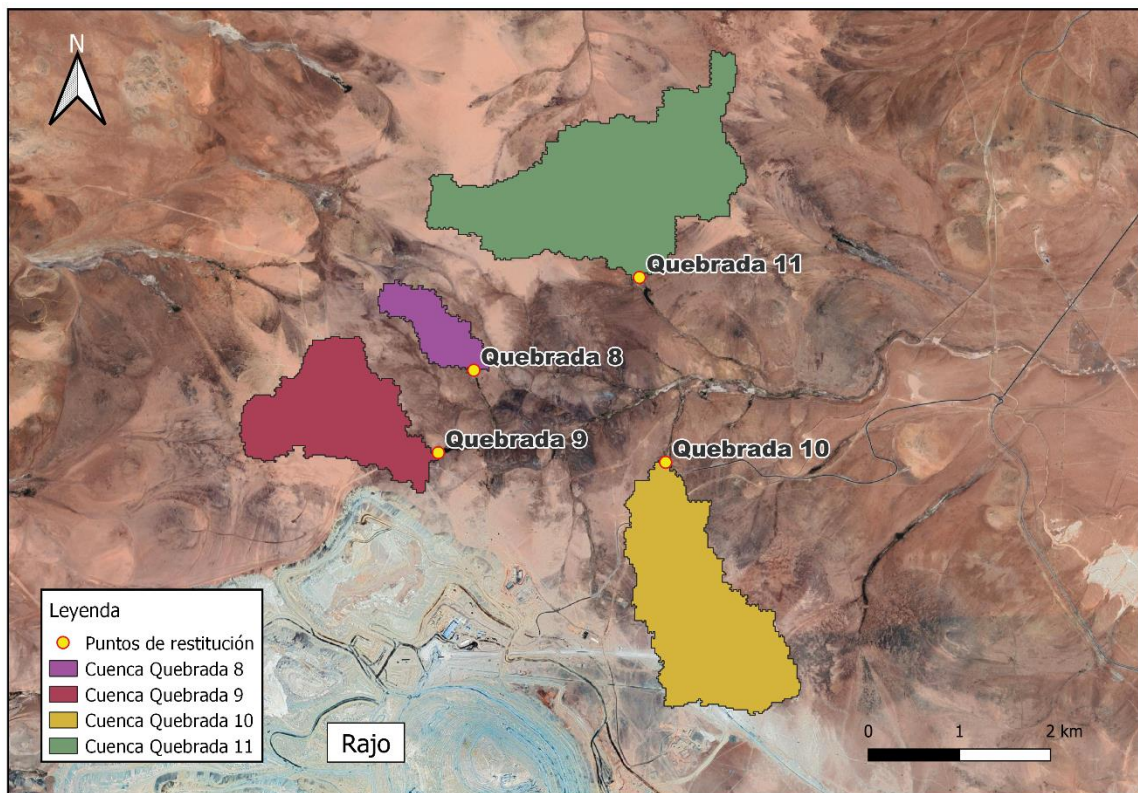


Figura 4.4. Cuencas aportantes a puntos de restitución de la zona norte. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.7. Área aportante a puntos de restitución en la zona norte.

Punto	Área [m^2]	Área [km^2]
Quebrada 10	2926161	2,93
Quebrada 11	4170056	4,17

Con respecto a la zona poniente, la cuenca aportante a la Quebrada 1 junto con las demás aledañas, abarcan el sector del rajo y el botadero proyectado para el año 2040, por lo que sólo se incluye en este análisis la cuenca asociada al punto de restitución asociado a la Quebrada 5, ubicada al norte de las demás.

La cuencas y áreas aportante de este sector se presentan en la **Figura 4.5** y **Tabla 4.8**, respectivamente.

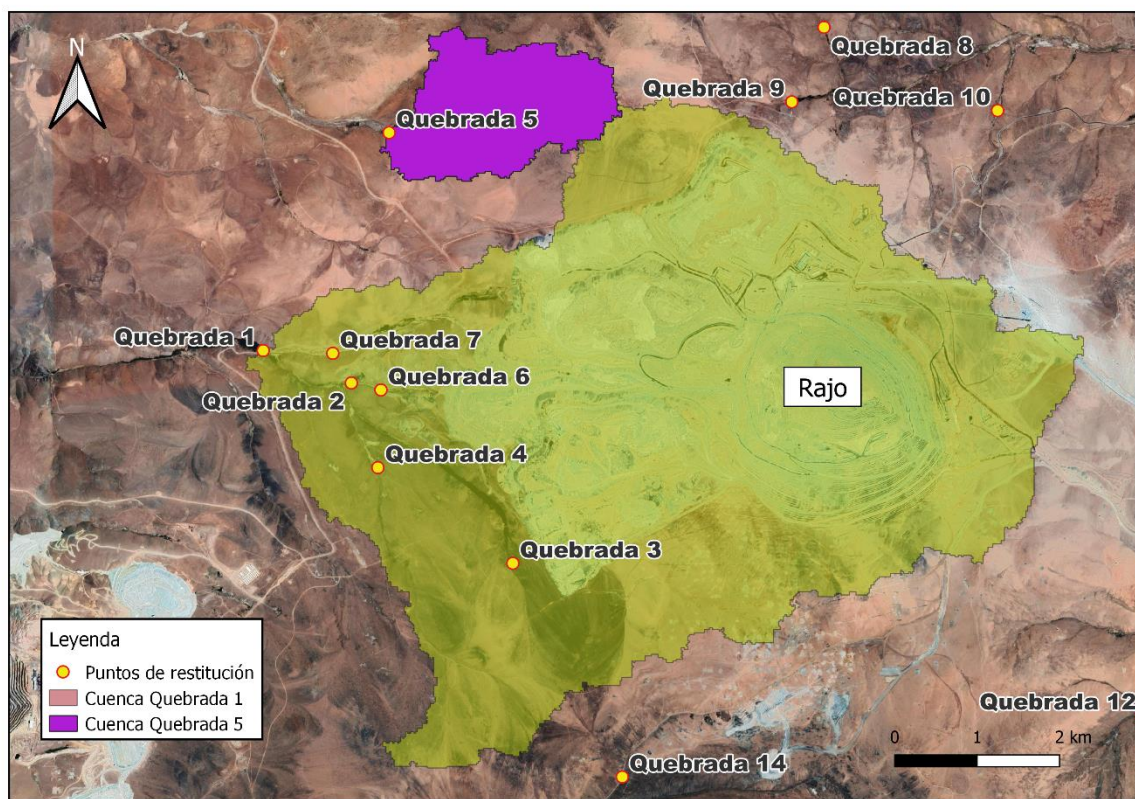


Figura 4.5. Cuencas aportantes a puntos de restitución de la zona poniente. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.8. Área aportante a puntos de restitución en la zona poniente.

Punto	Área [m^2]	Área [km^2]
Quebrada 5	3510706	3,51

Como medida alternativa para suplir la demanda del sector poniente, se propone aplicar una capa de arcilla sobre la superficie del botadero proyectado al año 2040 con el objetivo de disminuir la infiltración en esta zona y aprovechar las precipitaciones que caen sobre esta. La superficie a impermeabilizar se muestra en la **Figura 4.6**.

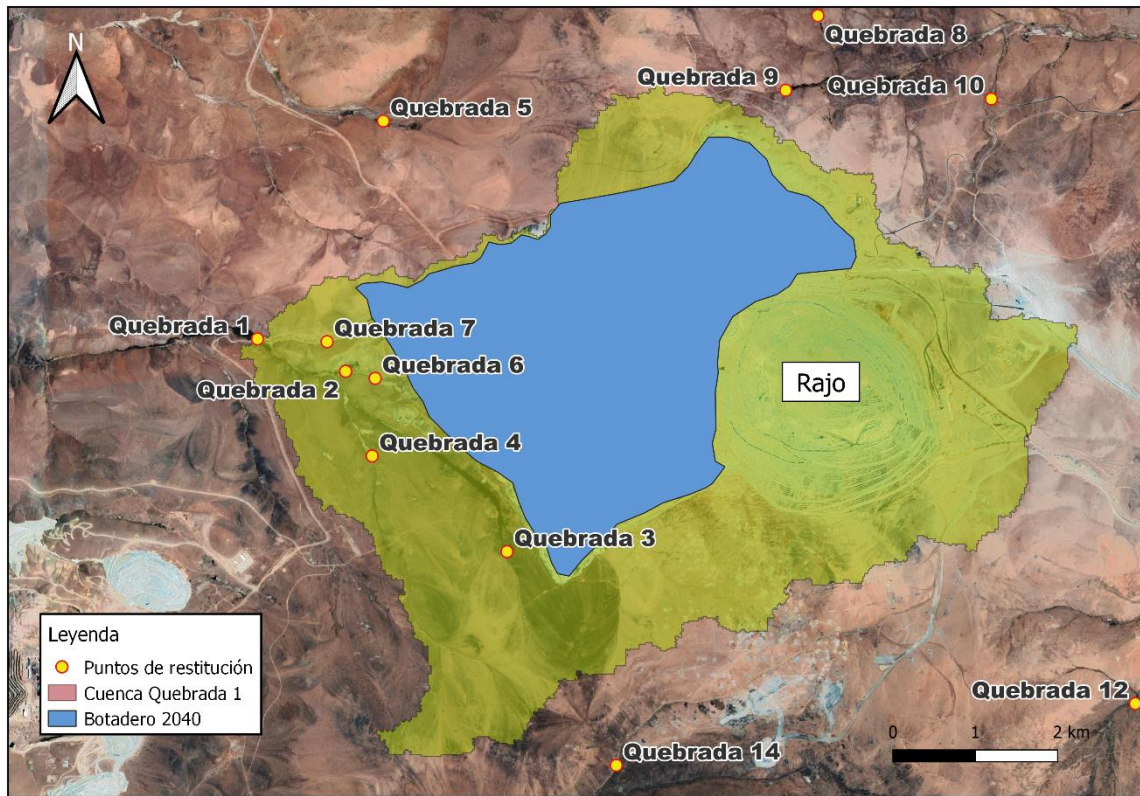


Figura 4.6. Superficie de botadero 2040 propuesto a impermeabilizar. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al sector suroriente, las áreas aportantes son capaces de suplir la demanda de caudal en la totalidad de las restituciones y se presentan en la **Figura 4.7** y **Tabla 4.9**.

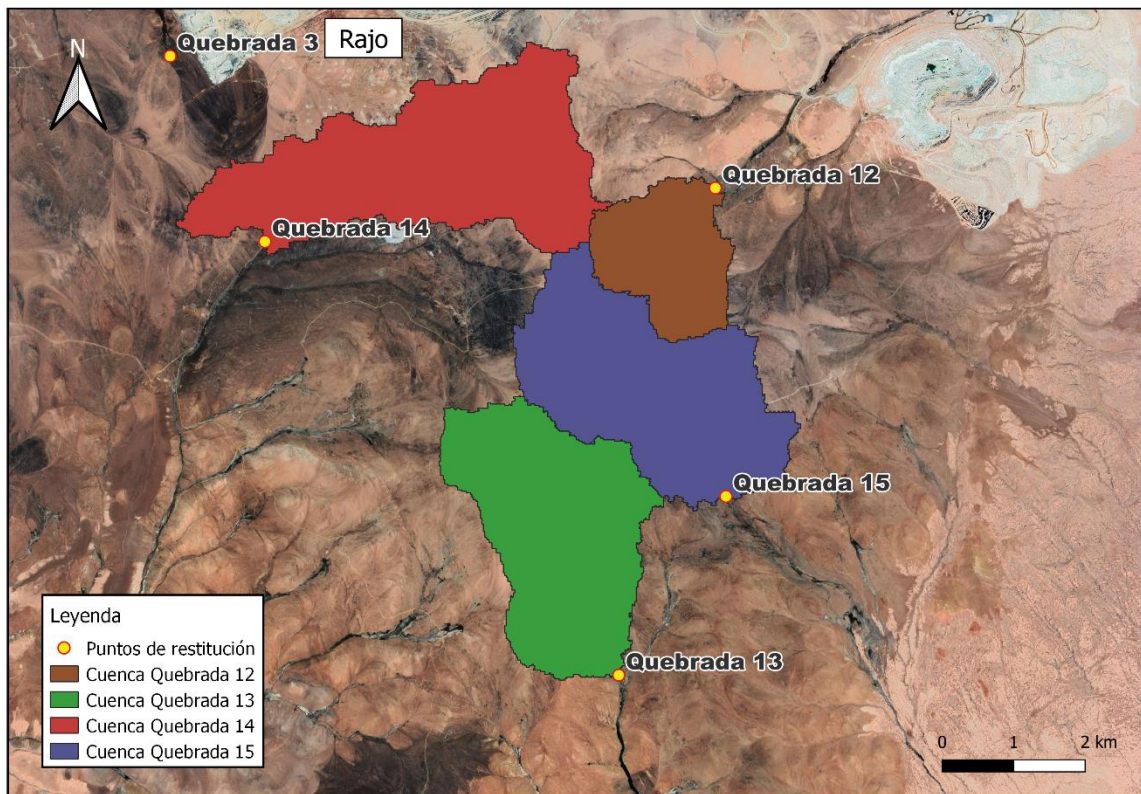


Figura 4.7. Cuencas aportantes a puntos de restitución de la zona suroriental. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.9. Área aportante a puntos de restitución de la zona suroriental.

Punto	Área [m^2]	Área [km^2]
Quebrada 12	3270058	3,27
Quebrada 13	7629889	7,63
Quebrada 14	9522774	9,52
Quebrada 15	7962163	7,96

Con los resultados obtenidos, se dimensiona el volumen necesario para la construcción de los embalses indicados anteriormente. Esta información, junto con el área superficial a cubrir por cada uno de ellos se presenta a continuación en la **Tabla 4.10**.

Tabla 4.10. Volúmenes y área superficial de embalses de almacenamiento de precipitaciones.

Restitución	Volumen [m^3]	Área superficial [m^2]
Quebrada 5	57659,7	17815,5
Quebrada 10	63635,3	14849,1
Quebrada 11	85796,4	21161,4
Quebrada 12	53635,0	16594,3
Quebrada 13	176851,5	38718,7
Quebrada 14	217336,7	48324,4
Quebrada 15	192750,1	40404,9

Con los resultados obtenidos, se diseñan los embalses de almacenamiento de precipitaciones para cada quebrada y el asociado al botadero proyectado al 2040, cuyos dimensionamientos se detallan en el **ANEXO D: DIMENSIONAMIENTO DE EMBALSES DE ALMACENAMIENTO DE PRECIPITACIONES**.

4.3. ANÁLISIS DE PERTINENCIA AMBIENTAL

En otra arista, con el fin de evaluar la pertinencia de ingresar estas alternativas a una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), se analiza si el proyecto genera o presenta a lo menos uno de los efectos, características o circunstancias establecidas en el art. 11 de la Ley sobre Bases del Medio Ambiente, los que se detallan en el apartado de **Normativa ambiental en Chile** en el **Marco teórico** de este documento. Teniendo esto en consideración, las alternativas que necesitarían presentar un EIA corresponderían a las que involucran extracción de aguas subterráneas, es decir, drenes y qanats, pues se necesita estudiar si el descenso de los acuíferos producto de las extracciones tiene efectos adversos significativos sobre la cantidad de recursos naturales renovables (agua subterránea) según establece el art 11. (b). Asimismo, se hace necesario evaluar la calidad de agua que se propone extraer en estas dos alternativas, puesto que es altamente probable que se requiera de un tratamiento pasivo que permita igualar la calidad de agua con el caudal a restituir. Por otra parte, también se propone que se debe someter a un EIA la alternativa que sugiere impermeabilizar el botadero proyectado al 2040, pues el desvío de las aguas puede afectar la recarga de los acuíferos que se encuentran en la zona, y con ello, perjudicar otros afloramientos.

4.4. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para evaluar económicamente las alternativas expuestas en el apartado anterior, se presentan combinaciones de medidas a implementarse conjuntamente. Estas corresponden a las siguientes:

1. Red de drenes para la aducción y captación de agua subterránea.
2. Red de túneles (qanats) para la aducción y drenes para la captación de agua subterránea.
3. Embalses de acumulación de precipitaciones en aquellos puntos de restitución donde es factible técnicamente su implementación (Quebradas 5, 10, 11, 12, 13, 14 y 15) y drenes en las quebradas restantes.
4. Embalses de acumulación de precipitaciones en aquellos puntos de restitución donde es factible técnicamente su implementación, túneles para la aducción y drenes para la captación en las quebradas restantes.
5. Instalación de 5.848 dispositivos de generación de agua atmosférica AIREX.

4.4.1. COSTOS DE LAS ALTERNATIVAS DE RESTITUCIÓN

GALERÍAS FILTRANTES: RED DE DRENES

Para la valorización económica de esta alternativa, a nivel de ingeniería conceptual, se utiliza la información presentada previamente en la **Sección 3.5** referente a los costos unitarios (**Tabla 3.7**). Con lo anterior, en la **Tabla 4.11** se muestra la inversión necesaria (CAPEX) para la construcción del sistema de drenes y su porcentaje respecto al total de la inversión.

Se agrega, además, los costos de eventuales contingencias adicionando un +10% sobre la inversión.

Tabla 4.11. CAPEX del sistema de drenes.

Costos Directos	Unidad	Cantidad	Precio total [USD]	Porcentaje [%]
Construcción accesos y plataformas	-	-	\$375.000	0,75%
Perforación y desarrollo 12"	m	21062	\$31.656.186	63,40%
Materiales de habilitación 12"	m	21062	\$17.439.336	34,92%
Consultor Informe Oficial	N° reportes	16	\$240.000	0,48%
Instrumentación	N° pozos	16	\$224.000	0,45%
Costo total			\$49.934.522	100%
Contingencias (+10%)			\$4.993.452	
Costo total inversión			\$54.927.974	

Con respecto a los costos de operación y mantenimiento (OPEX) del sistema, se contemplan los gastos de supervisión técnica (con camioneta) y de mantención de los drenes, cuyos valores de referencia se presenta en la **Tabla 3.8** de la **Sección 3.5**. Los resultados de esta estimación de presentan a continuación en la **Tabla 4.12**.

Tabla 4.12. OPEX del sistema de drenes.

Costos Directos	Unidad	Cantidad	Precio total [USD]
Mantención de drenes	m	21062	\$3.159.300
Supervisión técnica (con camioneta)	pp/año	1	\$80.000

TÚNELES (QANATS) DE ADUCCIÓN Y DRENES DE CAPTACIÓN

Para la estimación de costos de la red de túneles de aducción y drenes en el tramo de captación, siguiendo un procedimiento análogo al anterior, se utilizan los valores expuestos en la **Tabla 3.7** y **Tabla 3.9** de la **Sección 3.5**, con lo que se obtiene el CAPEX de esta alternativa. Los resultados se exponen en la **Tabla 4.13**.

Tabla 4.13. CAPEX de túneles de aducción y drenes de captación.

Costos Directos	Unidad	Cantidad	Precio total [USD]	Porcentaje [%]
Excavación de túneles	m	16788,2	\$65.880.258	85,78%
Construcción accesos y plataformas	-		\$375.000	0,49%
Perforación y desarrollo 12"	m	4325,4	\$6.501.076	8,46%
Materiales de habilitación 12"	m	4325,4	\$3.581.431	4,66%
Consultor Informe Oficial	N° reportes	16	\$240.000	0,31%
Instrumentación	N° pozos	16	\$224.000	0,29%
Costo total			\$76.801.766	100,00%
Contingencias (+10%)			\$7.680.177	
Costo total inversión			\$84.481.942	

EMBALSES DE ALMACENAMIENTO DE PRECIPITACIONES Y DRENES DE CAPTACIÓN

La evaluación económica de esta alternativa considera implementar de manera conjunta los embalses de acumulación de precipitaciones, túneles para la aducción y drenes de captación de agua subterránea. Los costos totales se presentan a continuación en la **Tabla 4.14**.

Tabla 4.14. CAPEX de embalses de acumulación de precipitaciones y drenes de captación.

Costos Directos	Unidad	Cantidad	Precio total [USD]	Porcentaje [%]
Construcción accesos y plataformas para drenes	-	-	\$375.000	0,87%
Perforación y desarrollo 12" para drenes	m	9219,1	\$13.856.307	32,32%
Materiales de habilitación 12" para drenes	m	9219,1	\$7.633.415	17,81%
Consultor Informe Oficial para drenes	N° reportes	16	\$240.000	0,56%
Instrumentación para drenes	N° pozos	16	\$224.000	0,52%
Excavación estructural en suelo común para embalses	m3	847664,7	\$11.307.847	26,38%
Suministro e instalación de geotextil para embalses	m2	197868,2	\$2.231.954	5,21%
Bolas de sombra para embalses	m2	197868,2	\$7.000.579	16,33%
Costo total			\$42.869.101	100%
Contingencias (+10%)			\$4.286.910	
Costo total inversión			\$47.156.011	

EMBALSES DE ALMACENAMIENTO DE PRECIPITACIONES, TÚNELES DE ADUCCIÓN Y DRENES DE CAPTACIÓN

Por otra parte, los costos que se contemplan para la construcción de embalses de almacenamiento de precipitaciones, túneles de aducción y drenes de captación se presentan en la **Tabla 4.15**.

Tabla 4.15. CAPEX de embalses de acumulación de precipitaciones, túneles de aducción y drenes de captación.

Costos Directos	Unidad	Cantidad	Precio total [USD]	Porcentaje [%]
Excavación de túneles	m	7731	\$30.337.992	53,81%
Construcción accesos y plataformas para drenes	-	-	\$375.000	0,67%
Perforación y desarrollo 12" para drenes	m	2000,6	\$3.006.902	5,33%
Materiales de habilitación 12" para drenes	m	2000,6	\$1.656.497	2,94%
Consultor Informe Oficial para drenes	N° reportes	16	\$240.000	0,43%
Instrumentación para drenes	N° pozos	16	\$224.000	0,40%
Excavación estructural en suelo común para embalses	m3	847664,7	\$11.307.847	20,06%
Suministro e instalación de geotextil para embalses	m2	197868,2	\$2.231.954	3,96%
Bolas de sombra para embalses	m2	197868,2	\$7.000.579	12,42%
Costo total			\$56.380.770	100%
Contingencias (+10%)			\$5.638.077	
Costo total inversión			\$62.018.847	

EMBALSES DE ALMACENAMIENTO DE PRECIPITACIONES (INCLUYENDO BOTADERO) Y DRENES DE CAPTACIÓN

Siguiendo un procedimiento análogo a los anteriores, se presentan los costos asociados al diseño de embalses de almacenamiento de precipitaciones, incluyendo el botadero impermeabilizado, y drenes para el tramo de captación. Esto se presenta en la **Tabla 4.16**.

Tabla 4.16. CAPEX de embalses de acumulación de precipitaciones (incluyendo botadero) y drenes de captación.

Costos Directos	Unidad	Cantidad	Precio total [USD]	Porcentaje [%]
Construcción accesos y plataformas para drenes	-	-	\$375.000	0,50%
Perforación y desarrollo 12" para drenes	m	3830,5	\$5.757.242	7,63%
Materiales de habilitación 12" para drenes	m	3830,5	\$3.171.654	4,20%
Consultor Informe Oficial para drenes	N° reportes	16	\$240.000	0,32%
Instrumentación para drenes	N° pozos	16	\$224.000	0,30%
Excavación estructural en suelo común para embalses	m3	1717518,2	\$22.911.692	30,36%
Relleno estructural con material seleccionado	m3	2855036	\$32.204.800	42,68%
Bolas de sombra para embalses	m2	298822,3	\$10.572.333	14,01%
Costo total			\$75.456.721	100%
Contingencias (+10%)			\$7.545.672	
Costo total inversión			\$83.002.393	

SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA AWGs

Dentro de los sistemas de captación de agua atmosférica mencionados, sólo se presentan los resultados de la tecnología AIREX, pues únicamente en este caso se posee información suficiente para su evaluación económica. Esta información se muestra en la **Tabla 4.17**.

Tabla 4.17. CAPEX de tecnología AIREX.

Costos Directos	Unidad	Cantidad	Precio total [USD]	Porcentaje [%]
Sistema AIREX	Dispositivos	5848	\$25.341.654	100%
Costo total			\$25.341.654	100%
Contingencias (+10%)			\$2.534.165	
Costo total inversión			\$27.875.819	

4.4.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Con los costos de cada alternativa de restitución presentados anteriormente, y considerando un horizonte de evaluación de 20 años con una tasa de descuento anual del 12%, se obtienen los costos finales de la valoración económica por cada alternativa propuesta a analizar. Estos resultados se presentan en orden de costos decreciente en la **Tabla 4.18** y su cálculo se detalla en el **ANEXO E: ESTIMACIÓN TOTAL DE INVERSIÓN**.

Tabla 4.18. Resultados de evaluación económica por cada alternativa de restitución.

N °	Alternativas	Costo [USD]
1	Drenes y embalses	\$63.323.211
2	Qanats y embalses	\$72.068.126
3	Embalses y captación de agua en botadero	\$94.602.575
4	Qanats	\$96.089.068
5	Drenes	\$104.730.641
6	Sistema AIREX	\$596.423.616

5. DISCUSIÓN

El trabajo de memoria de título presentado en este documento consiste en un estudio de la factibilidad técnica y económica de implementar medidas pasivas para la restitución de quebradas ubicadas en torno al rajo de la faena minera. Las alternativas propuestas y estudiadas a nivel de ingeniería conceptual, corresponden a opciones de captación de agua subterránea (qanats y drenes), generación de agua atmosférica (tecnologías AWGs) y almacenamiento de precipitaciones en pequeños embalses a ubicarse cercanos a las restituciones. El análisis de las alternativas contempló el dimensionamiento del sistema a implementar y sus costos de inversión (CAPEX) y de operación y mantenimiento (OPEX), tomando como referencia valores presentados en estudios previos reportados en la bibliografía.

La captación de agua subterránea mediante qanats o drenes ha sido una alternativa eficaz y usada ampliamente a través de la historia. En este estudio se proponen como opciones técnica y económicamente factibles de implementar para dar solución a la problemática presentada.

En relación a los dispositivos de captación de agua atmosférica, estos no suponen actualmente una solución óptima para cubrir la totalidad de caudal demandado por las restituciones, pues no rinden con su mayor eficiencia debido a la variabilidad de humedad relativa y temperatura de la zona en estudio. Por lo anterior, estas tecnologías se sugieren de manera conceptual para ser aplicadas en aquellos puntos de restitución donde la demanda de caudal es más baja, y con el fin de ser estudiadas a futuro cuando posiblemente estos dispositivos cuenten con tecnologías más eficientes. Para el análisis de alternativas, se propuso estudiar una compañía diferente según el tipo de generación utilizado por el equipo, las cuales corresponden a Drupps (absorción con líquido), AWN Nanotech y Zero Mass Water (absorción con sólido), Watergen (condensación) y AIREX (condensación). En el análisis de factibilidad técnica fueron estimados los dispositivos necesarios para suplir la demanda de restitución y la superficie a abarcar por estos, disponiendo de información suficiente para evaluar a las tecnologías Drupps, Watergen y AIREX. De estas, la que ofrece una mejor perspectiva corresponde a la empresa Drupps, pues sólo se requiere agregar nuevos módulos al equipo para aumentar su capacidad de producción, presentándose como una solución posible el instalar una planta con varios dispositivos. En cuanto a la evaluación económica en esta categoría, sólo se cuenta con información suficiente para valorizar la implementación del sistema AIREX.

Por otra parte, una ventaja que presenta el uso de los sistemas anteriores es que no se requiere de un tratamiento adicional para regular la calidad del agua a restituir, puesto que estos ya incorporan tratamiento de agua mediante UV, carbón activado y control de pH. Sin embargo, es necesario modificar estos procedimientos en los dispositivos para que aseguren una calidad de agua acorde al sistema natural a restituir, y no al de agua potable para el que fue diseñado.

Con referencia a la fuente energética de las AWGs, aquellas alternativas que tienen incorporado un sistema de suministro de energía solar (AWN Nanotech, Drupps y Zero Mass Water) presentan mayor autonomía de funcionamiento, contrario a Watergen y AIREX, donde es necesario instalar un sistema de energía renovable adicional al producto, o bien, conectarlo al sistema interconectado central, que se descarta al significar incurrir en un gasto constante a perpetuidad.

Por otro lado, los embalses de almacenamiento de precipitaciones fueron propuestos como medida alternativa en las quebradas en que el área aportante de la cuenca asociada no fuera suficiente para suplir la demanda de restitución. Estas quebradas corresponden a la Quebrada 5 en el sector poniente, las Quebradas 10 y 11 en el sector norte, y las Quebradas 12, 13, 14 y 15 en el sector suroriente. En el sector poniente no fueron consideradas las demás cuencas aportantes a las restituciones, pues estas abarcan gran parte del botadero proyectado para el año 2040 y la zona del rajo. Para dar solución a esto, se propone impermeabilizar el botadero con una capa de arcilla y recuperar el agua que es capaz de recibir de las precipitaciones. De esta manera, esta opción permite almacenar el agua demandada por todo el sector poniente. En cuanto al diseño de estas alternativas se contempla la instalación de geotextil en la base de los embalses para evitar pérdidas por infiltración a través de posibles fracturas en las rocas, y el uso de bolas de sombra sobre la superficie de agua para reducir la evaporación cerca de un 80% y evitar pérdidas.

Las alternativas consideradas en la evaluación económica corresponden a:

1. Red de drenes para la aducción y captación de agua subterránea.
2. Red de túneles (qanats) para la aducción y drenes para la captación de agua subterránea.
3. Embalses de acumulación de precipitaciones en aquellos puntos de restitución donde es factible técnicamente su implementación (Quebradas 5, 10, 11, 12, 13, 14 y 15) y drenes en las quebradas restantes.
4. Embalses de acumulación de precipitaciones en aquellos puntos de restitución donde es factible técnicamente su implementación, túneles para la aducción y drenes para la captación en las quebradas restantes.
5. Instalación de 5.848 dispositivos de generación de agua atmosférica AIREX.

Las opciones presentadas se analizaron económicamente considerando un horizonte de evaluación de 20 años con una tasa de descuento anual del 12%. Los resultados arrojaron que la opción más rentable corresponde a (3) la construcción de embalses de almacenamiento de precipitaciones y drenes para los puntos de restitución del sector poniente y en las Quebradas 8 y 9, con un costo de \$63.323.211. A esta opción le sigue (4) el diseño de embalses de almacenamiento de precipitaciones con qanats en el sector poniente y en las Quebradas 8 y 9 con un costo de \$72.068.126. Por otra parte, la opción más costosa corresponde a la instalación de dispositivos AIREX (5) con un valor de \$596.423616, cifra que escapa de los alcances del proyecto, y que, por ende, no es factible económicamente de implementar en la actualidad. A partir de las estimaciones realizadas se puede afirmar que las alternativas que contemplan la construcción de embalses resultan más económicas, pues los costos asociados

a la perforación y/o excavación de suelo para la instalación de drenes y/o túneles son más elevados. Sin embargo, es necesario señalar que, al no considerar los costos de la construcción de las presas de tierra en los embalses, estos pueden estar subestimados

También, con respecto a la evaluación económica, es posible apreciar el alto porcentaje en costo con respecto al total que significa la implementación de bolas de sombra, sin embargo, se justifica su uso dada la efectividad para evitar pérdidas de agua.

Finalmente, es necesario señalar que el estudio desarrollado corresponde a una ingeniería conceptual, asociada a la primera etapa del proyecto. Los conceptos técnicos iniciales se estudian y se analizan para identificar si este es factible de implementar, o bien, proponer cuáles son los requerimientos tecnológicos que se necesitan para llevarse a cabo. Posterior a esta etapa, es necesario realizar una ingeniería básica y de detalle que profundice en el desarrollo de la alternativa seleccionada, para finalmente completar el diseño detallado de las tecnologías que se desee implementar.

6. CONCLUSIONES

El trabajo realizado durante esta investigación se centra en el análisis de una de las medidas de mitigación comprometidas en el EIA (2019) del “Proyecto de desarrollo y mejoramiento de la capacidad productiva de la compañía minera” y como asegurar su cumplimiento a largo plazo con el fin de preservar el medio ambiente natural luego del cierre de las faenas.

Así, la ejecución de las obras de este nuevo proyecto de expansión podría traer consigo ciertas externalidades negativas que son necesarias de abordar. En particular, el caso en estudio trata sobre la disminución de los niveles de los acuíferos en la zona producto del desaguado mediante pozos, y como esto afecta ciertos afloramientos en quebradas que abastecen zonas de bofedales. Estos corresponden a humedales altiplánicos de gran importancia ambiental, social y económica, donde persisten zonas de pastoreo de comunidades indígenas.

Para dar una respuesta a largo plazo a la problemática presentada, es decir, restituir los caudales superficiales de los afloramientos luego del cierre de las faenas el año 2040, este estudio plantea diversas alternativas pasivas y autosostenibles en el tiempo, las cuales contemplan la captación de agua subterránea, generación de agua desde el vapor de la atmósfera con dispositivos AWG y el almacenamiento de precipitaciones derivadas del invierno altiplánico en pequeños embalses, descritas ampliamente en apartados anteriores.

De las opciones entregadas, según los resultados de factibilidad técnica y económica presentados anteriormente en el documento, se sugiere continuar con los estudios necesarios para implementar la construcción de embalses de almacenamiento de precipitaciones y drenes para los puntos de restitución del sector poniente y en las Quebradas 8 y 9, y como segunda alternativa, considerar el diseño de embalses de almacenamiento de precipitaciones con qanats en el sector poniente. Estas medidas cumplen con el objetivo de ser pasivas, es decir, autosostenibles en el tiempo y que requieren poca intervención humana para su mantenimiento, por lo que responden adecuadamente a la problemática de restituir ciertos flujos superficiales en las quebradas en torno al rajo.

Luego de realizada esta investigación y haber propuesto formas de captación y/o generación de agua, es necesario analizar su calidad química y biológica, de manera que se determine si es necesario implementar un sistema de tratamiento adicional pasivo con el fin de cumplir con los estándares de calidad medidos en las quebradas previamente. Con respecto a esto, los sistemas AWGs cuentan con un sistema de tratamiento incorporado capaz de producir agua potable, por lo que sería necesario adecuar el dispositivo para que se ajuste a la calidad de los afluentes a restituir.

Por otra parte, es importante estudiar la pertinencia de que las propuestas de restitución presentadas se contemplen en un EIA (**Apartado 4.3**), siendo necesario incorporar nuevos estudios como los siguientes:

- Analizar el efecto de la extracción de agua subterránea sobre los niveles de los acuíferos sobre los que se propone trabajar, con el fin de estudiar con mayor profundidad su impacto ambiental y la sostenibilidad de la medida. En particular, se recomienda estudiar la recarga de los acuíferos desde donde se plantea captar agua y determinar si las extracciones ocasionan un efecto considerable sobre el nivel freático, afectando nuevos afloramientos
- Estudiar los impactos ambientales de impermeabilizar con arcilla el terreno del botadero proyectado al año 2040. En particular, cómo esta medida podría afectar la recarga de los acuíferos que se encuentran bajo esta zona.

En otra arista, se espera que las tecnologías AWGs presentadas en este estudio aumenten su capacidad productiva y eficiencia con el transcurso de los años, por lo que se sugiere realizar un seguimiento sobre estas e investigar nuevas opciones presentes en el mercado y así poder volver a evaluar la factibilidad de su implementación.

Por otro lado, es necesario en etapas futuras realizar los estudios pertinentes a la ingeniería básica y de detalle de la opción más rentable, correspondiente a la construcción de embalses de almacenamiento de precipitaciones y drenes para los puntos de restitución del sector poniente y en las Quebradas 8 y 9. Para lo anterior, se requiere considerar estudios topográficos del terreno, estudios hidrológicos, de geología y geotécnicos, sondajes, etc.

Finalmente, es necesario señalar la importancia de continuar investigando e implementar medidas de captación y tratamiento pasivas en cierres de faenas mineras, puesto que de esto depende que sus operaciones no afecten considerablemente el entorno natural ni las actividades de las comunidades aledañas a las faenas.

BIBLIOGRAFÍA

Alegría C., M. y Lillo C., A. (1996) 'Protección legal de los humedales altoandinos (vegas y bofedales) en Chile'. Dirección General de Aguas, MOP.

Arcadis (2019a) Línea Base: Clima y meteorología.

Arcadis (2019b) Línea Base: Hidrología.

Arcadis (2019c) Plan de medidas de mitigación, reparación y/o compensación.

Asiabanpour B, Ownby N, Summers M, Moghimi F (2019) Atmospheric water generation and energy consumption: an empirical analysis. In: 2019 IEEE Texas power and energy conference (TPEC), pp 1–6. IEEE

AWN Nanotech (2018). Available at: <http://awnnanotech.com>.

Ayala, L. (2010) Aspectos técnicos de la gestión integrada de las aguas (GIRH) – Primera etapa diagnóstico”. Informe preparado para el diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Santiago, Chile.

Bluedot (2020) 'Estudio de Mezcla para Compromisos de Restitución de Corto , Mediano y Largo Plazo'.

CEPIS (2002) Manual de Diseño de Galerías Filtrantes. Lima.

CMDIC (no date) 'Cuenca Coposa', (Cmdic), pp. 1–37.

CMDIC. (2019). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto "Desarrollo de Infraestructura y Mejoramiento de Capacidad Productiva de Collahuasi".

CONIC-BF (2020) Criterios de diseño hidrológicos para la estimación de caudales de crecidas en sectores Collahuasi.

Drupps (2017). Available at: <https://drupps.com/>.

Loctevout, E. et al. (2020) 'Exploration , mapping and characterization of filtration galleries of the Pica Oasis , northern Chile : A contribution to the knowledge of the Pica aquifer', pp. 529–558.

Mart, A. (2007) 'El agua en la atmósfera', pp. 36–44.

Moghimi, F. et al. (2021) 'Is atmospheric water generation an economically viable solution?', Clean Technologies and Environmental Policy, (April). doi: 10.1007/s10098-020-02015-6.

Ponce-Vega, L. A. (2008) 'Puquios, qanats y manantiales: gestión del agua en el Perú antiguo'. Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú.

Reporte técnico Drupps (2020).

Riechmann, J. (2003) 'Biomímesis', pp. 28–31. El Ecologista, n° 36.

Schreiber, K. and Lancho, J. (2006) Aguas en el desierto: los puquios de Nasca.

SEA Chile (2021). Available at: <https://www.sea.gob.cl/sea/quienes-somos> (Accessed: 22 June 2021).

Smedley, T. (2018) 'Las fascinantes tecnologías que logran obtener agua potable del aire', BBC.

Te Chow, V. (2005) 'Hidráulica de canales abiertos (1a. ed.)'. MCGRAW-HILL INTERAMERICANA

Tu, Y., Wang, R., Zhang, Y., & Wang, J. (2018). Progress and Expectation of Atmospheric Water Harvesting. *Joule*, 2(8). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.07.015>

Valipour, M. et al. (2020) 'Sustainability of Underground Hydro-Technologies: From Ancient to Modern Times and toward the Future'. *Sustainability* 2020.

Watergen (no date). Available at: <https://www.watergen.com/>.

7. ANEXOS

ANEXO A: PERFILES LONGITUDINALES DE ADUCCIÓN DESDE CAPTACIÓN A RESTITUCIÓN

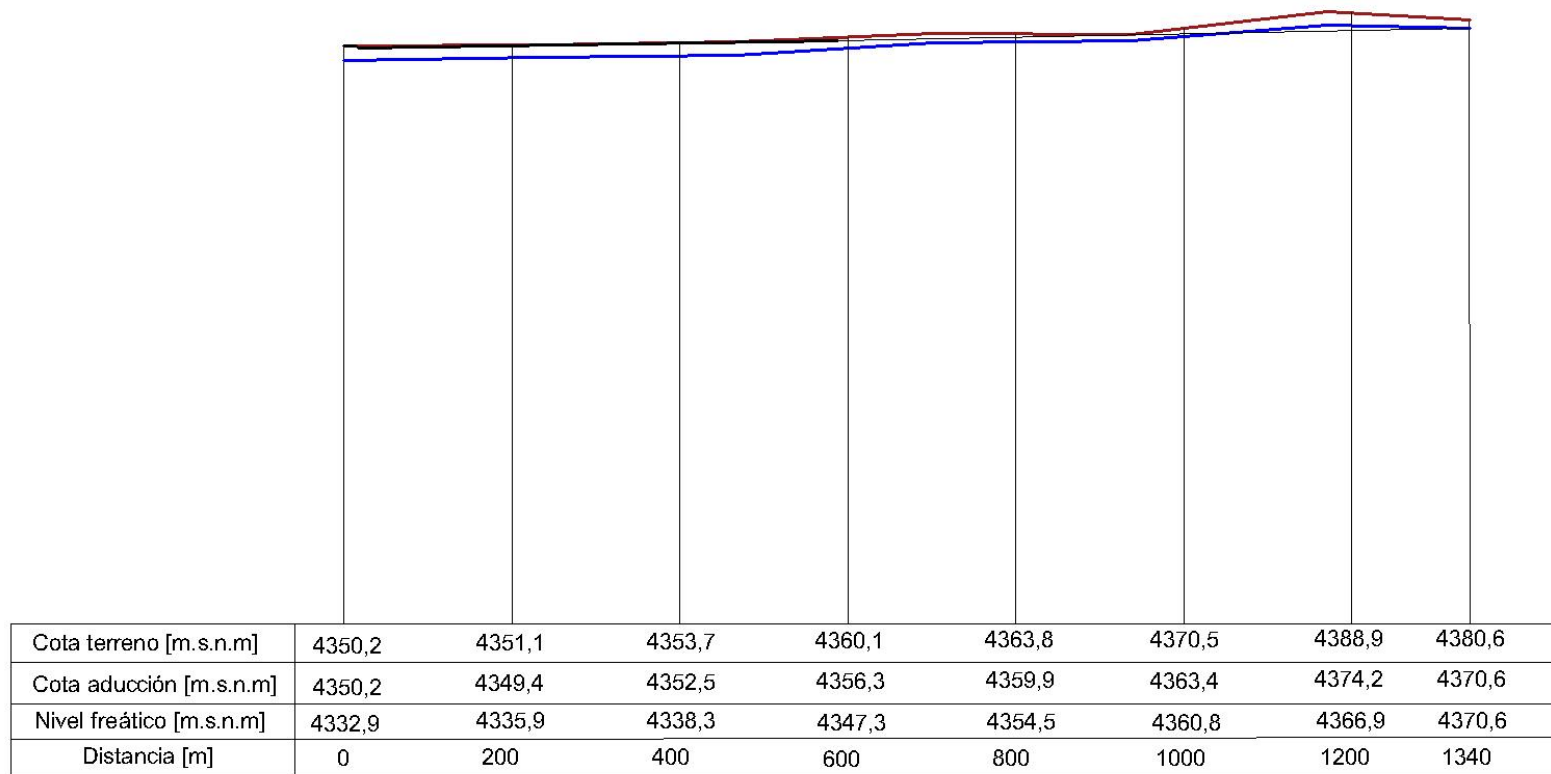


Figura 7.1. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 1.

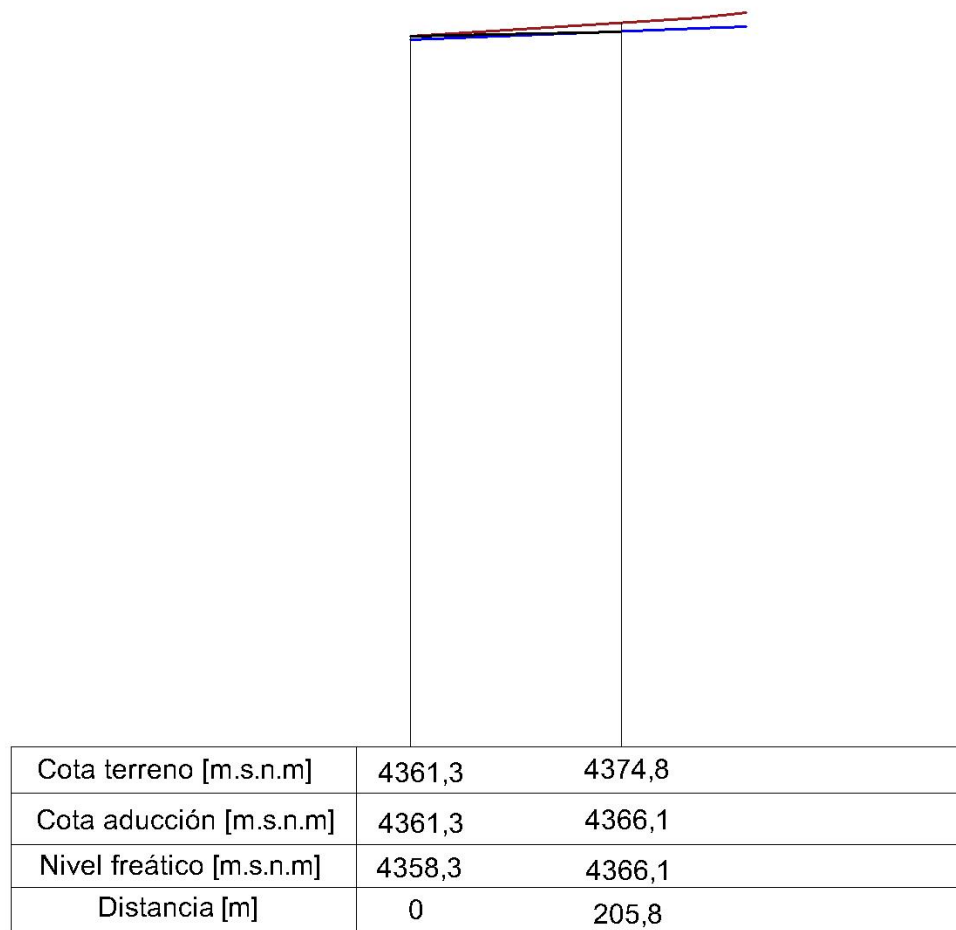


Figura 7.2. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 2.

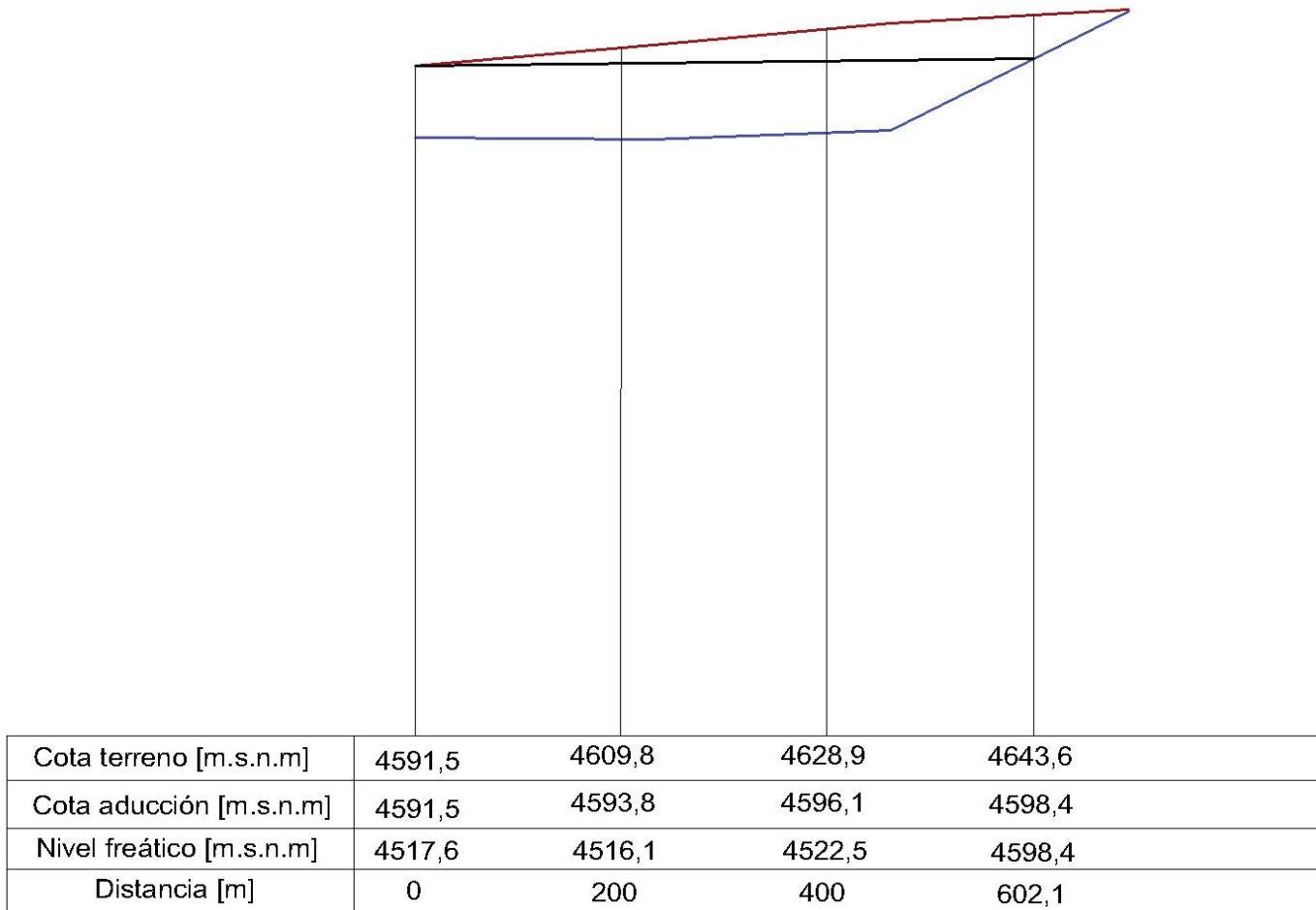


Figura 7.3. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 3.

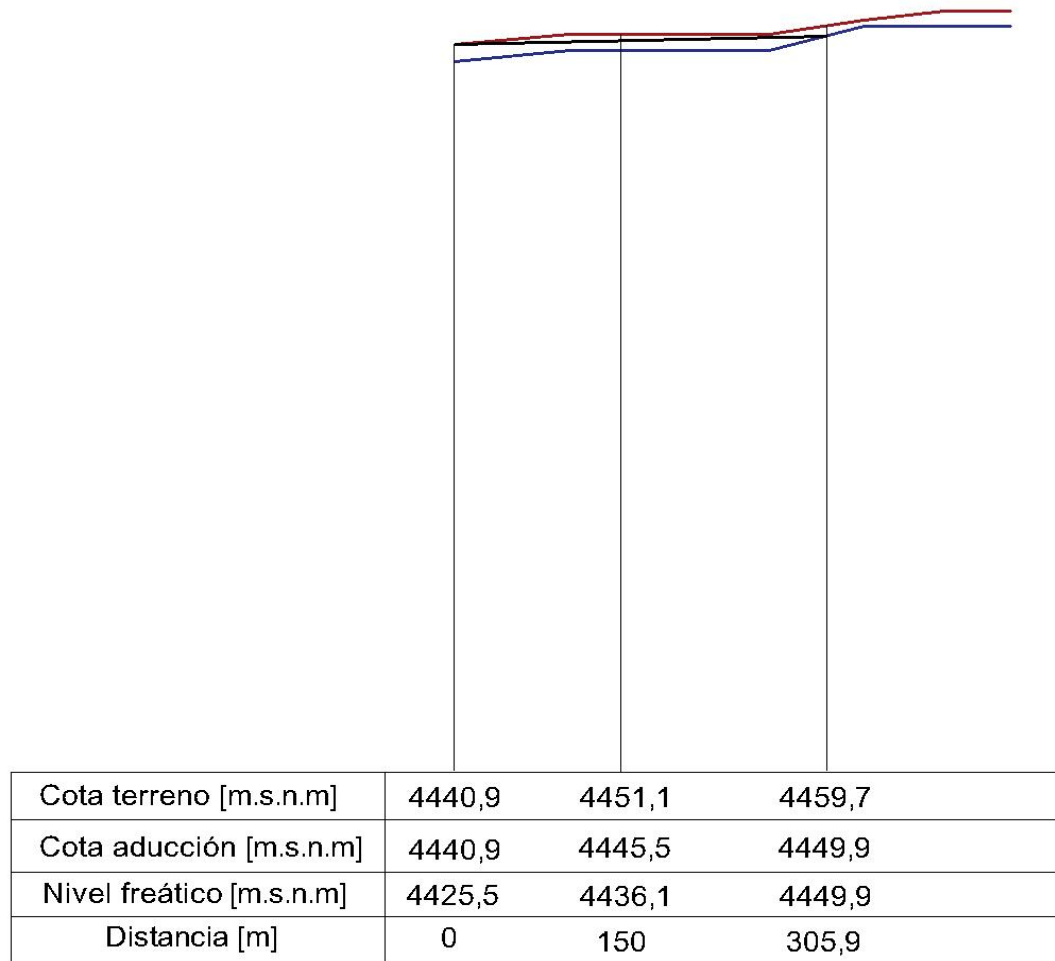


Figura 7.4. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 4 - 1.

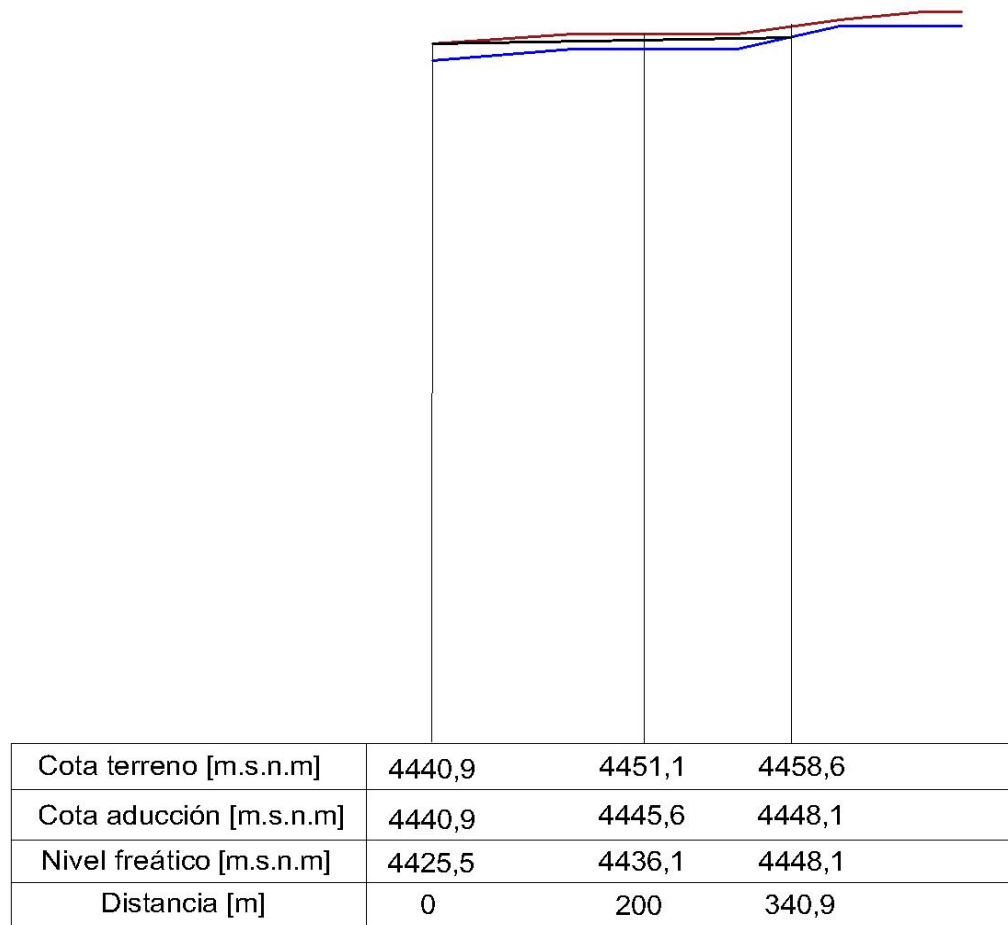


Figura 7.5. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 4 - 2.

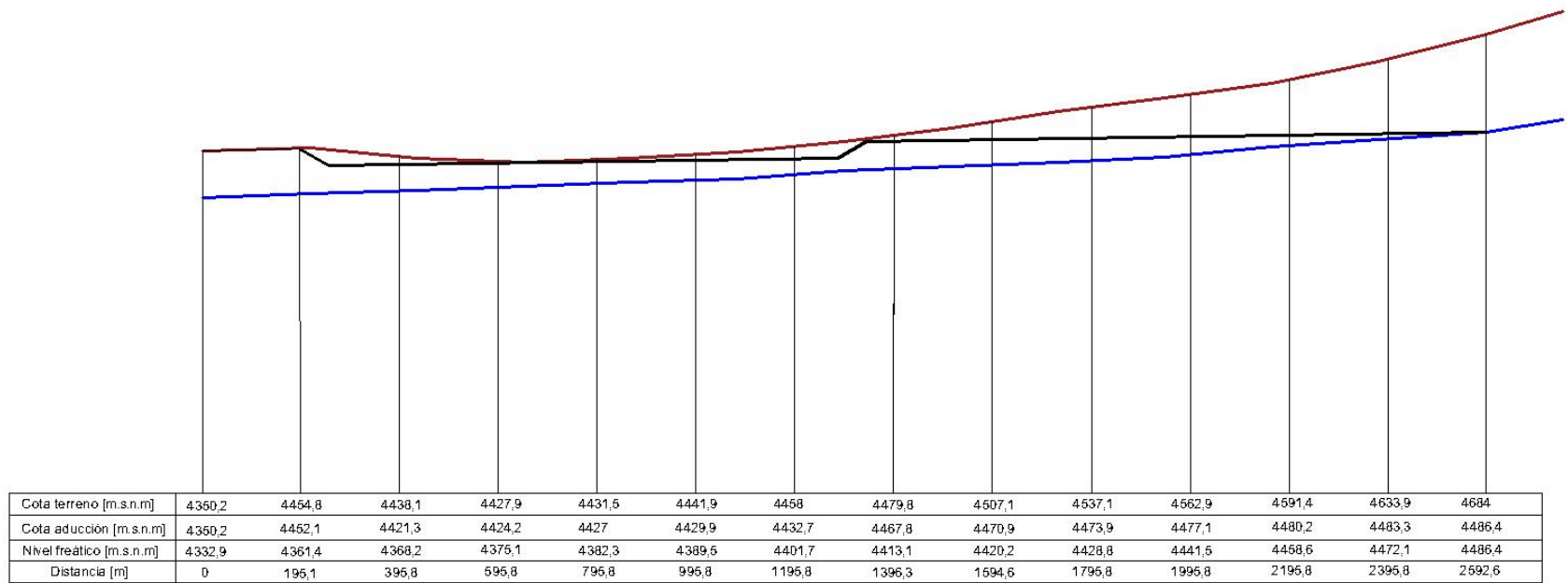


Figura 7.6. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 5.

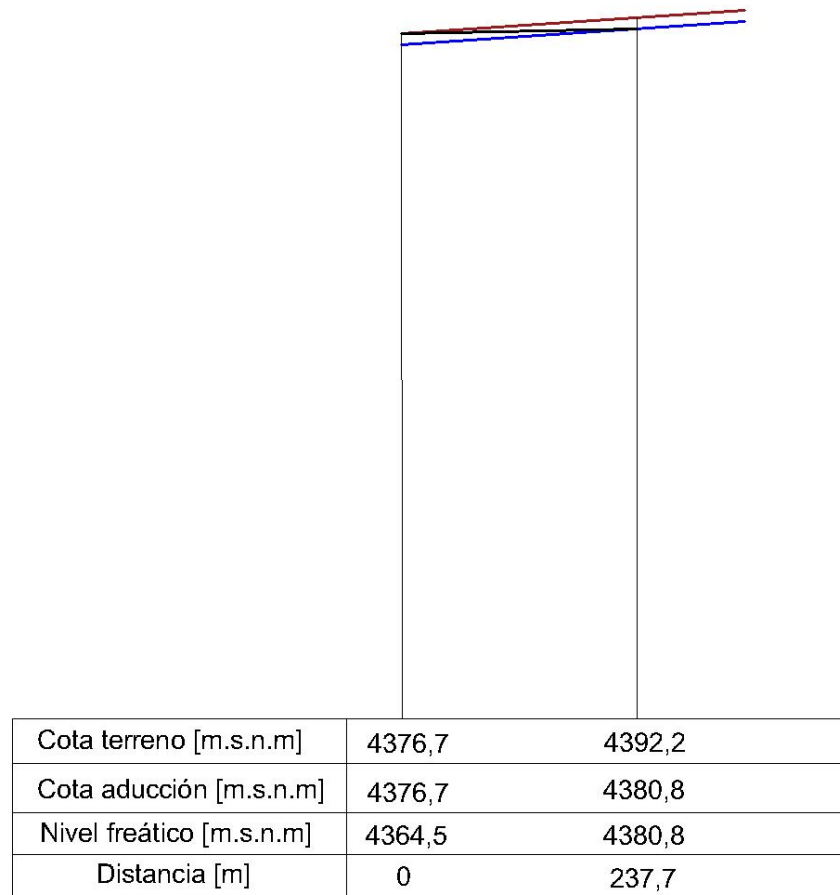


Figura 7.7. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 6.

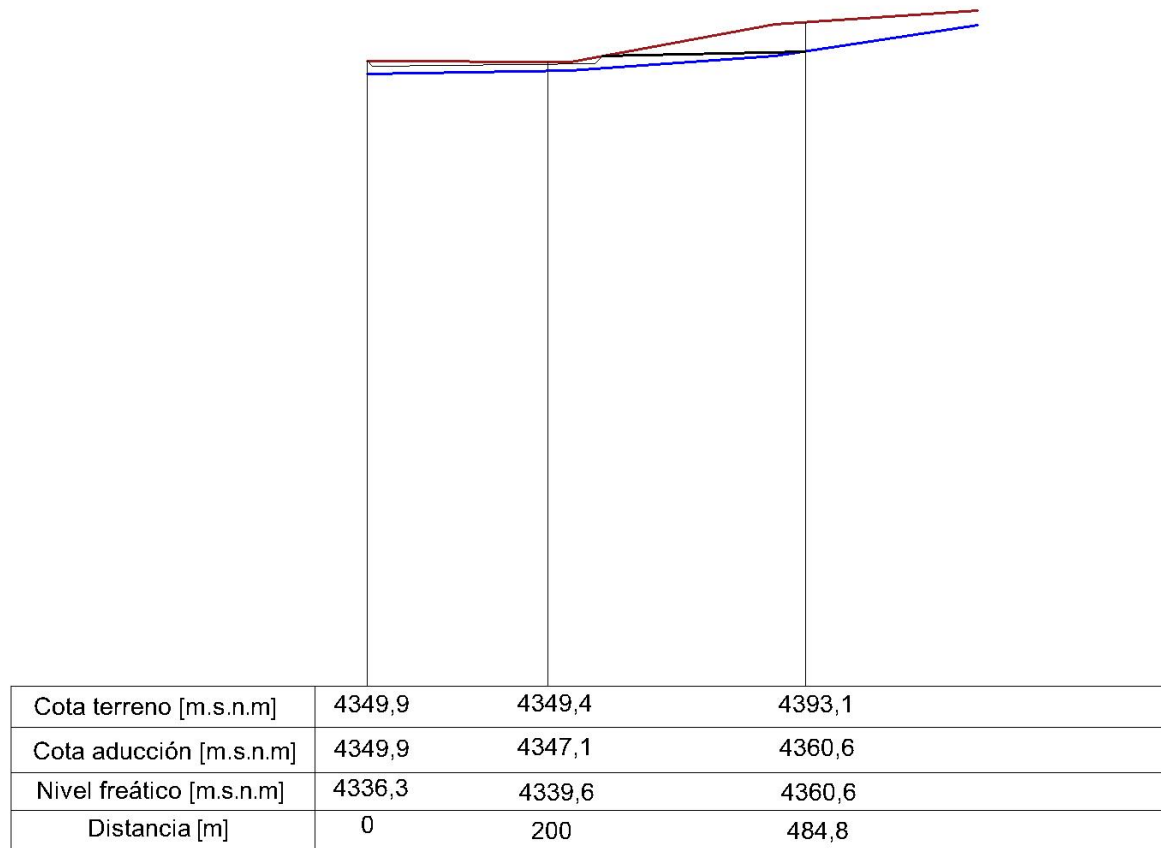


Figura 7.8. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 7.

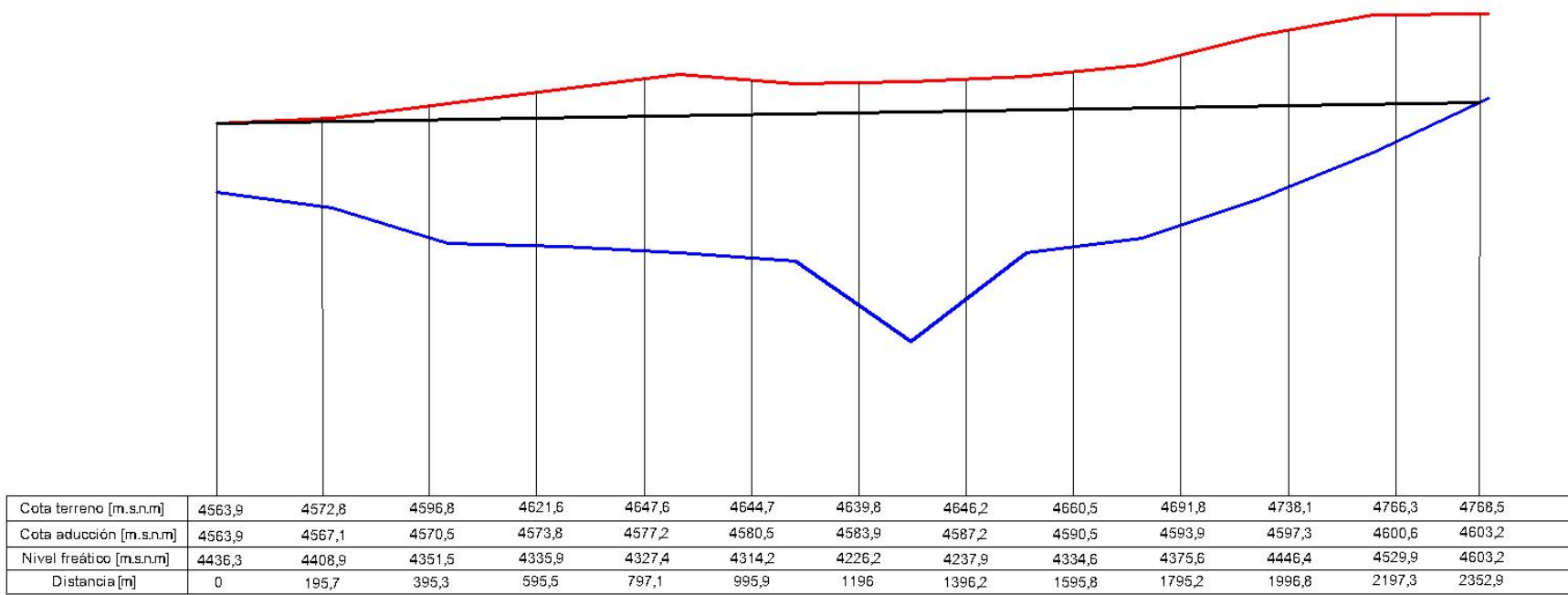


Figura 7.9. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 8.

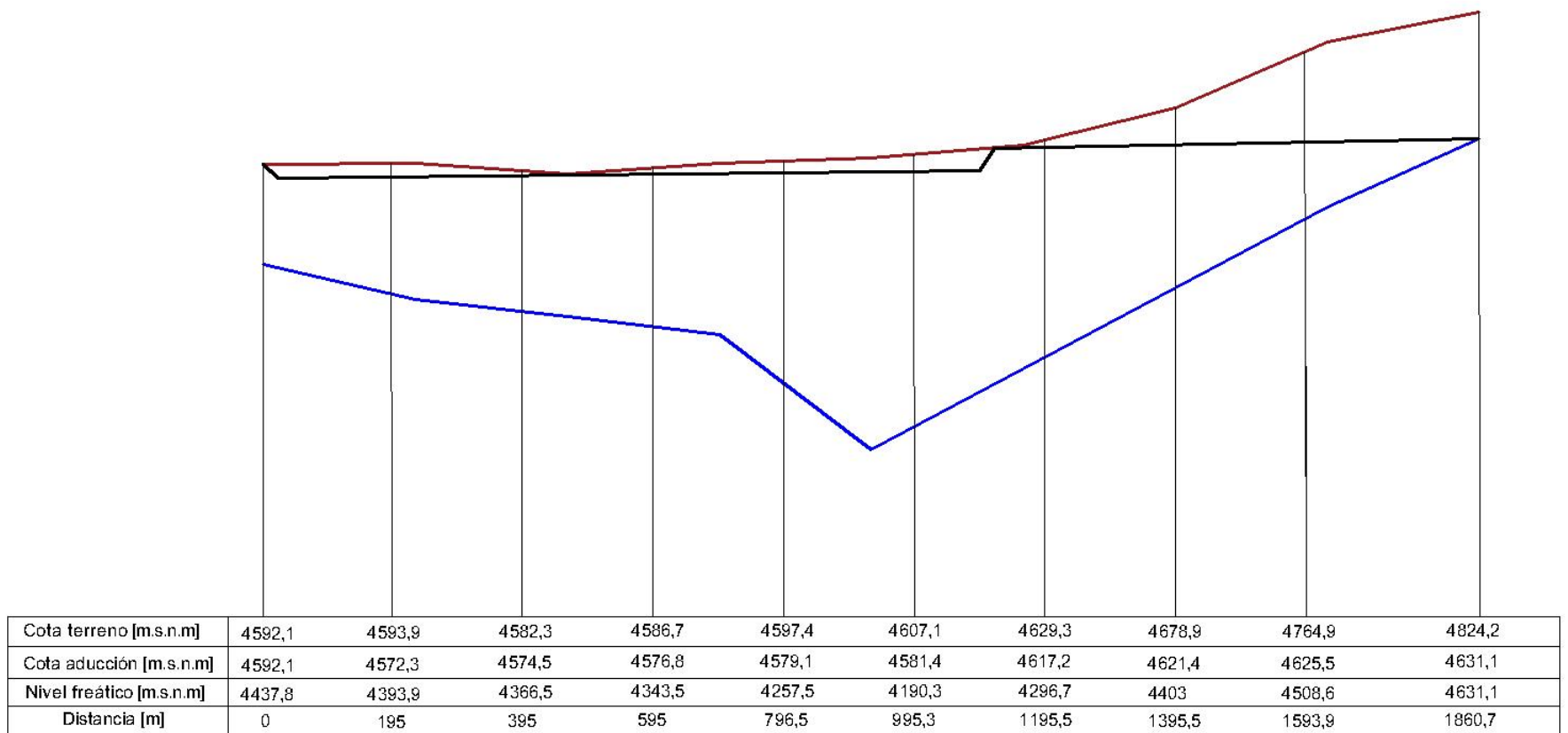


Figura 7.10. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 9.

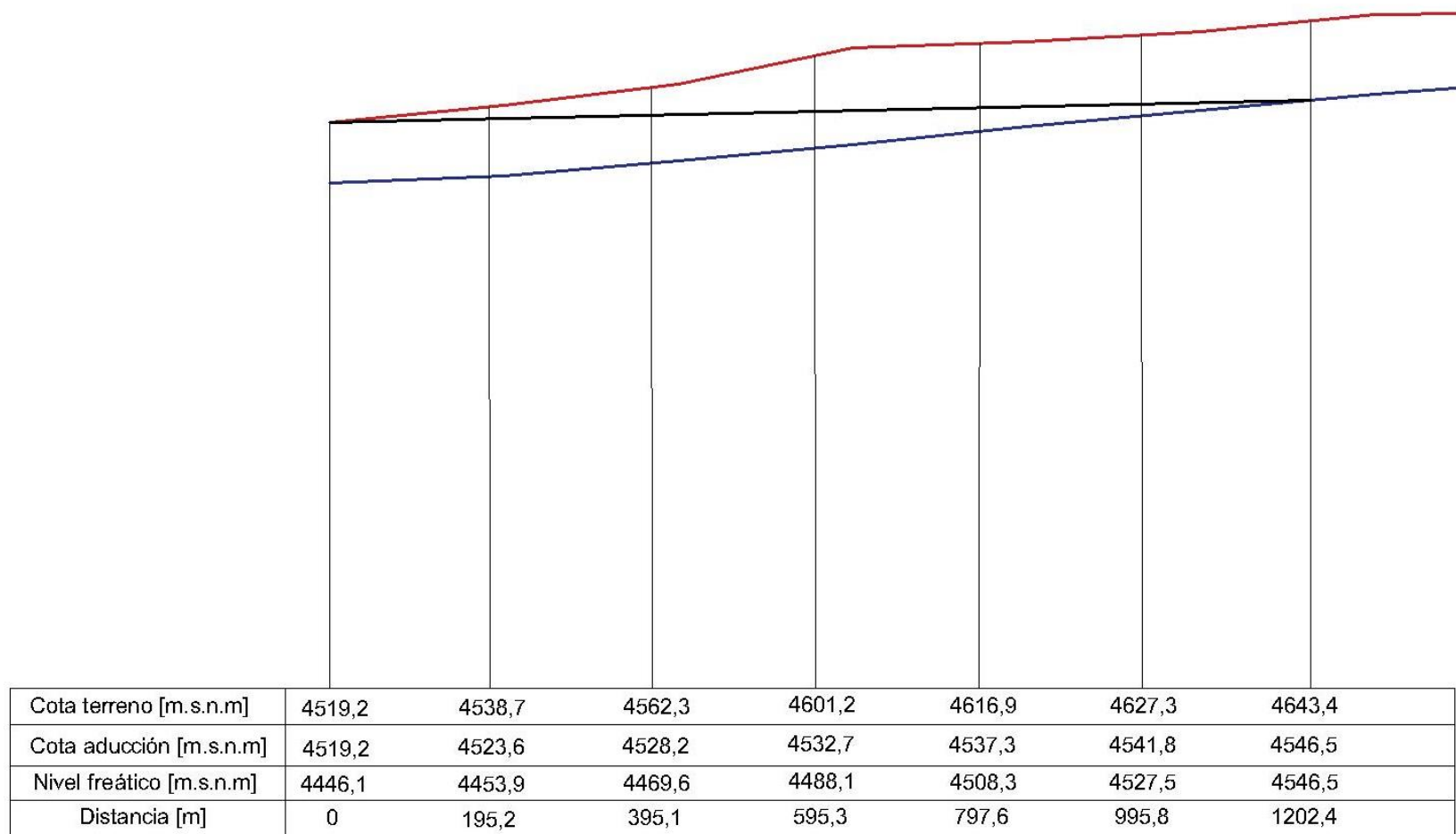


Figura 7.11. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 10.

Figura 7.12. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 11.

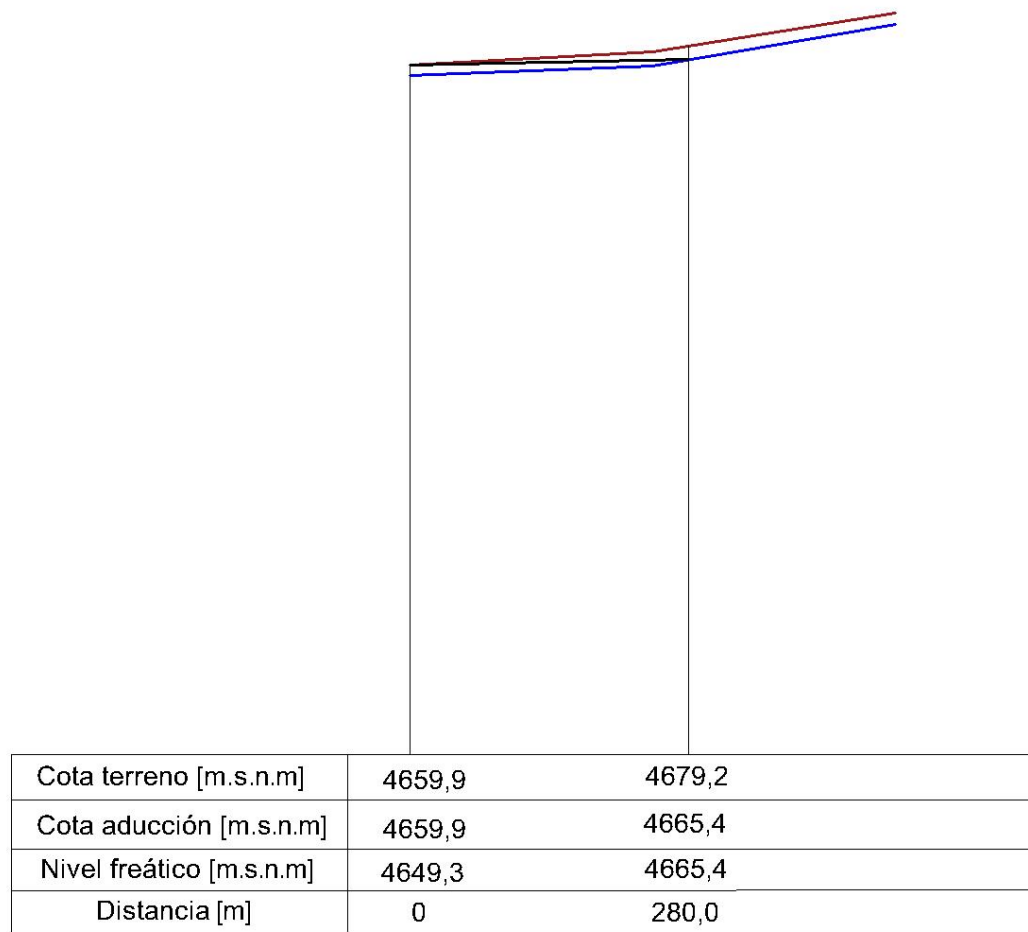


Figura 7.13. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 12.

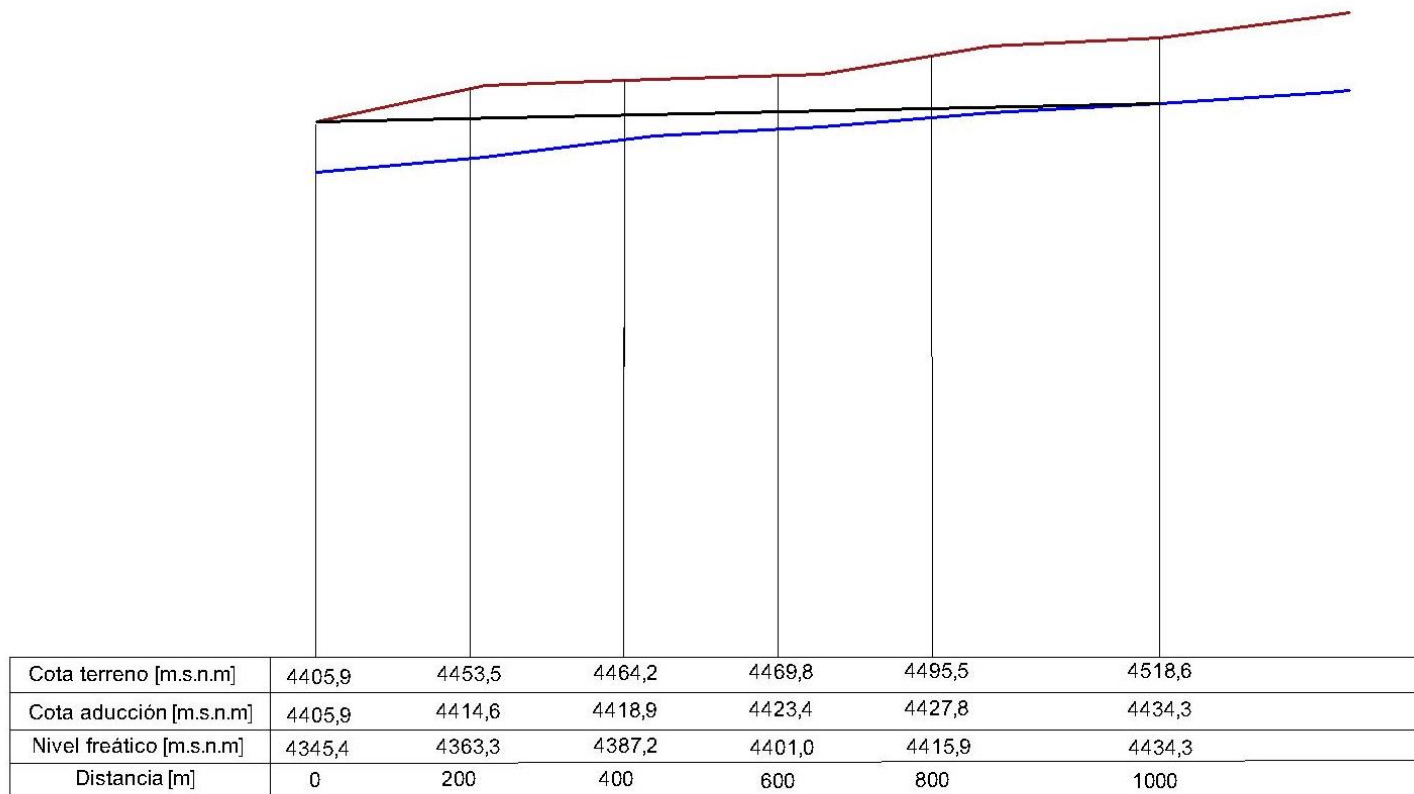


Figura 7.14. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 13.

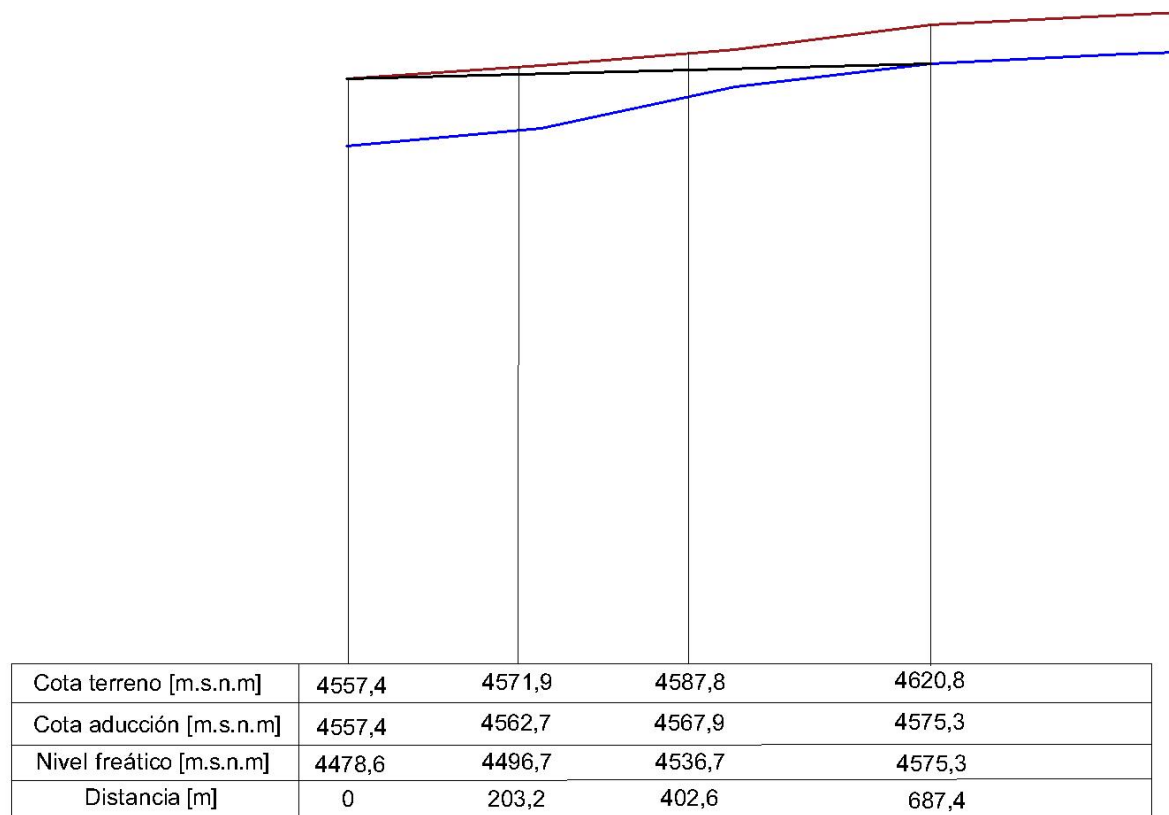


Figura 7.15. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 14.

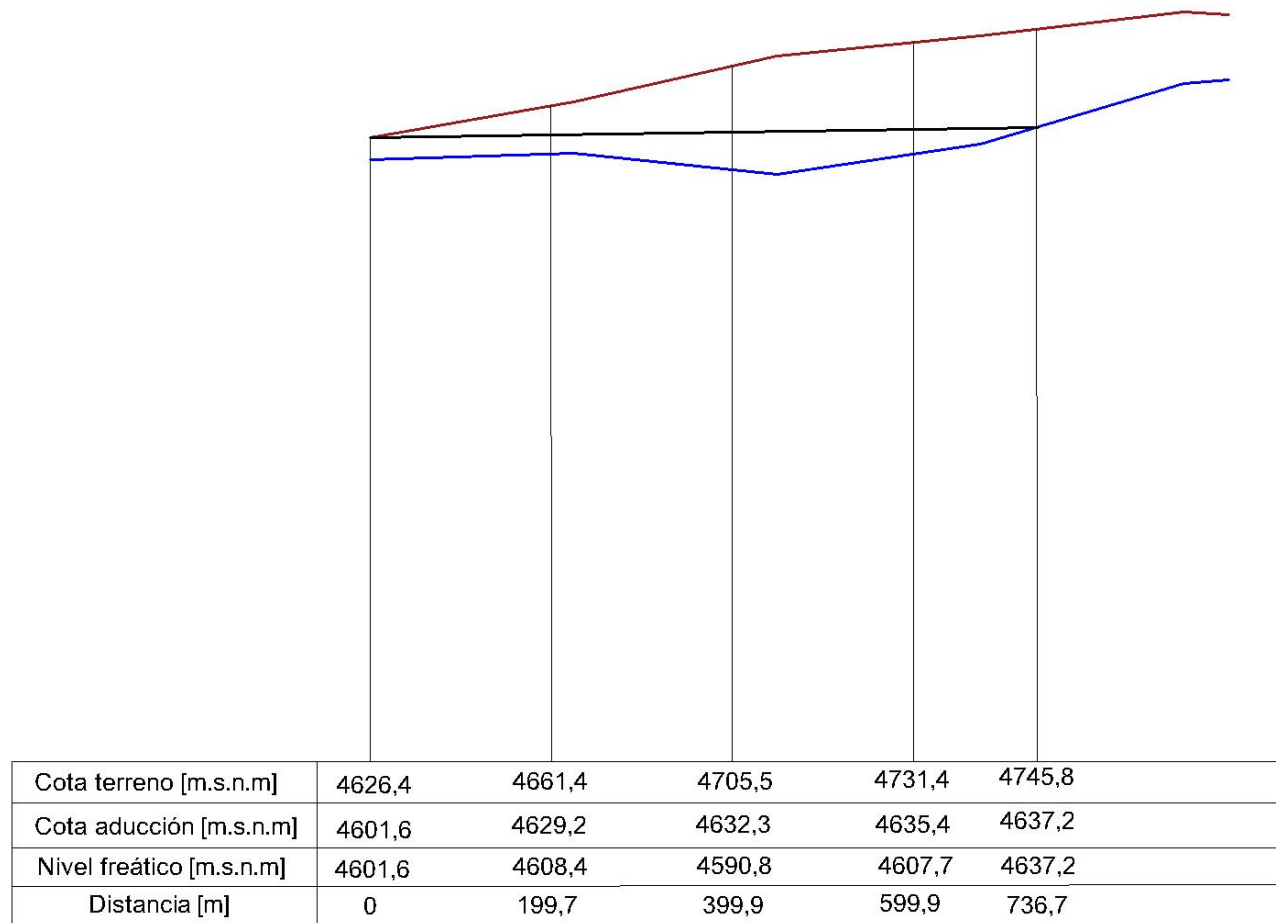


Figura 7.16. Perfil longitudinal de aducción en Quebrada 15.

ANEXO B: COORDENADAS DE PUNTOS DE CAPTACIÓN Y TRANSMISIVIDAD

Tabla 7.1. Transmisividad y coordenadas de puntos de captación.

Punto de restitución	Coordenada Este captación [m.s.n.m]	Coordenada Norte captación [m.s.n.m]	Transmisividad [m ² /s]
Quebrada 1	524398	7680888	2,E-04
Quebrada 2	525029,8	7680951,1	2,E-05
Quebrada 3	527019	7678353	1,E-04
Quebrada 4 - 1	525567	7679714	4,E-06
Quebrada 4 - 2	525463,8	7679838	1,E-04
Quebrada 5	527849,8	7684747	2,E-05
Quebrada 6	525363,2	7680818,5	2,E-04
Quebrada 7	524774	7681009	3,E-05
Quebrada 8	529841,8	7686692	2,E-05
Quebrada 9			
Quebrada 10			
Quebrada 11	533108,9	7683286,6	3,E-06
Quebrada 12	534228	7677067,3	1,E-06
Quebrada 13	532749	7671296	2,E-04
Quebrada 14	528880	7676202	5,E-06
Quebrada 15	533975	7673066	2,E-05

ANEXO C: LARGOS DE POZOS DE INSPECCIÓN Y VENTILACIÓN

Tabla 7.2. Largos de pozos de inspección y ventilación en cada punto de restitución.

Punto de restitución	Pozo 1 [m]	Pozo 2 [m]	Pozo 3 [m]	Pozo 4 [m]	Pozo 5 [m]	Pozo 6 [m]	Pozo 7 [m]	Pozo 8 [m]	Pozo 9 [m]	Pozo 10 [m]	Pozo 11 [m]	Pozo 12 [m]	Pozo 13 [m]	Total [m]
Quebrada 1	1,7	1,2	3,8	3,9	7,1	14,7	10							42,4
Quebrada 2	8,7													8,7
Quebrada 3	16	32,8	45,2											94
Quebrada 4 - 1	5,6	9,8												15,4
Quebrada 4 - 2	5,5	10,5												16
Quebrada 5	2,7	14,1	3,7	4,5	12	25,3	12	36,2	63,2	85,8	111,2	150,6	197,6	718,9
Quebrada 6	11,4													11,4
Quebrada 7	2,3	32,5												34,8
Quebrada 8	5,7	26,3	47,8	70,4	64,2	55,9	59	70	97,9	140,8	165,7	165,3		969
Quebrada 9	21,6	7,8	9,9	18,3	25,7	12,1	57,5	139,4	193,1					485,4
Quebrada 10	15,1	34,1	68,5	79,6	85,5	96,9								379,7
Quebrada 11	25,7	25,7	66,5	47,5	21,9	1,5	7,9	1,4	-	0,4	5,9	29,7		234,1
Quebrada 12	13,8													13,8
Quebrada 13	38,9	45,3	46,4	67,7	84,3									282,6
Quebrada 14	9,2	19,9	45,5											74,6
Quebrada 15	32,2	73,2	96	108,6										310

ANEXO D: DIMENSIONAMIENTO DE EMBALSES DE ALMACENAMIENTO DE PRECIPITACIONES

Tabla 7.3. Dimensionamiento de embalse de precipitaciones en punto de restitución Quebrada 5.

Mes	PP [mm]	PPef [mm]	Volumen entrada [m3]	Evaporación [mm]	Evaporación disminuida [mm]	Evaporación [m3]	Volumen neto [m3]	Entrega [m3/mes]	Volumen final [m3]
1	44,2	10,15	35630,9	139,78	27,96	498,0	35132,9	5443,2	29689,7
2	43,25	9,64	33830,5	117,12	23,42	417,3	63102,9	5443,2	57659,7
3	18,93	0,50	1760,0	124,38	24,88	443,2	58976,5	5443,2	53533,3
4	1,11	0	0,0	112,68	22,54	401,5	53131,8	5443,2	47688,6
5	0,18	0	0,0	91,62	18,32	326,4	47362,2	5443,2	41919,0
6	0,55	0	0,0	83,35	16,67	297,0	41622,0	5443,2	36178,8
7	1,38	0	0,0	84,38	16,88	300,7	35878,1	5443,2	30434,9
8	1,13	0	0,0	105,48	21,10	375,8	30059,1	5443,2	24615,9
9	0,49	0	0,0	126,45	25,29	450,5	24165,3	5443,2	18722,1
10	0,28	0	0,0	153,68	30,74	547,6	18174,6	5443,2	12731,4
11	1,98	0	0,0	165,13	33,03	588,4	12143,0	5443,2	6699,8
12	39,14	7,52	26410,5	166,03	33,21	591,6	32518,7	5443,2	27075,5

Tabla 7.4. Dimensionamiento de embalse de precipitaciones en punto de restitución Quebrada 10.

Mes	PP [mm]	PPef [mm]	Volumen entrada [m3]	Evaporación [mm]	Evaporación disminuida [mm]	Evaporación [m3]	Volumen neto [m3]	Entrega [m3/mes]	Volumen final [m3]
1	44,2	10,15	29698,3	139,78	27,96	415,1	29283,1	1114,6	28168,6
2	43,25	9,64	28197,6	117,12	23,42	347,8	56018,4	1114,6	54903,8
3	18,93	0,50	1466,9	124,38	24,88	369,4	56001,3	1114,6	54886,8
4	1,11	0	0,0	112,68	22,54	334,6	54552,2	1114,6	53437,6
5	0,18	0	0,0	91,62	18,32	272,1	53165,5	1114,6	52050,9
6	0,55	0	0,0	83,35	16,67	247,5	51803,4	1114,6	50688,9
7	1,38	0	0,0	84,38	16,88	250,6	50438,3	1114,6	49323,7
8	1,13	0	0,0	105,48	21,10	313,3	49010,4	1114,6	47895,9
9	0,49	0	0,0	126,45	25,29	375,5	47520,4	1114,6	46405,8
10	0,28	0	0,0	153,68	30,74	456,4	45949,4	1114,6	44834,8
11	1,98	0	0,0	165,13	33,03	490,4	44344,4	1114,6	43229,9
12	39,14	7,52	22013,0	166,03	33,21	493,1	64749,8	1114,6	63635,3

Tabla 7.5. Dimensionamiento de embalse de precipitaciones en punto de restitución Quebrada 11.

Mes	PP [mm]	PPef [mm]	Volumen entrada [m3]	Evaporación [mm]	Evaporación disminuida [mm]	Evaporación [m3]	Volumen neto [m3]	Entrega [m3/mes]	Volumen final [m3]
1	44,2	10,15	42322,8	139,78	27,96	591,6	41731,2	1995,8	39735,4
2	43,25	9,64	40184,3	117,12	23,42	495,7	79424,0	1995,8	77428,1
3	18,93	0,50	2090,5	124,38	24,88	526,4	78992,2	1995,8	76996,4
4	1,11	0	0,0	112,68	22,54	476,9	76519,5	1995,8	74523,7
5	0,18	0	0,0	91,62	18,32	387,7	74135,9	1995,8	72140,1
6	0,55	0	0,0	83,35	16,67	352,8	71787,3	1995,8	69791,5
7	1,38	0	0,0	84,38	16,88	357,1	69434,4	1995,8	67438,5
8	1,13	0	0,0	105,48	21,10	446,4	66992,1	1995,8	64996,3
9	0,49	0	0,0	126,45	25,29	535,2	64461,1	1995,8	62465,3
10	0,28	0	0,0	153,68	30,74	650,4	61814,9	1995,8	59819,0
11	1,98	0	0,0	165,13	33,03	698,9	59120,1	1995,8	57124,3
12	39,14	7,52	31370,6	166,03	33,21	702,7	87792,3	1995,8	85796,4

Tabla 7.6. Dimensionamiento de embalse de precipitaciones en punto de restitución Quebrada 12.

Mes	PP [mm]	PPef [mm]	Volumen entrada [m3]	Evaporación [mm]	Evaporación disminuida [mm]	Evaporación [m3]	Volumen neto [m3]	Entrega [m3/mes]	Volumen final [m3]
1	44,2	10,15	33188,5	139,78	27,96	463,9	32724,6	5106,2	27618,4
2	43,25	9,64	31511,5	117,12	23,42	388,7	58741,2	5106,2	53635,0
3	18,93	0,50	1639,3	124,38	24,88	412,8	54861,5	5106,2	49755,3
4	1,11	0	0,0	112,68	22,54	374,0	49381,3	5106,2	44275,1
5	0,18	0	0,0	91,62	18,32	304,1	43971,0	5106,2	38864,8
6	0,55	0	0,0	83,35	16,67	276,6	38588,2	5106,2	33481,9
7	1,38	0	0,0	84,38	16,88	280,1	33201,9	5106,2	28095,6
8	1,13	0	0,0	105,48	21,10	350,1	27745,5	5106,2	22639,3
9	0,49	0	0,0	126,45	25,29	419,7	22219,7	5106,2	17113,4
10	0,28	0	0,0	153,68	30,74	510,0	16603,4	5106,2	11497,1
11	1,98	0	0,0	165,13	33,03	548,0	10949,1	5106,2	5842,9
12	39,14	7,52	24600,1	166,03	33,21	551,0	29891,9	5106,2	24785,7

Tabla 7.7. Dimensionamiento de embalse de precipitaciones en punto de restitución Quebrada 13.

Mes	PP [mm]	PPef [mm]	Volumen entrada [m3]	Evaporación [mm]	Evaporación disminuida [mm]	Evaporación [m3]	Volumen neto [m3]	Entrega [m3/mes]	Volumen final [m3]
1	44,2	10,15	77437,4	139,78	27,96	1082,4	76355,0	1995,8	74359,2
2	43,25	9,64	73524,6	117,12	23,42	907,0	146976,8	1995,8	144980,9
3	18,93	0,50	3825,0	124,38	24,88	963,1	147842,7	1995,8	145846,9
4	1,11	0	0,0	112,68	22,54	872,5	144974,4	1995,8	142978,5
5	0,18	0	0,0	91,62	18,32	709,5	142269,1	1995,8	140273,2
6	0,55	0	0,0	83,35	16,67	645,4	139627,8	1995,8	137632,0
7	1,38	0	0,0	84,38	16,88	653,4	136978,5	1995,8	134982,7
8	1,13	0	0,0	105,48	21,10	816,8	134165,9	1995,8	132170,0
9	0,49	0	0,0	126,45	25,29	979,2	131190,9	1995,8	129195,0
10	0,28	0	0,0	153,68	30,74	1190,0	128005,0	1995,8	126009,1
11	1,98	0	0,0	165,13	33,03	1278,7	124730,4	1995,8	122734,6
12	39,14	7,52	57398,4	166,03	33,21	1285,7	178847,3	1995,8	176851,5

Tabla 7.8. Dimensionamiento de embalse de precipitaciones en punto de restitución Quebrada 14.

Mes	PP [mm]	PPef [mm]	Volumen entrada [m3]	Evaporación [mm]	Evaporación disminuida [mm]	Evaporación [m3]	Volumen neto [m3]	Entrega [m3/mes]	Volumen final [m3]
1	44,2	10,15	96648,7	139,78	27,96	1350,9	95297,8	2773,4	92524,4
2	43,25	9,64	91765,1	117,12	23,42	1132,0	183157,5	2773,4	180384,1
3	18,93	0,50	4773,9	124,38	24,88	1202,1	183955,9	2773,4	181182,4
4	1,11	0	0,0	112,68	22,54	1089,0	180093,4	2773,4	177320,0
5	0,18	0	0,0	91,62	18,32	885,5	176434,5	2773,4	173661,1
6	0,55	0	0,0	83,35	16,67	805,6	172855,5	2773,4	170082,1
7	1,38	0	0,0	84,38	16,88	815,5	169266,5	2773,4	166493,1
8	1,13	0	0,0	105,48	21,10	1019,5	165473,6	2773,4	162700,2
9	0,49	0	0,0	126,45	25,29	1222,1	161478,1	2773,4	158704,7
10	0,28	0	0,0	153,68	30,74	1485,3	157219,4	2773,4	154446,0
11	1,98	0	0,0	165,13	33,03	1596,0	152850,0	2773,4	150076,5
12	39,14	7,52	71638,3	166,03	33,21	1604,6	220110,2	2773,4	217336,7

Tabla 7.9. Dimensionamiento de embalse de precipitaciones en punto de restitución Quebrada 15.

Mes	PP [mm]	PPef [mm]	Volumen entrada [m3]	Evaporación [mm]	Evaporación disminuida [mm]	Evaporación [m3]	Volumen neto [m3]	Entrega [m3/mes]	Volumen final [m3]
1	44,2	10,15	80809,8	139,78	27,96	1129,5	79680,2	1399,7	78280,5
2	43,25	9,64	76726,5	117,12	23,42	946,5	154060,5	1399,7	152660,9
3	18,93	0,50	3991,5	124,38	24,88	1005,1	155647,3	1399,7	154247,6
4	1,11	0	0,0	112,68	22,54	910,5	153337,1	1399,7	151937,4
5	0,18	0	0,0	91,62	18,32	740,4	151197,0	1399,7	149797,4
6	0,55	0	0,0	83,35	16,67	673,5	149123,8	1399,7	147724,1
7	1,38	0	0,0	84,38	16,88	681,9	147042,3	1399,7	145642,6
8	1,13	0	0,0	105,48	21,10	852,4	144790,2	1399,7	143390,5
9	0,49	0	0,0	126,45	25,29	1021,8	142368,7	1399,7	140969,0
10	0,28	0	0,0	153,68	30,74	1241,9	139727,2	1399,7	138327,5
11	1,98	0	0,0	165,13	33,03	1334,4	136993,1	1399,7	135593,4
12	39,14	7,52	59898,0	166,03	33,21	1341,7	194149,8	1399,7	192750,1

ANEXO E: ESTIMACIÓN TOTAL DE LA INVERSIÓN

Tabla 7.10. Estimación de costo total de la inversión para construcción de una red de drenes para el tramo de captación y aducción.

Periodo	Inversión	Costos	Valor presente
0	-\$54.927.974		\$0
1		-\$80.000	\$-71.429
2		-\$80.000	\$-135.204
3		-\$80.000	\$-192.147
4		-\$80.000	\$-242.988
5		-\$80.000	\$-288.382
6		-\$80.000	\$-328.913
7		-\$80.000	\$-365.101
8		-\$80.000	\$-397.411
9		-\$80.000	\$-426.260
10		-\$3.239.300	\$-18.302.767
11		-\$80.000	\$-475.016
12		-\$80.000	\$-495.550
13		-\$80.000	\$-513.884
14		-\$80.000	\$-530.253
15		-\$80.000	\$-544.869
16		-\$80.000	\$-557.919
17		-\$80.000	\$-569.570
18		-\$80.000	\$-579.974
19		-\$80.000	\$-589.262
20		-\$3.239.300	\$-24.195.769
Total [\$]			\$-104.730.641

Tabla 7.11. Estimación de costo total de la inversión para construcción de túneles para la aducción y drenes para el tramo de captación.

Periodo	Inversión	Costos	Valor presente
0	-\$84.481.942		\$0
1		-\$80.000	\$-71.429
2		-\$80.000	\$-135.204
3		-\$80.000	\$-192.147
4		-\$80.000	\$-242.988
5		-\$80.000	\$-288.382
6		-\$80.000	\$-328.913
7		-\$80.000	\$-365.101
8		-\$80.000	\$-397.411
9		-\$80.000	\$-426.260
10		-\$728.810	\$-4.117.939
11		-\$80.000	\$-475.016
12		-\$80.000	\$-495.550
13		-\$80.000	\$-513.884
14		-\$80.000	\$-530.253
15		-\$80.000	\$-544.869
16		-\$80.000	\$-557.919
17		-\$80.000	\$-569.570
18		-\$80.000	\$-579.974
19		-\$80.000	\$-589.262
20		-\$80.000	\$-597.555
Total [\$]			\$-96.501.568

Tabla 7.12. Estimación de costo total de la inversión para construcción de embalses de almacenamiento de precipitaciones y drenes para los puntos de restitución del sector poniente y en las Quebradas 8 y 9.

Periodo	Inversión	Costos	Valor presente
0	-\$47.156.011		\$0
1		-\$80.000	\$-71.429
2		-\$80.000	\$-135.204
3		-\$80.000	\$-192.147
4		-\$80.000	\$-242.988
5		-\$80.000	\$-288.382
6		-\$80.000	\$-328.913
7		-\$80.000	\$-365.101
8		-\$80.000	\$-397.411
9		-\$80.000	\$-426.260
10		-\$1.462.865	\$-8.265.514
11		-\$80.000	\$-475.016
12		-\$80.000	\$-495.550
13		-\$80.000	\$-513.884
14		-\$80.000	\$-530.253
15		-\$80.000	\$-544.869
16		-\$80.000	\$-557.919
17		-\$80.000	\$-569.570
18		-\$80.000	\$-579.974
19		-\$80.000	\$-589.262
20		-\$80.000	\$-597.555
Total [\$]			\$-63.323.211

Tabla 7.13. Estimación de costo total de la inversión para construcción de embalses de almacenamiento de precipitaciones, y qanats en el sector poniente y en las Quebradas 8 y 9.

Periodo	Inversión	Costos	Valor presente
0	-\$62.018.847		\$0
1		-\$80.000	\$-71.429
2		-\$80.000	\$-135.204
3		-\$80.000	\$-192.147
4		-\$80.000	\$-242.988
5		-\$80.000	\$-288.382
6		-\$80.000	\$-328.913
7		-\$80.000	\$-365.101
8		-\$80.000	\$-397.411
9		-\$80.000	\$-426.260
10		-\$380.090	\$-2.147.593
11		-\$80.000	\$-475.016
12		-\$80.000	\$-495.550
13		-\$80.000	\$-513.884
14		-\$80.000	\$-530.253
15		-\$80.000	\$-544.869
16		-\$80.000	\$-557.919
17		-\$80.000	\$-569.570
18		-\$80.000	\$-579.974
19		-\$80.000	\$-589.262
20		-\$80.000	\$-597.555
Total [\$]			\$-72.068.126

Tabla 7.14. Estimación de costo total de la inversión para construcción de embalses de almacenamiento de precipitaciones e impermeabilizar área del botadero proyectada al año 2040 para recuperar el agua proveniente de lluvias y así restituir el sector poniente.

Periodo	Inversión	Costos	Valor presente
0	-\$83.002.393		\$0
1		-\$80.000	\$-71.429
2		-\$80.000	\$-135.204
3		-\$80.000	\$-192.147
4		-\$80.000	\$-242.988
5		-\$80.000	\$-288.382
6		-\$80.000	\$-328.913
7		-\$80.000	\$-365.101
8		-\$80.000	\$-397.411
9		-\$80.000	\$-426.260
10		-\$654.575	\$-3.698.495
11		-\$80.000	\$-475.016
12		-\$80.000	\$-495.550
13		-\$80.000	\$-513.884
14		-\$80.000	\$-530.253
15		-\$80.000	\$-544.869
16		-\$80.000	\$-557.919
17		-\$80.000	\$-569.570
18		-\$80.000	\$-579.974
19		-\$80.000	\$-589.262
20		-\$80.000	\$-597.555
Total [\$]			\$-94.602.575

Tabla 7.15. Estimación de costo total de la inversión para instalación de sistema AIREX.

Año	Inversión	Costos	Valor presente
0	-\$25.341.654		\$0
1			\$0
2			\$0
3			\$0
4			\$0
5	-\$25.341.654		-\$91.350.991
6			\$0
7			\$0
8			\$0
9			\$0
10	-\$25.341.654		-\$143.185.997
11			\$0
12			\$0
13			\$0
14			\$0
15	-\$25.341.654		-\$172.598.572
16			\$0
17			\$0
18			\$0
19			\$0
20	-\$25.341.654		-\$189.288.056
Total [\$]			-\$596.423.616