



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UN PLAN DE DESAGUADO Y  
DESPRESURIZACIÓN EN OPERACIONES MINERAS DEL NORTE DE CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JOSÉ LUIS DELGADO ESCÁRATE

PROFESOR GUÍA

MARTIN BROWN SEPÚLVEDA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

PABLO RENGIFO OYARCE

ADOLFO OCHOA LLANGATO

SANTIAGO DE CHILE

2024

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
CIVIL**

**POR:** JOSÉ LUIS DELGADO ESCÁRATE

**FECHA:** 2024

**PROFESOR GUÍA:** MARTIN BROWN  
SEPÚLVEDA

**CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UN PLAN DE DESAGUADO Y  
DESPRESURIZACIÓN EN OPERACIONES MINERAS DEL NORTE DE CHILE**

Las faenas que operan rajos abiertos, tanto en Chile como en otros países, se ubican normalmente en sectores con presencia de agua subterránea, por lo que requieren implementar sistemas de desaguado y despresurización (D&D) mediante la construcción de pozos de bombeo, drenes e infraestructura hidráulica complementaria con el propósito de generar depresiones sobre los niveles del acuífero circundante que permitan disminuir la presión sobre los taludes y también evitar la generación de afloramientos de agua que dificulten el proceso de minado.

Una adecuada implementación de estos sistemas facilita la operación de los equipos mineros, disminuye los riesgos asociados a estabilidad de taludes por la presencia de agua -y presiones de poro- y permite generar oportunidades para mejorar la productividad de la faena.

A partir de aspectos conceptuales y de ejemplos reales de diseño e implementación, se ha realizado un análisis sobre las consideraciones que se deben tener en cuenta respecto de los distintos elementos que conforman una estrategia de D&D con el fin de identificar aspectos mínimos que deben ser revisados en su implementación y con ello generar recomendaciones, tanto operacionales como de gestión interna, para su ejecución en función de las condiciones de cada faena.

Se presentan también los resultados de una encuesta realizada a 16 faenas de Chile y otros países, donde se han comparado criterios respecto de la implementación de algunos elementos de la estrategia de D&D, dando cuenta que es bastante similar en todos ellos. Esto permitió además establecer algunas buenas prácticas y recomendaciones en cuanto a la infraestructura de desaguado utilizada.

Finalmente, se refuerzan aspectos claves como el levantamiento de información hidrogeológica a partir de etapas tempranas de los proyectos y se enfatiza también sobre la necesidad de que las faenas establezcan ciclos de planificación con hitos claros que permitan a cada área técnica, por ejemplo, geología, geotecnia, hidrogeología, incorporar la información más actualizada que dispongan para alimentar el proceso de planificación de corto, mediano y largo plazo.

Para ti mamá, que has dado todo por nosotros.

Ale, Pepito, Ignacia y Leti...  
porque me impulsaron a cumplir este desafío.

## AGRADECIMIENTOS

Es sorprendente pensar en la gran cantidad de personas con las que he tenido la oportunidad de interactuar durante mi vida laboral y no laboral, y que de una u otra manera creo haber logrado tomar lección y generado aprendizaje respecto de mi vida personal y profesional. Además de mi familia, en estas líneas me voy a atrever a nombrar a algunas de ellas que considero han sido las más influyentes en mis ya aproximadamente 18 años de carrera profesional, tanto por los conocimientos que me entregaron, como también por tener la oportunidad de haber generado valiosas discusiones sobre distintos temas y decidoras experiencias:

A Juan Barrera, con quien di mis primeros pasos en la orientación al cliente, manejo de proveedores y el control de costos, y fue mi primer ejemplo de un líder preocupado de su equipo de trabajo y de traspasar conocimiento; a Nelson Araya, quien me enseñó gran parte de lo que sé sobre actividades hidrogeológicas de terreno y me dio lección de perseverancia; a Orlando Acosta, de quien aprendí a abordar los temas técnicos de recursos hídricos con una mirada integral, desafiándome a complementar mis conocimientos con legislación ambiental y de aguas; a Pablo Rengifo, por darme la oportunidad de desarrollarme en consultoría y ganar experiencia liderando equipos de especialistas de primer nivel; y a todo el equipo de Collahuasi que me apoyó para terminar este trabajo, especialmente a Mario Quiñones, Idoia Palacios y Daniel Benítez, así como también a mi equipo de colegas de ITASCA por sus sugerencias y recomendaciones. Así como ellos, muchos otros profesionales han dejado huella en este largo camino y nombrarlos uno a uno sería una lista que coparía largas páginas, por lo que sólo me queda darles las infinitas gracias y las disculpas del caso por no haberlos nombrado.

No quiero cerrar estas palabras sin darle reconocimiento a todos los que me incentivaron una y otra vez para sacar adelante esta memoria de título como Carlos Espinoza, Ximena Vargas y el último gran empujoncito que me dieron Adolfo Ochoa, Martin Brown y Patricio Gómez.

## Tabla de Contenido

1.	Introducción .....	1
2.	Objetivos .....	2
2.1	Objetivo general.....	2
2.2	Objetivos específicos .....	2
3.	Conceptos principales .....	2
3.1	Aguas de contacto.....	2
3.2	Aguas de no contacto.....	3
3.3	Presión de poro .....	3
3.4	Despresurización.....	4
3.5	Desagudo.....	4
3.6	Seepage .....	5
3.7	Estabilidad de taludes .....	5
4.	Metodología .....	6
5.	Marco teórico .....	6
5.1	Aspectos operacionales.....	9
5.2	Aspectos hidrogeológicos .....	11
6.	Elementos de una estrategia de desagudo y despresurización.....	14
6.1	Objetivos de despresurización y desagudo (D&D).....	15
6.2	Gobernanza del agua mina.....	18
6.3	Infraestructura.....	21
6.3.1	Desvío de cauces, canales perimetrales y zanjas.....	22
6.3.2	Pozos de bombeo .....	24
6.3.3	Drenes.....	26
6.3.4	Galerías.....	27
6.3.5	Piezómetros para monitoreo .....	28
6.3.6	Infraestructura hidráulica de los sistemas de D&D .....	32
7.	Establecimiento de objetivos de despresurización y/o desagudo.....	35
7.1	Indicadores para el proceso de despresurización.....	37
7.2	Indicadores para el proceso de desagudo .....	39
7.3	Indicadores de funcionamiento de la infraestructura y equipos .....	41
8.	Ejemplos de diseño de plan de despresurización .....	42

8.1	Caso 1: optimización de ángulo de talud .....	42
8.2	Caso 2: mejora en condición de estabilidad local mediante sistema de bombeo.....	47
9.	Revisión de otros proyectos .....	52
9.1	Análisis respecto a la estrategia de desaguado .....	55
9.2	Análisis respecto del caudal de desaguado y permeabilidades .....	57
9.3	Infraestructura y condición hidrogeológica. ....	58
9.4	Perforación de pozos: uso de bentonita. ....	60
9.5	Remoción de lodos de perforación (desarrollo del pozo). ....	61
9.6	Diámetros de habilitación de los pozos de desaguado.....	63
9.7	Materiales utilizados en la habilitación de los pozos.....	66
9.8	Realización de ensayos hidráulicos .....	68
9.9	Tipo de infraestructura para medición de niveles piezométricos en el rajo.....	70
9.10	Estrategia de mantenimiento del sistema de bombeo de pozos de desaguado.....	72
10.	Recomendaciones .....	73
11.	Conclusiones.....	75
12.	Bibliografía.....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Ubicación y tipo de mineral principal extraído de faenas encuestadas. Todas con método rajo abierto.....	53
Tabla 2:	Caracterización de cada faena respecto a tamaño y condición hidrológica .....	54
Tabla 3:	Principal tipo de infraestructura utilizada para el desaguado .....	55
Tabla 4:	Diámetro de habilitación en función del equipo de bombeo .....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Presión de poros relativa al nivel freático. ....	3
Figura 2:	Ejemplo de agua subterránea que se mueve por una zona de roca fracturada en una mina en el norte de Chile y aparece en el talud ( <i>seepage</i> ) .....	5
Figura 3:	Esquema del ciclo de vida de un proyecto minero.....	7
Figura 4:	Mina en Centroamérica con alta interferencia de agua en la operación de carguío.....	10
Figura 5:	Falla talud en mina Bringham Young en EEUU. ....	11
Figura 6:	Elementos principales para la construcción de un modelo conceptual hidrogeológico. ....	13
Figura 7:	Elementos principales de una estrategia de desaguado.....	14
Figura 8:	Procesos en el desarrollo de un plan de D&D .....	15
Figura 9:	Esquema extracción de estéril en función del ángulo global del rajo.....	16

Figura 10: Proceso recomendado de diseño de taludes en rajos abiertos.....	19
Figura 11: Secuencia usual de incorporación de información en la construcción de los planes de minado.....	20
Figura 12: Esquema de elementos utilizados para desagüe y despresurización.....	21
Figura 13: Ejemplo de desvío de cauce con obra de acumulación en borde de un rajo.....	22
Figura 14: Esquema de construcción de zanja.....	23
Figura 15: Ejemplo de desvío de escorrentías superficiales mediante canal perimetral en el borde de un rajo.....	23
Figura 16: Esquemas tradicionales de pozo de bombeo con bomba electrosumergible (izquierda) y bomba de superficie (derecha).....	25
Figura 17: Efecto esperado al operar pozos de bombeo.....	25
Figura 18: Esquema de drenaje horizontal.....	26
Figura 19: Ejemplo set de 2 drenes horizontales en una misma posición de perforación en mina en el norte de Chile.....	26
Figura 20: Disposición típica de drenes dentro de una galería de drenaje.....	27
Figura 21: Ejemplo de drenajes a través de perforaciones dentro de una galería.....	27
Figura 22 Esquema de diseño de piezómetro Casagrande.....	29
Figura 23: Esquema general de piezómetro de cuerda vibrante.....	30
Figura 24: Esquema específico sensor marca Geokon Modelo 4500S.....	30
Figura 25: Ejemplo de piezómetro de cuerda vibrante diseñado con un sensor en la zona saturada y otro en la zona no saturada del acuífero.....	31
Figura 26: Imagen con piscina interior mina que recibe aportes de flujos desde drenes.....	32
Figura 27: Plano con infraestructura hidráulica principal del sistema de desaguado de un rajo en norte de Chile.....	33
Figura 28: Esquema con filosofía de funcionamiento del sistema de desaguado de un rajo en norte de Chile.....	34
Figura 29: Análisis de estabilidad de un talud bajo dos condiciones de nivel freático.....	35
Figura 30: Iteración para validar plan de despresurización óptimo.....	36
Figura 31: Ejemplo definición de target de despresurización alejando el nivel X metros detrás del talud proyectado.....	38
Figura 32: Ejemplo definición de target de despresurización sectorizado.....	38
Figura 33: Ejemplo definición de target de despresurización con mayor detalle utilizando modelos numéricos hidrogeológicos y para un piezómetro en específico.....	39
Figura 34: Ejemplo de indicador de desaguado por sector.....	40
Figura 35: Imagen con registro de <i>seepage</i> y representación en modelo numérico.....	40
Figura 36: Ejemplo de indicador de avance de planes de perforación de un programa de D&D.....	41
Figura 37: Vista en planta sector de rajo donde se requiere optimizar el ángulo interrampa.....	42
Figura 38: Comparación de FoS en condición “Do Nothing” y caso seco.....	43
Figura 39: Sensibilización del FoS en función de la disminución del nivel freático.....	44
Figura 40: Caso 1: Primera iteración del plan de desaguado solo pozos.....	45
Figura 41: Caso 1: Segunda iteración del plan de desaguado con pozos y drenes.....	46
Figura 42: Caso 2: Zona de inestabilidad identificada en plan minero al año 2025.....	47

Figura 43: Caso 2: Set de drenes simulado. ....	48
Figura 44: Caso 2: Comparación de simulación con y sin drenes para el año 2025. ....	49
Figura 45: Caso 2: Alternativa de despresurización con set de pozos de bombeo. ....	50
Figura 46: Caso 2: Alternativa de despresurización con set de pozos de bombeo. Efecto generado para 2025. ....	51
Figura 47: Caso 2: Análisis de estabilidad con alternativa de despresurización con set de pozos de bombeo. Efecto generado para 2025. ....	51
Figura 48: Distribución geográfica de las faenas encuestadas ....	52
Figura 49: Esquema utilizado para comparar las distintas faenas de la encuesta.....	53
Figura 50: Caracterización de cada faena respecto a tamaño y condición hidrológica.....	54
Figura 51: Tipo de faena y cantidad de pozos inpit y outpit.....	56
Figura 52: Caudal de desaguado y rango de permeabilidades.....	57
Figura 53: Ejemplo de la limitación de la influencia del bombeo por presencia de estructuras ...	58
Figura 54: Relación entre permeabilidad, tipo de porosidad y faenas con muchos pozos.....	59
Figura 55: Relación entre permeabilidad, tipo de porosidad y faenas con drenes .....	59
Figura 56: Uso de bentonita en la perforación de pozos .....	60
Figura 57: Aplicación de la solución de hipoclorito.....	61
Figura 58: Criterios para la remoción del lodo desde el interior del pozo .....	62
Figura 59: Medición de concentración de sólido cono Imhoff (5 minutos de medición) .....	63
Figura 60: Ejemplo de daño en cable por habilitación muy ajustada en relación con el diámetro del conjunto motor-bomba-cables .....	64
Figura 61: Diámetro de habilitación en función de la profundidad de la mina .....	66
Figura 62: Materiales de habilitación utilizados.....	67
Figura 63: Diámetros de habilitación de faenas que reportan uso de PVC .....	67
Figura 64: Materiales de habilitación utilizados y niveles dinámicos.....	68
Figura 65: Faenas que realizan pruebas hidráulicas durante la perforación de pozos.....	69
Figura 66: Faenas que realizan pruebas hidráulicas después de la perforación de pozos .....	70
Figura 67: Infraestructura de monitoreo de niveles en el rajo .....	71
Figura 68: Sistema de recolección de datos desde los piezómetros .....	71
Figura 69: Infraestructura de monitoreo de niveles en el rajo.....	72

# 1. Introducción

Las faenas que operan rajos abiertos, tanto en Chile como en otros países, se ubican normalmente en sectores con presencia de agua subterránea, por lo que requieren implementar sistemas de desaguado y despresurización (D&D) mediante la construcción de pozos de bombeo, drenes e infraestructura hidráulica complementaria con el propósito de generar depresiones sobre los niveles del acuífero circundante que permitan disminuir la presión sobre los taludes y también evitar la generación de afloramientos de agua que dificulten el proceso de minado.

Una adecuada implementación de estos sistemas facilita la operación de los equipos mineros, disminuye los riesgos asociados a estabilidad de taludes por la presencia de agua -y presiones de poro- y permite generar oportunidades para mejorar la productividad de la faena. Sin embargo, la planificación y ejecución de estas actividades, además de requerir en algunos casos de un alto presupuesto para su implementación, también requiere de un alto grado de conocimiento de las condiciones geológicas e hidrogeológicas del sitio y de una coordinación armónica entre las distintas unidades de negocio que participan en la operación minera.

Dado esto, para diseñar un plan de desaguado eficiente, efectivo y de costos controlados, es necesario, por un lado, incorporar a las geociencias en la toma de decisiones, pasando por el desarrollo de modelos conceptuales y numéricos, y por otro, considerar que el plan de perforación debe adecuarse en forma realista a las condiciones operacionales de cada faena. Esto último cobra extrema relevancia considerando que el diseño de la mina se basa en muchos casos sobre proyecciones del descenso a generar sobre los niveles del acuífero (que luego alimentan modelos geomecánicos de estabilidad) y, por lo tanto, los elementos que fueron incorporados en las simulaciones de los modelos numéricos hidrogeológicos para generar estos descensos, deben poder ejecutarse en terreno, requiriendo para ello espacio físico y temporal dentro del plan minero, infraestructura para trasladar el agua hacia algún punto para su manejo y sistemas de control que permitan evaluar la efectividad del sistema en relación a los descensos de niveles esperados.

En este contexto, el presente trabajo busca aportar en la discusión de los elementos que deben ser considerados en la cadena de acciones a ejecutar para implementar la estrategia de desaguado y despresurización y cuáles son los principales desafíos desde el punto de vista técnico y adaptativo para su gestión. Se presentarán algunos casos de ejemplo en Chile y se hará una comparación con lo que ocurre en otras faenas a nivel global respecto a los elementos principales utilizados.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Como objetivo general de esta memoria, se busca realizar un análisis sobre las consideraciones que se deben tener en cuenta respecto de los distintos elementos que forman parte de la estrategia de un plan de despresurización y desaguado (D&D) para facilitar su implementación en minería a rajo abierto y generar recomendaciones de mejores prácticas, tanto operacionales como de gestión interna, para su implementación en función de las condiciones específicas a la que se ve enfrentada cada faena.

### **2.2 Objetivos específicos**

Como objetivos específicos se busca:

- Identificar los principales elementos que se deben considerar en un plan de despresurización y desaguado.
- Analizar la cadena de decisiones para la implementación de sistemas de desaguado y despresurización en minería de rajo abierto.
- Comparar criterios respecto a la implementación de algunos elementos de la estrategia en faenas a nivel global.
- Establecer recomendaciones de buenas prácticas, tomando como base la bibliografía disponible respecto al tema y ejemplos de análisis de casos.

## **3. Conceptos principales**

A continuación se describen algunos conceptos usualmente utilizados en el contexto de la gestión de agua mina y que serán utilizados en el marco del presente trabajo:

### **3.1 Aguas de contacto**

Se habla de aguas de contacto (o aguas contactadas) respecto de aquellas aguas superficiales o subterráneas que han entrado en contacto con componentes de la operación minera y que podrían afectar su calidad química. En esta categoría se identifican normalmente aquellas aguas que precipitan directamente sobre el rajo o aquellas que afloran por sus taludes y entran en contacto con el material tronado que puede tener residuos de explosivos y eventualmente aceites o fluidos de los equipos mecánicos de superficie. También se encuentran bajo esta definición aquellas que entran en contacto con otras instalaciones o áreas industriales de las faenas como depósitos de relave, botaderos, pilas de lixiviación, patios de almacenamiento de materiales o residuos, entre otros.

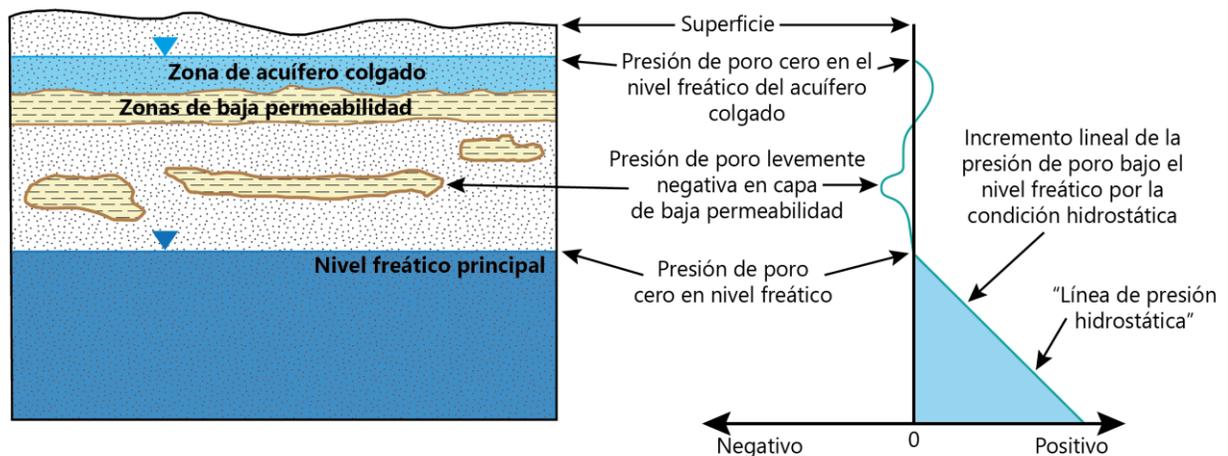
### 3.2 Aguas de no contacto

Por el contrario, las aguas de no contacto, se refiere a aquellas aguas superficiales o subterráneas que aún no entran en contacto con alguna instalación u operación de la mina y, por lo tanto, se puede entender que es agua que mantiene su calidad natural.

### 3.3 Presión de poro

La presión de poro se define como la presión que las aguas subterráneas ejercen dentro de los espacios porosos de la roca o el suelo. En condiciones hidrostáticas, la presión de poro es el resultado del peso de la columna de agua por encima de la profundidad de interés (Beale & Read, 2013). La presión de poro es cero en el nivel freático, positivo por debajo del nivel freático y negativo o cero por encima del nivel freático. A mayor profundidad, por debajo del nivel freático, mayor será la presión de poro (Figura 1).

Por encima del nivel freático, las fracturas y los espacios porosos pueden estar parcialmente drenados y el macizo rocoso podría también no estar completamente saturado. El agua que queda se mantiene en su lugar dentro de las fracturas y espacios porosos por tensión superficial, por lo que hay un efecto negativo de presión de poro (succión) asociada con estas zonas. En la mayoría de los casos, la magnitud de esta presión negativa es demasiado pequeña para ser significativa respecto de mantener junto al macizo rocoso. Las presiones de poros negativas significativas generalmente ocurren en materiales de grano fino (como las arcillas) o entornos de roca dura donde los sistemas de fractura son poco frecuentes, de pequeña apertura y mal interconectados.



**Figura 1: Presión de poros relativa al nivel freático.**

Adaptado de (Beale & Read, 2013)

En condiciones de medio poroso, la presión de poros se produce en los espacios intersticiales entre los granos y actúa sobre los propios granos. En condiciones de flujo de fractura, la presión de poros se produce dentro de las fracturas y actúa sobre la superficie de la masa rocosa que rodea las fracturas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la mayoría de las rocas duras presentes en los

rajos tienden a tener fracturas generalizadas y la presión de poros actúa en las fracturas pequeñas (microfracturas) y fracturas mayores. En los tipos de rocas de transición, la presión de poros se produce tanto en los espacios intersticiales de los granos de suelo como en las fracturas. Por debajo del nivel freático, la presión de poros se determina midiendo la altura de una columna de agua en un punto dado (profundidad y localización) dentro de la masa rocosa. En general, cuanto más abajo del nivel freático, mayor es la presión de poro (Beale & Read, 2013).

### **3.4 Despresurización**

Como concepto, la despresurización busca reducir el nivel piezométrico (y consecuentemente la presión de poro) en un punto específico del acuífero hasta un cierto nivel de referencia dado, lo que puede ocurrir mediante elementos forzantes como infraestructura de drenaje, pero también de manera indirecta por efecto del aumento de permeabilidad ocasionada por las tronaduras, lo que dependerá finalmente del tipo de material presente.

### **3.5 Desaguado**

El desaguado minero corresponde a todas las acciones que se realizan para sacar el agua desde una faena minera, ya sea aquella necesaria para reducir las presiones de poro, como aquella necesaria para asegurar una operación seca o sin interferencias con la operación. Para ejecutar esta actividad además de los elementos utilizados para despresurizar, se requiere infraestructura para el manejo de las aguas al interior de los rajos tales como puntos de acumulación de agua (piscinas, estanques), tuberías de conducción, zanjas, canales perimetrales, estaciones de bombeo y sus sistemas complementarios de energización y comunicación. En el mejor escenario, se trata de mantener el rajo seco en función de que el nivel de las aguas subterráneas esté por detrás de los taludes y por debajo del fondo del rajo, junto con evitar el ingreso de aguas lluvias perimetrales, manejando sólo el agua lluvia (o nieve) que cae en forma directa en la excavación.

Desde un punto de vista de evitar la contaminación de las aguas, los sistemas de desaguado pueden hacer manejos diferenciados de las aguas de contacto y de las aguas de no contacto, en la medida que sea necesario cuando, por ejemplo, se realizan descargas de aguas sobrantes a quebradas cercanas o se devuelven al ambiente mediante recarga artificial de acuíferos.

Para evitar confusiones de terminología, es importante tener en consideración que es usual que en una faena minera los conceptos de “despresurización” (disminuir presión) y “desaguado” (sacar agua) sean utilizados indistintamente y se hable en términos generales de “desaguado” o su traducción al inglés “dewatering” para referirse a ambos términos.

### 3.6 Seepage

El concepto de *seepage* se refiere a las aguas que afloran en los taludes y su origen puede estar asociado directamente al contacto del nivel de agua subterránea con el talud mismo o bien por la aparición de aguas que provienen desde una infiltración cercana o agua de lluvia de recarga reciente. Estas últimas dos situaciones pueden ocurrir usualmente en las partes altas de los taludes de una mina.



**Figura 2: Ejemplo de agua subterránea que se mueve por una zona de roca fracturada en una mina en el norte de Chile y aparece en el talud (*seepage*)**

Elaboración propia

### 3.7 Estabilidad de taludes

En términos simples, la estabilidad de taludes se refiere a las condiciones de una masa de suelo o roca frente a fenómenos de sollicitación como pueden ser el peso de la misma masa, el ángulo de excavación al que está expuesto, la presencia de agua (y presiones de poro asociada) y la presencia de otros factores como sobrecargas ya sea estáticas o dinámicas. En minería a rajo abierto se habla usualmente de estabilidad geomecánica a la estabilidad de los taludes de la mina. Se suele usar también el concepto de Factor de Seguridad (FoS) para establecer condiciones de estabilidad tal que los esfuerzos que es capaz de resistir el suelo o roca sean mayores que las sollicitaciones que están actuando.

## 4. Metodología

Para abordar la implementación de planes de desaguado y despresurización (D&D), se ha realizado una revisión de los textos técnicos específicos que son utilizados de referencia en hidrogeología de mina y que en general abordan el proceso integral de D&D minero. A partir de las conceptualizaciones que se plantean, se realiza una discusión de aquellos aspectos relevantes a considerar en su implementación real en terreno.

En este contexto, se analiza un ejemplo típico de la estructura de decisiones que finalmente finaliza en la construcción de sistemas de D&D y su utilización para la gestión de las aguas subterráneas y superficiales. Esta revisión se realiza desde un punto de vista del ciclo de planificación y de la estructura organizacional de una faena minera.

Dentro de las actividades de este ciclo de planificación, donde se ven normalmente involucradas distintas áreas técnicas dentro de una faena minera, se pone énfasis en los aspectos que gatillan la implementación de las recomendaciones hidrogeológicas y cómo posteriormente se recoge la información para alimentar un nuevo ciclo de actividades.

Por su parte, el análisis anterior se complementa con los resultados de un análisis de *benchmark* que se realizó durante el año 2021 consistente en una encuesta dirigida a profesionales a cargo del proceso de desaguado minero de 16 minas en diferentes partes del mundo, donde se consultó por una serie de aspectos relacionados a las características de sus sistemas de desaguado.

## 5. Marco teórico

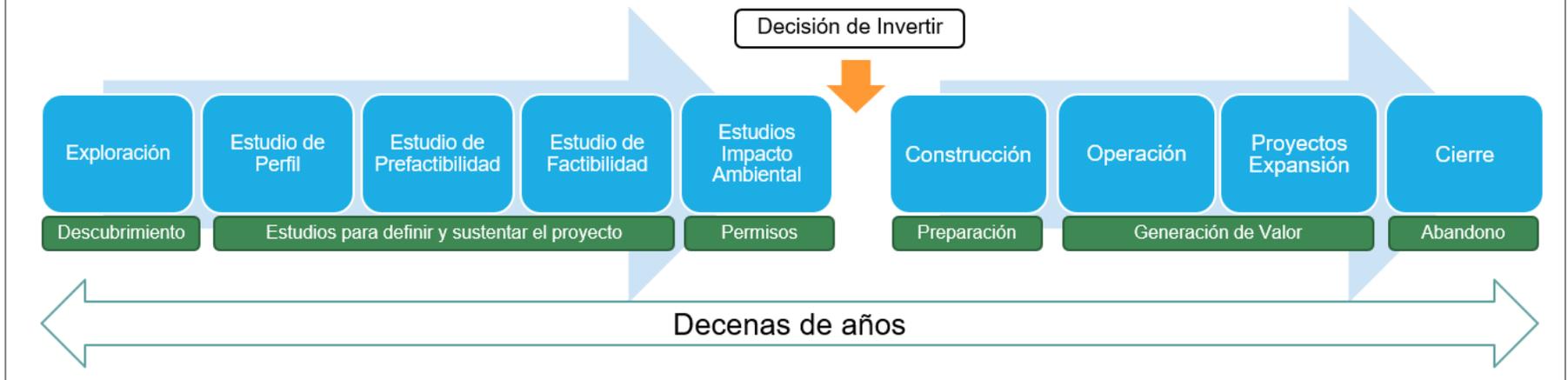
Casi todas las faenas en Chile y en el mundo, tanto a rajo abierto como subterráneas, tienen algún grado de interacción con las aguas subterráneas. Este grado de interacción podrá ser mayor o menor en función de las condiciones hidrogeológicas propias del lugar donde se encuentre cada mina, pero en general en todas ellas se debe hacer algún tipo de gestión para su manejo.

En particular para las faenas a rajo abierto, motivo de análisis de esta memoria, la relación del agua subterránea con el diseño de la mina es un aspecto que se debe considerar desde las etapas iniciales de los proyectos mineros, idealmente a partir de las primeras campañas de exploración minera.

En efecto, tal como se muestra en la Figura 3, la caracterización y conceptualización hidrogeológica es un tema que se debe abordar en forma creciente en la medida que el proyecto minero se va desarrollando, no sólo porque será información relevante para el diseño de ingeniería propiamente tal y las etapas de prefactibilidad y factibilidad del proyecto, sino que también será un elemento de importancia para los procesos de evaluación ambiental a los que se deberá someter para poder obtener los permisos necesarios para operar, especialmente en aquellos casos donde la mina o sus instalaciones se desarrollan en sitios de interés ambiental.

## ¿Cuándo se convierte el agua en relevante?

- Ciclo de Vida de una mina:



**Figura 3: Esquema del ciclo de vida de un proyecto minero**  
Elaboración propia

Por ejemplo, los requerimientos de los estudios de prefactibilidad y factibilidad de muchas de las empresas que operan en Chile utilizan como referencia las recomendaciones de información dadas por el estándar canadiense “NI 43-101 *Standards of Disclosure for Mineral Projects*” (OSC, 2016), donde las aguas subterráneas y el manejo de agua mina cobra relevancia en los apartados relacionados al método de minado e infraestructura, considerando la implicancia del agua mina en la operación y las inversiones que se deben realizar para su manejo; y también en los aspectos ambientales, considerando la relevancia de hacer un buen análisis de los potenciales impactos del minado y del monitoreo de sus efectos sobre el entorno, considerando que esto también requerirá inversiones durante el proyecto.

Por su parte, en línea con los requerimientos mencionados, en la legislación nacional el conocimiento de los aspectos hidrogeológicos asociados al desarrollo de una mina son parte de las exigencias mínimas que se abordan en el marco del Sistema de Evaluación Ambiental, donde la autoridad técnica incluso ha desarrollado guías específicas para estandarizar la presentación de esta componente (SEA, 2012).

Complementariamente, las últimas modificaciones al Código de Aguas<sup>1</sup> también han incorporado precisiones respecto de las aguas mina, en específico en cuanto a estandarizar su reporte y para justificar y cuantificar el manejo de las aguas que son extraídas. De igual forma, para las consideraciones de los Planes de Cierre (SERNAGEOMIN, 2020), también se deben tener en cuenta las condiciones hidrogeológicas frente al riesgo potencial de generación de drenajes ácidos.

No se debe dejar de lado que la caracterización del sitio no sólo es requerida para el desarrollo de los rajos o del minado subterráneo, sino que debe ser considerado para todos los elementos que conformarán las instalaciones claves de operación tales como depósitos de relaves, botaderos o desmontes, pilas de lixiviación, áreas de depósito de residuos, plantas concentradoras o cualquier otro elemento que pueda tener algún grado de interferencia física con las aguas subterráneas en forma directa por excavación o por posibles filtraciones de aguas de proceso. Por supuesto que esta caracterización deberá ser aún más exhaustiva si el proyecto considera la operación de campos de pozos para el abastecimiento hídrico de la faena.

En síntesis, entender las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas del entorno de una operación, puede tener implicancias en todo el ciclo de vida de un proyecto, influyendo en decisiones críticas asociadas a costos de capital (CAPEX<sup>2</sup>), costos de operación (OPEX<sup>3</sup>) y dando más certeza de su viabilidad socio-ambiental.

En específico para las operaciones a rajo abierto, complementando lo indicado por Beale & Read (Beale & Read, 2013), los **aspectos operacionales** relevantes a considerar para la gestión

---

<sup>1</sup> Versión consolidada del Código de Aguas con últimas modificaciones de septiembre de 2023 está disponible en biblioteca del Congreso Nacional: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=5605>

<sup>2</sup> Capex es el acrónimo de Capital Expenditures, es decir, gastos de capital o inversiones de capital. Se trata de los gastos que una empresa realiza para la adquisición o mantenimiento de bienes físicos con el fin de invertir en el crecimiento de la compañía. (fuente: [www.dripcapital.com](http://www.dripcapital.com)).

<sup>3</sup> Opex es el acrónimo de Operating Expenses, que se traduce como gastos operativos. Se refiere a todos los gastos que una empresa realiza para llevar a cabo sus funciones principales. (fuente: [www.dripcapital.com](http://www.dripcapital.com)).

operacional del agua de aquellas faenas que operan bajo el nivel del agua subterránea son al menos las dos siguientes:

- Controlar el ingreso de agua a las labores de minado, y
- Analizar el efecto del agua en la reducción de la estabilidad de los taludes

Por su parte, entre los **aspectos hidrogeológicos** a considerar, se debe tener en cuenta al menos:

- Caracterización de las propiedades hidrogeológicas del sitio: geología local, hidroquímica, hidrología, permeabilidad de la roca, ubicación del nivel freático y distribución de presión de poros en la vertical, y una buena comprensión del sistema estructural.

A continuación se describen con más detalle ambos aspectos.

### **5.1 Aspectos operacionales**

En detalle, cada uno de los dos aspectos involucra una serie de elementos dentro de las consideraciones que se deben tener para la planificación y operación de la mina, tal como se describe a continuación para cada uno:

- 1- **Controlar el ingreso de agua a las labores de minado.** Los flujos de agua en un rajo a cielo abierto suelen provocar una reducción de la eficiencia operativa y aumento de los costos de explotación debido a:
  - La pérdida de acceso a zonas del rajo debido a inundación y, en algunos casos, una pérdida definitiva de la capacidad de explotación minera.
  - Proceso de perforación y voladura en suelos húmedos puede causar un mal rendimiento de la voladura y, en algunos casos, fallos de detonación. Esto puede generar un mayor costo por mayor uso de explosivos y el uso de emulsiones.
  - Mayor desgaste de los equipos de carguío, incluyendo daños en los neumáticos, los componentes eléctricos o incluso la corrosión del equipo, lo que acarrea mayores costos de mantenimiento.
  - Una pérdida general de eficiencia, que puede dar lugar a mayores costos de carguío (mineral mojado pesa más que mineral seco o con humedad residual), reducción de condiciones de tránsito por barro en las rutas y consecuente aumento de los costos por mayor mantenimiento de los accesos y rampas. En el caso de algunos tipos de mineral, un elevado contenido de humedad puede generar obstrucciones o ineficiencias en el proceso de chanchado.
  - En zonas donde la temperatura es muy baja, se puede generar congelamiento en superficie, afectando la seguridad en el tránsito de camiones y vehículos en general.



**Figura 4: Mina en Centroamérica con alta interferencia de agua en la operación de carguío.**  
Fuente: Imagen de dominio público.

- 2- **Analizar el efecto del agua en la reducción de la estabilidad de los taludes.** La presencia de agua puede provocar una pérdida de rendimiento de los taludes de la mina. La presión del agua que actúa dentro de las discontinuidades y espacios porosos de la masa rocosa reduce la tensión efectiva, con la consiguiente reducción de la resistencia al cizallamiento del macizo rocoso. Cuando este efecto es relevante para la condición de estabilidad de un talud, o bien hay que despresurizar dicho talud o diseñar con un factor de seguridad más bajo, o el ángulo de talud debe aplanarse para compensar la reducción de la resistencia del macizo rocoso. Cuando se produce un exceso de presión de agua por debajo del fondo de la mina, puede producirse hundimiento.



**Figura 5: Falla talud en mina Bringham Young en EEUU.**

Fuente: Imagen dominio público

## **5.2 Aspectos hidrogeológicos**

En los entornos mineros, el agua subterránea se moviliza principalmente a través de grietas o fisuras presentes en las rocas que conforman el yacimiento. Estas grietas y fisuras muchas veces se encuentran rellenas con materiales que pueden permitir el flujo de agua. Dependiendo de los tipos de materiales que conforman el relleno o de su grado de consolidación, la capacidad de transmisión de agua a través de estas estructuras puede caracterizarse como de alta o baja permeabilidad.

Como bien resume Espinoza (Espinoza, 2019), las discontinuidades desde el punto de vista hidrogeológico son las estructuras geológicas más importantes en acuíferos de rocas cristalinas, debido a que facilitan el flujo y el almacenamiento de fluidos en la roca por medio de fracturas, zonas de cizalla, planos de estratificación, entre otras.

Además, estas discontinuidades pueden actuar como barreras para el agua, como en el caso de algunas fallas y diques, dado que pueden impermeabilizar grandes secciones de rocas en toda su extensión (Singhal & Gupta, 2010). Pero también se puede dar que estas fallas, cuando no están rellenas o el relleno está conformado por materiales no consolidados, pueden presentar una alta permeabilidad secundaria debido a la interconexión de fracturas y, con ello, comportarse como acuíferos de buen rendimiento.

En ambos casos, el enfoque de hidrogeología minera, ha estado relacionado a estudiar la influencia que el flujo de agua a través de estas discontinuidades puede tener sobre la estabilidad de taludes, debido a la presión que el agua puede ejercer en los poros del suelo (en el caso de material granular) o dentro de las fracturas (para el caso de rocas con porosidad secundaria), lo que ha sido abordado con detalle por diversos autores como Binet (Binet, 2007) y Beale&Read (Beale & Read, 2013).

Así, la presencia de agua en minas es una cuestión operacional fundamental, ya que la presión de poros en la roca reduce la resistencia de los materiales que componen la mina, lo que puede tener un efecto negativo sobre la estabilidad de un talud. Este efecto de las aguas subterráneas en la estabilidad de taludes se puede ilustrar con la ecuación de Coulomb (1):

$$\tau = c + (\sigma n - p) \cdot \tan\varphi \quad \text{(Ecuación 1)}$$

donde

$\tau$  = resistencia al corte en una superficie de falla potencial

$p$  = presión de fluido (o la presión de poro)

$\sigma n$  = esfuerzo normal total que actúa perpendicular a la superficie de falla potencial

$\varphi$  = ángulo de fricción interna

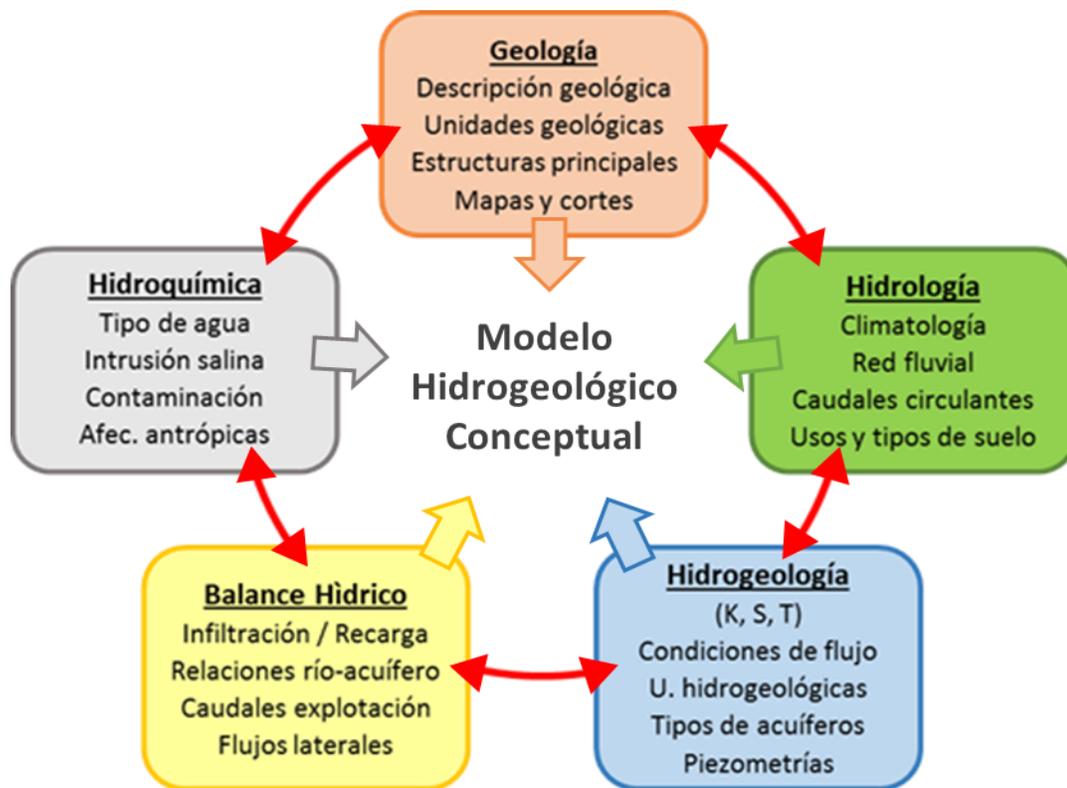
$c$  = cohesión disponible a lo largo de la superficie de falla potencial

$\sigma n - p$  = esfuerzo normal efectivo.

A partir de la Ecuación 1 se puede concluir que las aguas subterráneas pueden tener un efecto negativo en la estabilidad de un talud, debido a la presión del fluido ( $p$ ) que actúa dentro de discontinuidades y espacios de los poros contrarrestando el esfuerzo normal que actúa sobre el plano y, por lo tanto, reduce la resistencia al corte ( $\tau$ ) de la superficie.

En la actualidad, además de la modificación del diseño de un rajo, la única manera factible que existe para aumentar la resistencia del macizo rocoso y disminuir la probabilidad de deslizamientos en una mina son las campañas de despresurización, es decir, la ejecución de acciones tendientes a disminuir la presión de agua ( $p$ ) sobre los taludes. La reducción en la presión de las aguas subterráneas aumenta la tensión efectiva en la masa de la roca y, en consecuencia, aumenta la resistencia al cizallamiento (Beale et al., 2013).

Para que estas campañas sean eficaces se requiere un conocimiento profundo de las propiedades hidrogeológicas del sitio, siendo necesaria la caracterización de la geología local, la hidroquímica, hidrología, la permeabilidad de la roca, la ubicación del nivel freático y una buena comprensión del sistema estructural, así como también de la distribución vertical de la presión de poro y las tasas de carga y de descarga de agua dentro del macizo rocoso. En la Figura 6 se enumeran los elementos principales a considerar en la caracterización hidrogeológica.



**Figura 6: Elementos principales para la construcción de un modelo conceptual hidrogeológico**  
Elaboración propia

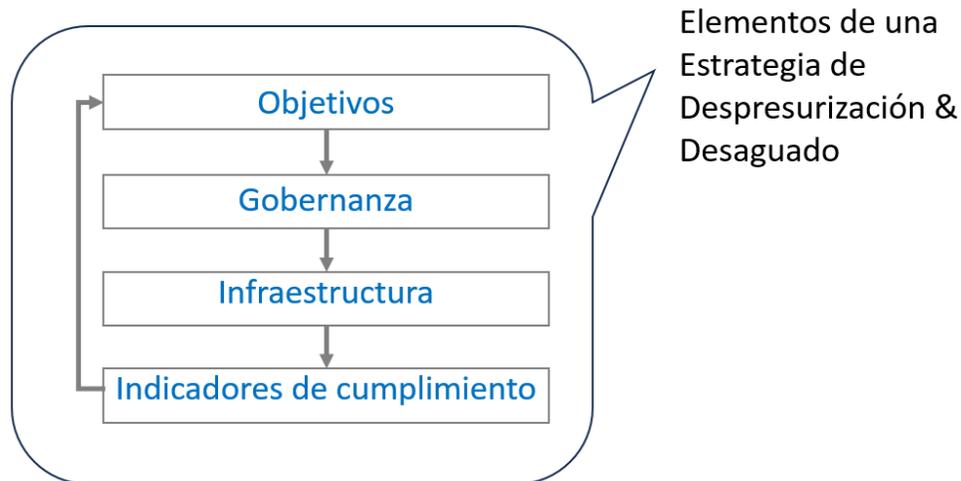
Pese a que la comprensión de la hidrogeología en las faenas mineras se ha incrementado significativamente en las últimas 2 a 3 décadas, aún persisten deficiencias en el levantamiento de información en cada sitio, ya sea por aspectos de costos, problemas operativos o también por deficiente gestión operacional, por lo que una práctica habitual -y no por ello menos efectiva- es tratar de simplificar los criterios para evaluar la forma en que se distribuye la presión de poros en minas a rajo abierto.

Históricamente, el trabajo de diseño analítico y numérico para taludes ha utilizado el nivel freático como entrada para los modelos geotécnicos, asumiendo implícitamente condiciones hidrostáticas en profundidad. Esta simplificación contrasta con la realidad del entorno minero, en especial en aquellas operaciones con programas activos de despresurización, en las que las presiones de poro se modifican en torno a pozos y galerías de drenaje, apartándose de las distribuciones esperadas en condiciones hidrostáticas (Sánchez, 2017). Sin embargo, esta simplificación se sigue utilizando dado que las faenas no implementan de manera acuciosa sistemas de medición de presiones que permitan comprender con detalle su distribución en las zonas de mayor interés para el avance y minado del rajo. Más adelante se abordarán sugerencias para abordar estas dificultades.

## 6. Elementos de una estrategia de desaguado y despresurización

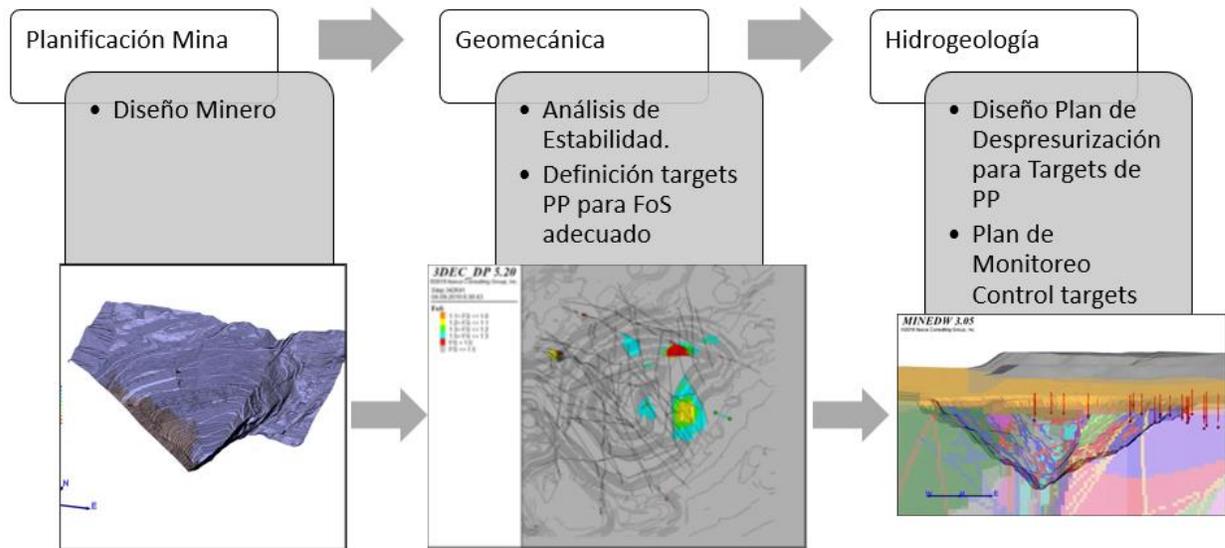
Una estrategia de despresurización y desaguado (D&D) debe considerar cuatro elementos que son básicos para su definición (Figura 7):

- Debe contener objetivos de despresurización y desaguado, o de al menos uno de ellos, que busquen resolver un problema operativo actual o que se haya proyectado que pueda ocurrir en el futuro;
- Debe contener una estructura organizacional que logre internamente gestionar las coordinaciones necesaria para su implementación;
- Debe disponer de los recursos e infraestructura para poder ejecutar in situ los programas que se definan; y finalmente,
- Debe disponer de indicadores que den cuenta del cumplimiento de los objetivos y programas de infraestructura.



**Figura 7: Elementos principales de una estrategia de desaguado**  
Elaboración propia

Se debe tener presente, que los objetivos de D&D deben ser revisados y pueden ser actualizados de forma dinámica en función de la nueva información geotécnica e hidrogeológica que se levante desde terreno o bien por modificaciones del Plan de Minado (Figura 8).



**Figura 8: Procesos en el desarrollo de un plan de D&D**

Fuente: Itasca

A continuación se describen cada uno de estos elementos y los aspectos prácticos principales que se deben considerar para cada uno.

## 6.1 Objetivos de despresurización y desaguado (D&D)

Los objetivos de D&D deben tener una mirada práctica y apuntar a resolver problemas que la operación puede tener en la actualidad o en etapas posteriores del minado. Por ello, es adecuado establecer objetivos que sean fáciles de medir y fáciles de comprender por el equipo que estará a cargo de su ejecución.

La definición específica de los objetivos dependerá finalmente de las condiciones que se den en cada faena y tendrán relación con los análisis de estabilidad geomecánica y con las condiciones operacionales en el interior de la mina. Se pueden definir de esta forma objetivos como los siguientes:

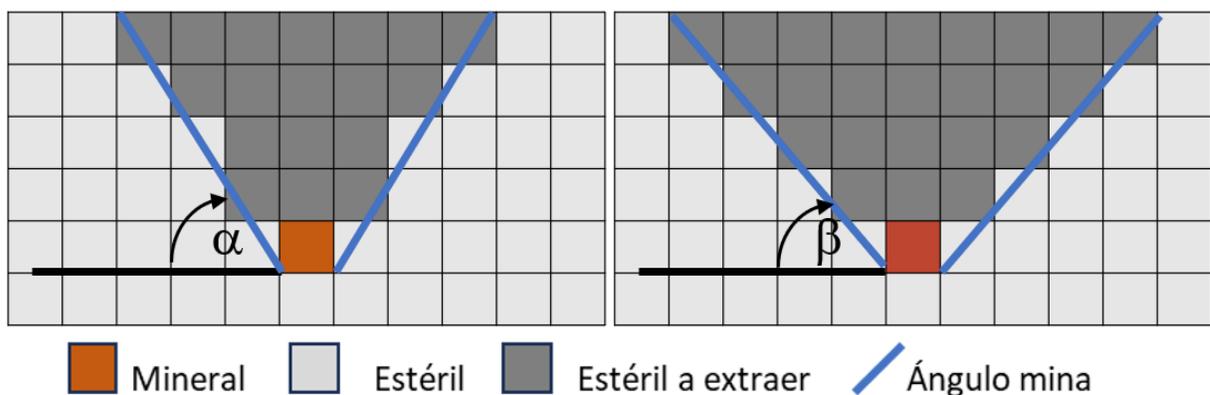
- Establecer un nivel piezométrico alejado algunos metros detrás del talud en aquellas zonas donde los análisis de estabilidad requieran disminuir la presencia de agua o presiones. Una forma simple de establecer esta distancia es, por ejemplo, considerando la altura de 1 ó 2 bancos, lo que debe ser validado con el análisis geomecánico. Se debe dejar en claro si esta referencia se mide hacia abajo o hacia atrás del talud.
- Establecer un nivel de presiones o de agua específico dentro de uno o más piezómetros o en un grupo reducido de bancos, valores que también deberán estar soportados por un análisis geomecánico.

- En el caso de que exista agua dentro de la mina (por lluvia o afloramientos subterráneos), normalmente se trata de mantener seco sectores específicos de la mina, tales como los sectores de minado actuales y los caminos o rampas de acceso.

Para establecer estos objetivos, especialmente los relacionados a generar una depresión de niveles, ya sea de manera específica en ciertos piezómetros o bancos o de manera más global en un talud completo, se deben realizar idealmente simulaciones utilizando herramientas numéricas -modelo numérico hidrogeológico- con el cual se deben evaluar alternativas de programas de despresurización, donde se pueden probar diferentes tipos de elementos, posiciones, profundidades y oportunidad de implementación, y analizar su efecto en la piezometría. Luego, cada uno de los resultados de estas simulaciones, deberá ser revisado en el modelo geomecánico para evaluar su efecto sobre los factores de seguridad.

En términos muy simples, el diseño de la excavación de un rajo tiene como objetivo extraer el mineral presente en profundidad con la menor extracción posible de material que no es mineral (estéril). Dentro de este proceso de optimización, uno de los parámetros clave es el ángulo del talud, que depende de las características mecánicas del macizo y de los esfuerzos a los que será sometido. Si el macizo tiene baja resistencia y además está sometido a presiones adicionales por presencia de agua (de acuerdo a lo representado previamente por la Ecuación 1), la resistencia general disminuye y el macizo puede hacerse inestable. Si no se elimina la presencia de agua, se debe disminuir el ángulo del talud (aplanándolo) con el consecuente aumento del material estéril que se debe extraer y, por lo tanto, el costo de operación del rajo puede aumentar drásticamente.

En la Figura 9 se muestra un ejemplo del exceso de material estéril que debe ser extraído desde una mina a rajo abierto para ir a buscar el mineral dispuesto en profundidad considerando dos ángulos globales de la mina  $\alpha > \beta$ . En el primer caso, el material estéril a movilizar es de 18 unidades, mientras que en el segundo caso, con un ángulo  $\beta$  más recostado que el ángulo  $\alpha$ , se deben movilizar 24 unidades, para poder extraer la misma unidad de mineral.



**Figura 9: Esquema extracción de estéril en función del ángulo global del rajo**  
Elaboración propia

Dado lo anterior, en el caso que el Plan de Minado esté de alguna forma condicionado por la presencia de presiones de poro sobre los taludes, la operación minera debe ejecutar acciones que permitan disminuir los niveles de agua que generan esta presión. Sin embargo, dado el dinamismo del proceso de extracción de mineral, cuando la implementación de estas acciones se requiere con mayor urgencia no siempre se dispone de los espacios y tiempos necesarios para implementar acciones en los sectores donde parece ser más prioritario, optando en muchos casos con posiciones alternativas que pueden ser menos efectivas y en algunos casos incluso no se puede acceder a la zona de interés por estar ya comprometida por aspectos de estabilidad del talud.

En efecto, el tiempo que se requiere para generar cierto de nivel de desaguado en un punto dado, estará condicionado por las características hidráulicas del medio y será mayor en la medida que el punto de desaguado se encuentre más alejado de la zona de interés (Ecuación 2).

$$\Delta h(x,t) = \Delta h_o \operatorname{erfc} \left( \frac{4Kt}{S_s x^2} \right)^{-1/2} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

$\Delta h$  = descenso que se quiere generar

K = conductividad hidráulica

$S_s$  = almacenamiento específico

t = tiempo

x = distancia del punto de desaguado

Fuente: Itasca

Así, es relevante tener en consideración que el flujo de agua subterránea por el suelo se mueve en general a velocidades muy bajas, por lo tanto, el efecto que se requiere generar sobre un talud o sobre una pared completa de un rajo es un proceso que puede tardar desde algunas semanas hasta meses e incluso años en función del punto de interés. Esta consideración es muy relevante en cuanto a que la planificación minera debe considerar estos tiempos para evaluar si es efectiva la medida que se quiere implementar, lo que normalmente puede ser evaluado de manera más integral a través de modelos hidrogeológicos tipo 3D (y con una menor precisión a través de modelos 2D).



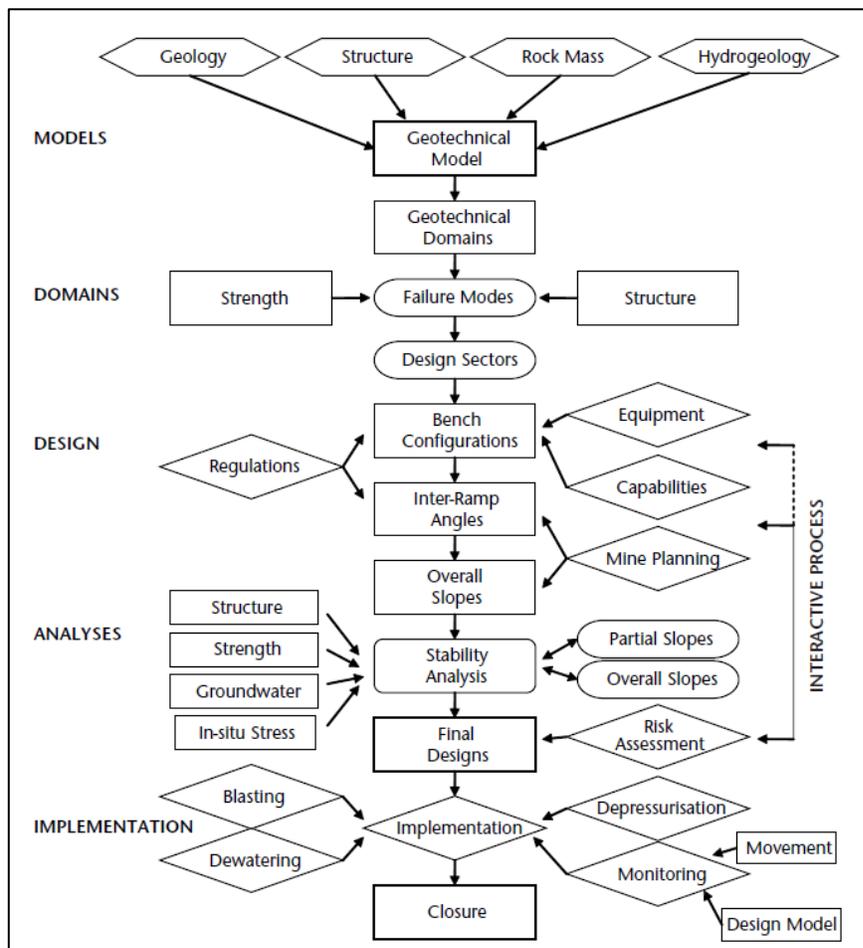
**Fotografía 1: Sector con afloramientos de agua subterránea donde ya no es posible ingresar maquinaria de perforación por compromiso de estabilidad del talud (mina en el norte de Chile).**

Elaboración propia

## **6.2 Gobernanza del agua mina**

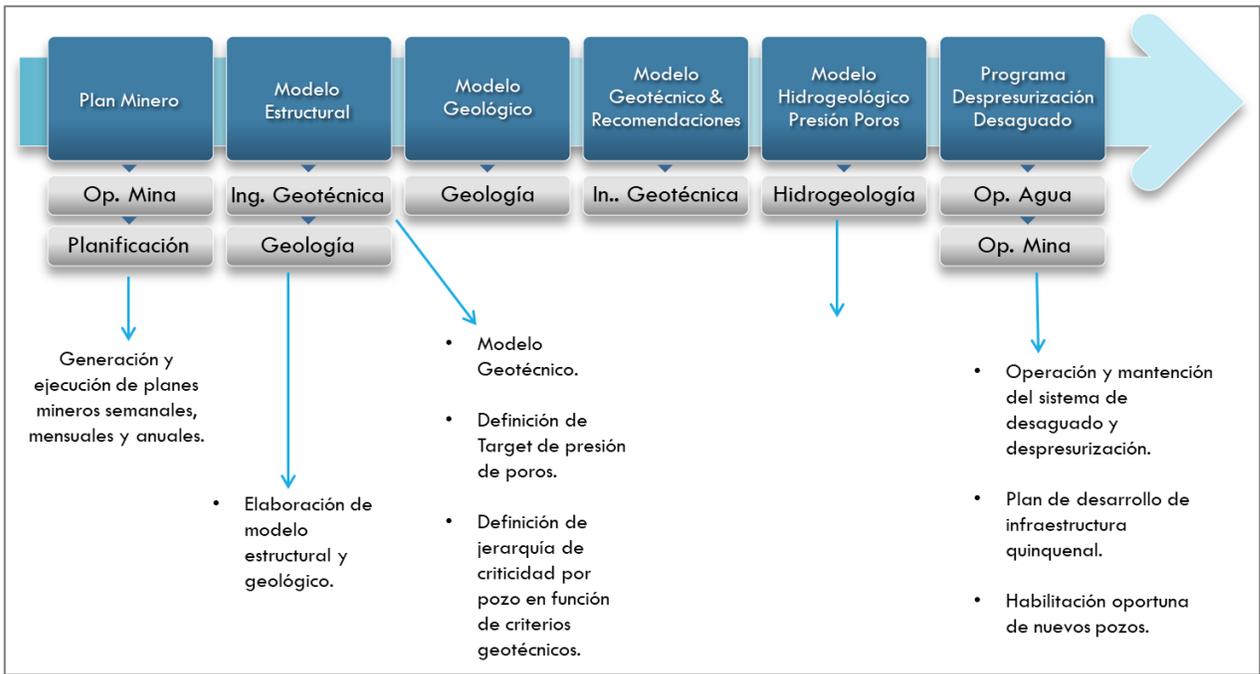
Las estrategias de D&D de las compañías mineras actuales normalmente están asociadas a equipos multidisciplinarios de especialistas donde los requerimientos de información son canalizados desde los equipos de planificación minera hacia los equipos de geotecnia e hidrogeología mina para analizar en cada ciclo de planificación, normalmente anual, la estabilidad de los diseños del minado para el año en curso (denominado “*Budget*”), para el quinquenio (o *Five Year Plan -5YP-*) y para el largo plazo o vida de la mina, denominado normalmente en la industria como LOM (*Life of Mine*) o LOA (*Life of Asset*).

En la Figura 10 se esquematiza el flujo de información que ocurre durante un ciclo de planificación anual y que es alimentado por especialistas de diferentes disciplinas, que a partir de la data recogida en terreno y que luego es interpretada mediante modelos, es utilizada por los equipos de planificación para diseñar el nuevo plan minero donde se detallan las características de los taludes y diseños operativos para el carguío del material minado. Posteriormente, este plan es verificado desde un punto de vista de su estabilidad y luego es implementado en terreno, desde donde nuevamente se obtiene información para comenzar un nuevo ciclo.



**Figura 10: Proceso recomendado de diseño de taludes en rajes abiertos**  
(Read & Stacey, 2009)

Para que este ciclo anual ocurra de manera fluida, la organización debe tomar decisiones respecto de la interacción entre los equipos de trabajo y en específico respecto de las fechas en las que debe ocurrir cada etapa del proceso, dada la secuencialidad de los análisis (Figura 11). Dada esta condición, no es extraño encontrarse con análisis de estabilidad que son alimentados con modelos que han sido elaborados incluso en años previos, debido a que no es factible en muchos casos trabajar todos los modelos en paralelo. Esta situación obliga a que los resultados de la estabilidad que se presentan a la organización deban ser de todas formas revisados conceptualmente por los distintos especialistas por si existiese algún supuesto importante que la nueva información de terreno que se haya levantado entre la construcción de los modelos de base y el análisis final de estabilidad, no se valide y, por lo tanto, pudiese representar un riesgo no previsto para la integridad de la mina y la seguridad de las personas y equipos que en ella operan.



**Figura 11: Secuencia usual de incorporación de información en la construcción de los planes de minado.**

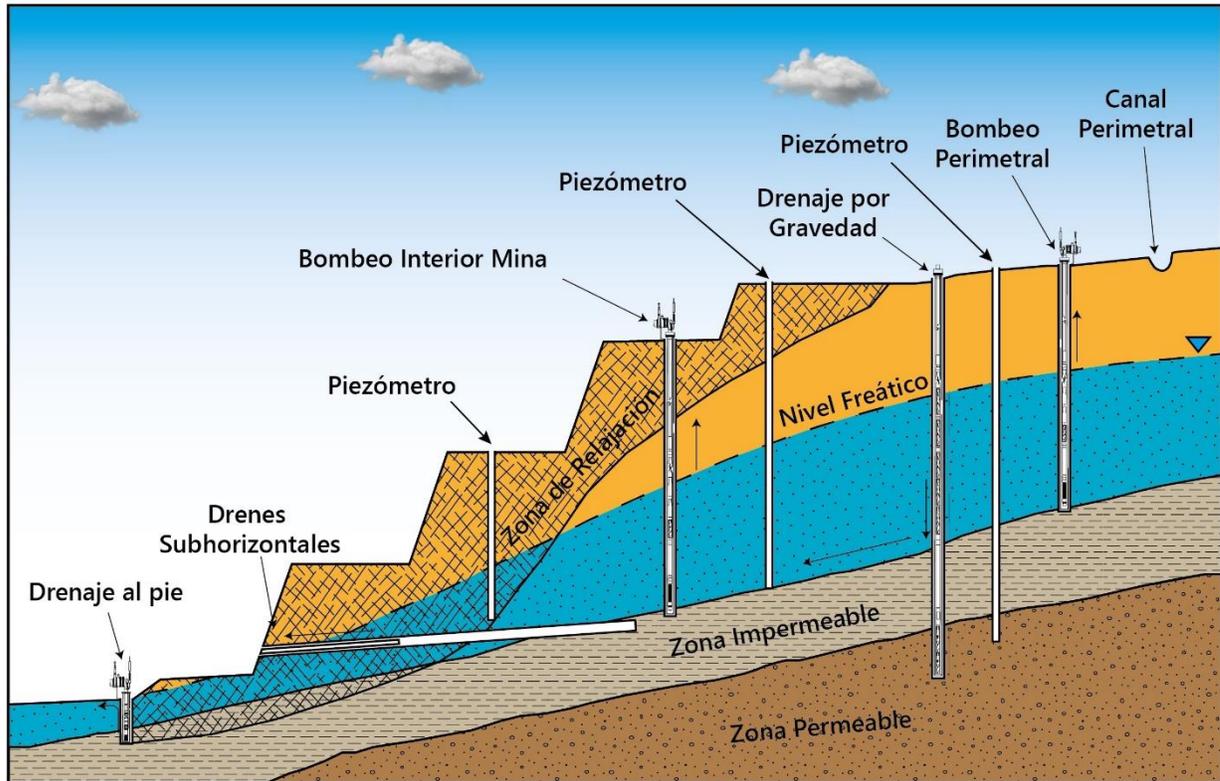
Elaboración propia

Otro aspecto importante que debe ser abordado en las organizaciones tiene relación con las relaciones de servicio entre las áreas técnicas que manejan los principales contratos con empresas externas, ya sea de proveedores o de contratistas, y aquellas áreas que se transforman en clientes internos de las primeras. Un ejemplo muy recurrente tiene que ver con los contratos de perforación de pozos, donde es usual que los equipos de exploración minera (área de geología) sean los que disponen de los contratos de perforación, mientras que las áreas de hidrogeología o geotecnia son áreas que deben solicitar servicios a ésta última como clientes internos. Cuando la organización no tiene bien definidas las metas o los incentivos para que esta relación de servicio se ejecute de manera correcta, es muy probable que el cumplimiento de los planes de perforación geológicos o mineros será privilegiado respecto de las otras áreas de las geociencias, con la consecuente pérdida de información o de oportunidades para la implementación de planes de monitoreo y despresurización.

De igual forma, los procesos de construcción de los presupuestos anuales y quinquenales, deben ser alimentados de la misma forma y debe haber consistencia entre las distintas áreas relacionadas. Para el caso de desagado, por ejemplo, debe haber consistencia entre las estimaciones de flujo requerido para despresurizar, la cantidad de pozos que se debe construir, la cantidad de máquinas y materiales que se requieren para perforar, la cantidad de infraestructura que se requiere para portear el agua fuera de la mina (*piping* y energía) y se debe validar disponer de los accesos y espacios para implementar toda la infraestructura requerida, entre otros.

### 6.3 Infraestructura

Como se ha indicado previamente, entre los principales tipos de infraestructuras que se utilizan para realizar las acciones de desagüe o despresurización de rajos están los drenes, pozos de bombeo, galerías o túneles, zanjas y canales perimetrales. En la Figura 12 se muestra un esquema general con la disposición de algunos de ellos en un perfil de talud.



**Figura 12: Esquema de elementos utilizados para desagüe y despresurización.**  
Elaboración propia

La infraestructura que se utiliza para el manejo de agua de mina podría diferenciar en ciertos casos el manejo de las aguas exteriores al rajo, es decir agua no contactada, y las aguas interiores al pit, normalmente contactadas. En ambos casos, las obras o infraestructura que se requiere para su manejo corresponden principalmente a:

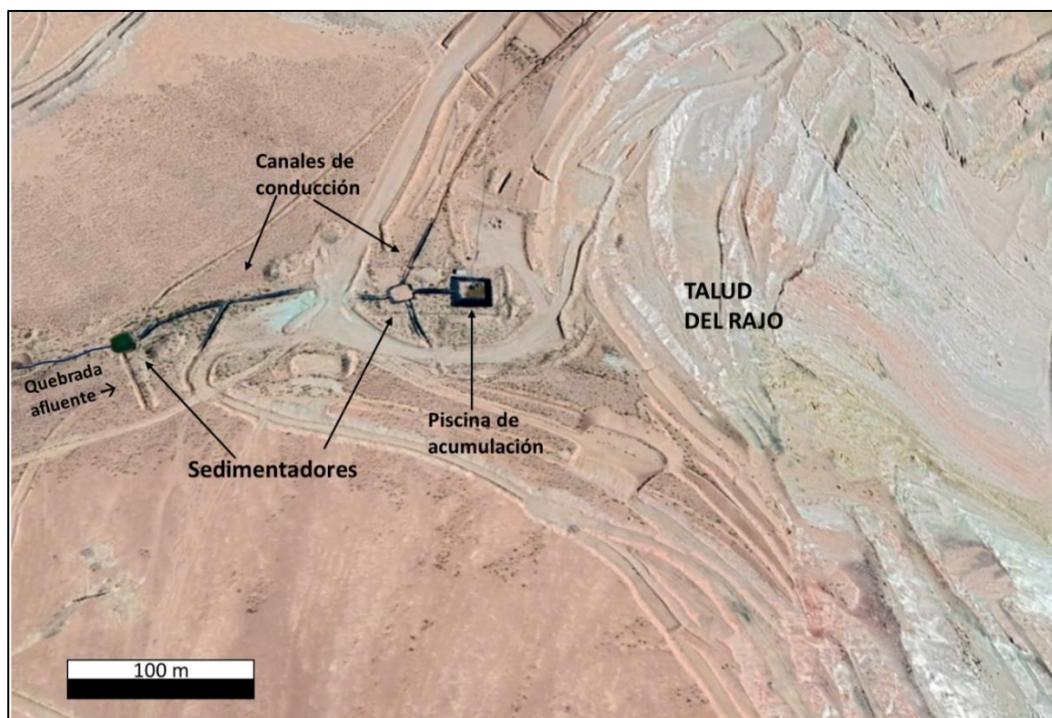
- Sistemas exteriores a la explotación (o sistemas “outpit”): acá se utilizan usualmente desvíos de cauces o quebradas, zanjas de drenaje, pozos de bombeo y galerías de drenaje.
- Sistemas interiores a la explotación (o sistemas “inpit”): acá se pueden considerar elementos de diseño del minado como el ángulo de inclinación de bermas y también infraestructura como drenes horizontales, pozos de bombeo y piscinas para acumular el agua en ciertos puntos.

- **Sistemas de monitoreo:** para poder hacer seguimiento a la efectividad de la operación de los sistemas de D&D es necesario implementar sistemas de monitoreo y control. En el caso de las aguas superficiales se requiere la implementación de sistemas de control de caudal, mientras que para el caso de las aguas subterráneas es importante contar con un red piezómetros distribuida por todos los sectores de la mina para el monitoreo de niveles o presiones, así como también registro del caudal evacuado por los drenes, el que es bombeado desde cada pozo y de aquellos bombeados desde los sumideros y fondo de mina.

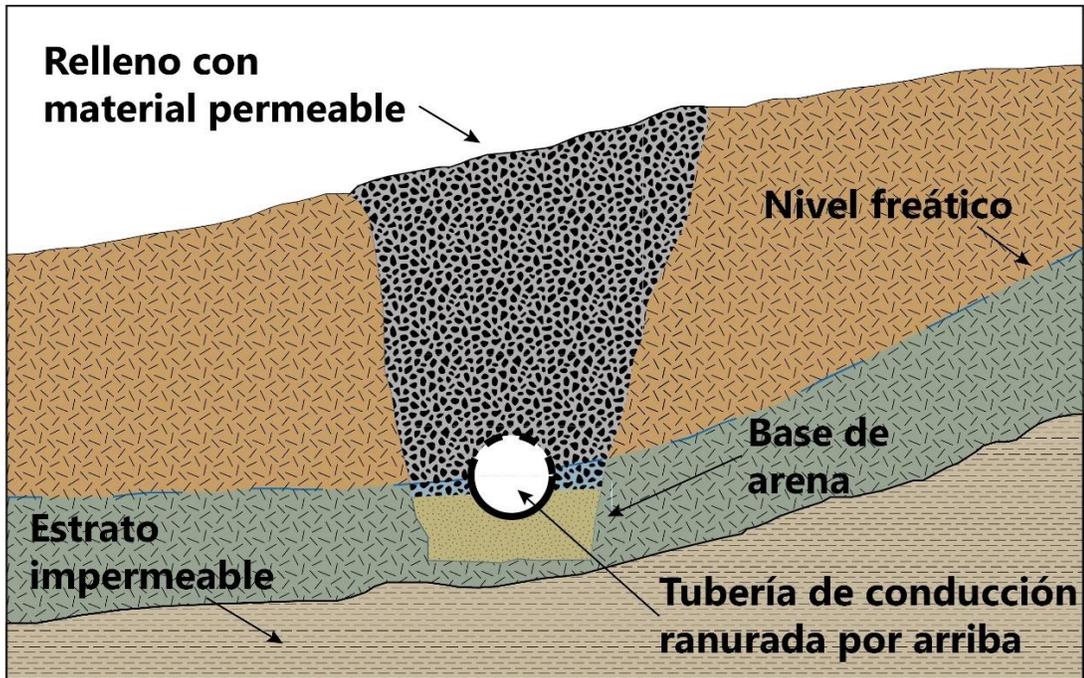
A continuación se describen los elementos principales de cada tipo de sistema:

### 6.3.1 Desvío de cauces, canales perimetrales y zanjas.

Como su nombre lo indica, se refiere a obras hidráulicas que permiten desviar las escorrentías que fluyen por cauces que son afluentes al área de explotación para conducirla mediante canales o tuberías hasta su vertido en partes alejadas a la mina. En aquellos casos donde las escorrentías son menores, alternativamente pueden disponerse obras de acumulación de agua, la que luego puede ser conducida (incluso bombeada) hacia otros puntos, como se muestra en la Figura 13 o zanjas impermeabilizadas que conduzcan el agua hacia sectores fuera de la mina (Figura 14 y Figura 15).



**Figura 13: Ejemplo de desvío de cauce con obra de acumulación en borde de un rajo.**  
Imagen Google Earth.



**Figura 14: Esquema de construcción de zanja**  
Elaboración propia



**Figura 15: Ejemplo de desvío de escorrentías superficiales mediante canal perimetral en el borde de un rajo.**  
Elaboración propia

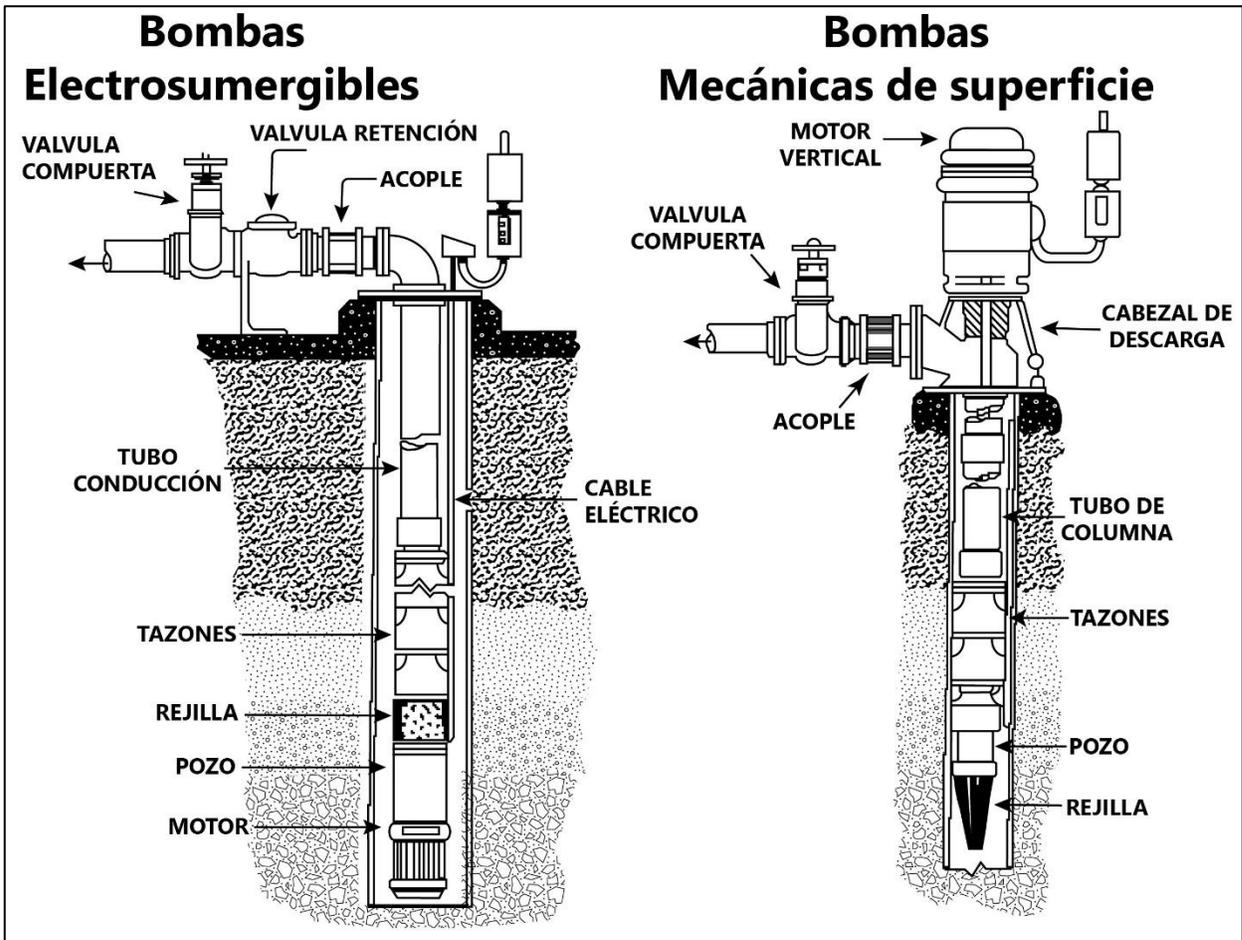
### 6.3.2 Pozos de bombeo

Actualmente es la infraestructura principal para la ejecución de las actividades de despresurización. Dado su alto costo (que dependiendo del lugar geográfico podría estar del orden de 1200 a 1500 US\$/m), su diseño debe ser adecuado para poder operar durante mucho tiempo. Como parte del diseño no sólo se debe definir su profundidad, sino que también elementos clave para capturar la mayor cantidad de información hidrogeológica y para evitar su colapso mientras se construye. Como se recomienda en (FCIHS, 2009), se debe considerar, entre otros:

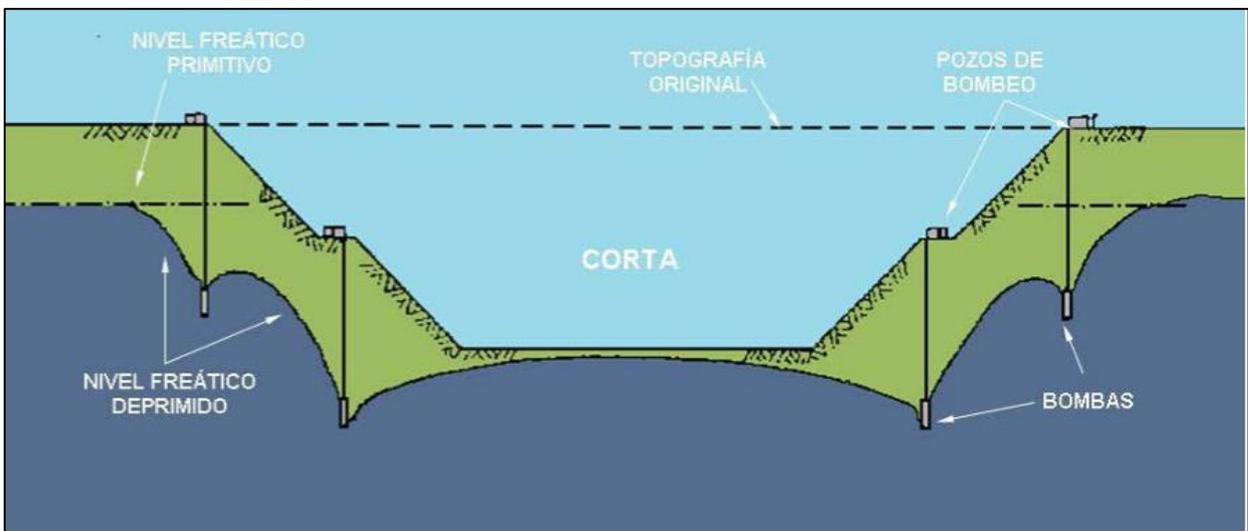
- Elección del método de perforación
- Definición de los diámetros de perforación
- Tipo de fluido de perforación
- Controles y ensayos para realizar durante la perforación
- Plan de prevención y seguridad de las operaciones

En general, los pozos de bombeo se implementan con bombas del tipo electrosumergible (donde el conjunto motor bomba se baja dentro del pozo) o con bombas mecánicas (donde el motor queda instalado en superficie). En general los equipos electrosumergibles permiten bombear en pozos más profundos, no obstante pueden tener limitaciones en aguas con alta temperatura (mayor a 40-50°), donde las bombas mecánicas tienen mejor desempeño porque el motor se puede enfriar de manera independiente en el exterior.

En la Figura 16 se presenta un esquema general de un pozo de bombeo con ambos sistemas de bomba. En la Figura 17 se muestra un esquema típico del efecto esperado de descenso en el acuífero al operar un sistema de pozos.



**Figura 16: Esquemas tradicionales de pozo de bombeo con bomba electrosumergible (izquierda) y bomba de superficie (derecha).**  
Elaboración propia



**Figura 17: Efecto esperado al operar pozos de bombeo.**  
Fuente: (Herrera, 2019)  
Elaboración propia

### 6.3.3 Drenes

Los drenes horizontales, en general son las estructuras más utilizadas para reducir la presión de poros en los taludes de las minas cuando el exceso de presión no ha sido posible controlarlo con sistemas de drenaje mediante pozos o bien se ha definido no utilizar pozos. Estos drenes, en general funcionan bien en acuíferos libres y en acuíferos confinados donde exista una carga piezométrica significativa. En la Figura 18 se observa un esquema con el diseño y características de un dren horizontal. Es usual que se aproveche la posición de un dren horizontal para perforar abanicos de drenes a distintos ángulos. En la Figura 19 se muestra la implementación en terreno de un set de drenes donde el primero ya está operativo y un segundo en perforación.

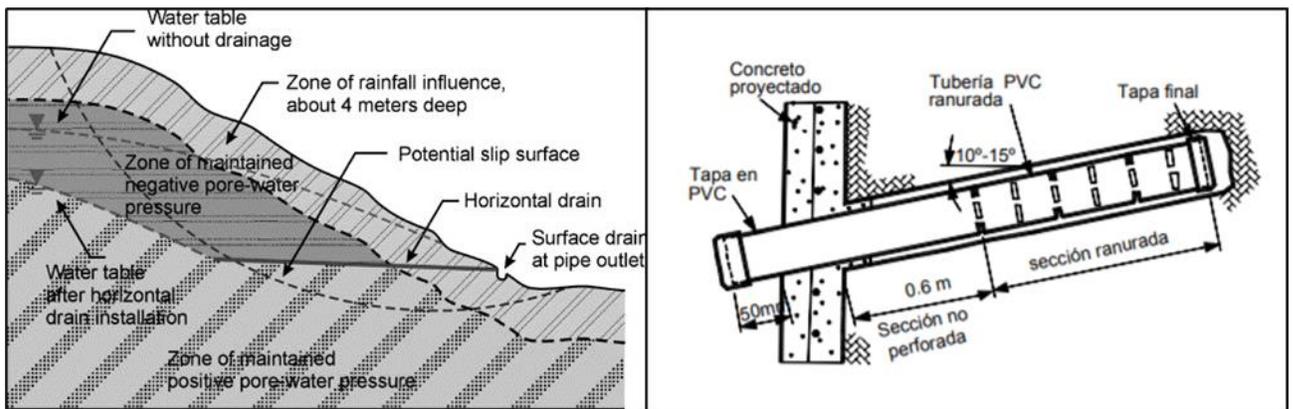


Figura 18: Esquema de drenaje horizontal.

Fuente: (Rahardjo. H., 2003)

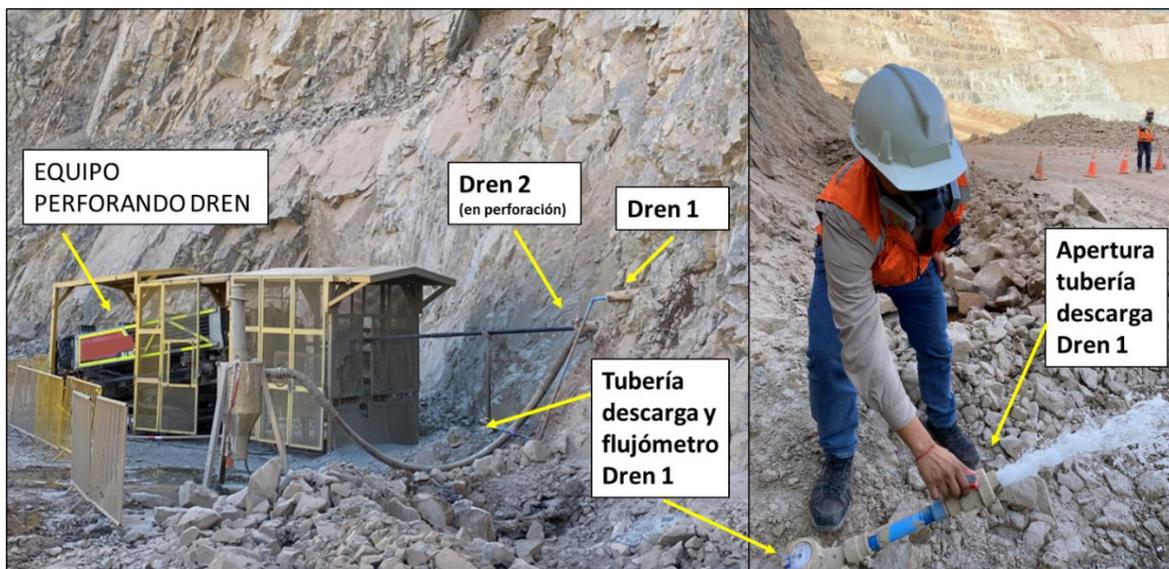
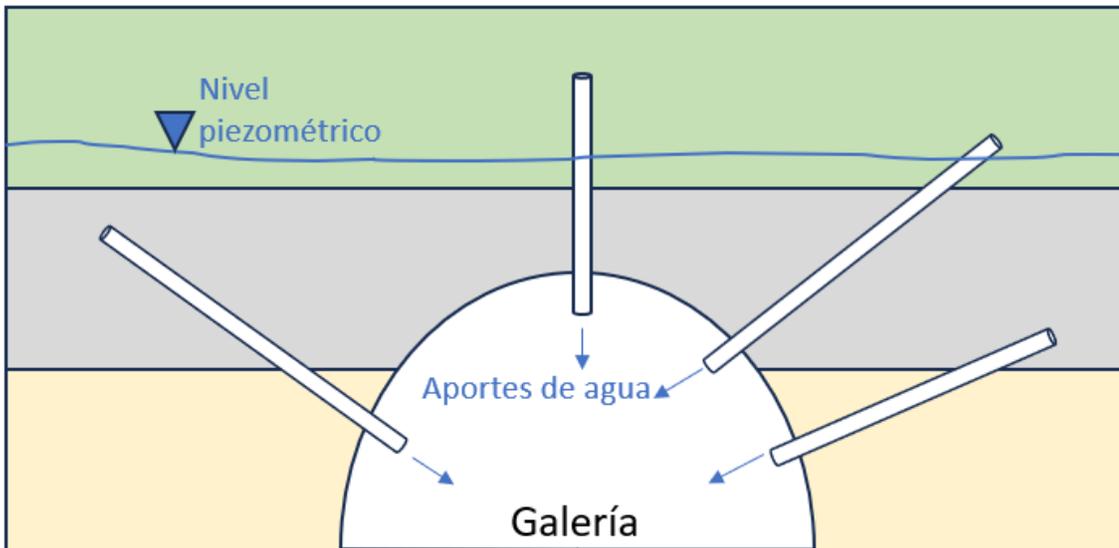


Figura 19: Ejemplo set de 2 drenes horizontales en una misma posición de perforación en mina en el norte de Chile.

Elaboración propia

### 6.3.4 Galerías

Consiste en la apertura de labores de avance subterráneo en el interior del macizo que se desea drenar, preferentemente paralelo al talud y por debajo de la superficie de explotación. Generalmente, se construyen perforaciones o drenes (a veces también denominados barrenos o taladros) en forma de abanico (Figura 20) con el objetivo de cortar niveles impermeables y acceder a las zonas de mayor aporte de agua. En la Figura 21 se muestra un ejemplo de aportes de agua por medio de drenes en galerías.



**Figura 20: Disposición típica de drenes dentro de una galería de drenaje**  
Elaboración propia



**Figura 21: Ejemplo de drenajes a través de perforaciones dentro de una galería**  
Elaboración propia

### **6.3.5 Piezómetros para monitoreo**

Los piezómetros son esenciales para poder hacer seguimiento al comportamiento de las aguas subterráneas y de su efecto como presión de poro sobre los taludes de un rajo. La disposición de piezómetros en distintos lugares de una mina es la única forma de poder caracterizar el comportamiento hidráulico de las distintas unidades hidrogeológicas que se identifiquen, así como también evaluar el efecto global de los sistemas de despresurización que se implementan.

Como sondaje que son, durante la perforación de los piezómetros es posible obtener valiosa información del sitio como la litología del suelo, ubicación del nivel de agua, parámetros hidráulicos de diferentes unidades de suelo mediante la ejecución de pruebas hidráulicas o indirectamente a través de datos de la perforación como la dilución de lodos, muestras de calidad de agua, tasa de perforación, entre otros.

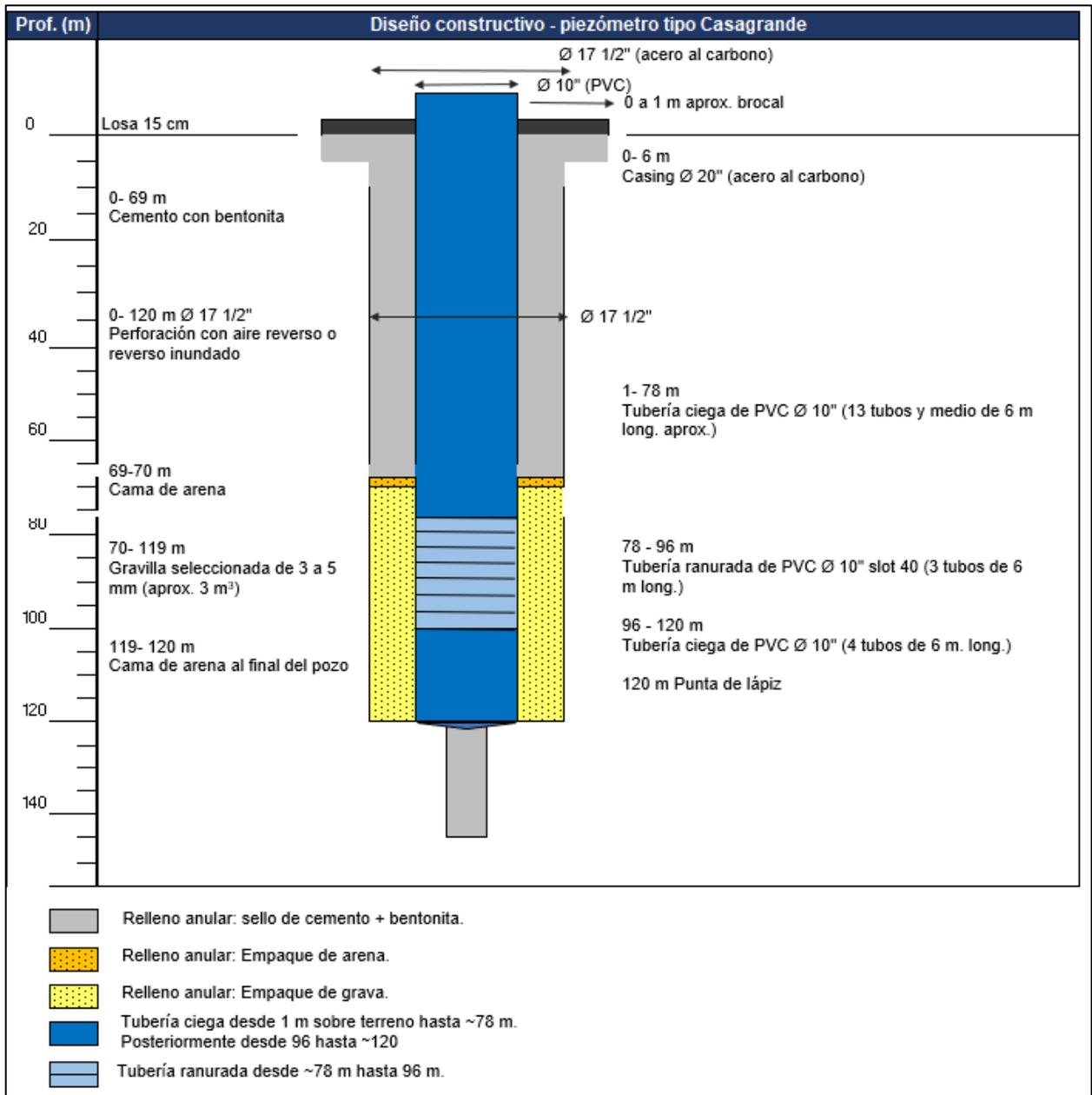
A partir de estos datos es posible representar el sistema hidrogeológico y su influencia en una operación minera mediante modelos hidrogeológicos conceptuales y numéricos.

Existen fundamentalmente dos tipos de piezómetros, los tipo Casagrande y los tipo Cuerda Vibrantes, los que se describen a continuación.

#### **i. Piezómetros Casagrande**

Llamado también piezómetro de tubo abierto; consiste en tubo abierto con un extremo perforado y protegido con un material poroso que se introduce en una perforación en el suelo que llega por debajo del nivel del agua subterránea. El nivel del agua se mide mediante una sonda fija o mediante un pozómetro. Estos piezómetros son adecuados para medir la presión de poros en terrenos de baja y media permeabilidad.

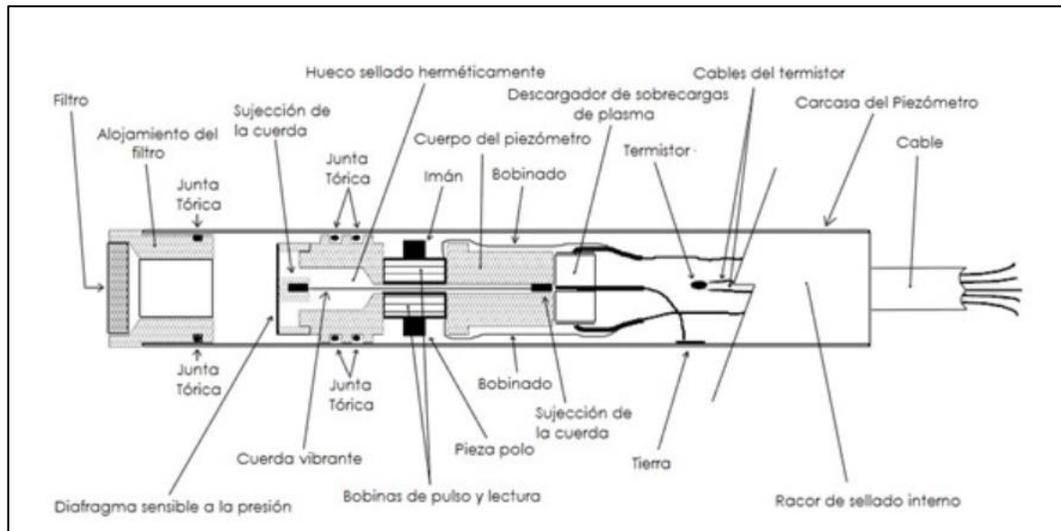
En la Figura 22 se observa un esquema de un piezómetro Casagrande, en donde se indican sus partes principales. Cuando se tiene evidencia del comportamiento hidráulico diferenciado de las distintas unidades de suelo en profundidad, es adecuado implementar piezómetros independientes cuyas zona de captación estén ubicadas de manera diferenciada en función de la unidad que se quiere caracterizar.



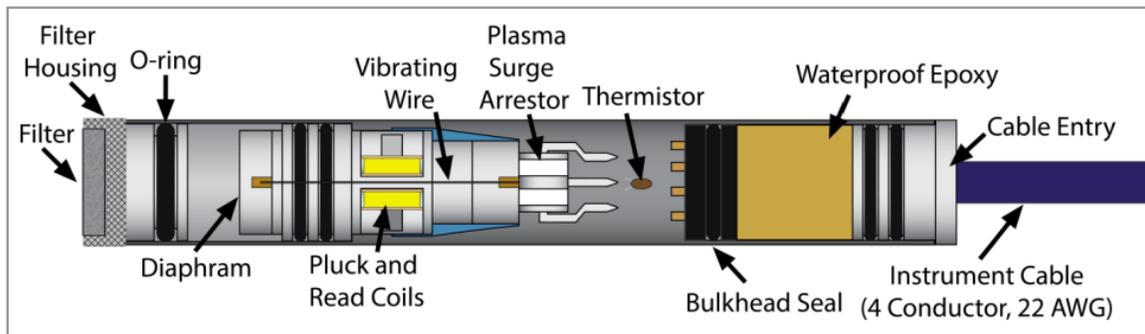
**Figura 22 Esquema de diseño de piezómetro Casagrande**  
Elaboración propia

## ii. Piezómetros de cuerda vibrante

Es un transductor de presión, diseñado para mediciones remotas del nivel piezométrico y de presión de poros en sondeos durante largos periodos de tiempo. La señal de salida es una señal de frecuencia, no afectada por la impedancia de línea y la resistencia de contacto, lo que permite la transmisión a través de distancias largas. En la Figura 23, se presenta un esquema de un piezómetro de cuerda vibrante, mientras que en la Figura 24 se muestra un ejemplo de un sensor de marca Geokon que es bastante utilizado en la industria. Por su parte, en la Figura 25 se muestra un esquema de diseño real de un multipiezómetro implementado con 2 sensores de cuerda vibrante.



**Figura 23: Esquema general de piezómetro de cuerda vibrante**  
Fuente: Ingeoexpert



**Figura 24: Esquema específico sensor marca Geokon Modelo 4500S**  
Fuente: [www.geokon.com](http://www.geokon.com)

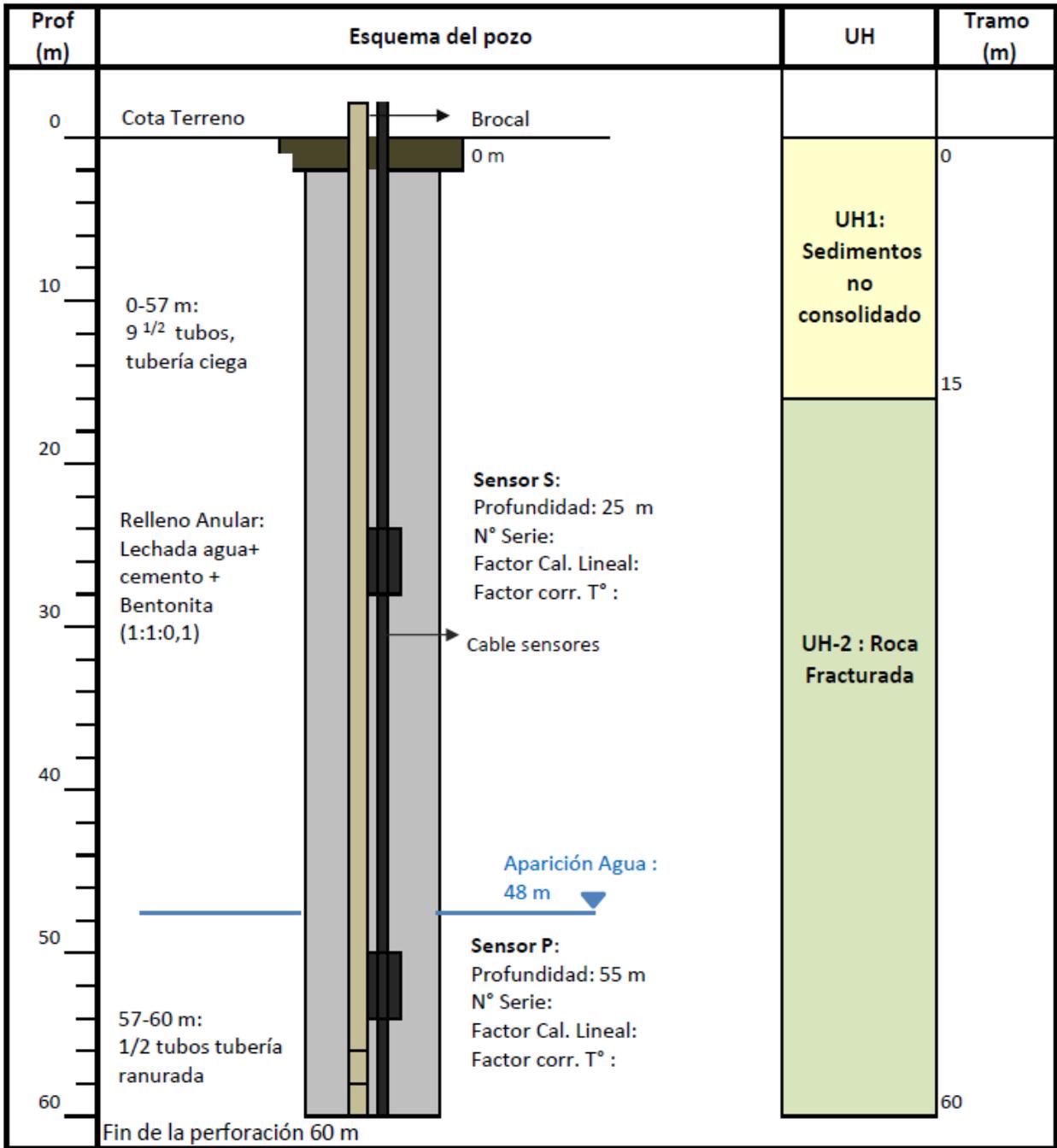


Figura 25: Ejemplo de piezómetro de cuerda vibrante diseñado con un sensor en la zona saturada y otro en la zona no saturada del acuífero.

Elaboración propia

### 6.3.6 Infraestructura hidráulica de los sistemas de D&D

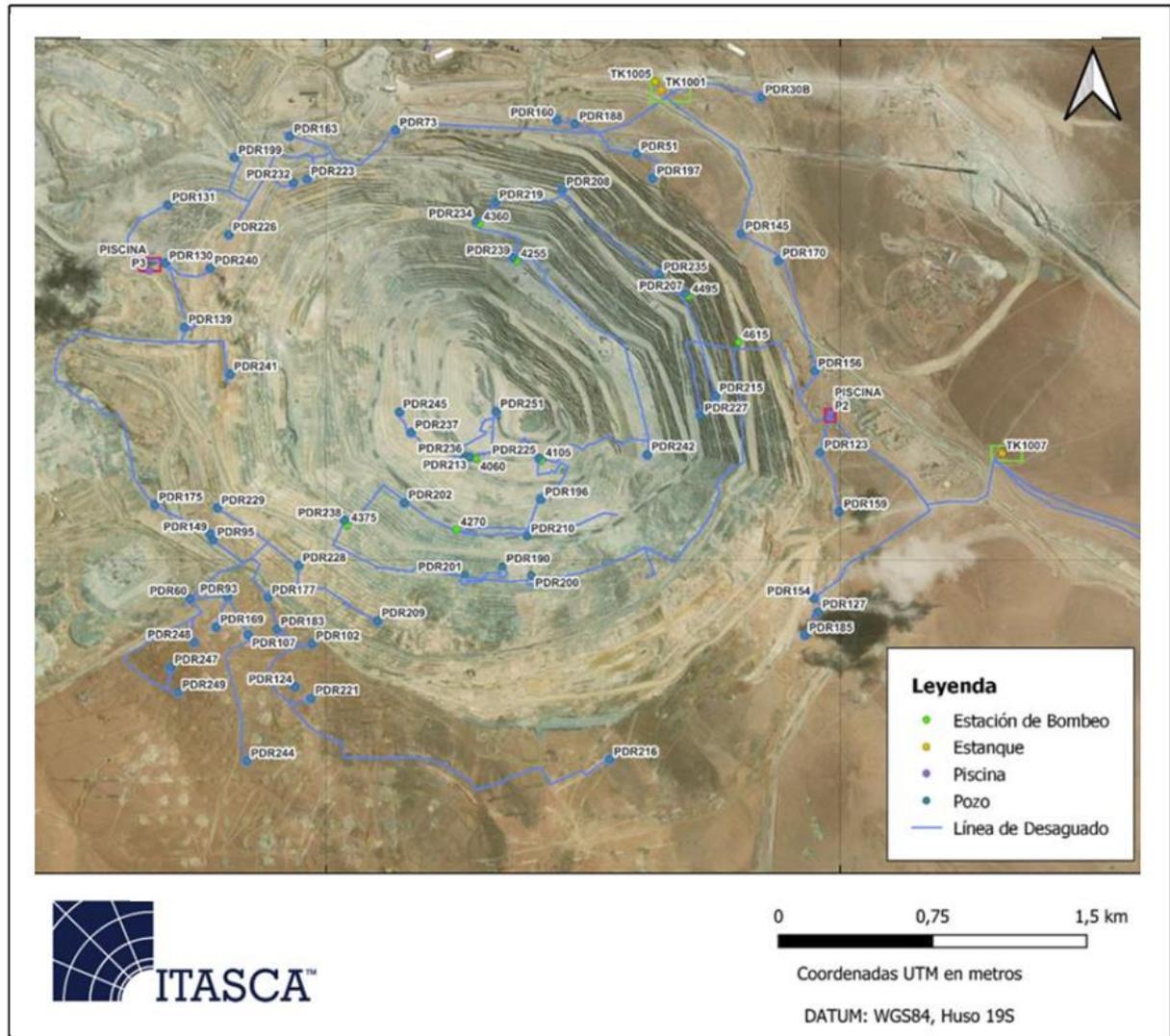
El agua desde los pozos de bombeo y galerías debe ser movilizada con algún sistema hidráulico mediante bombeos, estanques y el *piping* correspondiente. Esta infraestructura en muchos casos puede tener un tamaño importante y gran cantidad de elementos, requiriéndose su implementación mediante estudios de ingeniería que soporten un buen desempeño de los equipos y que permita portear toda el agua colectada en el rajo, considerando siempre una holgura que le permita incorporar aumentos de caudal en la medida que el modelo hidrogeológico indique que puede haber mayores flujos conforme avanza el minado o bien para afrontar aumentos estacionales en caso de lluvias o deshielos.

Muy relevante es considerar que la infraestructura hidráulica de un sistema de D&D debe adaptarse permanentemente a los cambios que ocurren dentro de la mina debido a la ejecución propiamente tal del plan minero, por lo que todos los equipos (o al menos en su mayoría) deben diseñarse pensando en su movilidad o bien deben estar ubicados en puntos donde puedan permanecer muchos años sin ser modificados. Debido a esto, es usual (y no necesariamente recomendable) que las instalaciones al interior de la mina sean de un estándar menor que las que están en el exterior, que normalmente pueden durar más años. En la Figura 26 se muestra un ejemplo de piscina de acumulación de agua desde sistema de drenes en el interior de un rajo.



**Figura 26: Imagen con piscina interior mina que recibe aportes de flujos desde drenes.**  
Elaboración propia

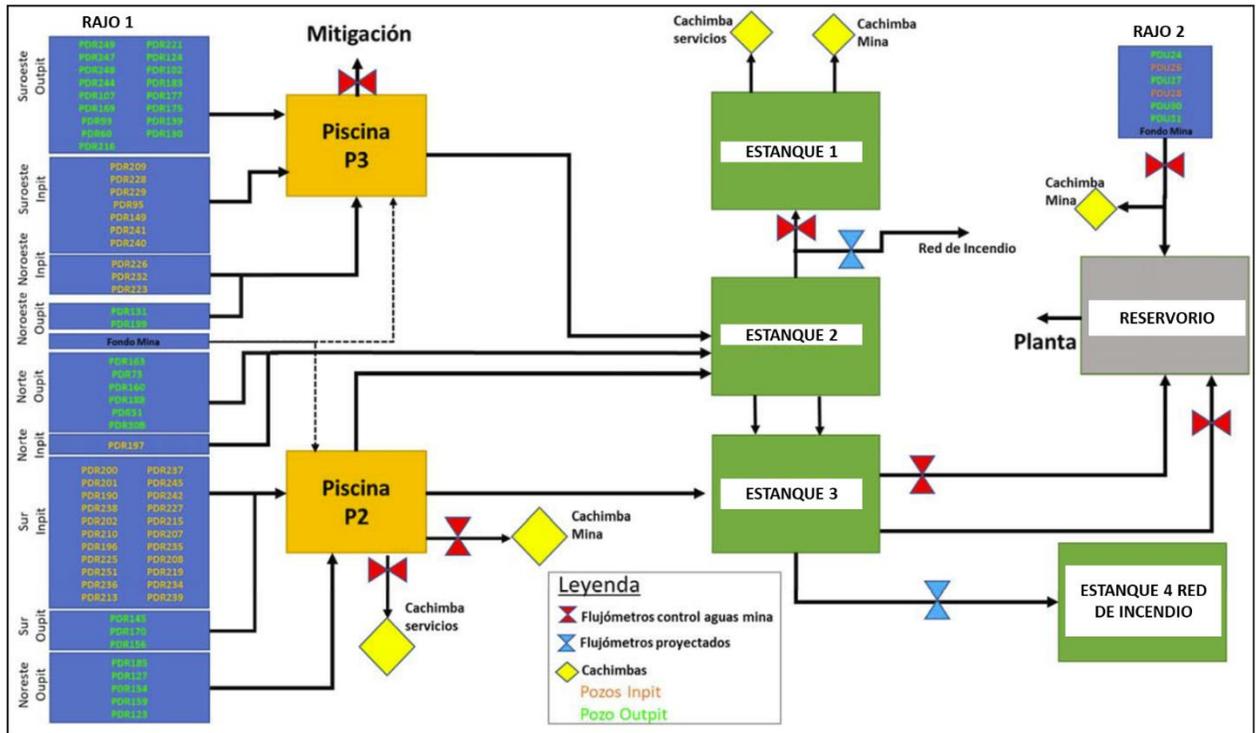
En la Figura 27 se muestra como ejemplo la red hidráulica que permite satisfacer los requerimientos de desaguado de un rajo ubicado en el norte de Chile. Se puede observar claramente que esta operación cuenta con un sistema de desaguado perimetral (outpit) y un sistema interior mina (inpit) y que además cuenta con estanques, piscinas e infraestructura complementaria.



**Figura 27: Plano con infraestructura hidráulica principal del sistema de desaguado de un rajo en norte de Chile**

Fuente: Itasca

Por su parte, en la Figura 28, se puede ver un esquema de la filosofía de operación del mismo sistema de desaguado anterior, donde se aprecia el diagrama de flujos y algunos puntos que permiten cuantificar los flujos de desaguado, así como también se identifican puntos de consumo para satisfacer requerimientos hídricos interiores de la mina para el control de polvo, lavado de camiones, red de incendio, entre otros.



**Figura 28: Esquema con filosofía de funcionamiento del sistema de desaguado de un rajo en norte de Chile**  
Fuente:Itasca

Los elementos de cuantificación del flujo de desaguado son fundamentales para la gestión del agua de mina y entre más detalle se logre del caudal de cada dren, pozo o al menos de cada sector de la mina, mejor podrán caracterizarse y modelarse para poder proyectar escenarios futuros con menor incertidumbre en las simulaciones.

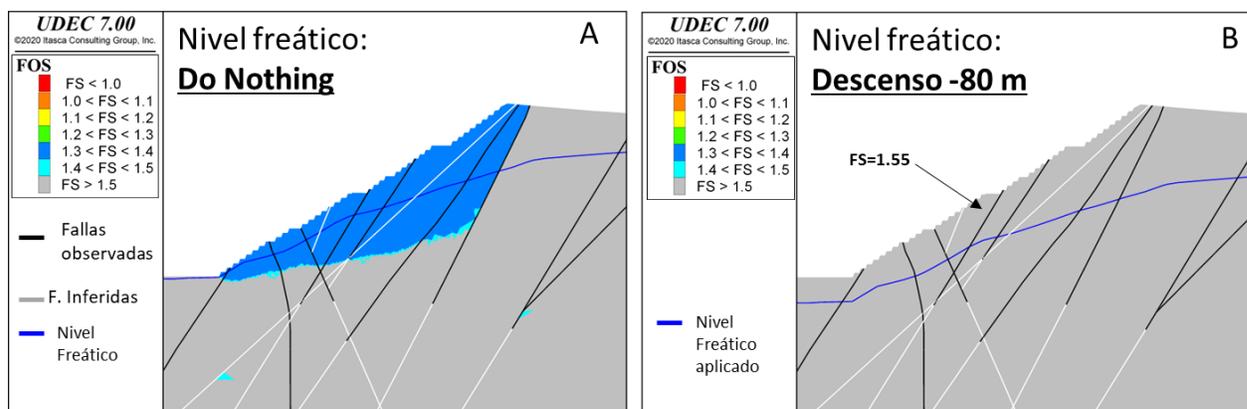
Respecto a esto último, la Dirección General de Aguas, con un foco puesto en la sustentabilidad de los acuíferos y para descartar y/o analizar el potencial efecto de los sistemas de desaguado en los usuarios ubicados en el entorno de faenas mineras, recientemente dispuso de la obligatoriedad de las empresas mineras de informar los caudales de desaguado que se extraen bajo el concepto de “aguas del minero” (DGA, 2022), lo que ha obligado a los titulares mineros a avanzar en esta mejora operacional.

## 7. Establecimiento de objetivos de despresurización y/o desaguado.

Los objetivos de despresurización y desaguado (usualmente denominados como “*target*” en la industria) deben ser abordados en función de las dificultades que pueda generar el agua o la presión de poros en la operación del rajo tanto para la situación actual como para el crecimiento proyectado de la mina.

Dado lo anterior, la definición de los objetivos debe tener como meta alcanzar presiones en los taludes tales que no afecten su estabilidad y esto debe establecerse como un acuerdo entre las áreas de operación y los ejecutores del plan, de modo que las actividades a desarrollar sean factibles y al menor costo en recursos, tiempo e interferencias con la operación. Los objetivos deben ser revisados periódicamente junto con la actualización de los distintos inputs que alimentan los modelos de estabilidad y en particular cada vez que haya cambios en el plan de minado proyectado.

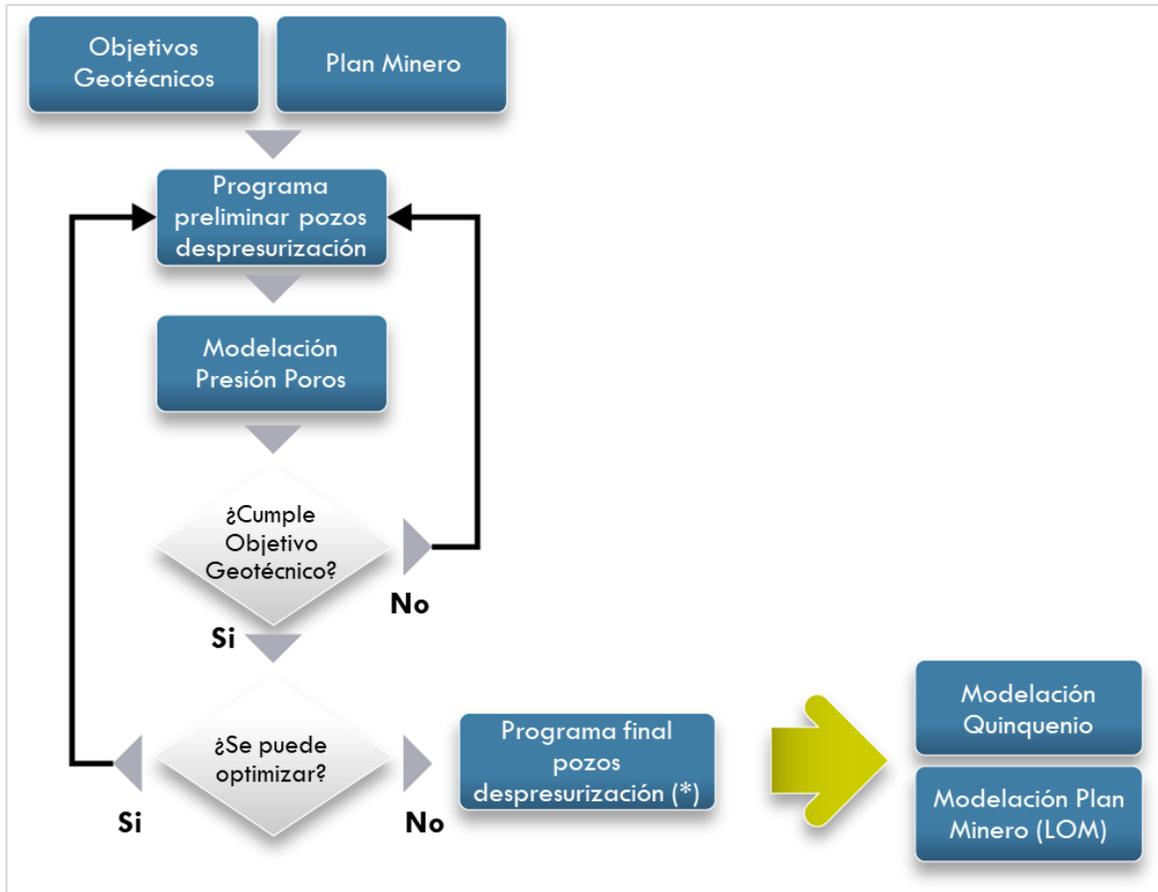
Para ejemplificar esto, en la Figura 29 (izquierda) se muestra un ejemplo del análisis de estabilidad para una sección de rajo conformado por roca con presencia de fracturas y con un nivel freático a pocos metros tras el talud (aflorando en el piso) y a la derecha, un escenario con un nivel freático disminuido en 80 m. Teniendo en consideración un criterio de aceptabilidad de 1,5 para el factor de seguridad (FoS), en la condición “*Do Nothing*”, es decir, cuando el plan de minado avanza pero no se ejecuta ninguna medida de despresurización forzada, el talud no cumple este criterio mostrando un FoS de 1,3. Por el contrario, en un caso con despresurización forzada donde se supone una disminución del nivel de agua en 80 m respecto del fondo del rajo, el FoS es superior a 1,55 en todo el talud. Esto da cuenta, por ejemplo, que podría haber una situación intermedia de despresurización tal que cumpla el criterio de aceptabilidad mínimo de 1,5 como FoS.



**Figura 29: Análisis de estabilidad de un talud bajo dos condiciones de nivel freático**  
Fuente: Itasca

El análisis anterior deja en evidencia que en aquellos casos donde el agua juega un rol relevante en la estabilidad de un talud, el diseño del sistema de desaguado debe ser tal que se utilicen los menores recursos y esfuerzos posibles, considerando el alto costo o esfuerzo de implementación

que esto puede llevar, optimizando el programa a uno tal que satisfaga el criterio de aceptabilidad mínimo. Así, se puede establecer un árbol de decisión que debe iterar hasta alcanzar una solución “óptima”, como se esquematiza en la Figura 30.



**Figura 30: Iteración para validar plan de despresurización óptimo**  
Elaboración propia

No obstante esto, existen operaciones donde las actividades de D&D son menores dado que pueden darse condiciones de baja precipitación, bajo aporte subterráneo y buena calidad de la roca, sin embargo esta condición debe siempre ser analizada ante el riesgo de que ocurran cambios en las condiciones hidrogeológicas (por ejemplo debido a la filtración de aguas operacionales) o cambios en las condiciones de minado que generen la exposición futura de rocas de menor calidad. Normalmente estos cambios pueden ocurrir en función de la nueva información que se genere en el proceso continuo de exploración minera, geotécnica e hidrogeológica.

Una vez definidos los objetivos de D&D, deben establecerse métricas para poder hacer seguimiento a su cumplimiento y visualizar adaptaciones que requiera el plan en caso de que no se estén logrando las metas esperadas. Para poder hacer este seguimiento, nuevamente es relevante

mencionar la importancia de disponer de puntos de control (piezómetros y afloramientos, principalmente) en toda el área de minado.

A continuación se indican algunos indicadores utilizados en minas en el norte de Chile:

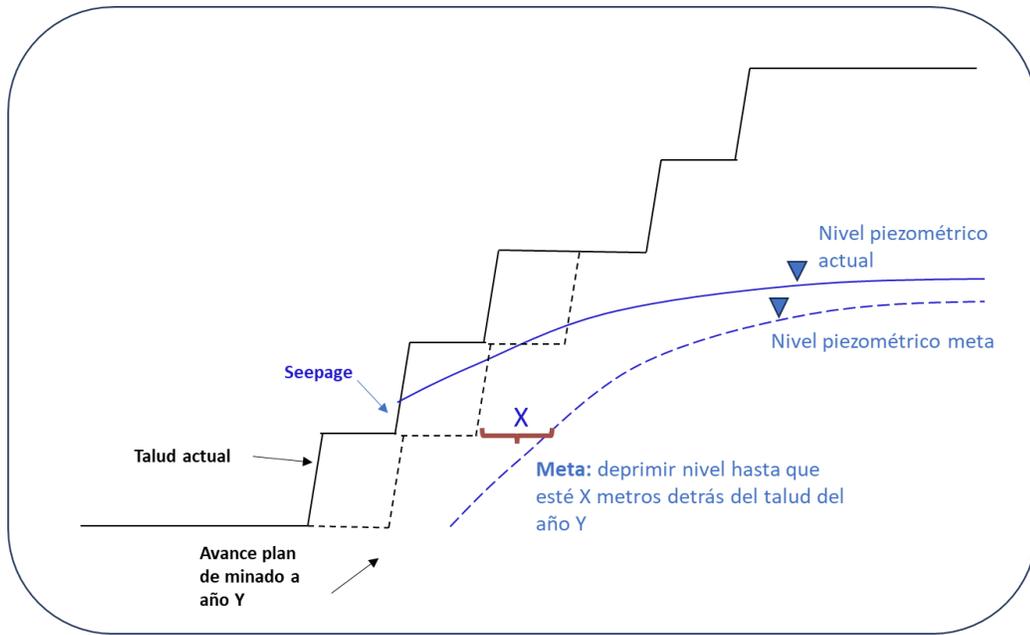
## **7.1 Indicadores para el proceso de despresurización**

Para la definición de indicadores que apunten directamente al proceso de despresurización, es necesario indicar que su definición dependerá de la información disponible y de la capacidad de predicción que se disponga.

Una aproximación bastante utilizada cuando no se tiene mucha información y que puede ser un tanto conservadora en la mayoría de los casos, tiene que ver con definir una distancia a la cual el nivel piezométrico se ubique por detrás del talud activo del rajo en un año futuro (asociado a dónde el análisis de estabilidad muestre riesgos). Esta definición puede realizarse tanto en secciones 2D, como se muestra en la Figura 31, como también en superficies 3D. Usualmente se considera esa distancia similar a un banco o dos bancos, pero también puede ser un número arbitrario en función de la experiencia del equipo a cargo del proceso. Alternativamente, puede considerarse también una meta de distancia donde el nivel piezométrico se ubique por debajo de cada banco.

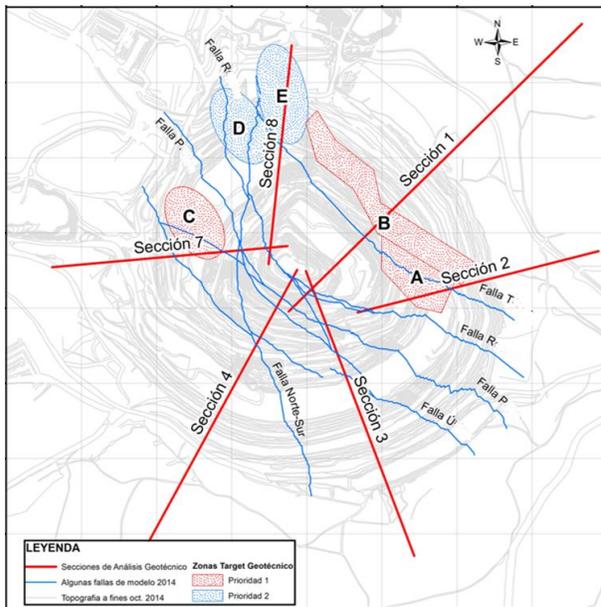
En cualquier caso, la meta de nivel piezométrico que se establezca debe ser tal que el análisis de estabilidad alcance resultados de factores de seguridad (FoS) que se encuentren sobre el criterio de aceptabilidad predefinido.

Para alcanzar estas metas de despresurización, normalmente se requiere bombear agua desde pozos o del flujo proveniente de drenes para lo cual se establecen supuestos en la modelación que luego deben ser validados. Para dar cumplimiento a este bombeo, se debe incorporar complementariamente un indicador de desaguado (que se explica en apartado 7.2 siguiente).



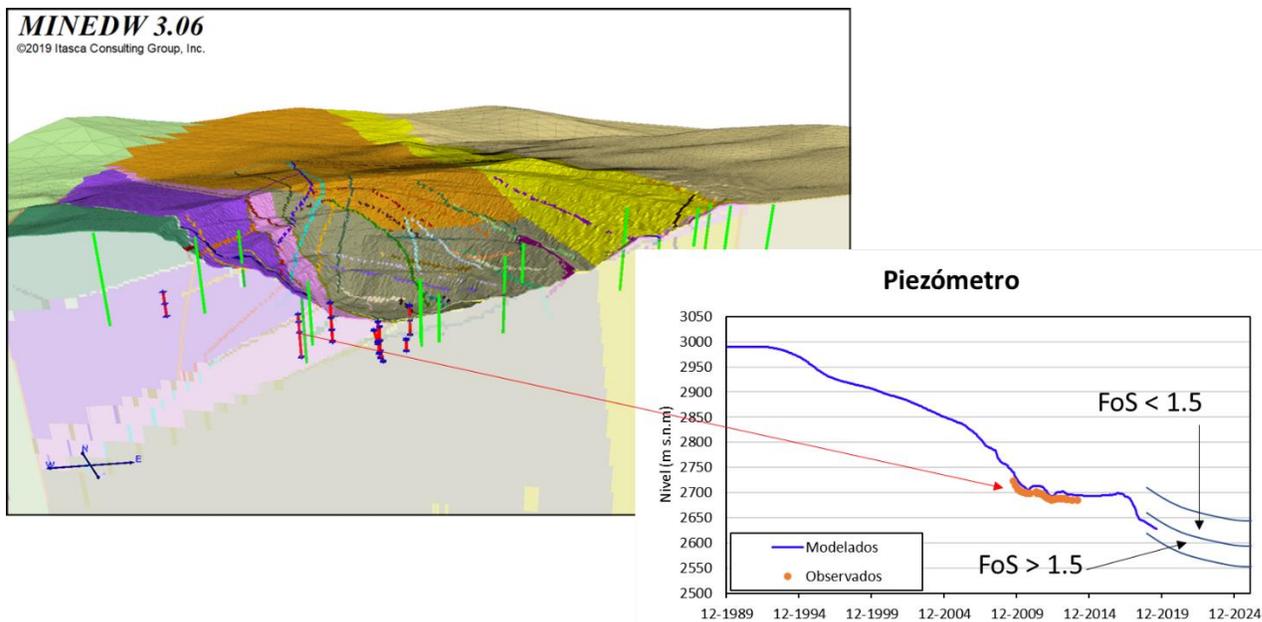
**Figura 31: Ejemplo definición de target de despresurización alejando el nivel X metros detrás del talud proyectado.**  
Elaboración propia

En la medida que se disponga de modelos numéricos hidrogeológicos y geomecánicos de alto detalle y desarrollo, es posible establecer metas sectorizadas, como el que se muestra en la Figura 32, e incluso se pueden establecer metas para piezómetros en específico (Figura 33), lo que permite definir planes de desaguado y despresurización optimizados y realistas.



Zona	Objetivo General	Profundidad Objetivo	Objetivo
A	Estructuras al E de fase 6, al sur de Falla T	Cota 4120 y 150 m detrás de talud	Pp < 500 kPa o ~ 50 m
B	Falla T	Cota 4180 y 80 m detrás de talud	Pp < 20 kPa en estructura Pp < 250 kPa en macizo
C	Talud W fase 8	Nivel Freático (NF) a cota 4375 y 50 m detrás de talud	NF 50 m detrás de talud, Pp < 10 kPa
D	Fallas P-R	NF a cota 4375 y 80 m detrás de talud	Pp < kPa en estructura y macizo
E	Intersección Fallas N-S, L y T.	Cota 4255, 80 m detrás de talud	Pp < 20 kPa en estructuras al 2016
ExPit	Preparar para recomendaciones 2016-2018	Paredes E, W y S: 300 m detrás de talud	25-50% de reducción de Pp para 2017

**Figura 32: Ejemplo definición de target de despresurización sectorizado.**  
Elaboración propia



**Figura 33: Ejemplo definición de target de despresurización con mayor detalle utilizando modelos numéricos hidrogeológicos y para un piezómetro en específico.**

Elaboración propia

## 7.2 Indicadores para el proceso de desaguado

El indicador para el proceso de desaguado de la mina está relacionado usualmente a medir los caudales que son bombeados o gestionados de manera sectorizada en el interior y exterior de la mina de modo de compararlo con los flujos que fueron estimados para lograr un descenso de los niveles piezométricos.

Así, esta información permite evaluar el esfuerzo de extracción de agua e interpretarlo en conjunto con el indicador de despresurización. Dada las incertidumbres propias de las condiciones hidrogeológicas de los entornos mineros, no es raro que ocurra que la meta de desaguado se cumpla, pero los indicadores de despresurización muestran que no se ha logrado el nivel esperado, por lo que se debe reevaluar esta relación en los siguientes ejercicios y hacer las correcciones que corresponda en la situación actual (mayor bombeo, más pozos en la zona de interés, reinterpretación hidrogeológica de estructuras, entre otros). También podría darse la situación contraria, donde con menor esfuerzo de bombeo los niveles bajen más de lo esperado, lo que estaría por el lado conservador.

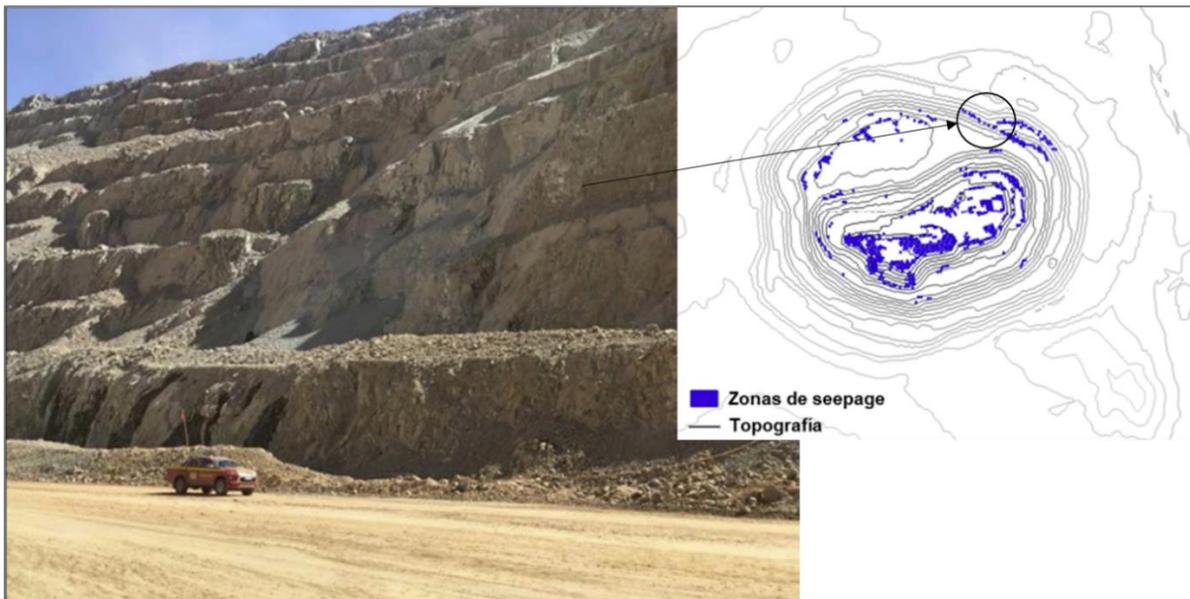
En este contexto, los indicadores de desaguado estarán asociados a establecer metas de caudal extraído por sector, tanto inpit como outpit o a través de la definición de sectores. En el caso del

inpit, uno de los indicadores podrá estar relacionado al agua en el fondo de mina y también en forma específica a la disminución de afloramientos en los taludes (o *seepage*).

Objetivo desaguado Sector Norte		
Target del año = 64 L/s	Q total promedio medido (L/s)	Cumplimiento del target (%)
Oct-22	32,4	50
Nov-22	22,2	35
Dic-22	23,6	36
Promedio Trimestre	26,1	40

**Figura 34: Ejemplo de indicador de desaguado por sector**  
Elaboración propia

En el caso del seguimiento de los afloramientos (o *seepage*), esta información es clave para realizar un buen análisis hidrogeológico conceptual y luego numérico, porque permite observar directamente lo que ocurre con el agua en los taludes (Figura 35). No obstante esto, muchas faenas no realizan este seguimiento de manera recurrente o lo hacen sólo de manera esporádica, siendo un período semanal una frecuencia adecuada para ejecutarlo. Un aspecto importante de la evaluación de esta variable es lograr diferenciar la presencia de *seepage* de otros fenómenos que podrían estar ocurriendo en la operación tales como derrames desde estanques, fugas de aguas desde piscinas o roturas de *piping*.



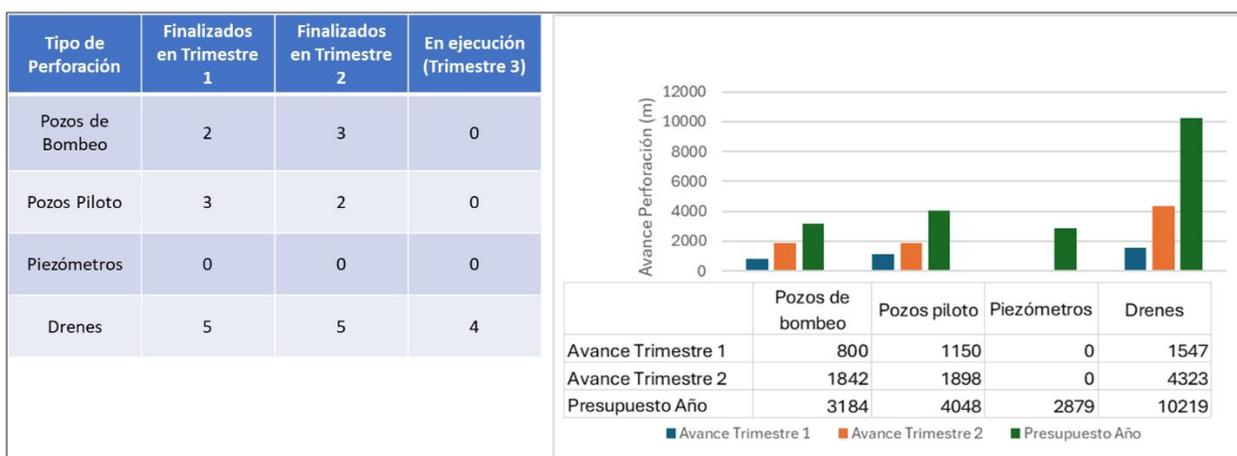
**Figura 35: Imagen con registro de *seepage* y representación en modelo numérico**  
Fuente: (ITASCA, 2023)

### 7.3 Indicadores de funcionamiento de la infraestructura y equipos

Complementariamente, desde un punto de vista de la operación de los equipos, es importante también establecer indicadores que apunten a asegurar el funcionamiento de los sistemas hidráulicos y de monitoreo.

Por ejemplo, se pueden establecer indicadores como:

- % de cumplimiento de las campañas de perforación de pozos o piezómetros nuevos o de reemplazo, como se muestra en la Figura 36.
- % de operatividad de los puntos de monitoreo, lo que permitiría identificar aquellos puntos que presentan fallas de medición.
- % de operatividad o disponibilidad de los equipos de bombeo, tanto de pozos como de sistemas superficiales.
- % de operatividad o disponibilidad del resto de los equipos e infraestructura en función del registro de fallas que hayan gatillado detenciones del sistema.



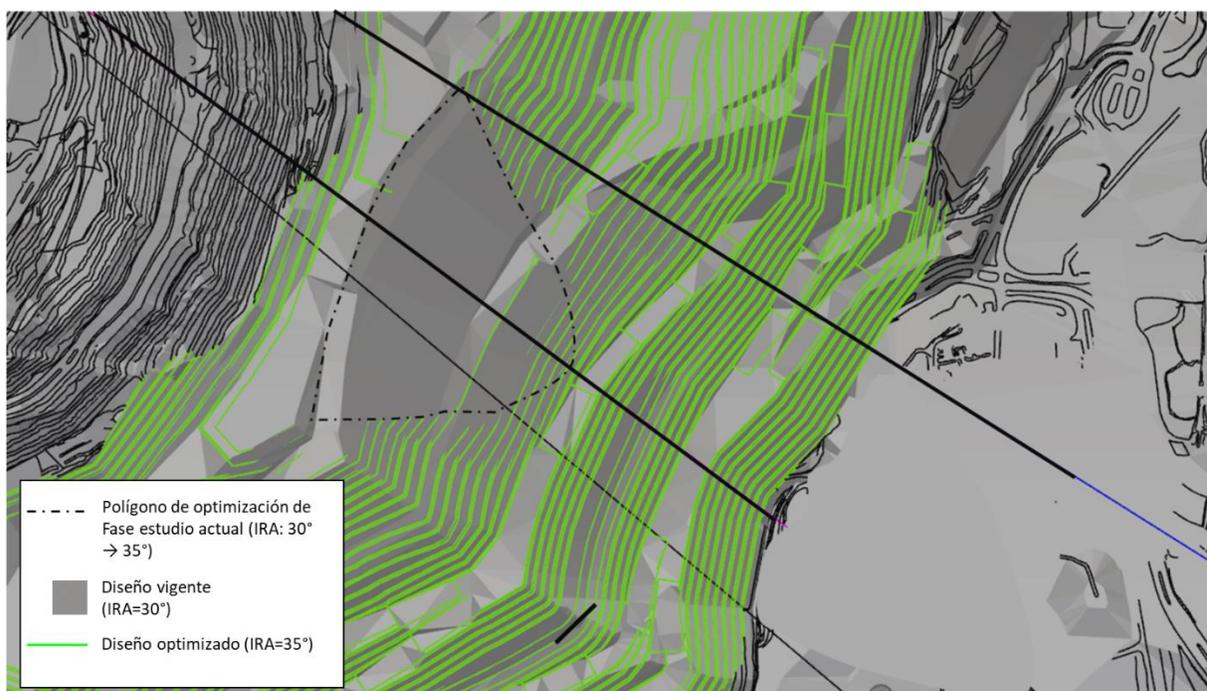
**Figura 36: Ejemplo de indicador de avance de planes de perforación de un programa de D&D.**  
Elaboración propia

## 8. Ejemplos de diseño de plan de despresurización

### 8.1 Caso 1: optimización de ángulo de talud

A continuación se desarrolla un ejemplo aplicado que muestra la influencia del agua en el diseño de un talud, donde el objetivo del equipo de planificación es mejorar el ángulo interrampa de 30° vigente a uno de 35° considerando nueva información geológica, geotécnica e hidrogeológica obtenida desde terreno. En la Figura 37 se muestra un sector del rajo que se quiere optimizar.

Para hacer este ejercicio, se ha considerado que ya existe en forma previa un modelamiento numérico hidrogeológico que fue desarrollado en la plataforma MINEDW<sup>4</sup> y un modelamiento geomecánico desarrollado en la plataforma UDEC<sup>5</sup>, herramientas que serán utilizadas para el análisis.



**Figura 37: Vista en planta sector de rajo donde se requiere optimizar el ángulo interrampa.**

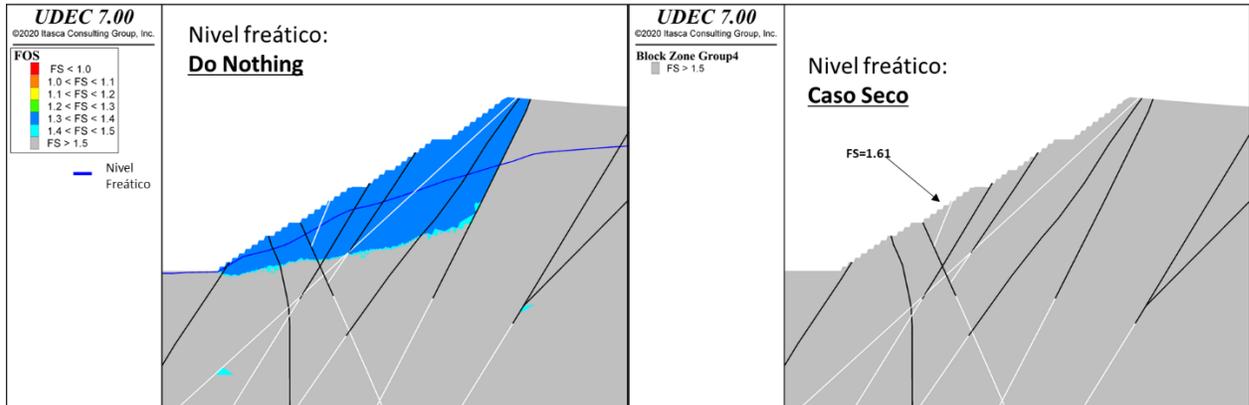
Elaboración propia

El primer paso que se debe analizar consiste en comparar la condición del talud en la situación con agua, sin esfuerzo de despresurización (“*Do Nothing*”), y la condición seca (supuesto de modelación). Esta comparación es importante de realizar, ya que si la condición seca muestra que

<sup>4</sup> MINEDW (Mine Dewatering) es un software que modela flujos de agua subterránea tridimensional (3D) de elementos finitos que fue desarrollado por ITASCA específicamente para aplicaciones de minería (<https://www.itasca.cl/software/minedw>).

<sup>5</sup> UDEC (Universal Distinct Element Code) es un código bidimensional desarrollado por ITASCA, basado en el método de elementos distintos, particularmente bien adaptado al modelamiento de sistemas rocosos fracturados sometidos a cargas estáticas o dinámicas (<https://www.itasca.cl/software/udec>).

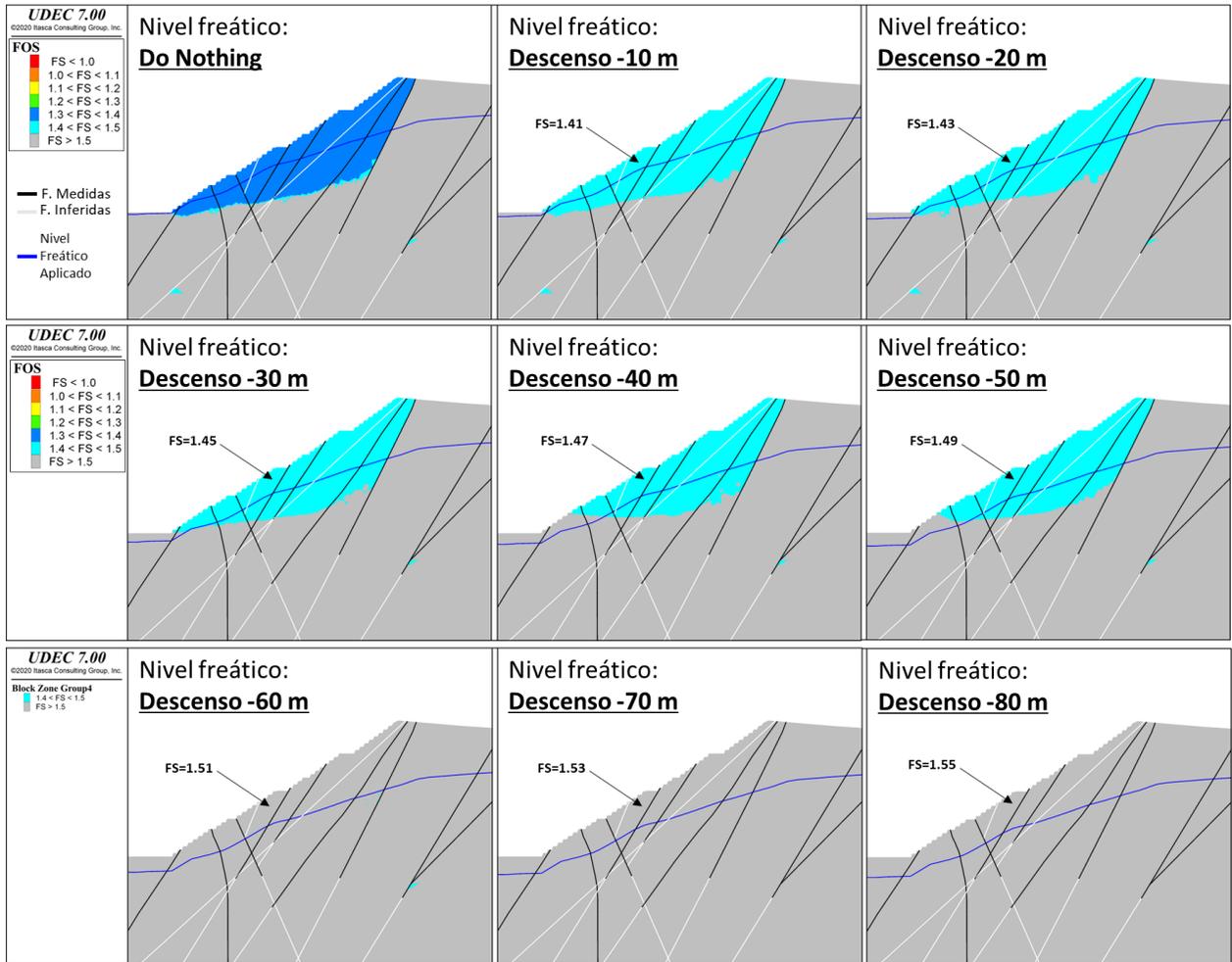
el talud es inestable, entonces no tiene sentido hacer un esfuerzo por despresurizar ya que el único camino hacia la estabilidad sería modificar el ángulo del talud. En este ejercicio el criterio de aceptabilidad para el FoS será de 1,5.



**Figura 38: Comparación de FoS en condición “Do Nothing” y caso seco.**  
Elaboración propia

Como se puede apreciar en la Figura 38, la simulación del caso seco arroja un FoS de 1,61 que cumple el criterio de aceptabilidad, mientras que el caso “Do Nothing” alcanza un FoS menor que 1,3 no cumpliendo el criterio. Esto implica que existe una solución intermedia de despresurización tal que puede cumplirse el FoS mínimo.

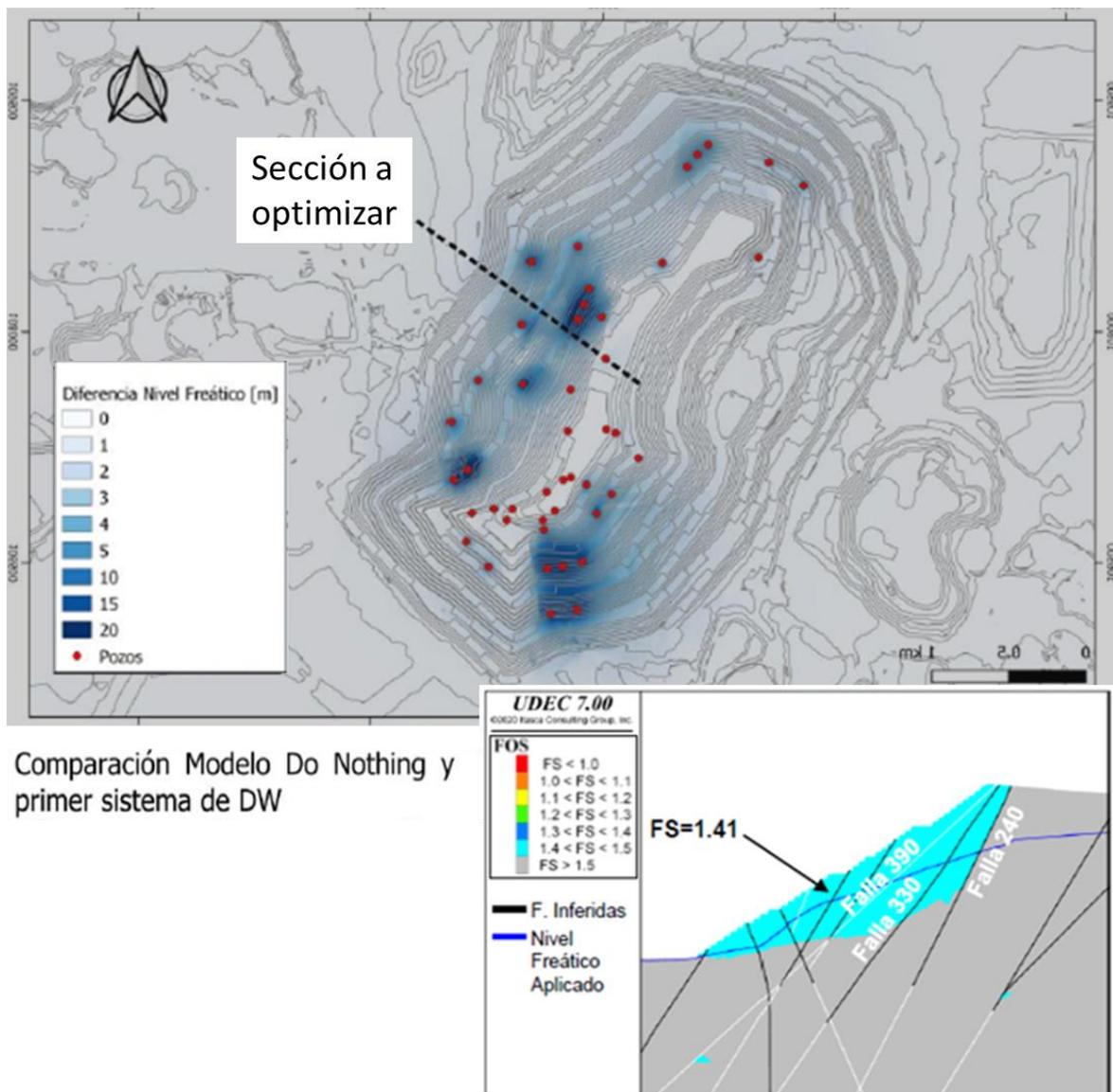
Dado lo anterior, se pueden probar distintos escenarios de disminución de niveles de agua tal que se alcance la condición de aceptabilidad. En la Figura 39 se hace una sensibilización con 8 escenarios de despresurización donde progresivamente se disminuye el nivel freático en el talud. Se puede ver que entorno a los 50 m y 60 m de disminución de nivel se alcanzan FoS entre 1,49 y 1,51, cercanos al valor mínimo de FoS aceptado.



**Figura 39: Sensibilización del FoS en función de la disminución del nivel freático.**  
Elaboración propia

Teniendo en cuenta dicha aproximación, utilizando el modelo numérico hidrogeológico, se pueden probar distintas combinaciones de infraestructura de extracción de agua (pozos y drenes) tal que se pueda alcanzar un descenso entre los 50 m a 60 m y, por lo tanto, cumplir con el criterio de aceptabilidad mínimo con un programa optimizado de perforación.

Como se podrá apreciar a continuación, es posible implementar en el modelo numérico múltiples combinaciones de pozos y drenes (y otras obras por cierto). En la Figura 40 se muestra una primera iteración donde en la sección de interés se han ubicado únicamente pozos de bombeo, los que han sido dispuestos en ubicaciones factibles que han sido discutidas con los equipos de planificación minera. El resultado de esta iteración muestra que la despresurización lograda permite alcanzar un FoS de 1,41 que está por debajo del criterio de aceptabilidad.



Comparación Modelo Do Nothing y primer sistema de DW

**Figura 40: Caso 1: Primera iteración del plan de desaguado solo pozos.**

Elaboración propia

En la Figura 41 se muestra una segunda iteración donde en la sección de interés se han ubicado drenes en complemento de los pozos de bombeo, algunos de los cuales fueron reubicados respecto de la iteración previa. Todas las ubicaciones, tanto de drenes como de pozos, han sido establecidas en sectores factibles de ingresar y que han sido discutidas con los equipos de planificación minera. El resultado de esta iteración muestra que la despresurización lograda permite alcanzar un FoS de 1,51 cumpliendo por tanto el criterio de aceptabilidad.

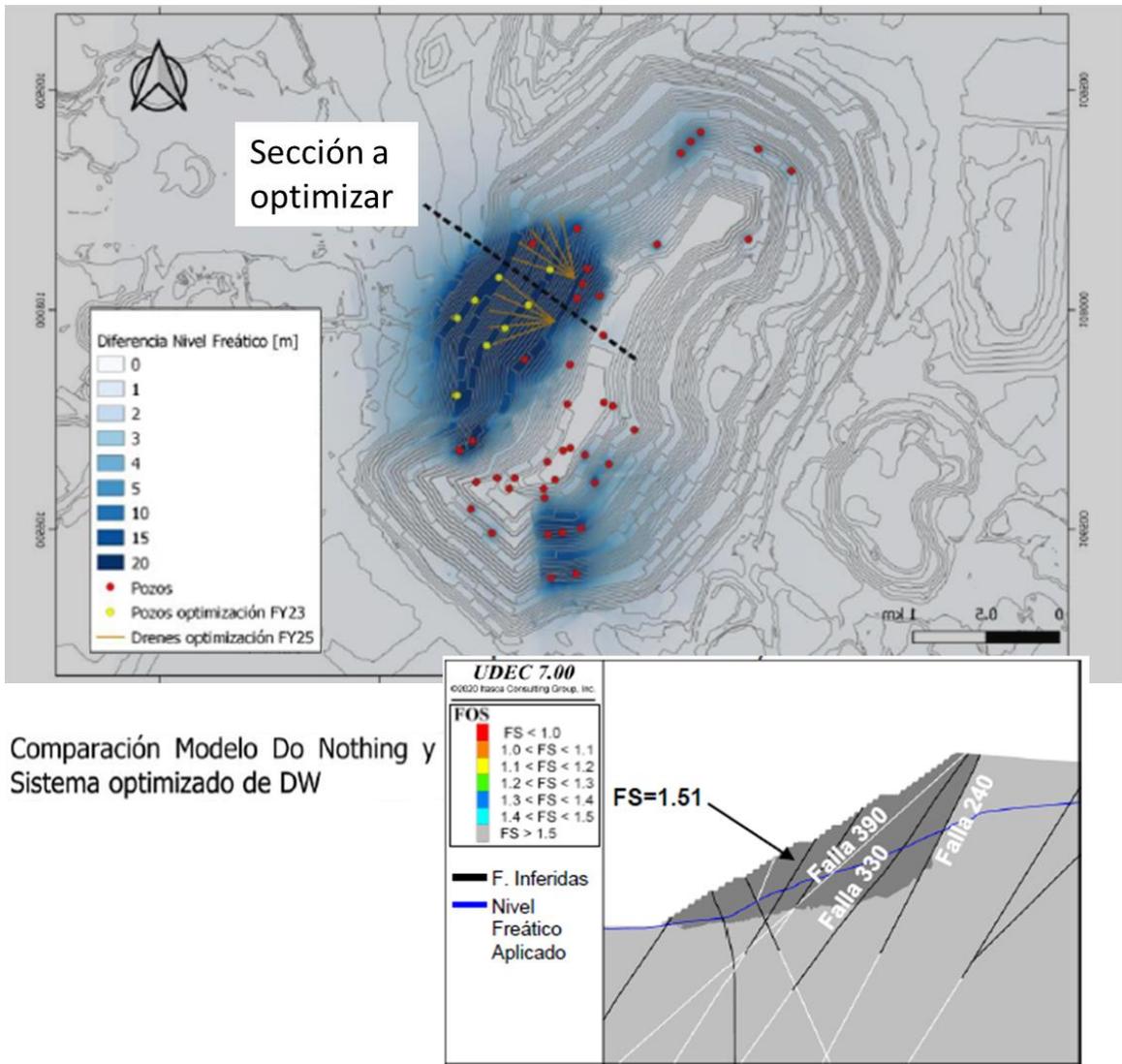
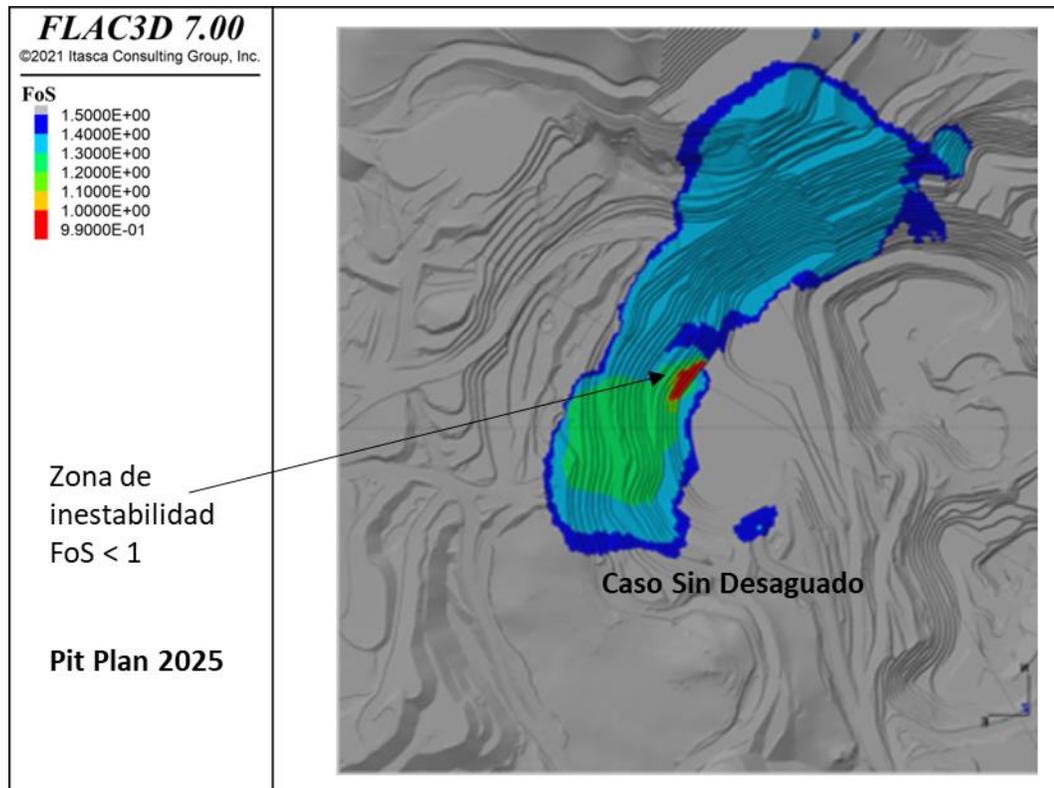


Figura 41: Caso 1: Segunda iteración del plan de desaguado con pozos y drenes.  
Elaboración propia

## 8.2 Caso 2: mejora en condición de estabilidad local mediante sistema de bombeo.

El ejemplo que se presenta a continuación es un ejercicio aplicado que nace de la identificación de una zona de inestabilidad ( $FoS < 1$ ) en una parte acotada del talud de un rajo que se observa en el año 2025 (coloreado con rojo en la Figura 42) y que ha sido modelado con el software geomecánico FLAC3D<sup>6</sup>. Dado esto, para evitar realizar cambios geométricos en el plan de minado, se ha requerido implementar alguna solución de despresurización para mejorar dicha condición.



**Figura 42: Caso 2: Zona de inestabilidad identificada en plan minero al año 2025.**

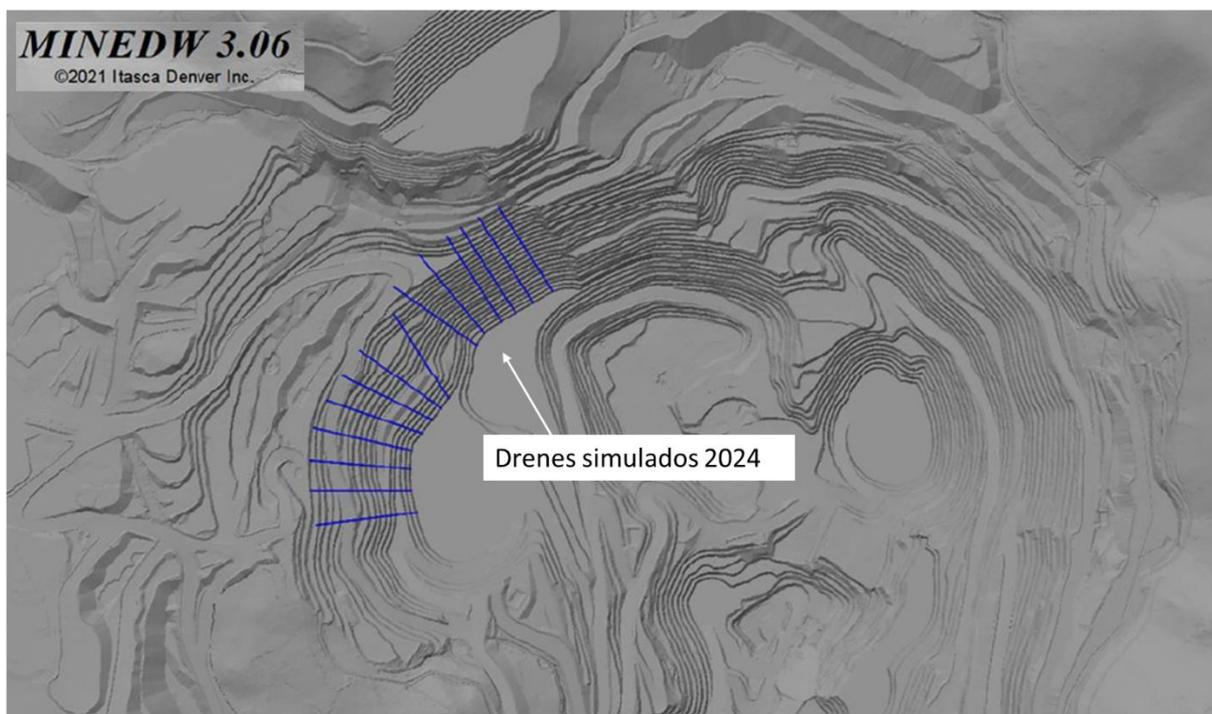
Elaboración propia

La primera alternativa evaluada consistió en simular el efecto de la implementación de drenes subhorizontales. Sin embargo, por restricciones operacionales de acceso al punto -en parte derivadas del mismo riesgo de inestabilidad-, la posición disponible para simular la perforación del sistema de drenes no es muy adecuada ya que se ubica en una cota muy abajo y además existen restricciones operacionales respecto de la longitud de perforación de los equipos disponibles<sup>7</sup> que en este caso es de 250 m. Entonces, para efectos de la simulación, se consideró un set de drenes de

<sup>6</sup> FLAC3D es un software comercial para modelar análisis de estabilidad dinámico en 3D (<https://www.itasca.cl/software/flac3d>).

<sup>7</sup> Equipos típicos en el mercado de perforistas pueden alcanzar sin mucha dificultad longitudes de 350 m en ambientes mineros tradicionales e incluso alcanzar longitudes de 500 m o un poco más en roca más competente. Entre más largo el dren, deberá tenerse especial precaución respecto del ángulo de partida por el efecto de pandeo.

250 m con un ángulo de perforación<sup>8</sup> de 3°. En la Figura 43 se muestra una vista en planta de los drenes simulados.

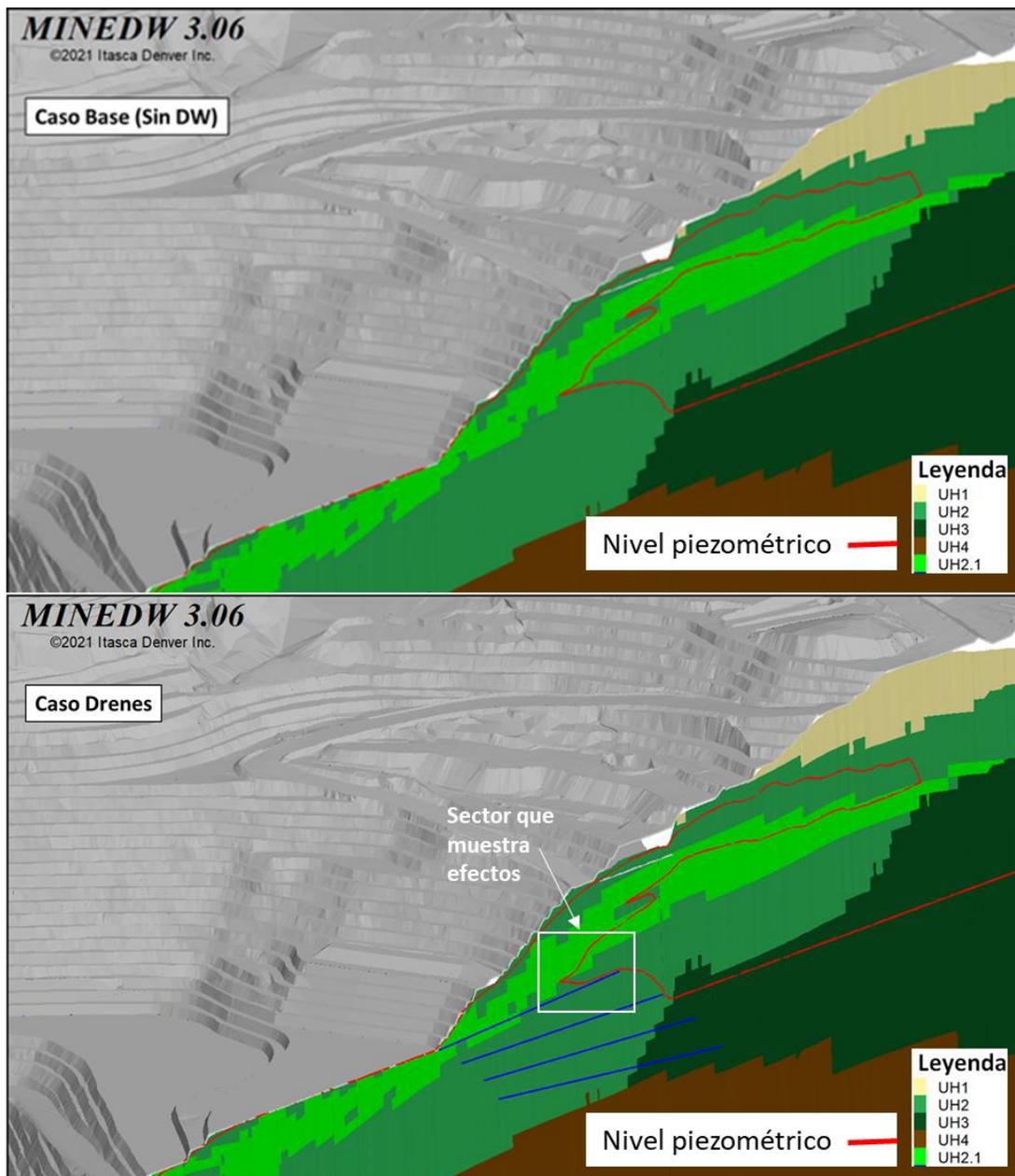


**Figura 43: Caso 2: Set de drenes simulado.**  
Elaboración propia

El resultado de la simulación de esta alternativa en la condición con y sin sistema de drenaje se muestra en la Figura 44. Como se puede apreciar, el efecto que genera el sistema de drenes que comienza a operar en el año 2024 es prácticamente imperceptible, lo que se explica porque la unidad UH2.1 es de muy baja permeabilidad frente a la UH2, por lo que no genera las condiciones de despresurización que se buscan.

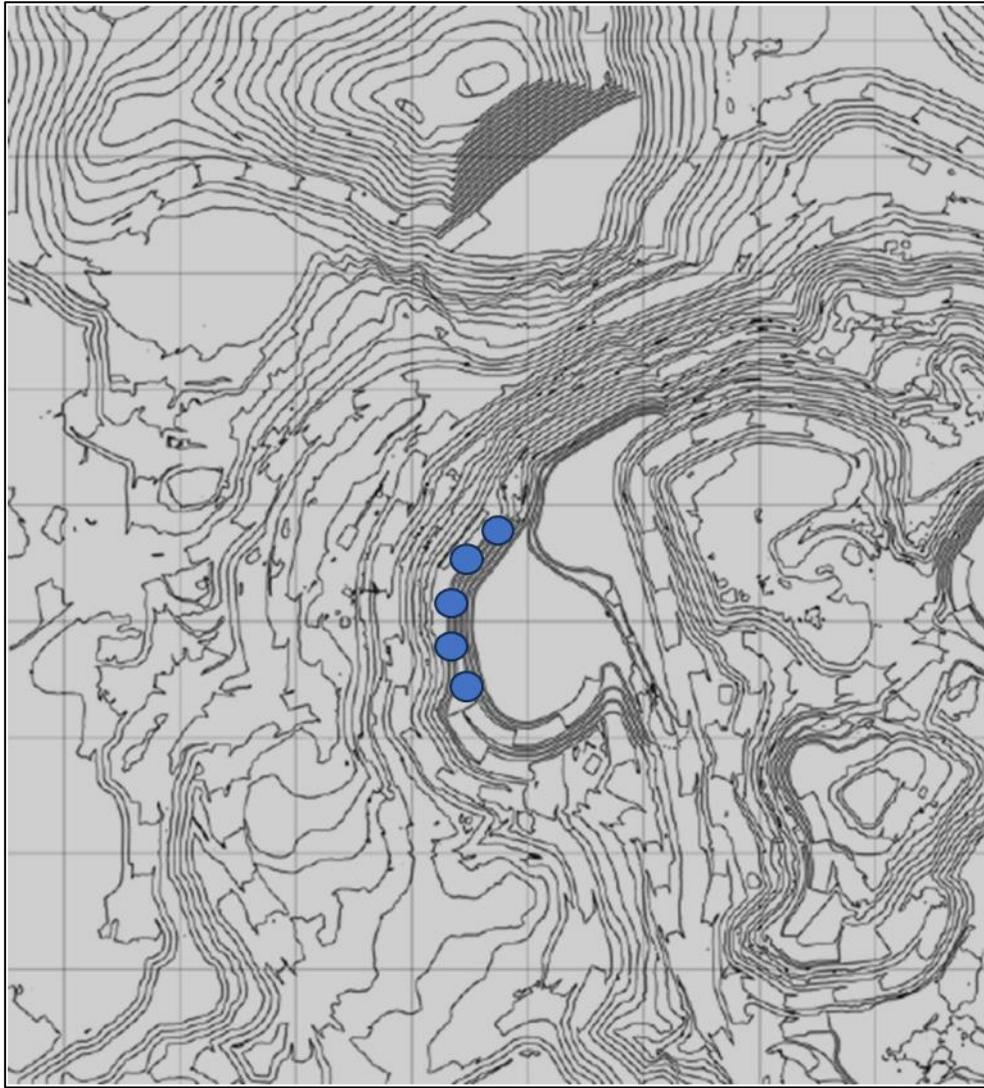
---

<sup>8</sup> Este valor de 3° representaría el valor promedio. En terreno es usual iniciar perforaciones con 5 a 7° de inclinación para compensar el pandeo.



**Figura 44: Caso 2: Comparación de simulación con y sin drenes para el año 2025.**  
Elaboración propia

Frente a esta condición, se propone una segunda alternativa de solución consistente en la perforación de un set de pozos de desaguado de 200 m de profundidad con el fin de generar una despresurización más agresiva en el sector de interés, teniendo en consideración la baja permeabilidad del medio. En la Figura 45 se muestra la distribución en planta de los pozos propuestos.



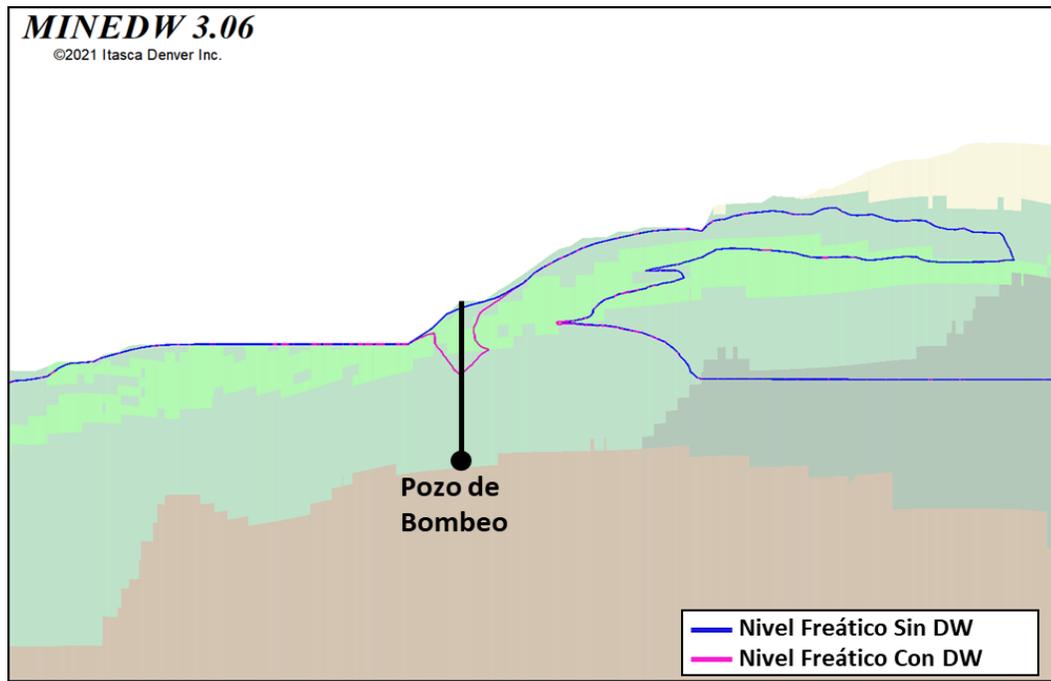
**Figura 45: Caso 2: Alternativa de despresurización con set de pozos de bombeo.**  
Elaboración propia

Una de las dificultades de la posición elegida para la perforación (y simulación) de los pozos tiene relación con que el avance de la mina en el corto plazo se dirige justamente hacia ese sector, por lo tanto, el efecto esperado para 2025 debe lograrse en un corto plazo. Como es de suponer a partir de lo previamente simulado para los drenes, también es esperable que el efecto sea acotado considerando la baja permeabilidad del medio.

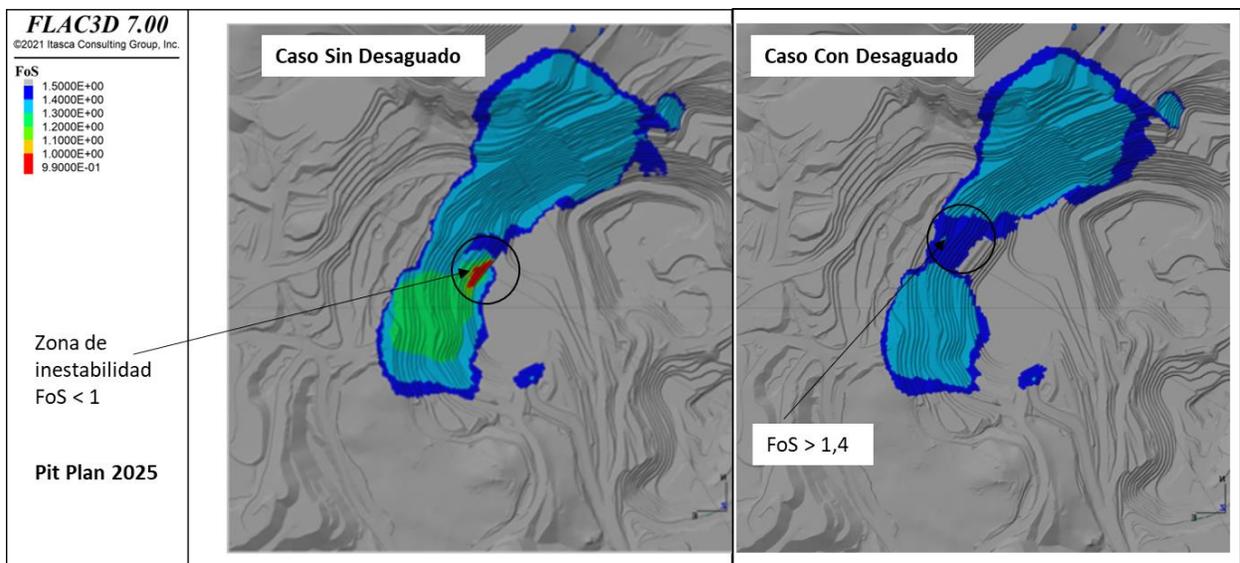
En la Figura 46 se muestra el resultado de la simulación del sistema de pozos sobre los niveles en el área de interés. El caudal que el modelo numérico logró obtener para los pozos es muy bajo, del orden de 0,2 a 0,5 L/s, consistente con las condiciones de baja permeabilidad.

Finalmente, el resultado de la modelación mostró que efectivamente el efecto de los pozos de bombeo implementados es puntual, presentando un bajo radio de influencia. De todas formas, a partir del análisis de estabilidad de taludes, el factor de seguridad en este macizo es muy sensible

a la presión de poros, por lo que los descensos generados, aunque de baja magnitud, logran generar que para fines de 2024 y para el año 2025 se cumplan los criterios de aceptabilidad.



**Figura 46: Caso 2: Alternativa de despresurización con set de pozos de bombeo. Efecto generado para 2025.**  
Elaboración propia

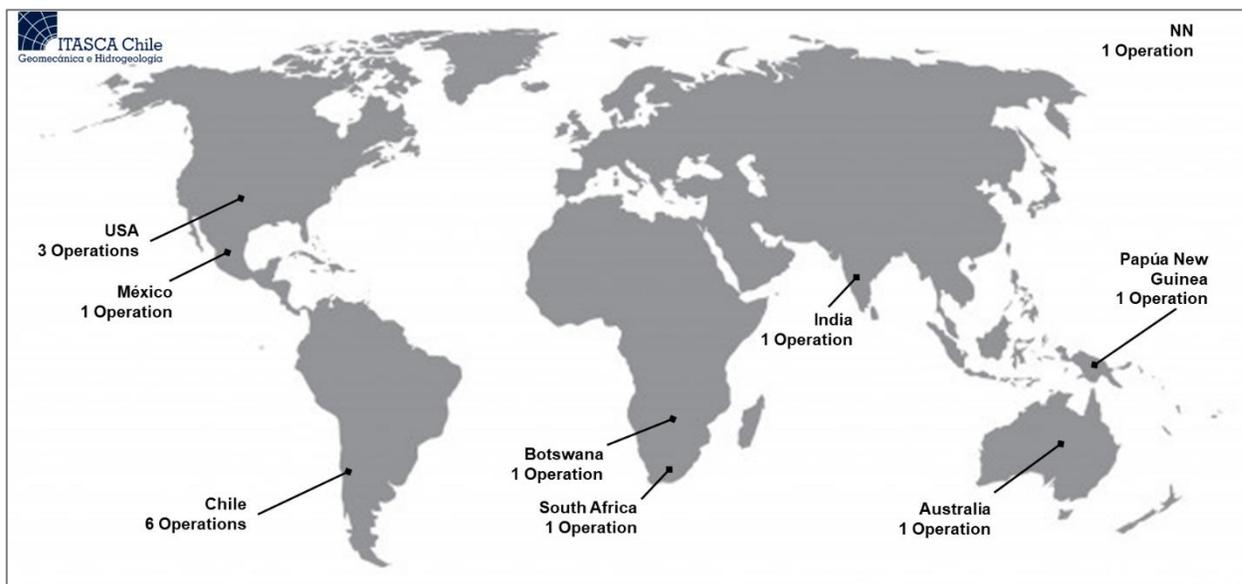


**Figura 47: Caso 2: Análisis de estabilidad con alternativa de despresurización con set de pozos de bombeo. Efecto generado para 2025.**  
Elaboración propia

A partir de la simulación y del resultado presentado de este último caso, es relevante considerar la alta sensibilidad que puede generar la condición hidrogeológica en el análisis de estabilidad. La única forma de subsanar esta condición está directamente relacionada con aumentar la captura de datos de terreno, ya sea mediante la medición de niveles en las distintas unidades hidrogeológicas, es decir, mayor número de piezómetros, como también la realización de pruebas hidráulicas en los distintos sectores y unidades de la mina. Por su parte, la temporalidad de la implementación de la solución también es un aspecto relevante para considerar, tomando en cuenta que en este caso en específico, se ha considerado un bombeo continuo desde el año 2024, lo que podría no ser efectivo teniendo en cuenta los tiempos de contratación, movilización del contratista y luego la perforación y puesta en servicio del pozo propiamente tal.

## 9. Revisión de otros proyectos

En el contexto de establecer recomendaciones respecto de la implementación de los programas de D&D en otros países con minería a gran escala, se realizó una breve encuesta a distintas operaciones recogiendo respuestas desde 16 faenas (Figura 48 y Tabla 1). Esta actividad fue desarrollada para una minera del norte de Chile en el año 2021 con el fin de evaluar nuevas prácticas que permitan realizar mejoras en los aspectos de diseño, construcción y operación de los sistemas de desaguado. Es importante mencionar que la mayor parte de las faenas encuestadas solicitaron la confidencialidad de la información, por lo tanto, los datos específicos de la información entregada por cada una de las operaciones no se incluyen en este informe.



**Figura 48: Distribución geográfica de las faenas encuestadas**  
Elaboración propia

**Tabla 1: Ubicación y tipo de mineral principal extraído de faenas encuestadas. Todas con método rajo abierto.**

<i>País</i>	<i>Faena</i>	<i>Mineral</i>
<b>Australia</b>	Telfer	Oro-Cobre
<b>Bostwana</b>	Debswana	Diamante
<b>Chile</b>	Cerro Colorado	Cobre
<b>Chile</b>	Collahuasi	Cobre
<b>Chile</b>	Escondida	Cobre
<b>Chile</b>	Los Bronces	Cobre
<b>Chile</b>	Ministro Hales	Cobre
<b>Chile</b>	Spence	Cobre
<b>Estados Unidos</b>	Bingham Canyon	Cobre
<b>Estados Unidos</b>	Morenci	Cobre
<b>Estados Unidos</b>	Nevada Gold	Oro
<b>India</b>	Rampura Agucha	Plomo-Zinc
<b>México</b>	Peñasquito	Oro-Plata
<b>NN*</b>	NN	Hierro
<b>Papúa Nueva Guinea</b>	Lihir	Oro
<b>Sudáfrica</b>	Sishen	Hierro

Elaboración propia

El análisis de la información recogida de las respuestas fue primeramente contextualizado de acuerdo con las condiciones climáticas de cada faena, en función de la precipitación, así como también en cuanto a su tamaño en superficie y profundidad (Figura 49 y Tabla 2). A partir de esta diferenciación, se realizan posteriormente las comparaciones y cruces entre las características y condiciones hidrogeológicas con los datos de diseño y operacionales obtenidos desde cada faena para interpretar los resultados.



**Figura 49: Esquema utilizado para comparar las distintas faenas de la encuesta**  
Elaboración propia

**Tabla 2: Caracterización de cada faena respecto a tamaño y condición hidrológica**

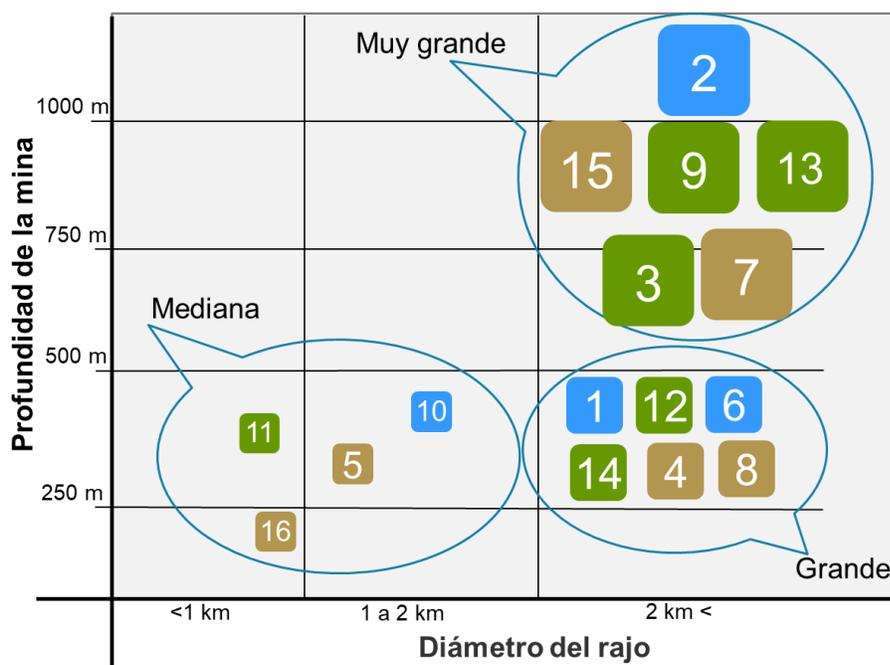
Faena <sup>1</sup>	Tamaño <sup>2</sup>	Lluvia <sup>3</sup>
1	G	H
2	MG	H
3	MG	SA
4	G	A
5	M	A
6	G	H
7	MG	A
8	G	A
9	MG	SA
10	M	H
11	M	SA
12	G	SA
13	MG	SA
14	G	SA
15	MG	A
16	M	A

El orden en la que está enumerada cada faena corresponde al orden de llegada de las respuestas

Tamaño: MG: Muy grande/Very Large; G: Grande/Large; M: Mediana/Medium

Condición de lluvia: H: Húmedo/Wet; SA: Semiárido/Semi-arid; A: Árido/Arid

Elaboración propia



**Figura 50: Caracterización de cada faena respecto a tamaño y condición hidrológica**

Elaboración propia

De acuerdo con esto, es posible sostener que en general las faenas analizadas son comparables en alguna medida con la situación de la mediana y gran minería en Chile ya sea en cuanto a tamaño o condición de precipitaciones.

Esta clasificación de las operaciones, en cuanto a tamaño y precipitaciones, se utiliza en todas las figuras de este trabajo con el fin de poder comparar y analizar cada resultado en función de las condiciones de cada sitio.

La información recogida y analizada a partir de la encuesta dice relación con antecedentes sobre:

- Análisis respecto de la estrategia de desaguado.
- Análisis respecto del caudal de desaguado y permeabilidades
- Infraestructura y condición hidrogeológica
- Uso de bentonita en la perforación de pozos de desaguado
- Remoción de lodos de perforación (Desarrollo del Pozo). Criterios para la limpieza de pozos en cuanto al uso de hipoclorito, tiempos de reposo y tiempos de remoción de fluidos de perforación.
- Diámetros de habilitación de los pozos de desaguado
- Materiales utilizados para la habilitación de pozos
- Realización de ensayos hidráulicos
- Tipo de infraestructura para medición de niveles piezométricos en el rajo
- Estrategia de mantenimiento del sistema de bombeo de pozos de desaguado

Es importante hacer notar que los cruces de información que se presentan a continuación son un conjunto finito de múltiples relaciones que se pueden establecer entre las variables estudiadas y, por lo tanto, este análisis aborda aquellas que se han considerado más relevantes para efectos del contexto del presente trabajo de memoria.

## **9.1 Análisis respecto a la estrategia de desaguado**

Uno de los aspectos analizados tiene que ver con la estrategia de desaguado, desde el punto de vista de la infraestructura. En la Tabla 3 se muestra el tipo de infraestructura principal de desaguado reportado por cada faena donde destaca que hay un uso general de los sistemas con pozos inpit, outpit y drenes, así como de bombeo de fondo. Sólo 2 faenas reportan el uso de túneles y/o galerías para hacer desaguado.

Complementariamente, en la Figura 51 se grafica la cantidad de pozos inpit y outpit de cada faena, donde se puede ver que las muy grandes en general requieren una gran cantidad de pozos tanto en el inpit como en el outpit operando al mismo tiempo, y que las faenas grandes y medianas requieren de una menor cantidad de pozos. De igual forma, las faenas con menor cantidad de pozos se ubican principalmente en zonas con régimen de precipitación de tipo árido y semi-árido.

**Tabla 3: Principal tipo de infraestructura utilizada para el desaguado**

Faena	Tamaño	Lluvia	Tipo de Infraestructura Principal				
			Pozos Inpit	Pozos Outpit	Drenes	Bombeo fondo mina	Túnel
1	G	H		X	X	X	
2	MG	H			X	X	X
3	MG	SA	X				
4	M	A		X	X		
5	M	A	X				
6	G	H	X			X	
7	MG	A	X	X	X	X	X
8	G	A	X	X	X	X	
9	MG	SA	X		X	X	
10	M	H			X	X	
11	M	SA	X	X		X	
12	G	SA	X	X			
13	MG	SA	X	X			
14	G	SA	X	X	X	X	
15	MG	A	X	X		X	
16	M	A	X				

Tamaño: MG: Muy grande/Very Large; G: Grande/Large; M: Mediana/Medium  
 Condición de lluvia: H: Húmedo/Wet; SA: Semiárido/Semi-arid; A: Árido/Arid

Elaboración propia

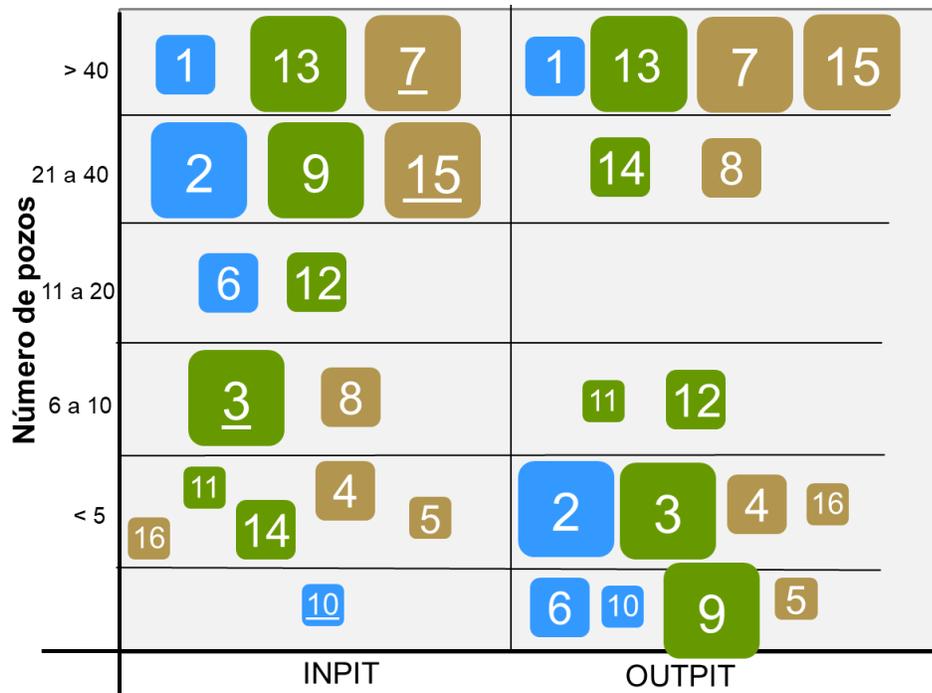


Figura 51: Tipo de faena y cantidad de pozos inpit y outpit

Elaboración propia

## 9.2 Análisis respecto del caudal de desaguado y permeabilidades

A partir de Figura 52, se puede observar que los sistemas de desaguado que superan los 100 L/s se encuentran en general en las faenas de mayor tamaño y en regiones semiáridas o húmedas, independiente del rango de permeabilidades del acuífero.

Las minas con los caudales de desaguado más bajos (< 50 L/s) coinciden con áreas de menor lluvia, lo que parece consistente debido a la menor recarga que podría llegar a cada sistema. Las faenas de menor tamaño también requerirían flujos de desaguado menores. No se observa una relación directa entre los bajos caudales en este grupo de faenas y el rango de permeabilidad.

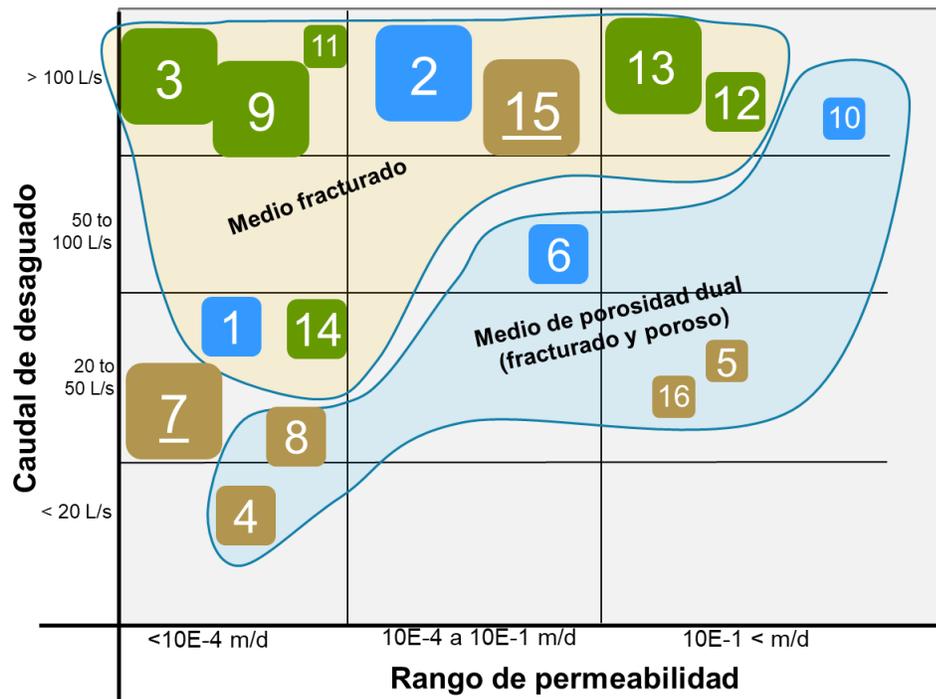
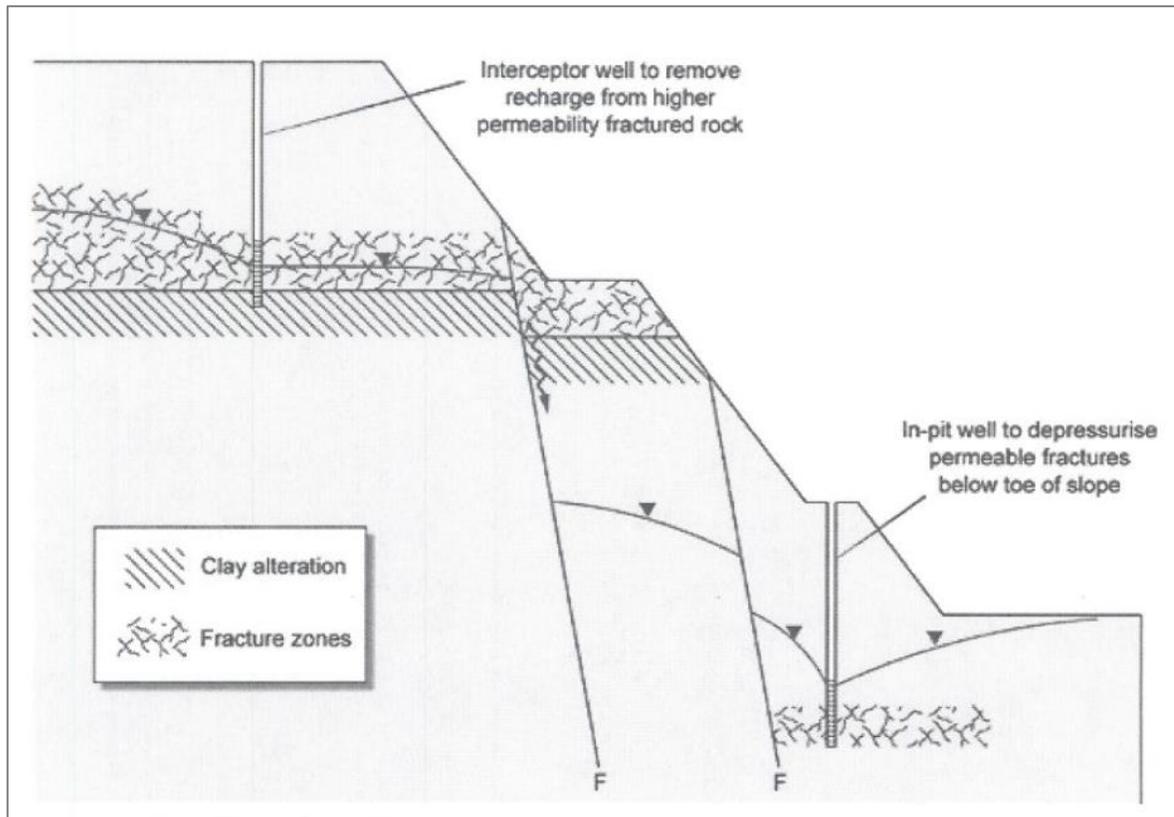


Figura 52: Caudal de desaguado y rango de permeabilidades  
Elaboración propia

Un aspecto importante a notar, es que dada la gran cantidad de pozos que reportan algunas faenas y los totales extraídos, en promedio el caudal de desaguado desde cada pozo es del orden de 1 a 4 L/s, lo que supone un desafío para la operación de los sistemas de bombeo debido a que son pozos que en general no operarán de manera continua o tendrán grandes depresiones de nivel dinámico.

### 9.3 Infraestructura y condición hidrogeológica.

En un medio fracturado probablemente existe un fuerte control estructural que hace que el radio de influencia de un pozo o cono de depresión asociado al bombeo sea más acotado que en un acuífero homogéneo, lo que automáticamente elevaría el número de pozos necesarios para despresurizar o bajar el nivel piezométrico en áreas más amplias (Figura 53). Esto indicaría que es más probable que una operación necesite un gran número de pozos cuando se encuentra en un medio fracturado, pero esto podría no ser necesario en todos los casos.

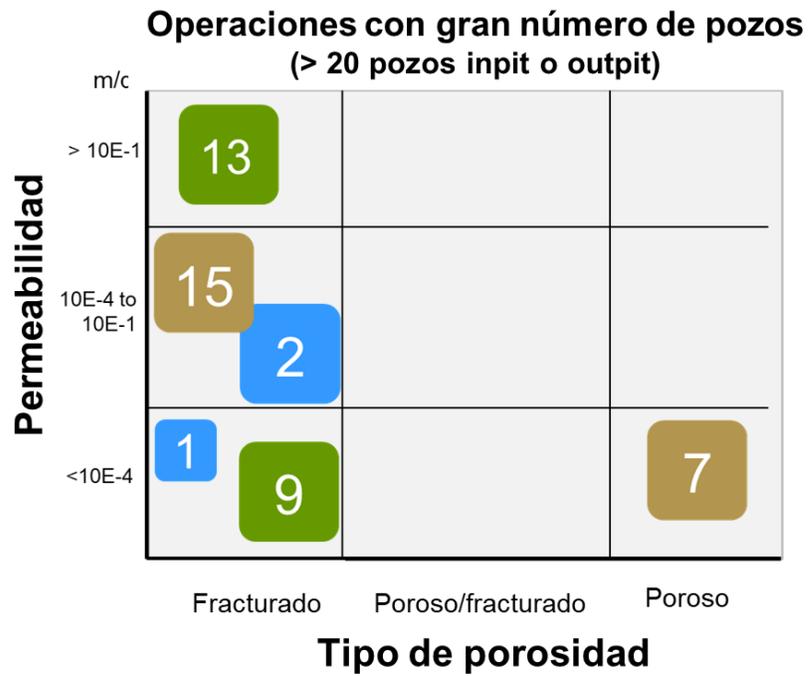


**Figura 53: Ejemplo de la limitación de la influencia del bombeo por presencia de estructuras**

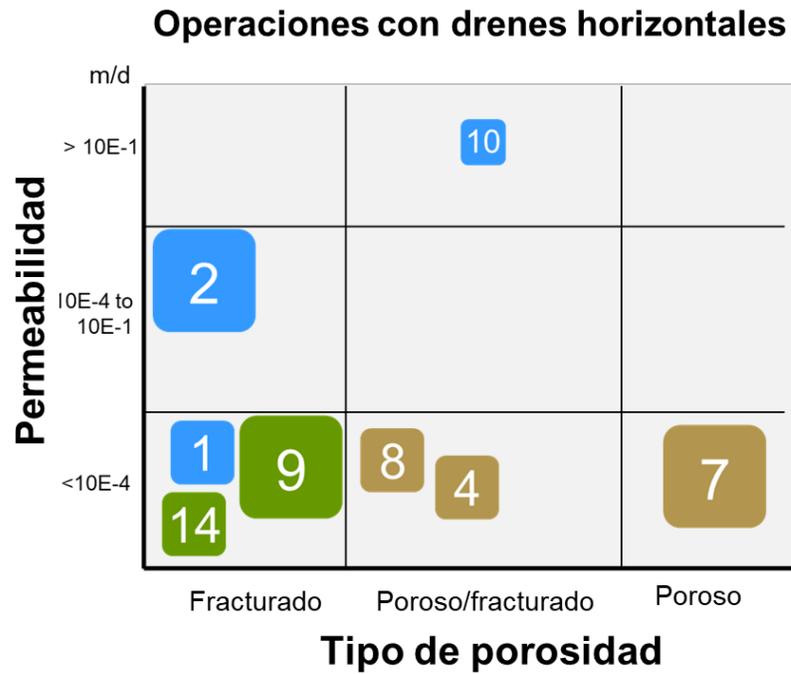
*Fuente: (Read & Stacey, 2009)*

Aunque, como se ha visto anteriormente, no parece haber una correlación entre el número de pozos utilizados para una operación en un medio fracturado, casi todas las operaciones que presentan un gran número de pozos se encuentran en medios fracturados (Figura 54). Esto indicaría que es más probable que una operación necesite un gran número de pozos cuando se encuentra en un medio fracturado, pero esto podría no ser necesario en todos los casos.

Además, se puede destacar que la mayoría de las faenas que presentan bajas permeabilidades también hacen uso de drenajes horizontales para su estrategia de desagüe (Figura 55), posiblemente debido a que los pozos actúan más localmente en estos sistemas y los drenes pueden apoyar la despresurización local de ciertos taludes.



**Figura 54: Relación entre permeabilidad, tipo de porosidad y faenas con muchos pozos**  
Elaboración propia



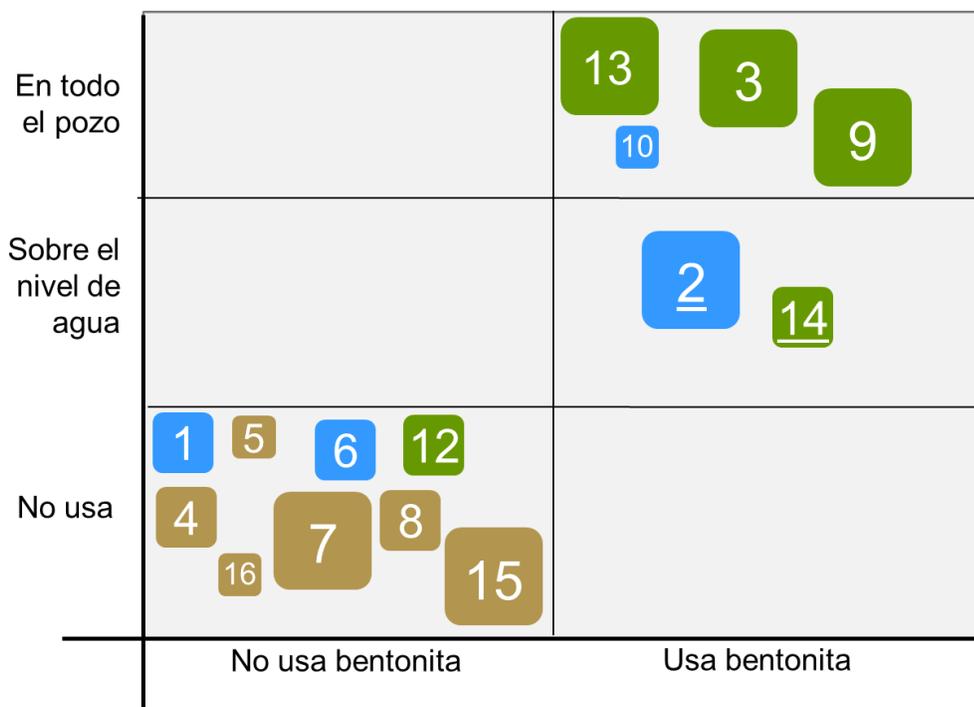
**Figura 55: Relación entre permeabilidad, tipo de porosidad y faenas con drenes**  
Elaboración propia

## 9.4 Perforación de pozos: uso de bentonita.

Durante la perforación de un pozo para desaguado, se requiere del uso de aditivos que permitan sostener la pared para evitar derrumbes y la pérdida del pozo. Sin embargo, un exceso en la aplicación de aditivos podría generar un sellado de las principales zonas de aporte dentro del pozo, lo que va en desmedro del objetivo de sacar agua desde las zonas de aporte.

En particular, es conocido que el uso de bentonita como aditivo de estabilización de paredes dentro de un pozo genera obstrucción de las fracturas o poros que aportan agua al pozo, ya que es de difícil remoción, privilegiándose el uso de lodos biodegradables que pueden ser removidos aplicando soluciones de hipoclorito de sodio y lavado posterior. Por su parte, en las zonas sin aporte (zona no saturada) parece razonable utilizar bentonita en caso de ser necesario para evitar derrumbe de pozo durante la construcción. Con todo, es recomendable analizar caso a caso, dependiendo del tipo de agua del pozo o del agua disponible para utilizar durante la perforación cuál es el lodo más adecuado (Custodio&Llamas, 1996). Actualmente las empresas perforistas cuentan con especialistas de lodos que pueden apoyar esta decisión operacional.

En la Figura 56 se han graficado las respuestas respecto a la zona del pozo donde se usa bentonita. La mayoría de las faenas indican no utilizarlo o utilizarlo sólo en la zona no saturada (por sobre el nivel del agua). Por su parte, las 4 faenas que declaran usar bentonita en todo el pozo son faenas en condiciones de lluvia semi-árida o húmeda, 3 de las cuales tienen caudales de desaguados por sobre los 100 L/s. Por el contrario, todas las faenas ubicadas en zonas áridas indican no utilizarlo.



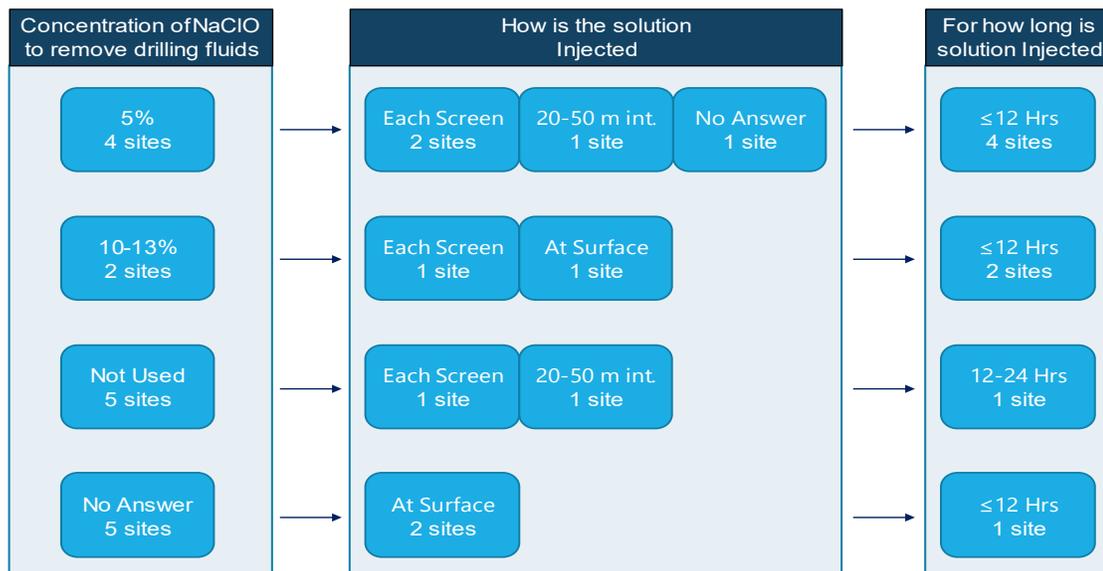
**Figura 56: Uso de bentonita en la perforación de pozos**  
Elaboración propia

## 9.5 Remoción de lodos de perforación (desarrollo del pozo).

Una vez finalizado el pozo y luego de la instalación del casing, es necesario realizar el proceso de remoción del lodo, etapa que se inicia usualmente con la aplicación de una solución (normalmente de hipoclorito) para disolver el lodo de perforación, un período de reposo para que reaccione con el lodo y luego una etapa de limpieza para su extracción. Dependiendo de la profundidad del pozo, la forma en que se inyecta la solución, el tiempo de reposo y la metodología de limpieza, la duración de esta etapa puede variar en una gran cantidad de días para el caso de pozos profundos, lo que debe ser analizado en términos de la eficiencia de la limpieza en relación con los costos y tiempos de la actividad. En referencias como (Sterret, 2007) se indican recomendaciones al respecto.

Es importante destacar que este fue uno de los ítemes con menor cantidad de respuestas por parte de los especialistas que abordaron la encuesta, lo que es llamativo considerando que es una actividad que puede tomar muchos días -y por ende un alto costo y pérdida de oportunidad de hacer otra perforación- si no es bien controlada.

En la Figura 57 se presentan los resultados de las respuestas entregadas por cada faena respecto a cómo realiza el proceso anterior. Se puede ver que en 5 faenas no se estaría aplicando una solución de hipoclorito, por lo tanto, el lavado del lodo se realiza sólo con agua, mientras que 4 faenas indican aplicar soluciones de 5% y otras 2 faenas entre 10 a 13%. Respecto de la forma de incorporar esta solución dentro del pozo, 4 faenas indican que lo hacen en cada criba, 3 faenas lo hacen en tramos entre 20 a 50 m, y otras 3 indican hacerlo directamente desde superficie. Por su parte, en 7 faenas se indica que el tiempo de reposo considerado es normalmente menor a 12 hrs.

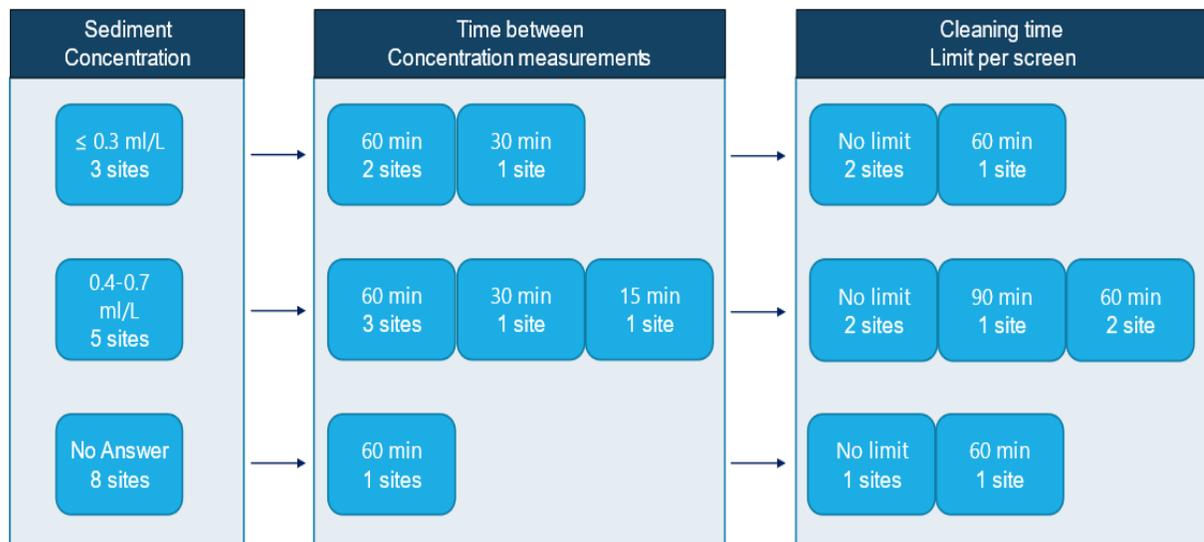


**Figura 57: Aplicación de la solución de hipoclorito**  
Elaboración propia

Respecto de la metodología de remoción del lodo luego del reposo, hay tres aspectos utilizados normalmente para definir hasta cuándo se realiza la limpieza: un criterio de la concentración de sólidos en el agua de salida, frecuencia de chequeo del cumplimiento del criterio de concentración de sólido y tiempo máximo de limpieza por criba.

Las respuestas de las faenas muestran que en 3 faenas el criterio de sólidos es tener una concentración menor de 0,3 mL/L, mientras 5 lo reportan entre 0,4 y 0,7 mL/L. Por su parte, 6 faenas realizan una revisión de este criterio, mientras se realiza la limpieza, cada 60 min y 3 revisan el cumplimiento cada 30 minutos o menos. Por otro lado, 5 faenas no establecen un límite máximo de limpieza por criba, esperando alcanzar el criterio de concentración en algún momento, mientras que 1 faena lo establece en 90 minutos y 4 en una hora como máximo.

Con todo, se debe tener en cuenta que el límite de limpieza por criba puede ser relajado desde los 0,1 mL/L (usualmente utilizado para pozos de producción de agua) a valores un poco más altos como 0,3 ó 0,4 mL/L (Figura 59) en la medida que asuma un mayor riesgo de desgaste de equipos, que para el caso de un bombeo de desaguado podría no ser relevante y podría permitir ahorrar varios días de desarrollo del pozo.



**Figura 58: Criterios para la remoción del lodo desde el interior del pozo**  
Elaboración propia



*0,1 mL/L*



*0,4mL/L sin finos*



*0,4 mL/L con finos*

**Figura 59: Medición de concentración de sólido mediante como Imhoff (5 minutos de medición)**  
Elaboración propia

## 9.6 Diámetros de habilitación de los pozos de desaguado

Los diámetros de habilitación de los pozos es un aspecto importante en la efectividad final que va a tener cada uno en función de su objetivo de desaguado. Si el diámetro de la habilitación es pequeño en relación con el caudal o la altura de agua que requiere movilizar, entonces será un pozo subutilizado ya que deberá implementarse con equipos de bombeo de menor capacidad. Además, existe el riesgo de que el conjunto “motor-bomba-cables” ingrese muy ajustado dentro del pozo, generando daños en el cableado, y por lo tanto, un corto circuito que impida la operación del pozo, tal como se muestra como ejemplo en la Figura 60.



**Figura 60: Ejemplo de daño en cable por habilitación muy ajustada en relación con el diámetro del conjunto motor-bomba-cables**

Elaboración propia

Una recomendación que se propone en (Sterret, 2007) es considerar que el diámetro del *casing* debería ser idealmente 2 tamaños de tubería mayor que el diámetro nominal del conjunto motor-bomba, y como mínimo que esta diferencia sea de al menos un diámetro mayor (ver Tabla 4).

**Tabla 4: Diámetro de habilitación en función del equipo de bombeo**

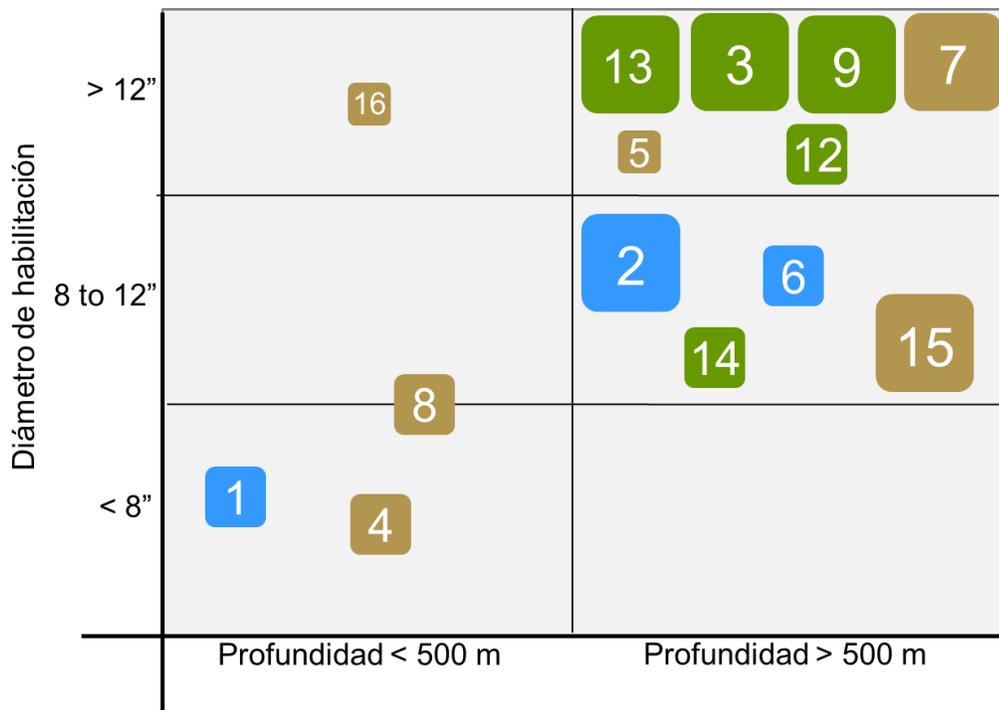
Caudal esperado del pozo		Diámetro nominal de la bomba		Diámetro óptimo de la habilitación*		Diámetro mínimo de la habilitación*	
m <sup>3</sup> /day	GPM	mm	in	mm	in	mm	in
< 545	< 100	102	4	152 ID	6 ID	127 ID	5 ID
409 a 954	75 a 175	127	5	203 ID	8 ID	152 ID	6 ID
818 a 1,910	150 a 350	152	6	254 ID	10 ID	203 ID	8 ID
1,640 a 3,820	300 a 700	203	8	305 ID	12 ID	254 ID	10 ID
2,730 a 5,450	500 a 1,000	254	10	356 ID	14 OD	305 ID	12 ID
4,360 a 9,810	800 a 1,800	305	12	406 OD	16 OD	356 OD	14 OD
6,540 a 16,400	1,200 a 3,000	356	14	508 OD	20 OD	406 OD	16 OD
10,900 a 20,700	2,000 a 3,800	406	16	610 OD	24 OD	508 OD	20 OD
16,400 a 32,700	3,000 a 6,000	508	20	762 OD	30 OD	610 OD	24 OD

+ Para información específica de la bomba, el diseñador debería contactar al proveedor de equipos indicando el caudal esperado del pozo, la altura de carga y los requerimientos de eficiencia.

\* El tamaño de la habilitación del pozo se basa en el diámetro exterior (OD) mayor de las cazoletas de la bomba o, en el caso de las bombas sumergibles, de la bomba y el motor. Aunque se haga, no es una buena práctica colocar la succión de la bomba en la zona de la rejilla (cribas), especialmente en pozos de gran capacidad. Nota: ID se refiere a diámetro interior.

*Fuente: Traducido de Tabla 9.3 Groundwater and Wells, 2007.*

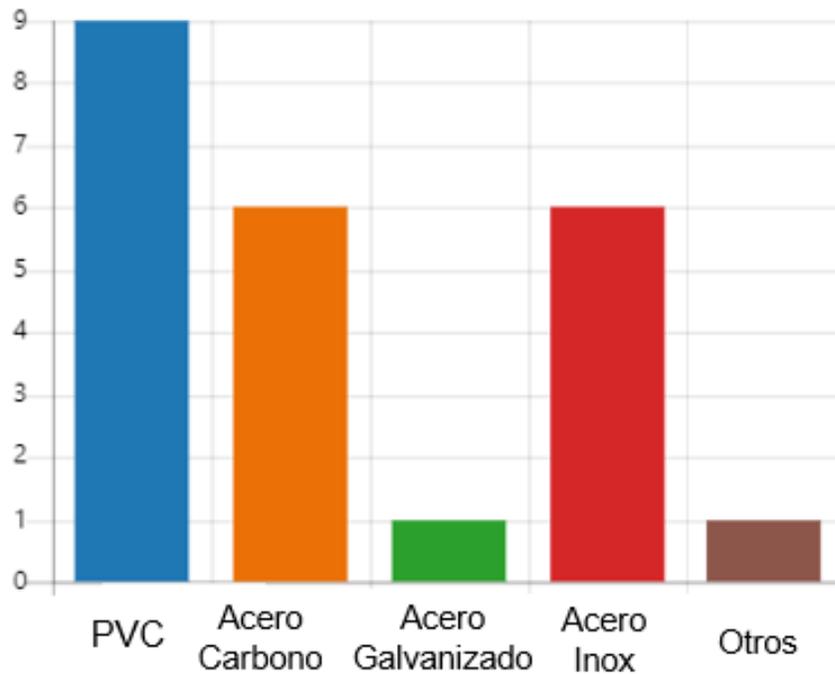
Respecto de los diámetros de habilitación de los pozos de desaguado, se observa en la Figura 61 que las faenas con rajos más profundos y los que se ubican en zonas con mayores tasas de precipitación utilizan diámetros de habilitación de 12” o mayores, lo que se puede relacionar tanto con la necesidad de elevar una mayor altura de agua o bien para extraer mayores caudales, ya que en ambos casos se requiere de equipos de bombeo de mayor diámetro. Las faenas que reportan diámetros menores a 8” son faenas de menor tamaño.



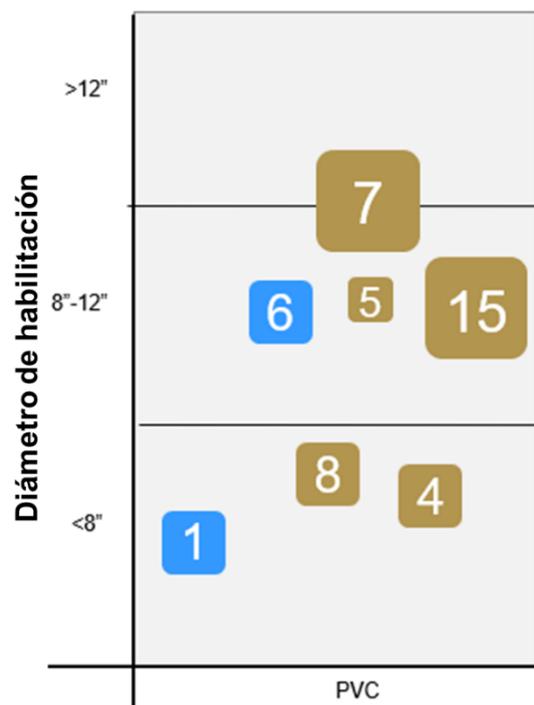
**Figura 61: Diámetro de habilitación en función de la profundidad de la mina**  
Elaboración propia

### 9.7 Materiales utilizados en la habilitación de los pozos

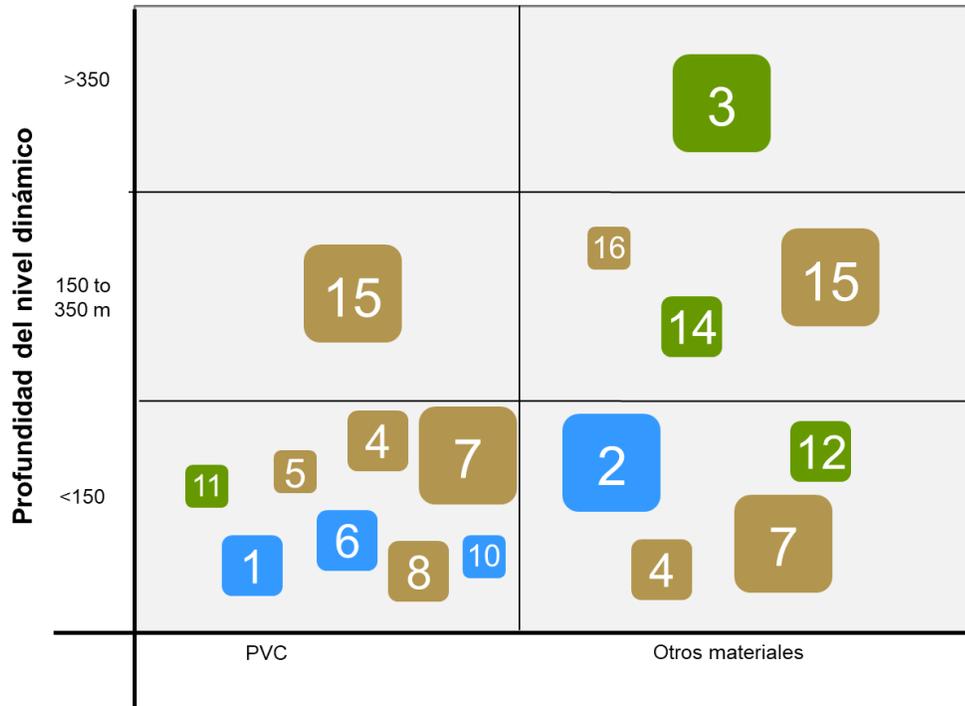
Respecto de los materiales de habilitación que son utilizados para los pozos de desaguado, en la Figura 62 se puede ver que la mayoría de las faenas utiliza materiales como el PVC, acero negro y acero inoxidable. A partir de la Figura 63 y Figura 64 se puede ver que el uso de PVC se relaciona mayoritariamente a faenas que utilizan diámetros de habilitación menores a 12" y con niveles dinámicos menores a 150 m. No se incluyó en la encuesta preguntas que relacionen la calidad del agua con el tipo de material seleccionado, lo que parece relevante de evaluar en cada caso considerando el número de faenas que ha reportado el uso de acero inoxidable.



**Figura 62: Número de faenas y materiales de habilitación utilizados**  
Elaboración propia



**Figura 63: Diámetros de habilitación de faenas que reportan uso de PVC**  
Elaboración propia

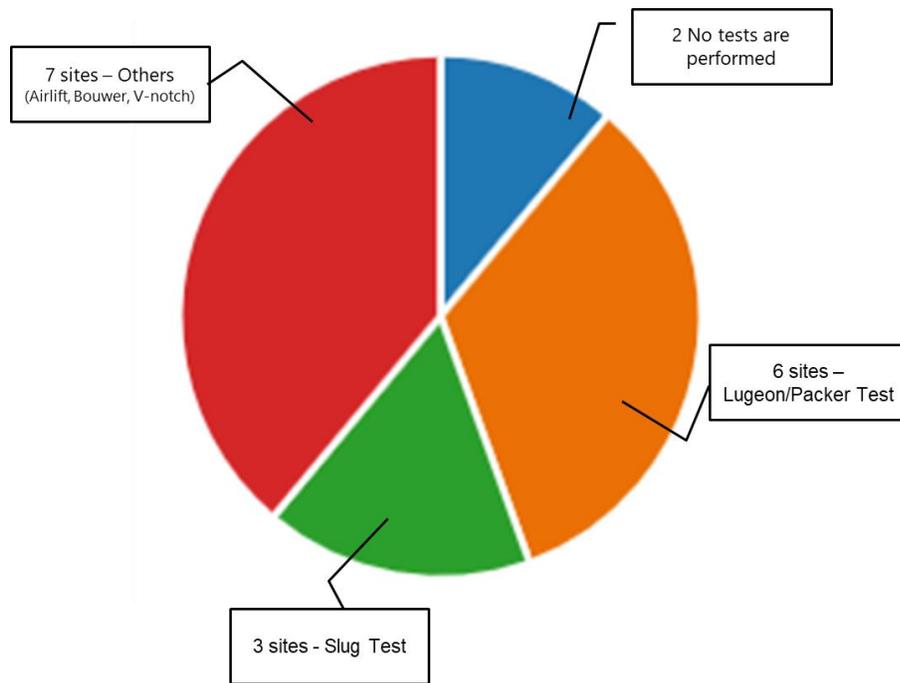


**Figura 64: Materiales de habilitación utilizados y niveles dinámicos**  
Elaboración propia

## 9.8 Realización de ensayos hidráulicos

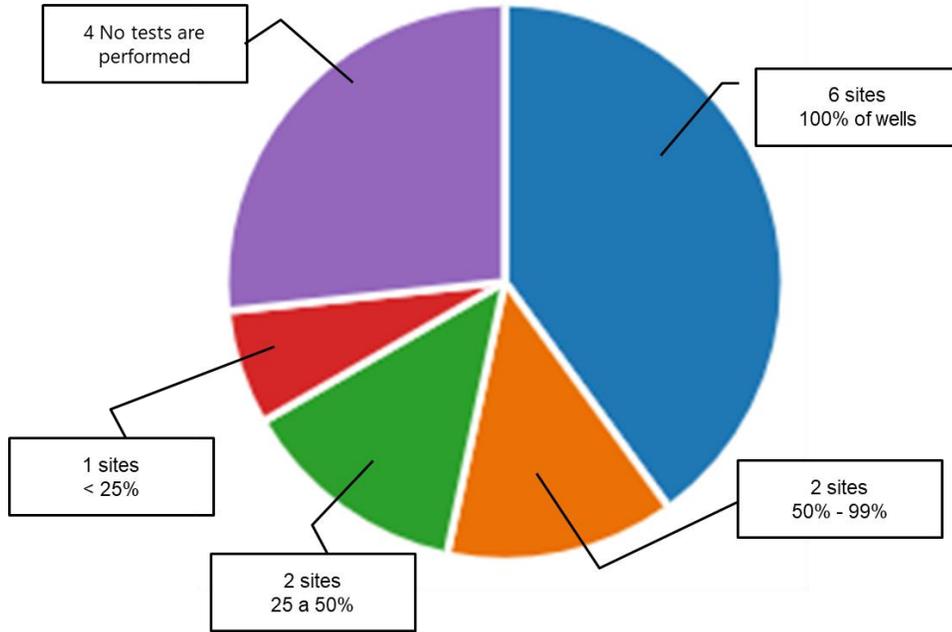
Considerando la importancia de alimentar con información de terreno los modelos hidrogeológicos conceptuales, se ha consultado si durante la perforación de pozos se aprovecha la oportunidad de realizar pruebas hidráulicas para la obtención de parámetros hidráulicos y si se realizan pruebas una vez finalizados los pozos de desaguado.

En la Figura 65 se puede ver que en su mayoría las faenas realizan durante la perforación algún tipo de test hidráulico, ya sea de tipo *packer*, *airlift*, *slug test* y otros más, lo que es una buena práctica considerando los costos y oportunidad de una perforación. Sólo 2 faenas indican no hacerlo de manera sistemática.



**Figura 65: Faenas que realizan pruebas hidráulicas durante la perforación de pozos**  
Elaboración propia

De igual forma, en la Figura 66 se puede ver que la mayoría de las faenas realizan pruebas hidráulicas luego de la perforación de los pozos de desaguado como una buena práctica para poder hacer un diseño adecuado de los sistemas de bombeo y también para obtener parámetros hidráulicos del acuífero, donde 6 faenas indican hacerlo en el 100% de los casos. Sólo 4 faenas reportan no hacerlo.

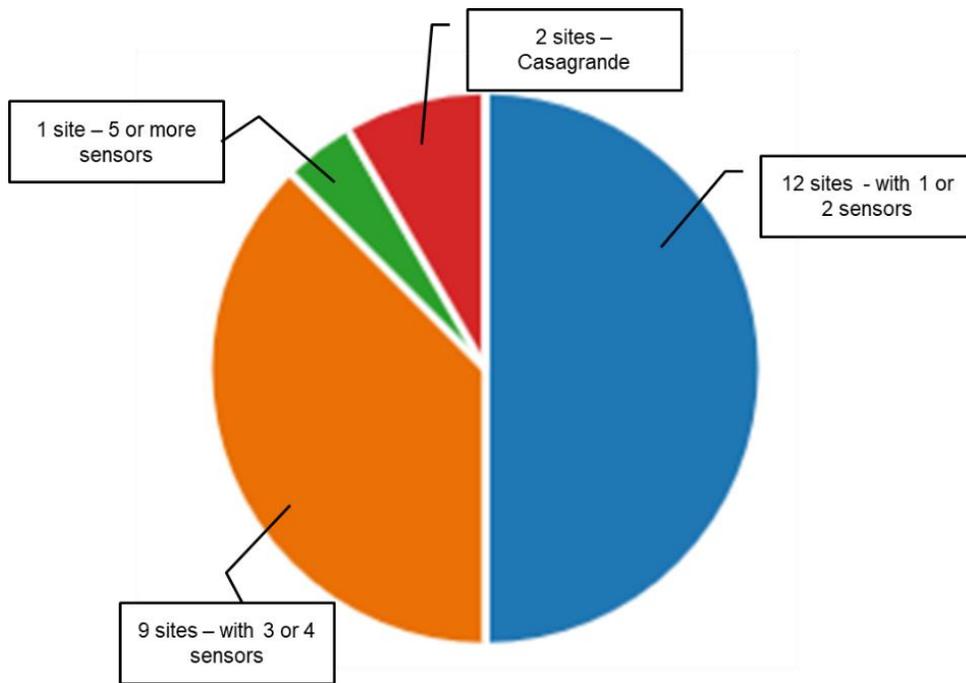


**Figura 66: Faenas que realizan pruebas hidráulicas después de la perforación de pozos**  
Elaboración propia

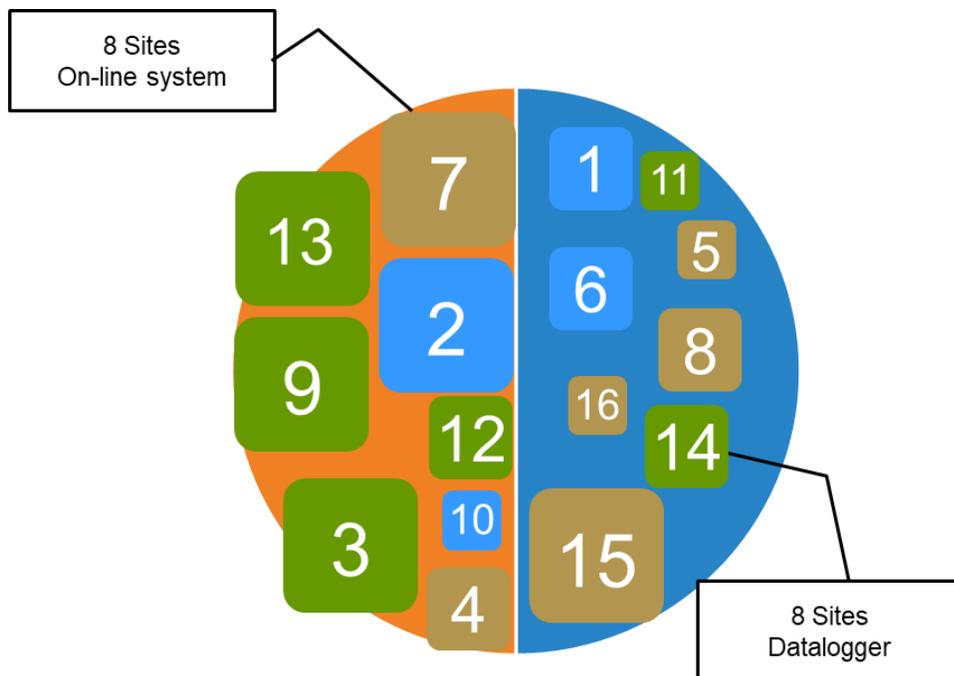
### 9.9 Tipo de infraestructura para medición de niveles piezométricos en el rajo

Respecto del estándar que utilizan las faenas para el monitoreo de sus rajos, todas las faenas que respondieron reportan el uso de piezómetros de tipo Cuerda Vibrante (CV) con uno o más sensores y en algunos casos un uso mixto de CV y piezómetros Casagrande (Figura 67).

En la Figura 68 se puede observar que las faenas que utilizan sistema de monitoreo on-line corresponden principalmente a las de mayor tamaño, lo que parece ser una buena práctica para la optimización de tiempos de descarga de datos.



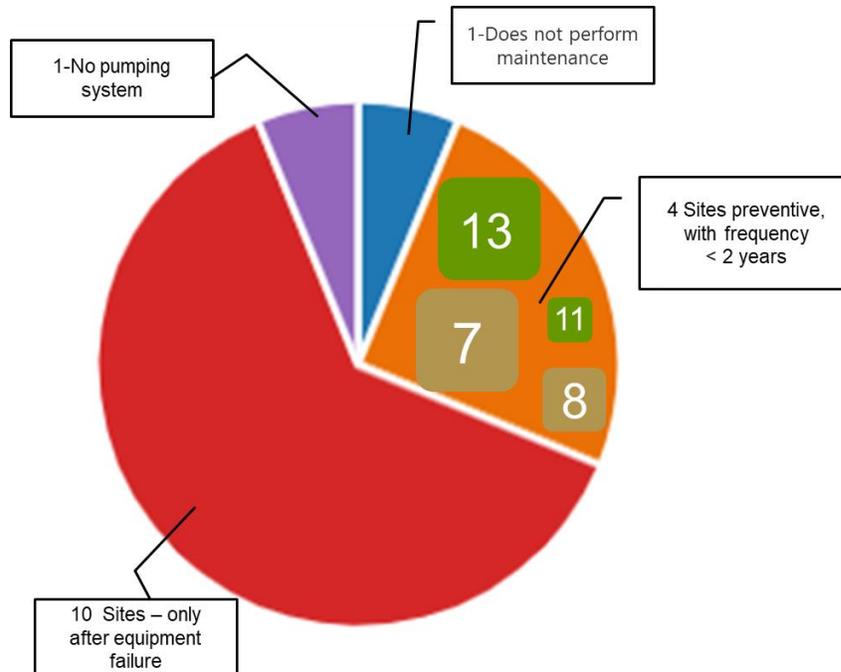
**Figura 67: Infraestructura de monitoreo de niveles en el rajo**  
Elaboración propia



**Figura 68: Sistema de recolección de datos desde los piezómetros**  
Elaboración propia

## 9.10 Estrategia de mantenimiento del sistema de bombeo de pozos de desaguado

Respecto del estándar de mantenimiento de los sistemas de bombeo de los pozos de desaguado, la respuesta general de las faenas es que sólo realizan este tipo de mantenimiento considerando un criterio de falla y sólo 4 reportan realizar un monitoreo preventivo. En la Figura 69 se ha incluido como contexto las faenas que realizan este mantenimiento, donde no se aprecia un patrón específico que relacione este criterio con el tipo de faena.



**Figura 69: Infraestructura de monitoreo de niveles en el rajo**  
Elaboración propia

## 10.Recomendaciones

Tomando en consideración los antecedentes revisados y teniendo en cuenta los diferentes ejemplos analizados, se listan algunas recomendaciones que se sugiere tener en cuenta para el diseño e implementación de una estrategia de desaguado y/o despresurización:

- Una estrategia de D&D debe abordarse con enfoques temporales distintos toda vez que los requerimientos de corto, mediano y largo plazo pueden ser diferentes. Esta temporalidad es intrínseca a la condición de que el movimiento del agua en el suelo o en rocas fracturadas puede ser muy lento, lo que implica que los procesos de despresurización pueden tomar meses o años, lo que obliga a actuar de forma anticipada y planificada.
- Los análisis técnicos hidrogeológicos que soportan la estrategia de D&D, ya sea modelos conceptuales y/o numéricos, deben estar respaldados con información de terreno. En este sentido, la caracterización hidrogeológica desde las etapas tempranas de los proyectos es clave para disponer de modelos hidrogeológicos robustos que entreguen resultados con baja incertidumbre.
- Los procesos de planificación minera deben considerar dentro de los análisis técnicos los aspectos hidrogeológicos, ya que son un input relevante para los análisis de estabilidad de taludes. De esta forma, los planes de minado deben considerar espacios físicos y temporales que permitan ejecutar las acciones de perforación necesarias que permitan a su vez lograr las metas de D&D que se establezcan en cada caso.
- Se debe tener en cuenta que la implementación de un programa de D&D puede ser de alto costo, por lo que es importante diseñar programas optimizados para lo cual la modelación numérica hidrogeológica es fundamental.
- De igual forma, esta optimización debe considerar que debido al natural avance del minado, muchos pozos, puntos de control e infraestructura, serán destruidos o deberán ser movilizados año a año, por lo tanto, deben tratar de ubicarse en posiciones que permitan maximizar su vida útil o minimizar su movilidad. Para ello, nuevamente es clave una adecuada coordinación con los equipos de planificación.
- Respecto de la implementación de metodologías de D&D como túneles y galerías, parece ser que esta opción no es muy eficiente de implementar si el objetivo es sólo D&D considerando que el tamaño de túnel que se debe construir debe ser grande para el ingreso de equipos de perforación y hacer mantenimiento, lo que sugiere altos costos de CAPEX, junto con altos costos de mantenimiento en operación (OPEX) y cierre. Por otro lado, el avance de la mina puede generar que el túnel o galería quede hidráulicamente colgado en un tiempo acotado desde su construcción, teniendo que de todas formas implementar una estrategia de uso de pozos y/o drenes. Con todo, se debe plantear un caso de negocio (con

sus *trade-off*) en el evento que alguna faena quiera profundizar en esta opción, sobre todo cuando el túnel o galería pueda ser utilizado para abordar múltiples objetivos como el de exploración minera.

- Respecto del levantamiento de información de terreno, se sugiere establecer como criterio general la ejecución permanente de pruebas hidráulicas durante la perforación de los pozos de bombeo y piezómetros de control, lo que permitirá aumentar la densidad de información de parámetros hidráulicos de las distintas unidades hidrogeológicas y de las zonas de falla que sean relevantes para el movimiento del agua en la mina.
- Considerando los avances tecnológicos actuales, se recomienda que los sistemas de control de niveles (piezómetros Casagrande y cuerdas vibrante) y caudales de los sistemas de desaguado estén implementados con sistemas en línea ya que facilita por un lado el monitoreo del comportamiento de los niveles y disminuye los tiempos de operación para el rescate de datos desde terreno.
- Aun cuando la mayoría de las faenas consideran el criterio de hacer mantenimiento de los equipos de bombeo de pozos sólo cuando ocurren fallas, se sugiere revisar esta estrategia para el caso de pozos que estén ubicados en zonas que se verán afectadas por el crecimiento del rajo en un tiempo más lejano o para aquellos pozos que puedan ser más relevantes para la despresurización de ciertos sectores de la mina.
- Cuando la mina se va profundizando, se requiere que los pozos de monitoreo y desaguado también se vayan profundizando, lo que implica mayores tiempos de perforación en cada posición. Este aumento en los tiempos de perforación puede ser excesiva en sectores cercanos a los frentes de trabajo. Dado esto, es importante que los equipos técnicos a cargo de las perforaciones hidrogeológicas evalúen permanentemente el desempeño de cada etapa de la construcción de un pozo, tanto de la perforación propiamente tal, como también de la etapa de habilitación y desarrollo (limpieza) de modo que los ahorros de tiempo estén dirigidos a optimizar estas actividades y no a dejar de lado la ejecución de pruebas hidráulicas.
- Para los pozos de bombeo se sugiere revisar los diámetros de habilitación considerando que las faenas con rajos más profundos utilizan diámetros de 12” o mayores, lo que parece razonable teniendo en cuenta los diámetros de equipos de bombeo y diámetros de cables.
- Respecto de los materiales para la habilitación de los pozos, se observa una práctica extendida el uso de PVC para pozos de desaguado de menor profundidad. Se sugiere hacer una revisión con los fabricantes del material para establecer profundidades máximas de resistencia para diámetros de hasta 12” entendiéndose que este material permite ahorrar costos, disminuye los tiempos de habilitación y es considerado un material chancable.

## 11. Conclusiones

A partir de aspectos conceptuales y de ejemplos reales de diseño e implementación, se ha realizado un análisis sobre los principales elementos operacionales e hidrogeológicos que se deben tener en cuenta respecto de los distintos aspectos que conforman una estrategia de despresurización y desaguado con el fin de identificar aquellos mínimos que deben ser abordados en su implementación y, con ello, generar recomendaciones de mejores prácticas, tanto operacionales como de gestión interna, para su ejecución en función de las condiciones específicas a la que se ve enfrentada cada faena.

De esta forma, se han identificado aspectos claves en la cadena de toma de decisiones que se sugiere analizar caso a caso, como el levantamiento de información hidrogeológica a partir de etapas tempranas de los proyectos y que se recomienda debe mantenerse durante todo el período de operación ya que permitirá robustecer los modelos hidrogeológicos que se utilizarán como herramientas para diseñar distintas alternativas de programa de despresurización que sean efectivos para los análisis de estabilidad de taludes, en caso de que cada faena lo requiera.

Por su parte, también como parte de las recomendaciones respecto de la toma de decisiones, se enfatiza en la necesidad de que las faenas establezcan ciclos de planificación con hitos claros que permitan a cada área técnica -por ejemplo geología, geotecnia, hidrogeología- incorporar la información más actualizada que dispongan para alimentar el proceso de planificación de corto, mediano y largo plazo. También, desde el punto de vista de la gestión interna, es importante establecer incentivos claros en la ejecución de los contratos, especialmente los de perforación, para que todos los objetivos de las campañas que se deban ejecutar sean cumplidos y no sólo de aquella área que normalmente administra el servicio (que usualmente es geología de exploración).

A partir del análisis de casos, se pudo dar cuenta que es factible diseñar sistemas de despresurización a la medida de cada faena en consideración de los análisis de estabilidad, pudiendo en cada situación incorporar aspectos de detalle como ubicación, longitud y temporalidad de la infraestructura a implementar. Es relevante nuevamente mencionar acá que la certidumbre de estas proyecciones irá de la mano con la cantidad de información de terreno que soporten las herramientas de modelación utilizadas, tanto desde el punto de vista hidrogeológico como geotécnico, especialmente respecto de las características hidrogeológicas de los materiales y de una buena caracterización del comportamiento hidráulico de las estructuras.

En cuanto a los resultados de la encuesta realizada a 16 faenas de rajo abierto ubicadas en distintas partes del mundo, se han podido comparar criterios respecto de la implementación de algunos elementos de la estrategia de D&D, dando cuenta que el estado del arte en términos generales es bastante similar en Chile respecto de otros países del globo, donde las metodologías de despresurización y desaguado están normalmente asociadas a un gran número de pozos de bombeo ubicados al interior y exterior de los rajos. El análisis comparativo permitió además establecer algunas buenas prácticas y recomendaciones en cuanto a la infraestructura de desaguado utilizada, materiales de habilitación de pozos, metodología de desarrollo de los pozos, levantamiento de información de permeabilidades, entre otros.

Un aspecto que también parece interesante de considerar es que las explotaciones mineras muy grandes, independiente de que se encuentren en zonas de condición climática semiáridas o húmedas, requieren de sistemas de desagüe robustos, con infraestructuras a menudo numerosas y variadas.

En las explotaciones mineras encuestadas, todos los sistemas de desagüe favorecieron el uso de pozos frente a otros tipos de infraestructuras. En casi todos los casos, el desagüe se apoya también en el bombeo en el fondo del pozo.

Por su parte, la mayoría de las explotaciones no realiza un mantenimiento preventivo de los pozos desaguado, y sólo intervienen los equipos cuando se produce un fallo en el sistema de bombeo, lo que puede ser entendible en pozos que tengan una corta vida útil. Sin embargo, se sugiere revisar caso a caso esta filosofía de operación considerando que algunos pozos en particular pueden ser muy relevantes para la despresurización de sectores específicos de la mina, por lo que puede ser muy relevante asegurar la operación continua de estos sistemas.

## 12. Bibliografía

- Beale & Read. (2013). *Evaluating Water in Pit Slope Stability*. Collingwood, Australia.: CSIRO PUBLISHING.
- Binet, S. M. (2007). In situ characterization of flows in a fractured unstable slope. *Geomorphology*, 86, 193-203.
- Custodio&Llamas. (1996). *Hidrología Subterránea, Segunda Edición*.
- DGA. (2022). *Resolución N°2682 de 2022. Determina las formas, requisitos y periodicidad en que se deberá entregar la información referida al artículo 56 Bis del Código de Aguas.* .
- Espinoza, C. (2019). *Aguas subterráneas en medio fracturado y su relación con la ocurrencia de movimientos en masa en una ladera del Valle de Aburrá*. Medellín, Colombia: Universidad EAFIT.
- FCIHS. (2009). *Hidrogeología - Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea*.
- Herrera, J. (2019). *Drenaje y gestión del agua de la mina*.
- ITASCA. (2021). *Optimización del proceso de perforación de pozos de desaguado. Estudio de benchmark global*.
- ITASCA. (2023). *Actualización Modelo Numérico Hidrogeológico 3D. Sierra Gorda Contractual Minera. Informe de cumplimiento ambiental presentado a SMA en Nov.2023*.
- OPS. (1997). *Vulnerabilidad de los sistemas de agua potable frente a deslizamientos*.
- OSC. (2016). *Standards of Disclosure for Mineral Projects, National Instrument 43-101*. Ontario Securities Commission.
- Rahardjo. H., H. K. (2003). *Effectiveness of horizontal drains for slope stability*.
- Read & Stacey. (2009). *Guidelines for Open Pit Design*. Melbourne, Australia: CSIRO Publishing
- Sánchez, E. (2017). *Consideraciones Hidrogeológicas para el Desarrollo de un Sistema Múltiple de Sensores de Presión de Poros. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias Mención Geología*. Santiago: Universidad de Chile.
- SEA. (2012). *Guía para el uso de modelos de agua subterráneas en el SEIA*. Servicio de Evaluación Ambiental.
- SERNAGEOMIN. (2020). *Guía metodológica para la presentación y actualización de planes de cierre sometidos al procedimiento de aplicación general*.
- Singhal & Gupta. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks (Segunda ed.)*. New York: Springer.

Sterret, B. (2007). *Groundwater and Wells, Third Edition - Johnson Screen.*