



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Postgrado

Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica

**ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE POZOS DE
BOMBEO SUBTERRÁNEO PARA ABATIR EL NIVEL FREÁTICO DEL ACUÍFERO TERMAL
DE BAJA TEMPERATURA QUE AFECTA EL DESARROLLO DE TÚNELES EN MINAS**

Ing. Ruddy Amílkar Ramírez Tenas

Asesorado por el Ing. MSc. Víctor Manuel López Juárez

Guatemala, septiembre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE POZOS DE BOMBEO SUBTERRÁNEO PARA ABATIR EL NIVEL FREÁTICO DEL ACUÍFERO TERMAL DE BAJA TEMPERATURA QUE AFECTA EL DESARROLLO DE TÚNELES MINEROS

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. RUDDY AMÍLKAR RAMÍREZ TENAS
ASESORADO POR EL ING. MSC. VÍCTOR MANUEL LÓPEZ JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Ing. Luis Enrique Contreras
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE POZOS DE BOMBEO SUBTERRÁNEO PARA ABATIR EL NIVEL FREÁTICO DEL ACUÍFERO TERMAL DE BAJA TEMPERATURA QUE AFECTA EL DESARROLLO DE TÚNELES MINEROS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 04 de marzo de 2017.

Ing. Ruddy Amílkar Ramírez Tenas



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102

DTG. 284.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE POZOS DE BOMBEO SUBTERRÁNEO PARA ABATIR EL NIVEL FREÁTICO DEL ACUÍFERO TERMAL DE BAJA TEMPERATURA QUE AFECTA EL DESARROLLO DE TÚNELES EN MINAS**, presentado por el Ingeniero Ruddy Amilkar Ramírez Tenas, estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, octubre de 2020.

AACE/asga

Guatemala, Septiembre de 2020

EEPFI-1152-2020

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE POZOS DE BOMBEO SUBTERRÁNEO PARA ABATIR EL NIVEL FREÁTICO DEL ACUÍFERO TERMAL DE BAJA TEMPERATURA QUE AFECTA EL DESARROLLO DE TÚNELES EN MINAS”** presentado por el **Ingeniero Ruddy Amilkar Ramírez Tenas** quien se identifica con Carné-200312493 correspondiente al programa de **Maestría en Ciencias en Ingeniería en Geotécnica**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Ing. Edgar Danyó Álvarez Cotí
Director



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, Septiembre de 2020

EEPP1-1151-2020

Como Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE POZOS DE BOMBEO SUBTERRÁNEO PARA ABATIR EL NIVEL FREÁTICO DEL ACUÍFERO TERMAL DE BAJA TEMPERATURA QUE AFECTA EL DESARROLLO DE TÚNELES EN MINAS"** presentado por el Ingeniero Ruddy Amílkar Ramírez Tenas quien se identifica con Carné 200312493.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, Septiembre de 2020

EEPFI-1153-2020

En mi calidad como Asesor del Ingeniero **Ruddy Amilkar Ramírez Tenas**, quien se identifica con carné **200312493**, procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: "**ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE POZOS DE BOMBEO SUBTERRÁNEO PARA ABATIR EL NIVEL FREÁTICO DEL ACUÍFERO TERMAL DE BAJA TEMPERATURA QUE AFECTA EL DESARROLLO DE TÚNELES EN MINAS**", quien se encuentra en el programa de **Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica**, en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



Mtro. Ing. Víctor Manuel López Juárez
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por otorgarme la inspiración suficiente para mejorar cada día.
Mis padres	Ruddy Ramírez y Matilde Tenas (q. d. e. p.) Por orientarme certeramente y apoyarme en mis proyectos de manera incondicional.
Mi esposa	Yazminiha Alejandra Salazar, por apoyarme en todo lo que emprendo.
Mis hijos	André y Giancarlo Ramírez Salazar, los llevo en mi corazón y mente, otorgan la fuerza suficiente para aventurarme a ser la mejor versión de mí.
Mis hermanas	Yaritza y Lucylena Ramírez Tenas, por demostrarme su cariño y aprecio siempre.
Familia y amigos	Por todas sus muestras de cariño y tener palabras de aliento en momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser el lugar que me forjó como persona y profesional.
Facultad de Ingeniería	Por otorgarme el conocimiento que ha dado lugar a retos inigualables.
Mis amigos de la Facultad	Por ser partícipes de cada uno de los éxitos alcanzados.
Asesor	Por todos sus consejos y tiempo brindado durante el desarrollo de mi trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XIII
OBJETIVOS	XV
HIPÓTESIS	XVII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	1
1.1. Descripción general	1
2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA	3
2.1. Análisis geológico estructural	4
2.1.1. Geología regional	4
2.1.2. Geología local	5
2.1.3. Geología estructural	6
2.2. Análisis geotécnico	9
2.2.1. Caracterización del macizo rocoso	9
2.2.2. Aspectos estructurales	11
2.2.3. Calidad de la masa rocosa	12
2.2.4. Clasificación del macizo rocoso	13
2.2.5. Resistencia de la roca intacta	14
2.2.6. Resistencia de la masa rocosa	15

2.3.	Análisis hidrogeológico.....	16
2.3.1.	Hidrología	16
2.3.2.	Agua subterránea	18
2.4.	Definición de acuífero termal.....	19
2.5.	Tipos de captaciones de agua subterránea.....	19
2.6.	Piezómetros	20
2.7.	Gradiente de temperatura	21
2.8.	Tipos de acuíferos termales	21
2.9.	Sistema de fallas para la identificación de acuíferos predominantes.	22
2.10.	Efectos de acuíferos termales durante el minado.....	23
2.10.1.	Operaciones de mina subterránea.....	23
2.10.2.	Estabilidad del túnel	24
2.11.	Definición de modelo hidrogeológico.....	25
2.12.	Definición de áreas de influencia de pozos de bombeo.....	28
2.13.	Sistema de perforación de pozos	29
2.13.1.	Perforaciones en superficie	30
2.13.2.	Perforaciones subterráneas.....	31
3.	IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO	37
3.1.	Método de perforación de pozos subterráneos	37
3.2.	Diseño de pozos de bombeo.....	40
3.3.	Selección de equipo de bombeo	43
3.4.	Pruebas de bombeo	44
3.5.	Determinación de variables hidrogeológicas	49
3.6.	Calificación del acuífero	51
3.7.	Beneficios esperados con la implementación	53
4.	SEGUIMIENTO Y CONTROL	55

4.1.	Método de medición de flujo de agua	55
4.2.	Método de medición de niveles de agua	56
4.3.	Control de caudal y volúmenes de agua extraído	57
4.4.	Niveles dinámicos de pozos	61
4.5.	Niveles freáticos mediante piezómetros.....	62
5.	MANTENIMIENTO Y MEDIO AMBIENTE	65
5.1.	Plan de mantenimiento a equipo de bombeo y pozos	65
5.2.	Muestreo de calidad de agua.....	67
5.3.	Método de tratamiento de agua	69
5.4.	Disposición final del agua postratamiento.....	69
	CONCLUSIONES	71
	RECOMENDACIONES.....	73
	REFERENCIAS	75
	ANEXOS	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

1.	Plano general Mina Marlín sector West Vero	2
2.	Mapa geológico regional	5
3.	Geología en sector West Vero	6
4.	Proyección superficial de la mineralización y sistemas de fallas. Según Wood (2010)	7
5.	Sección geológica pozo 13U15-35C	8
6.	Diagrama estereográfico de planos principales de West Vero.....	10
7.	Diagrama de roseta de discontinuidades West Vero.	11
8.	Ubicación de la mina respecto a los afluentes.....	17
9.	Presencia de agua subterránea termal.....	18
10.	Inferencia de Sección hidrogeológica.....	26
11.	Distribución espacial de influencia de los dos acuíferos en Mina Marlín	27
12.	Plan de minado en Mina Marlín.....	29
13.	Método de instalación de tubería de recubrimiento PVC	33
14.	Distribución general de sumideros en interior Mina Marlin	34
15.	Falla con influencia en el acuífero termal	35
16.	Área de trabajo influenciada por acuífero termal	36
17.	Modelo de perforación de pozos en el sector de West Vero.....	38
18.	Perforación de pozo con equipo Raise Boring Robbins.....	39
19.	Pozo finalizado donde se muestra nivel freático somero	40
20.	Instalación de tubería PVC para recubrimiento en pozo.....	41
21.	Diseño constructivo de pozos en West Vero	42
22.	Rendimiento equipo electrosumergible	43
23.	Instalación final de pozo.....	44

24.	Datos obtenidos con sonda Aqua Troll 500	45
25.	Abatimiento de pozo	48
26.	Obtención de transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento.....	50
27.	Perfil longitudinal de pozos implementados	52
28.	Condiciones de túnel sin implementar sistema de pozos	53
29.	Condiciones de túnel implementado el sistema de pozos	54
30.	Pozo con flujómetro electromagnético instalado	56
31.	Caudal promedio de pozos durante un mes de bombeo	59
32.	Caudal promedio y volumen extraído mensualmente	60
33.	Nivel dinámico de pozo.....	62
34.	Nivel piezómetro	63

TABLAS

I.	Sistemas principales de discontinuidades estructurales de West Vero	10
II.	Calidad del macizo rocoso con relación al índice RMR.....	14
III.	Calidad de la masa rocosa, la veta West Vero.....	14
IV.	Resistencia compresiva de la roca intacta de West Vero.....	15
V.	Propiedades de resistencia de la masa rocosa de West Vero	16
VI.	Datos obtenidos con sonda Aqua Troll 500	46
VII.	Tabla de clasificación de acuífero	51
VIII.	Fallas comunes en equipos electrosumergibles y posibles soluciones	66
IX.	Resultados de muestras de agua	68

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados centígrados
GPM	Galones por minuto
RMR	Índice de calidad del macizo rocoso
RQD	Índice de calidad de roca
PSI	Libra de fuerza por pulgada cuadrada
m	Metro
msnm	Metros sobre el nivel del mar

GLOSARIO

Abatir	Descenso del nivel de agua en un pozo mecánico.
Acuífero	Formación geológica subterránea que alberga agua.
Aqua Troll 500	Sonda multiparámetro que mide presión y temperatura en el interior de pozos.
Aquifertest Pro	Programa para el análisis, interpretación y visualización de información generada mediante pruebas de bombeo.
Arsénico	Es un elemento químico de la tabla periódica que pertenece al grupo de los metaloides.
CAD	Diseño asistido por computadora. (Siglas del nombre en inglés Computer Aided Design).
Flujómetro	Instrumento de medida para la medición de caudal o gasto volumétrico de un fluido.
Geomecánica	Implica el estudio geológico del comportamiento suelo y rocas.
Hastiales	Muros que se encuentran en el interior de una galería o túnel minero.

Hidrogeología	Parte de la geología que estudia el ciclo de las aguas superficiales y subterráneas.
ISRM	Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas. (Siglas del nombre en inglés).
Piezómetro	Instrumento que se usa para medir la compresibilidad de los líquidos.
Sumidero	Abertura o conducto que existe en suelos y permite el desagüe de agua natural.
Transmisibilidad	Tasa de flujo bajo un determinado gradiente hidráulico a través de una unidad de anchura de acuífero de espesor dado, y saturado.
Tubería	Conducto formado por tubos que sirve para distribuir líquidos o gases.

RESUMEN

Según la formación geológica del lugar donde se lleve a cabo el proceso de desarrollo de túneles para la extracción de minerales, se tiene la probabilidad de interceptar acuíferos termales de alta o baja temperatura.

El avance del túnel se interrumpe cuando se interceptan acuíferos termales durante el proceso de su desarrollo porque el riesgo aumenta significativamente por las condiciones del lugar y la demora afecta el proceso productivo de una mina.

Por lo tanto, es importante considerar que los trabajos de desarrollo del túnel deben carecer de interrupciones. Por esta razón, es indispensable proponer el diseño de un sistema de pozos, cuya función sea abatir el nivel freático del lugar para garantizar las condiciones que permitan el desarrollo continuo y el cumplimiento de los planes de minado.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La presencia de acuíferos termales (en zonas volcánicas) durante el proceso de extracción de minerales, empleando obras subterráneas y según la geología del lugar, la profundización y desarrollo de túneles pueden prolongar el ciclo de minado e incrementar el riesgo de colapso del túnel, debido a la saturación del suelo y a la probabilidad de encontrar áreas que poseen malas condiciones geomecánicas en el macizo rocoso.

Las áreas de mineralización presentan fracturación y fallas que propician condiciones favorables para la transmisibilidad mayor del acuífero termal. Por ello, durante el desarrollo de los túneles se enfrentan problemas que impiden la continuidad del plan de minado. Por esta razón, se debe analizar el acuífero y proponer una solución factible y viable para resolver el problema y obtener un ciclo de minado eficiente.

Para identificar las zonas afectadas por el acuífero termal, se realiza un estudio hidrogeológico que permita reconocer cada uno de los pozos. Por medio de este estudio se establecen parámetros para el diseño apropiado del pozo y el equipo de bombeo que se instalará en el interior del pozo.

Por lo anterior, se plantea la siguiente interrogante principal:

¿Permitirá un modelo hidrológico que se ubiquen los pozos de manera efectiva, para garantizar el abatimiento del nivel freático en los desarrollos mineros?

Asimismo, se formulan las siguientes preguntas secundarias:

¿Los pozos que se ubiquen en el interior de la mina, tendrán un método constructivo factible para la instalación de equipos electro sumergible?

Al tener en funcionamiento el sistema de pozos, ¿se evidenciará un descenso del nivel freático para mejorar las condiciones en el desarrollo de túneles mineros?

OBJETIVOS

General

Determinación de un modelo hidrogeológico para diseñar un sistema de pozos de bombeo subterráneo que garantice el abatimiento del nivel freático en desarrollos mineros.

Específicos

- Definir el modelo de influencia del acuífero termal en el desarrollo del túnel.
- Inferir mediante la caracterización geológica la influencia del acuífero termal de baja temperatura, en el área de desarrollo del túnel.
- Realizar un análisis geotécnico con el que se obtenga información sobre el macizo rocoso y se identifiquen los efectos negativos que tiene las aguas subterráneas en la estabilidad de la obra subterránea.
- Identificar el tipo de acuífero termal que afecta al desarrollo del túnel.
- Definir el modelo hidrogeológico, que permita diseñar el sistema de bombeo para el control del nivel freático.

HIPÓTESIS

Un análisis hidrogeológico permitirá localizar el agua subterránea termal que afecta el desarrollo de túneles mineros, identificar el sistema de pozos subterráneos para abatir el nivel freático y lograr desarrollo eficaz del túnel minero.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Este trabajo se fundamentará en la investigación de campo, cuyo propósito es identificar las áreas de desarrollo de túneles afectados por acuíferos termales.

Luego, por medio de herramientas de software CAD, se marcarán los lugares afectados para identificar con claridad las áreas e inferir, en función de ellas, que se espera se tengan los mismos inconvenientes y con ello recurrir al plan de minado.

La profundidad del desarrollo minero incide en la decisión de cavar pozos subterráneos o superficiales, para abatir los niveles freáticos. En este caso, se han realizado pozos subterráneos porque los pozos superficiales de bombeo exigen que las perforaciones sean mayores a los 600 metros de profundidad, lo que aumentaría los costos y el tiempo de implementación.

El diseño de los pozos subterráneos debe contemplar un diámetro que permita albergar en su interior un equipo de bombeo. Además, el pozo debe tener un tubo de recubrimiento con ranuras para evitar el colapso de sus paredes y permita el aporte de agua al área donde se instalará la bomba electro sumergible.

Durante las pruebas de bombeo se clasifica el acuífero termal. Por ello, la importancia de estas pruebas radica en la calificación del acuífero y, a partir de ello, planificar la cantidad de pozos necesarios para abatir los niveles freáticos del lugar y obtener una mejora significativa en el desarrollo del túnel minero.

INTRODUCCIÓN

Este documento da a conocer la metodología que se debe utilizar cuando, en el desarrollo de túneles para extracción de minerales, se tiene interferencia de un acuífero termal de origen volcánico, el cual dificulta las operaciones de la mina relacionadas al ciclo de minado.

Asimismo, da a conocer una posible solución a la presencia de acuíferos termales durante la excavación de túneles, la cual se fundamenta en conocer las variables hidrogeológicas del lugar, las cuales pueden caracterizar el acuífero y con base en esto, se generen propuestas de pozos de extracción de agua, para tener control del nivel freático.

Los resultados esperados con la implementación de un sistema de pozos para el control del nivel freático es generar lugares propicios para desarrollar túneles, en los cuales no se vea afectada la operación y garantizar que esta sea fluida y segura.

Se brinda conocimiento sobre la importancia de las variables hidrogeológicas, las cuales permiten que se caracterice el acuífero termal, permitiendo conocer las ubicaciones estratégicas de los pozos, garantizando con ello lograr abatir el nivel freático, asimismo, se hace referencia a la importancia que tiene el monitoreo constante tanto del sistema de bombeo como de la calidad del agua extraída, para la toma de decisiones de brindar un manejo especializado de la misma.

En generalidades del proyecto se brinda un panorama del problema que se presenta, cuando se detecta que, el desarrollo del túnel minero está siendo afectado por un acuífero termal, dando a conocer los indicios que se presenta;

así como, los problemas que se tienen con lo que respecta al desarrollo del túnel, dado que las condiciones varían adversamente con lo que respecta las condiciones del lugar.

El análisis del problema brinda un panorama detallado de cómo afectan los acuíferos termales durante el desarrollo de la mina, la manera en la que se obtiene información y como esta se debe inferir para generar toma de decisiones, sobre el método a emplear para controlar el efecto del agua termal en el desarrollo del túnel minero.

En la implementación del diseño, presenta la metodología que se debe emplear para diseñar un sistema de pozos subterráneos en túneles mineros, se detalla la manera en que se realiza el proceso de perforación, instalación de equipo sumergibles y resultados de las pruebas de bombeo, que dan parámetros que aportan conocimiento sobre la capacidad del pozo y asimismo, brindan conocer variables hidrogeológicas, las cuales permiten seguir infiriendo con la caracterización del acuífero.

En el seguimiento y control se informa sobre cómo realizar el control de caudal y volumen extraído de agua; asimismo, la importancia de realizar monitoreo de piezómetros, para conocer niveles freáticos y la medición de niveles dinámicos en pozos y generar registros que permitan conocer el comportamiento del acuífero.

En mantenimiento y medio ambiente se muestra un plan de mantenimiento de los equipos electro sumergibles; así como, también aspectos de muestreo de calidad de agua, para la identificación de parámetros que faciliten la toma de decisión al respecto de la implementación de un método de tratamiento de esta.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. Descripción general

Durante el proceso de minado y desarrollo de túneles en minas de extracción de minerales, situadas en zonas volcánicas existe la probabilidad de que la influencia de un acuífero termal volcánico de alta o baja temperatura afecte la perforación y las labores mineras porque fluctuación de la temperatura en las áreas de trabajo propicia que los ciclos de minado sean más lentos y las personas no pueden exponerse por tiempos prolongados a la temperatura.

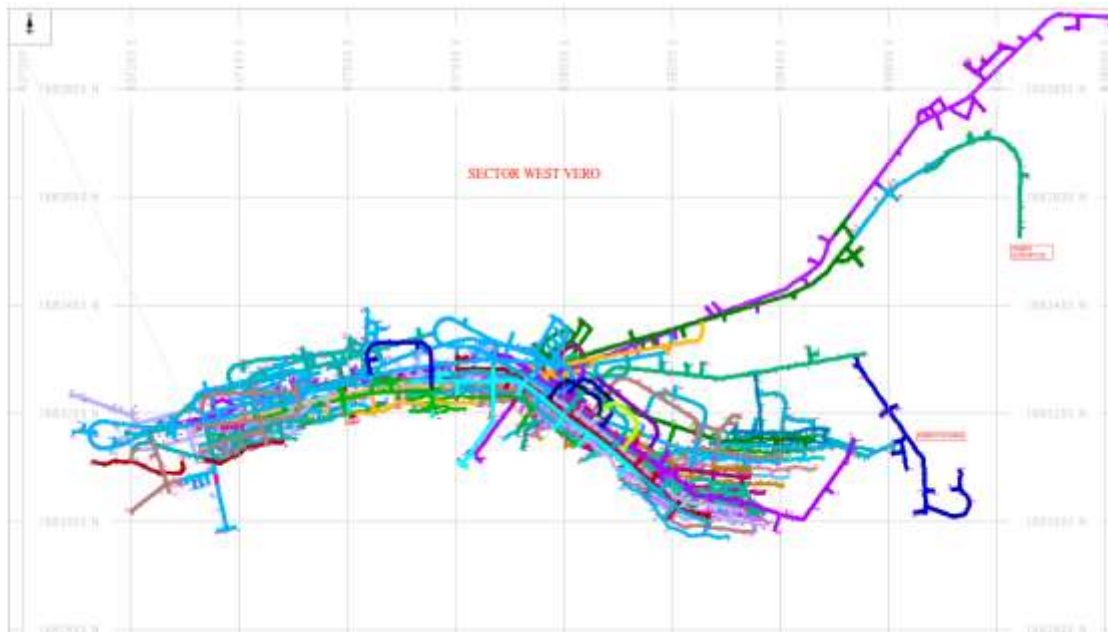
Las condiciones del lugar se tornan complejas, debido al bombeo del agua que surge y esto retarda aún más los procesos. Adicionalmente, existe el peligro potencial de que, en un terreno saturado por el agua se registren derrumbes en lugares donde no se cuenta con buenas condiciones geomecánicas del macizo rocoso.

La búsqueda de una solución factible y viable para agilizar el proceso de minado con una mejora sustancial en la producción y la seguridad de que no se verá comprometida la estabilidad del terreno, da como resultado que las áreas de trabajo incrementen su seguridad para el personal que realiza labores en el interior de la mina.

Con base en la experiencia de uno de los sectores de la Mina Marlín, ubicada en el municipio de San Miguel Ixtahuacán, en el departamento de San Marcos, donde se registraban los niveles más profundos en la zona denominada

como West Vero, se registró la prevalencia de un acuífero termal de baja temperatura el cual afecto el proceso de minado.

Figura 1. **Plano general Mina Marlín sector West Vero**



Fuente: Departamento de Ingeniería Mina Subterránea (2016). *Desarrollos en Mina Subterránea.*

2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

Con el propósito de generar áreas de trabajo seguras durante el desarrollo del túnel minero, dada la afluencia que se tiene por el acuífero termal, se busca determinar una solución factible operacionalmente y viable económicamente.

La prevalencia de flujos abundantes de agua en los frentes de trabajo dificulta que el minado se lleve a cabo en el tiempo establecido, cambia drásticamente las condiciones del lugar y el avance en el desarrollo del túnel se torna complejo porque los frentes de trabajo se inundan y las operaciones no se ejecutan de manera adecuada.

Las probabilidades que encontrar áreas donde se deben instalar bombas sumergibles de achique para controlar el caudal de agua en los frentes de trabajo son altas. Las inundaciones cambian la estabilidad del terreno. Por ello, se debe encontrar un método para anticiparse a este comportamiento. Se estima que la implementación de pozos permitirá instalar bombas a niveles inferiores y se abatirá el nivel freático.

Si el nivel freático se abate correctamente, las condiciones mejorarán y se avanzará en el desarrollo del túnel. Por ello, durante este proceso se deben identificar las variables hidrogeológicas del lugar para obtener una estimación aproximada del acuífero que se afectará con la implementación de un sistema de bombeo.

Luego, se determinará el diseño de los pozos y de los equipos de bombeo que se instalarán para abatir los niveles freáticos.

2.1. Análisis geológico estructural

El análisis de la geología estructural, en este documento, presenta la relación entre las estructuras subterráneas y las rocas que lo conforman; con ello, se infiere la influencia que ejerce el acuífero de baja temperatura en el área de estudio.

2.1.1. Geología regional

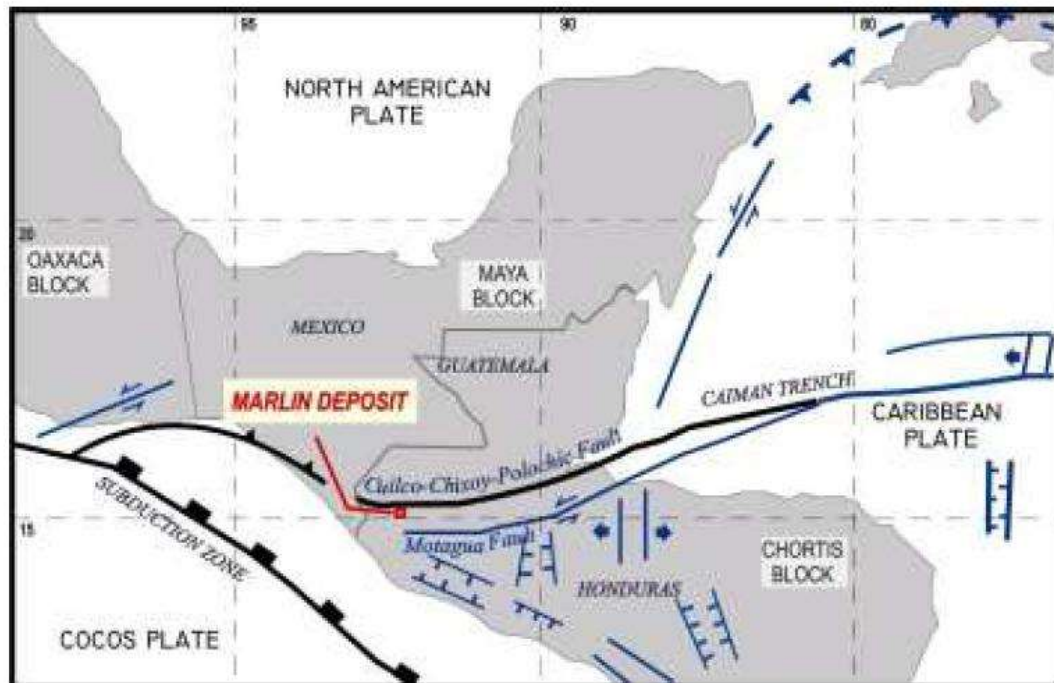
Guatemala se encuentra establecida por una tectónica de placas de colisión entre el caribe y América del Norte. También recibe influencia de la zona de subducción de la placa de Cocos. El contacto está formado por dos fallas de deslizamiento con sentido Este – Oeste, la falla Cuilco-Chixoy-Polochic y la falla del Motagua. Estas fallas representan los límites tectónicos entre los bloques tectónicos maya (Norte) y chortí (Sur).

El bloque tectónico maya se compone, principalmente, de rocas metamórficas, sedimentos detríticos, calizas y algunos intrusivos.

El bloque tectónico chortí, se define por basamento subyacente del pérmico, rocas metamórficas, intrusivas y rocas sedimentarias asociadas que subyacen a las rocas del terciario-cuaternario de la cordillera volcánica. Este bloque también contiene un arco volcánico activo que está asociado a la subducción de la placa de Cocos.

El depósito de oro y plata de West Vero se encuentra dentro del bloque chortí y estrechamente asociado a las fallas que cortan una secuencia calco-alcalina de rocas volcánicas de edad terciaria, 20 km al sur del sistema de falla Cuilco-Chixoy-Polochic.

Figura 2. **Mapa geológico regional**



Fuente: Galicia y Charest (2004). *Mapa geológico regional de Guatemala.*

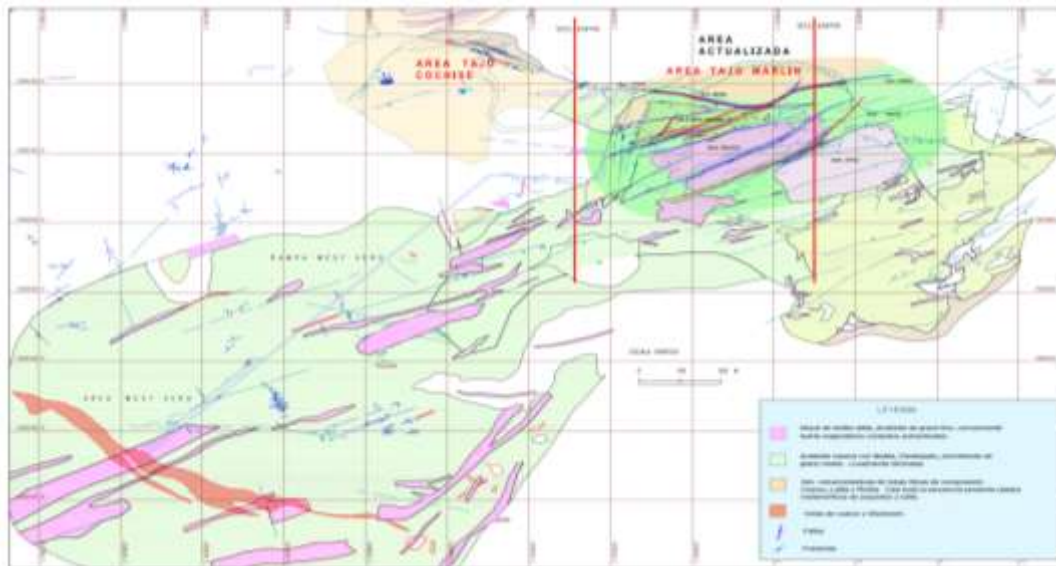
2.1.2. Geología local

El área en estudio, que comprende al yacimiento con mineralización de oro y plata de West Vero, se encuentra asociado a un sistema de fallas sub-verticales que cortan a secuencias volcánicas (Tm) y volcanoclásticas (Tv), las que, a su vez, son constituidas por lutitas subvolcánicas (Tlp) y diques de lutitas (Tli) y andesitas (Tai).

La secuencia de rocas volcánicas y volcanoclásticas presenta un espesor de aproximadamente 1 200 m y se emplaza en una cuenca de escala regional, limitada por fallas. Las rocas volcánicas están conformadas por andesita masiva y los volcanoclásticos están conformados por tobas líficas.

La figura 3 muestra la geología de West Vero, de acuerdo con la interpretación realizado por el Departamento de Geología de Exploración, Montana Exploradora, S.A.

Figura 3. **Geología en sector West Vero**



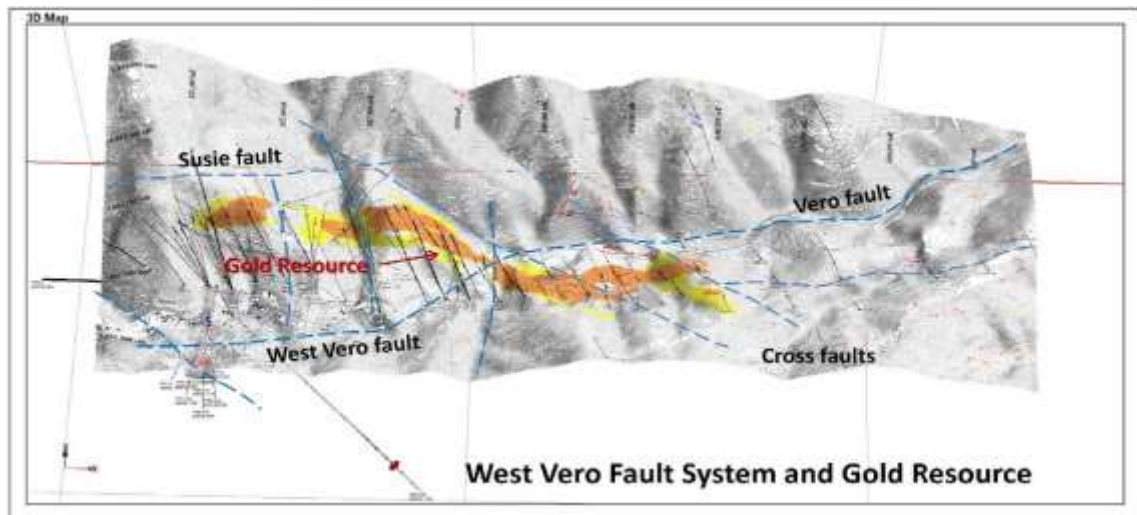
Fuente: Rojas (2012). *Geología local del área de yacimiento de West Vero*.

2.1.3. **Geología estructural**

El control más importante en la mineralización de oro y plata se encuentra localizado en las fallas y estructuras de escala local y regional. Numerosas etapas de fallamiento ocurridas antes, durante y después del evento de mineralización, se reflejan claramente en las texturas, las ubicaciones y tipos de mineralización.

El corredor de la mineralización en Marlin y por extensión en West Vero está controlado por sistemas de fallas de rumbo N60°E con buzamientos que varían de 30° a 60° al SE. Ver sistemas de fallas principales en la Figura 4.

Figura 4. **Proyección superficial de la mineralización y sistemas de fallas. Según Wood (2010)**

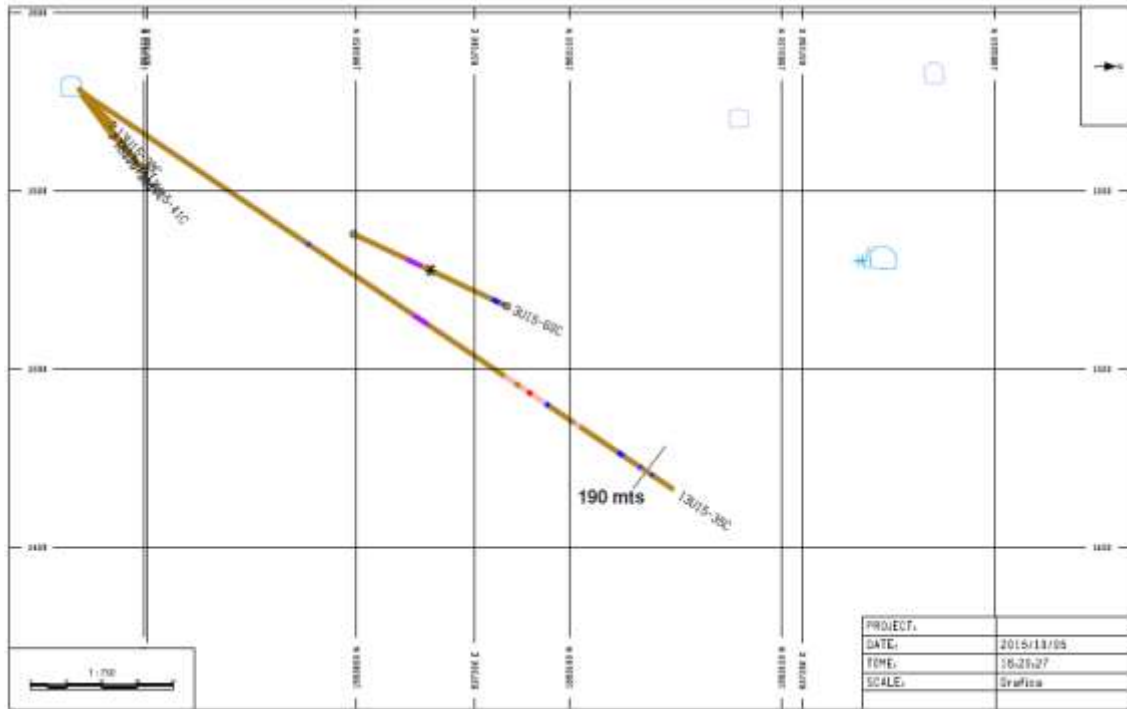


Fuente: Departamento de Geomecánica (2017). *Plan de gestión de terreno*.

Las características geológicas locales se obtienen a partir de la información geológica aportada por el Departamento de Geología de Mina para las distintas perforaciones realizadas en West Vero. La sección del pozo que se incluye en la Figura 5 se considera representativa del entorno geológico de West Vero.

La unidad litológica dominante consiste en una secuencia volcanoclástica compuesta por tobas líticas donde predominan fragmentos metamórficos. En la parte superior se han interceptado unos diques de lutita-andesita que parecen ser subverticales en su inclinación.

Figura 5. Sección geológica pozo 13U15-35C



Fuente: Departamento Geología mina subterránea (2016). *Sección de pozo*

La principal estructura mineralizada consiste en una veta de cuarzo con desarrollo de *stockwork* la cual tiene rumbo dominante N80E y buza 70-75SE. Varias de las manifestaciones de agua caliente identificadas están emplazadas a lo largo de la estructura mineralizada.

Varios de los pozos exploratorios que resultaron secos, como los pozos 13U15-51C y 13U15-52C que llegaron hasta la profundidad 1390 no interceptaron estructuras mineralizadas por lo que esta evidencia sugiere de nuevo que existe un desarrollo predominante de los manantiales artesianos de agua caliente en los sectores extensionales de la veta y *stockwork*.

2.2. Análisis geotécnico

El análisis geotécnico es imprescindible en todo desarrollo minero, dado que permitirá conocer las características del macizo rocoso, así como las discontinuidades que se presentan. Durante el análisis geotécnico se conoce la calidad del macizo rocoso y su clasificación, la resistencia de la roca intacta y la compresión, permitiendo determinar la factibilidad constructiva de un túnel según los resultados de los parámetros antes mencionados.

2.2.1. Caracterización del macizo rocoso

Las características litológicas simplificadas de la masa rocosa del yacimiento West Vero son las siguientes: al techo se halla la roca denominada (Tm) conformada por volcánicos constituidos por andesita masiva, al piso se halla la roca denominada (Tv) conformada por volcanoclásticos que están constituidos por tobas líticas, y la zona mineralizada de oro y plata alojada en brecha tectónica, zona de *stockwork* de cuarzo, y en menor cantidad como disseminaciones en las rocas desprovistas de vetas y estructuras. Además, se observa la presencia de latitas subvolcánicas y diques de latitas y andesitas incluyendo a la secuencia volcánica y volcanoclástica.

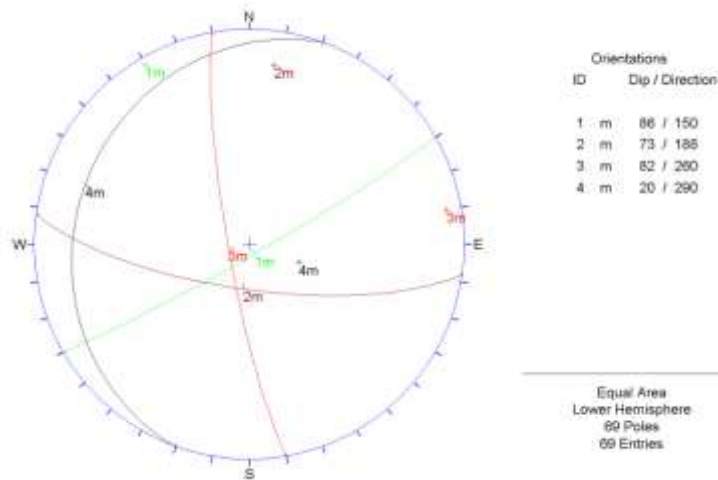
Las características de la distribución de discontinuidades se presentan 2 sistemas de discontinuidades principales (Sistemas 1 y 2) y 2 sistemas secundarios (Sistemas 3 y 4).

Tabla I. **Sistemas principales de discontinuidades estructurales de West Vero**

Descripción	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Rumbo/Buzma.	N60°E/86°SE	N82°W/73°SW	N10°W/82°SW	N20°E/20°NW
Dir. Buz./Buzam	150°/86°	188°/73°	260°/82°	290°/20°

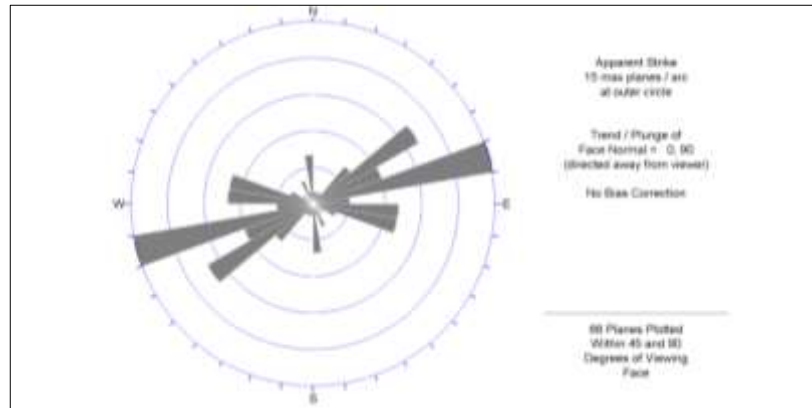
Fuente: Departamento de Geomecánica (2017). *Plan de Gestión de control de terreno.*

Figura 6. **Diagrama estereográfico de planos principales de West Vero**



Fuente: Departamento de Geomecánica (2017). *Plan de Gestión de control de terreno.*

Figura 7. **Diagrama de roseta de discontinuidades West Vero**



Fuente: Departamento de Geomecánica (2017). *Plan de Gestión de control de terreno*.

2.2.2. Aspectos estructurales

Las características estructurales de las discontinuidades se establecieron mediante tratamiento estadístico de información registrada en los mapeos geotécnicos.

- Fallas: tienen espaciamientos por lo general mayores de 3 m, la persistencia es de decenas de metros, la apertura es de 1 a 5 mm, las superficies de las caras son lisas con espejos de falla en algunos casos, presentan ondulaciones. Estas estructuras están rellenas con materiales de panizo, brechas, materiales oxidados y arcillas, el espesor de estos rellenos varía entre 5 y 20 cm. Las fallas constituyen lugares por donde ocurren las filtraciones de agua. Las áreas de influencia de las fallas son menores a 1 m de espesor.

- Diaclasas y pseudoestratos: tienen las siguientes características estructurales: espaciamiento varía generalmente entre 20 a 60 cm y localmente de 6 a 20 cm, la persistencia es de 3 a 10 m, la apertura es menor a 1 mm a cerrada, la rugosidad de las paredes es ligera, el relleno es duro cuando es sílice y suave cuando son calcitas o arcillas con espesores menores de 5 mm, las superficies de las discontinuidades están por lo general ligeramente alteradas y localmente moderadamente alteradas, y las condiciones de agua subterránea varían desde húmedas hasta flujos localizados, pasando por mojadas a goteos.

2.2.3. Calidad de la masa rocosa

La fuente principal de información de la calidad de la masa rocosa de West Vero son los testigos rocosos de los sondajes diamantinos ejecutados como parte de la exploración del yacimiento.

A partir de este parámetro, se realizó la zonificación de West Vero, la cual indicó que, en gran parte del área de proyecto, se estima en el 70 -80 %, los valores de RQD son mayores a 40 %, en el resto del área los valores de RQD son iguales o menores de 40 %, esto último ocurre solo en la parte superior del yacimiento (Rojas, 2012).

Las observaciones realizadas en campo han indicado que la resistencia de la roca intacta de las diferentes unidades litológicas no tiene mucha variación, al ocurrir esto, el grado de fracturamiento de la roca o RQD condiciona la calidad de la masa rocosa, consecuentemente es consistente tener una zonificación basada en valores de RQD.

2.2.4. Clasificación del macizo rocoso

Clasificación Rock Mass Rating (RMR), desarrollada por Bienawski y actualizada en 1989. Esta clasificación permite relacionar índice de calidad con parámetros geotécnicos del macizo y de la excavación, al momento del mapeo se divide en las labores subterráneas en áreas que presentan características geológicas similares y tiene en cuenta los siguientes parámetros:

- Resistencia Uniaxial: el cálculo de este parámetro es mediante tres formas, una de ellas es mediante la utilización del martillo de geólogo, el segundo es mediante el esclerómetro y el último es mediante el equipo de carga puntual.
- Grado de fracturación: dividido el área se procede a contabilizar el número de fracturas por metro y mediante el grafico correlación RQD vs. espaciamiento de discontinuidades se determina el porcentaje del RQD.
- Espaciamiento de discontinuidades: se determina las familias de las discontinuidades y las más críticas se procede a realizar el promedio de del espaciamiento de dicha familia.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

Tabla II. **Calidad del macizo rocoso con relación al índice RMR**

Tipo de roca	Rango RMR	Calidad según RMR
II	> 60	Buena
IIIA	51 - 60	Regular A
IIIB	41 - 50	Regular B
IVA	31 - 40	Mala A
IVB	21 - 30	Mala B
V	< 21	Muy Mala

Fuente: Bieniawski (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*.

Las clasificaciones mencionadas en la tabla 2 han permitido realizar la clasificación del macizo rocoso de West Vero, el cual se presenta en la tabla 3.

Tabla III. **Calidad de la masa rocosa, la veta West Vero**

Litología	Rango de RMR	Rango de calidades
Caja techo Tm	58	IIIA
Mineral	46 - 57	IIIB Y IIIA
Caja piso Tv	49 - 62	IIIB, IIIA y II

Fuente: Rojas (2012). *Informe geomecánico*.

2.2.5. Resistencia de la roca intacta

Uno de los parámetros más importantes que se utiliza para evaluar el comportamiento mecánico de la masa rocosa es la resistencia compresiva no confinada de la roca intacta (σ_c).

Los valores son obtenidos realizando ensayos de golpes con el martillo de geólogo, con el martillo Schmidt de dureza según normas ISRM y con equipo de carga puntual.

Tabla IV. **Resistencia compresiva de la roca intacta de West Vero**

Litología	Rango NR*(número rebotes martillo Schmidt)	Rango σ_c (MPa)
Caja techo Tm	50	143
Mineral	34 - 45	61 - 110
Caja piso Tv	38 - 54	76 - 176

Fuente: Rojas (2012). *Informe geomecánico*.

Otro parámetro importante de la roca intacta es la constante “ m_i ” del criterio de falla de Hoek & Brown (2002-2006), este parámetro fue estimado según la literatura técnica. De acuerdo con ello para la andesita masiva Tm de la caja techo, para el mineral, y para las tobas líticas Tv de la caja piso, les corresponden los valores de 25, 20 y 15 respectivamente.

2.2.6. Resistencia de la masa rocosa

Para estimar los parámetros de resistencia de la masa rocosa, se utilizó el criterio de falla de Hoek & Brown (2002, 2006), con el programa RocLab de Rocscience Inc. (2007). Para ello, se tomaron los valores más representativos de calidad de la masa rocosa, asimismo de resistencia compresiva uniaxial y la constante “ m_i ” de la roca intacta. En el siguiente cuadro se presentan las propiedades de resistencia de la masa rocosa involucrada en West Vero.

Tabla V. **Propiedades de resistencia de la masa rocosa de West Vero**

Litología	GSI	σ_c (MPa)	γ (G/CM ³)	"m _i "	M _b	s	E _{mr} (MPa)	"v"
Caja techo Tm	58	100	2.65	25	3.834	0.0046	11225	0.25
Mineral	54	80	2.55	20	2.566	0.0027	7077	0.26
Caja piso Tv	57	120	2.65	15	2.200	0.0040	11127	0.25

Fuente: Rojas (2012). *Informe geomecánico*.

2.3. Análisis hidrogeológico

En el análisis hidrogeológico para la construcción de túneles se debe conocer la hidrología del lugar; además, se deben realizar inspecciones de campo y sondeos, para conocer y caracterizar las condiciones del agua subterránea. La realización del análisis hidrogeológico permitirá la toma de decisiones de cómo afrontar los problemas de saturación del suelo durante los procesos constructivos de un túnel.

2.3.1. Hidrología

La mina está situada entre dos afluentes del río Cuilco, Tzalá y Quivichil. El terreno que rodea a la mina se caracteriza por valles fluviales abruptamente inclinadas.

El río Tzalá fluye de este a oeste y su curso pasa al sur de la mina antes de su confluencia con el río Cuilco. El canal pasa a 300 m de los trabajos subterráneos del sector Marlin. El río drena un área de aproximadamente 70 km². El río Quivichil ocupa un área más pequeña de captación superficial, fluye hacia el noreste y se encuentra al norte de la propiedad de la mina.

El régimen de caudales de los ríos refleja el patrón mensual de precipitaciones de los cuales hasta un 90 % de la precipitación anual se produce durante los meses de abril y octubre.

Las precipitaciones son de, aproximadamente, 900 mm por año en la mina Marlin, aunque el promedio de toda la cuenca superficial es, probablemente, mayor a causa del terreno más elevado que se encuentra hacia el sur oeste y el sur. (Schlumberger Water Services April, 2014)

Figura 8. **Ubicación de la mina respecto a los afluentes**



Fuente: Departamento de Geomecánica (2017). *Plan de Gestión de control de terreno.*

2.3.2. Agua subterránea

La presencia del agua dentro de la masa rocosa influye adversamente en las condiciones de estabilidad de las labores subterráneas. Su principal efecto es la presión que ejerce en las discontinuidades, disminuyendo la resistencia al corte y por tanto disminuyendo el factor de seguridad o grado de estabilidad.

Uno de los indicios donde se determina la presencia de agua subterránea en el desarrollo de los túneles, es que durante el avance se observará la presencia humedad, goteo y hasta flujos continuos en techo y hastiales, los cuales influyen adversamente en la calidad de la masa rocosa, en particular, cuando las condiciones geomecánicas sean desfavorables.

Figura 9. **Presencia de agua subterránea termal**



Fuente: Fotografía propia (2016), *Sector West Vero Nivel 1523, Mina Marín.*

2.4. Definición de acuífero termal

Durante el minado se pueden interceptar acuíferos que, además de proporcionar flujo de agua, se registra el aporte de presión y temperatura cuyas variables deben ser analizadas, para su clasificación ya que puede ser un acuífero termal de baja o de alta temperatura y esta temperatura puede registrar variantes según la profundidad.

En dicho análisis es importante inferir la dirección en la que se mueve el flujo de agua, para estimar las áreas que serán afectadas y en función a esta información conocer si se verán comprometidas zonas de interés en el minado, esto con el propósito de establecer de manera previa el plan de implementación de pozos que apoyen en abatir los niveles freáticos y permitan que el desarrollo del minado sea continuo.

Asimismo, es importante conocer las zonas de mineralización estimadas y el plan de minado, dado que con base en esta información se deberán ubicar los pozos de manera estratégica, garantizando que generen influencia en drenaje del agua subterránea abatiendo los niveles y otorguen un ciclo minado continuo; así situarlos en sectores donde no interfiera con el minado, colaborando con ello a que la construcción del pozo perdure durante el desarrollo de la obra subterránea.

2.5. Tipos de captaciones de agua subterránea

Cuando se trata de un desarrollo de túneles mineros con características subterráneas y cuya profundidad hacia la superficie sea considerable, se tiene como única alternativa la utilización de pozos para la extracción de agua y de esta manera abatir los niveles freáticos.

Para la implementación de esta metodología es importante estimar que se deberá contar con un equipo de perforación capacitado para la realización de pozos según el diseño en diámetro y profundidad.

También es imprescindible planificar el uso de las galerías colectoras o sumideros e implementarlos en distintos niveles, con el propósito que equipos de bombeo de mayor capacidad pueda trasladar el agua hacia la superficie.

2.6. Piezómetros

El propósito del piezómetro es la medición de la presión del agua subterránea, esta información permite el monitoreo de niveles de estáticos y dinámicos del agua subterránea que afecta en el desarrollo del túnel.

Según el tipo de aplicación, también se pueden encontrar piezómetros con sistema de tubo abierto o cerrado. Se cuenta con una amplia diversidad de instrumentación para la implementación de piezómetros que van desde los neumáticos, cuerda vibrante, de resistencia eléctrica o con sensores de presión.

Con los datos que aportan los piezómetros se obtienen las variables hidrogeológicas, que brindan información sobre la caracterización del acuífero.

La medición periódica de los piezómetros permitirá conocer el nivel del agua dentro de la mina e indicará la influencia del bombeo en el acuífero. Con esta información se determinarán los requerimientos de expansión del sistema de bombeo.

2.7. Gradiente de temperatura

Cuando se encuentra agua subterránea con características termales en una perforación, se estructura el gradiente de temperatura para conocer los cambios de temperatura que se registran a medida que se va profundizando la perforación.

Se conoce que el gradiente de temperatura se puede medir en los primeros kilómetros de la corteza de la tierra la cual tiene una progresión media que corresponde a 3 ° C por cada 100 metros de profundidad, es a esta relación que se le conoce como gradiente geotérmico.

La relación que se tiene a mayores temperaturas registradas corresponde a una mayor presión, por lo que será necesario que, en función de este gradiente, se proyecte la longitud del pozo, para identificar la manera adecuada de estabilizar el pozo durante el proceso de perforación y queda a discreción del experto en lodos, la determinación precisa de aditivos de perforación a emplear y medidas de seguridad que se deben tener durante el proceso de perforación.

2.8. Tipos de acuíferos termales

Los tipos de acuífero termal que se describirán a continuación están determinados según sus características de temperatura del flujo y a sus posibles aplicaciones para el aprovechamiento de la energía contenida en estos.

- Alta temperatura: son los que aportan suficiente temperatura lo cual permite que se pueda generar energía eléctrica a partir del aprovechamiento del vapor de agua, por lo tanto, puede ser rentable, dado que cuenta con temperaturas mayores a los 150 °C.

- Media temperatura: estos acuíferos, pueden registrar temperaturas entre los 100 a 150 °C, su aprovechamiento puede ser para generación de energía eléctrica a menor escala que las de alta temperatura, así como puede ser aprovechado su potencial, para procesos de calefacción o procesos industriales.
- Baja temperatura: Estos se encuentra entre temperaturas de 100 a 30 °C, estos pueden ser empleados para sistemas de climatización doméstica y agrícola.

2.9. Sistema de fallas para la identificación de acuíferos predominantes

Cuando es identificado en el desarrollo de un túnel minero un acuífero de tipo termal, existe una alta probabilidad que esté presente un comportamiento surgente, desplazando el agua por capilaridad este comportamiento se debe a la presión que posee el acuífero, pero el mayor aporte de agua subterránea, será por medio de fallas, dado que, por medio de estas, se le facilitará la transmisibilidad y provocará que esto aporte saturación a los lugares con los que tiene comunicación o influencia mediante este sistema de fallas.

Durante el desarrollo del túnel de la mina, será necesario identificar el sistema de fallas que aportan agua y saturación del suelo, con el propósito que, mediante la identificación de estas, se conozca la influencia del acuífero y se pueda ubicar de manera adecuada los pozos que abatirán el nivel freático.

2.10. Efectos de acuíferos termales durante el minado

Cuando una labor minera es afectada por un acuífero termal, esto proporciona retos muy particulares al proceso. Entre estos, se verá afectada la operación y asimismo se compromete la estabilidad del túnel.

Estas particularidades, en ocasiones no se detectan de forma anticipada, ya que cuando se ejecutan las perforaciones de núcleo o diamantina para determinar zonas mineralizadas o de reserva, no se toma relevancia a la presencia de agua subterránea.

Cuando se está en fase de exploración, el enfoque principal es la identificación de reservas, para el planteamiento de un diagrama de bloques que de inferencia sobre la manera adecuada en la cual se ejecutará el minado. No se considera la identificación de acuíferos que puedan generar inconvenientes durante el desarrollo de las labores mineras.

2.10.1. Operaciones de mina subterránea

Durante el desarrollo de túneles para extraer mineral, en las obras subterráneas prevalecerá un flujo abundante de agua que aporta presión y temperatura. Eventualmente, provoca que el frente de trabajo se inunde, se atrase el trabajo y las condiciones operativas del túnel cambian, ya que se puede requerir que se drene el agua y se necesite un flujo mayor de ventilación.

Como medida de mitigación se puede proceder empleando la instalación de bombas sumergibles de achique, las cuales extrae el agua y la conduzcan a un sumidero, que puede generar demoras dado que, si no está seco el frente de trabajo, no se podía generar ningún tipo de avance y las condiciones de trabajo

se tornan inadecuadas, por la temperatura del lugar y la humedad relativa, asimismo esto implica que se debe tener una planificación de ubicación de sumideros, en función del avance del túnel.

Otro inconveniente es que, durante la perforación de la plantilla para la voladura, sea interceptado un mayor flujo de agua, dado que esto facilita la transmisibilidad de esta y el agua fluya hacia el frente de trabajo, generando un aumento significativo en el aporte agua.

Adicionalmente, como el agua registra alta temperatura y el espacio está confinado, el tiempo que el personal puede estar expuesto es reducido, ya que una exposición prolongada podría provocar un golpe de calor, por estrés térmico.

Otro problema se genera cuando los explosivos se introducen en los agujeros saturados de humedad y al ejecutar la voladura las detonaciones podrían ser irregulares y discontinuas. Esto provocaría un avance inadecuado y sería necesario requemar para perfilar partes del túnel que no han sido afectadas por la voladura principal. Estas acciones prolongarían el tiempo de desarrollo e incrementarían los costos.

2.10.2. Estabilidad del túnel

En el desarrollo del túnel minero se registrarán áreas con terreno cuyas condiciones geomecánicas son desfavorables. Por ello, durante el avance de la construcción, podrían suscitarse colapsos provocados por la saturación del terreno, lo cual afecta estructuralmente el desarrollo del túnel.

Dado que el principal efecto del agua subterránea es la presión ejercida en las discontinuidades, disminuye la resistencia al corte y por lo tanto se disminuye considerablemente el factor de seguridad.

2.11. Definición de modelo hidrogeológico

El proceso de modelado debe basarse, inicialmente, en la observación. "Por esta razón, durante el desarrollo del túnel se deben inspeccionar las áreas para registrar los lugares con mayor aporte de agua. También se debe tomar en cuenta si existe aporte de agua superficial, dado que esta puede generar un incremento en el sistema, pues de existir permeabilidad, serán por las fracturas y fallas existentes en el área.

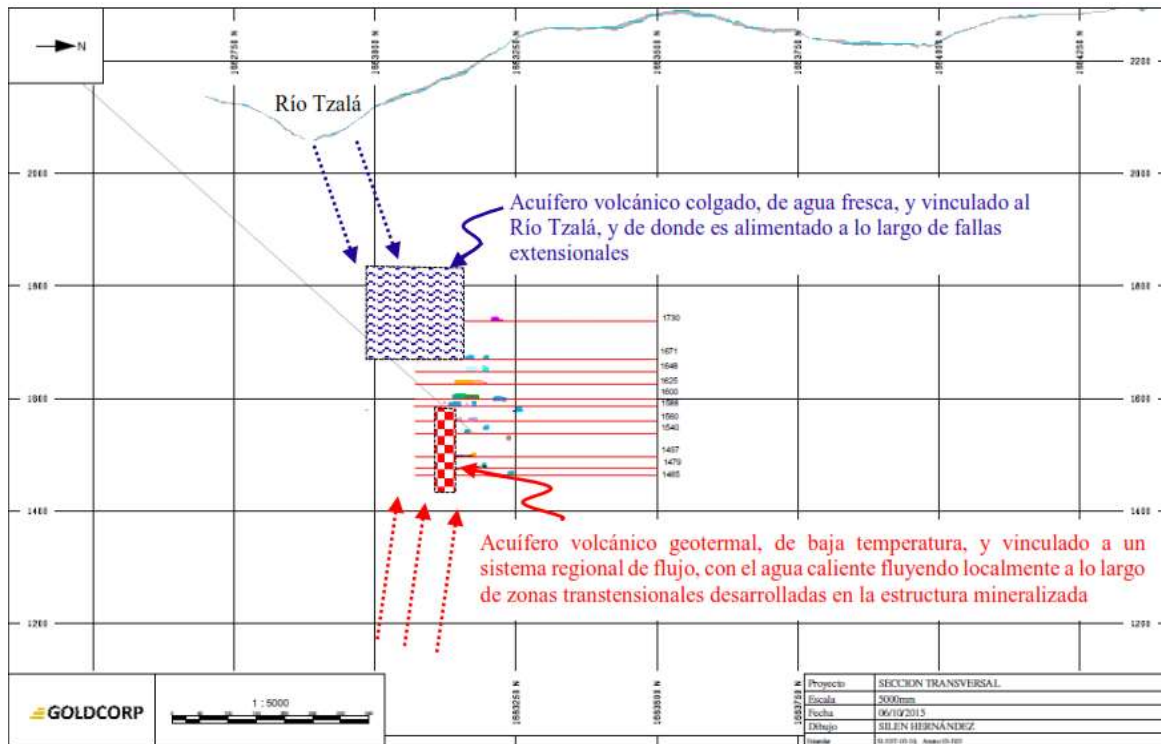
Con base en la observación realizada en las labores del túnel en la Mina Marlín, se determina que es indispensable la identificación de áreas en las que se tiene mayor prevalencia de agua termal. Por lo tanto, esto apoya a la definición de influencia que tiene el acuífero, con el propósito de generar un modelo hidrogeológico, el que permita establecer un método para establecer solución al problema de presencia de flujo de agua termal durante las operaciones de desarrollo del túnel.

Mediante la observación y reconocimiento en el desarrollo del túnel en Mina Marlín, se identificaron dos acuíferos:

- Acuífero colgado de agua fresca aportado por flujos superficiales en este caso influencia del Rio Tzalá, el cual permea a través de fallas extensionales.

- Acuífero volcánico termal de baja temperatura, con comportamiento surgente que se fluye a través de zonas transtensionales desarrolladas por estructuras mineralizadas.

Figura 10. Inferencia de Sección hidrogeológica



Fuente: Planificación Mina Subterránea (2015). Sección transversal dibujada.

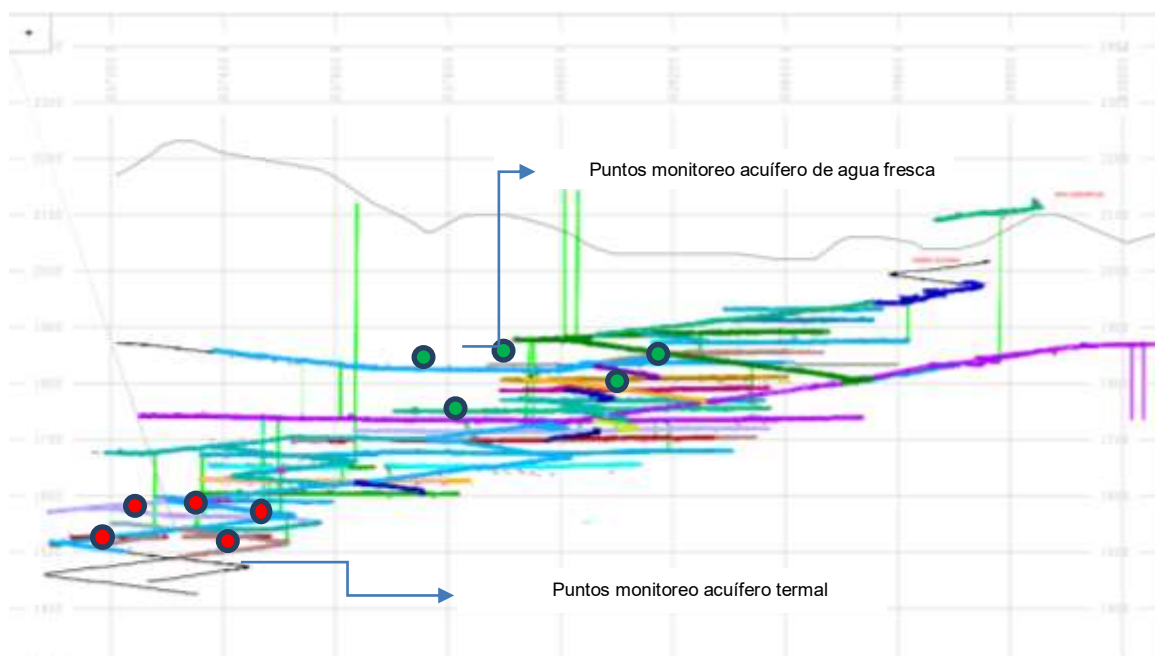
Por medio de la interpretación de la sección hidrogeológica, se determina que los dos acuíferos identificados influyen de manera independiente, por lo que la saturación de agua en niveles inferiores se vincula directamente por el acuífero termal de baja temperatura interceptado en el desarrollo del túnel minero.

Este acuífero se alimenta de otro acuífero de comportamiento termal de mayor temperatura, el que puede ser parte de un sistema de flujo regional.

Se infiere que la separación de los acuíferos de agua fresca y de agua termal se debe a factores estructurales, dado a que la mayor presencia de fallas extensionales a profundidad las que se relacionan con la veta de reserva mineralizada.

Por ello, será necesario conocer el plan de minado en los niveles inferiores, para determinar un sistema de pozos que cumplan la función de abatimiento de los niveles freáticos.

Figura 11. **Distribución espacial de influencia de los dos acuíferos en Mina Marlín**



Fuente: Planificación Mina Subterránea (2016). *Monitoreo de frentes con aporte de agua fresca y termal de baja temperatura.*

2.12. Definición de áreas de influencia de pozos de bombeo

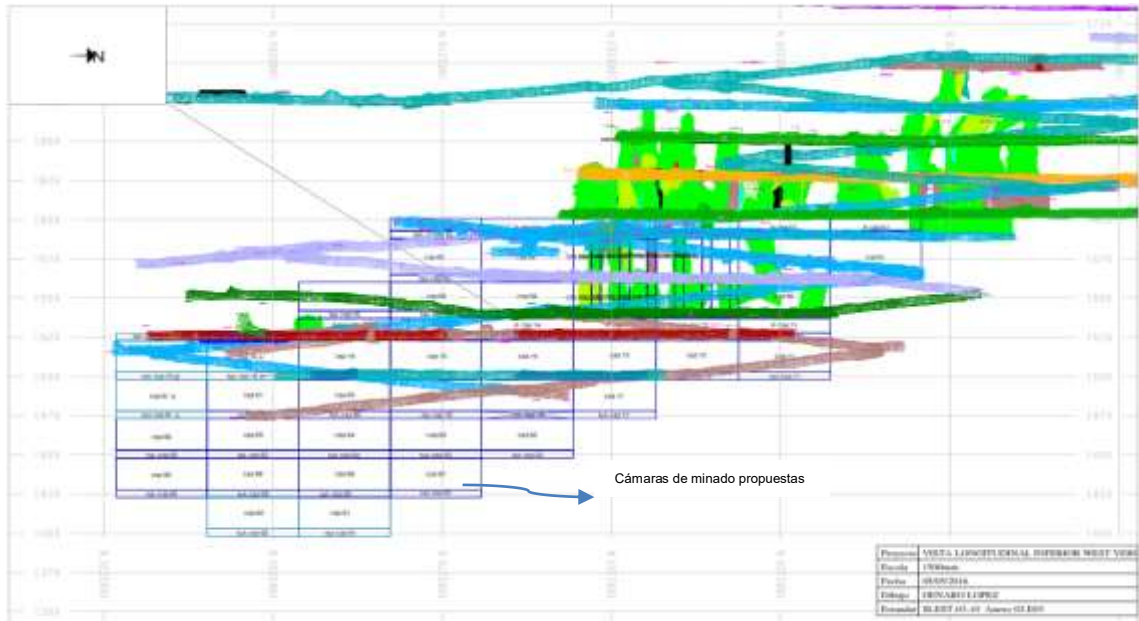
Durante los desarrollos de los frentes de trabajo, se deben identificar áreas en las que el aporte de agua con características termales registre aumento significativo del flujo, a medida en que se profundiza el desarrollo del túnel.

Existe una alta probabilidad de que se observe otro comportamiento bastante particular. Este radica en que, a medida que el túnel avanza hacia niveles inferiores, el flujo de agua disminuye notablemente en los niveles superiores porque el minado afecta la capilaridad y se genera interrupción en la transmisibilidad del flujo, lo que puede justificar el efecto observado.

Cuando se conoce con certeza la zona de mineralización, se realiza el diagrama de bloques y plan de minado, por lo que en función a esta información es importante que se realice la planificación de los pozos.

A continuación, se presente un ejemplo de un diagrama de bloques; que es inferido mediante la perforación de diamantina y los valores de ley mineral obtenidos en el muestreo de los núcleos analizados, en función a esta información, se procede a generar la planificación del minado, siendo esto de mucha importancia, ya que también servirá para ubicar los pozos de bombeo.

Figura 12. Plan de minado en Mina Marlín



Fuente: Departamento de Ingeniería mina subterránea (2016). *Planificación de Mina Subterránea*.

2.13. Sistema de perforación de pozos

Un sistema de perforación de pozos deberá ser conformado por varios pozos ubicados de manera estratégica, fundamentado por el modelo hidrogeológico. Se estima que una vez implementado el sistema bombeo subterráneo se registre abatimiento de los niveles freáticos y se mejorarán las condiciones de la mina, permitiendo que los procesos de desarrollo del túnel ganen una mayor continuidad.

En el caso de estudio, es necesario se realice la perforación de pozos para drenar el agua termal que afecta el desarrollo del túnel, por lo que se debe realizar elección del sistema de perforación que será empleado.

Se debe analizar el criterio de realizar perforación superficial o subterránea, y esto se deberá elegir en función a la factibilidad operativa y la viabilidad económica, dado que ambos sistemas implicarán diferentes retos.

2.13.1. Perforaciones en superficie

La elección de perforaciones superficiales se basa en las condiciones de la mina, dado que, si los desarrollos de los túneles se ejecutan en áreas profundas, se debe evaluar la perforación superficial, ya que existen limitantes en los equipos de perforación relacionadas con la capacidad de perforar a la profundidad requerida, los costos elevados al ejecutar perforaciones profundas y el tiempo que llevaría completar la perforación del pozo, así como elevar los costos por tener que elegir equipos electro sumergible que cuenten con la capacidad suficiente para extraer el agua a profundidades prolongadas, y garanticen el abatimiento efectivo del agua subterránea.

La perforación en superficie consiste en identificar el área que se desea afectar con el bombeo en el desarrollo del túnel, luego realizar esta proyección de coordenada y marcarla en la superficie.

La perforación superficial, otorga algunos beneficios operativos, como la facilidad para trasladar el equipo de perforación, ubicar libremente todos los aditamentos necesarios para efectuar la perforación, facilitando que el diseño del pozo pueda ser implementado con un tubo protector de acero al carbón con

agujeros tipo puente, para prevenir corrosión y garantizar un tiempo prologando de funcionamiento del pozo.

La instalación de la bomba y la tubería de descarga es más fácil porque, se pueden usar grúas. Esto favorece la construcción en superficie de sistemas de tuberías para conducir el agua a lugares donde haya certeza de que no filtrarán en el lugar que se afecta con el bombeo y si sus características ameritan tratamiento, se podrán depositar en áreas aptas.

Una de las desventajas por evaluar, es que cuando se perfora desde la superficie los costos aumentan porque se deben perforar más metros. Lo cual amplía el tiempo que se debe invertir en la construcción de los pozos. La implementación de un sistema de pozos con este método genera demoras sustanciales que afectan el proceso productivo.

2.13.2. Perforaciones subterráneas

El análisis de perforación de pozos subterráneos surge de tener áreas de desarrollo de túnel dentro de la mina a profundidades bastante considerables. Este sistema ofrece la facilidad de que, por realizarse dentro del desarrollo del túnel, los pozos no deberán ser muy profundos, por lo que disminuye el tiempo de construcción y esto agiliza la implementación de un sistema de bombeo, que garantice el abatimiento del nivel freático.

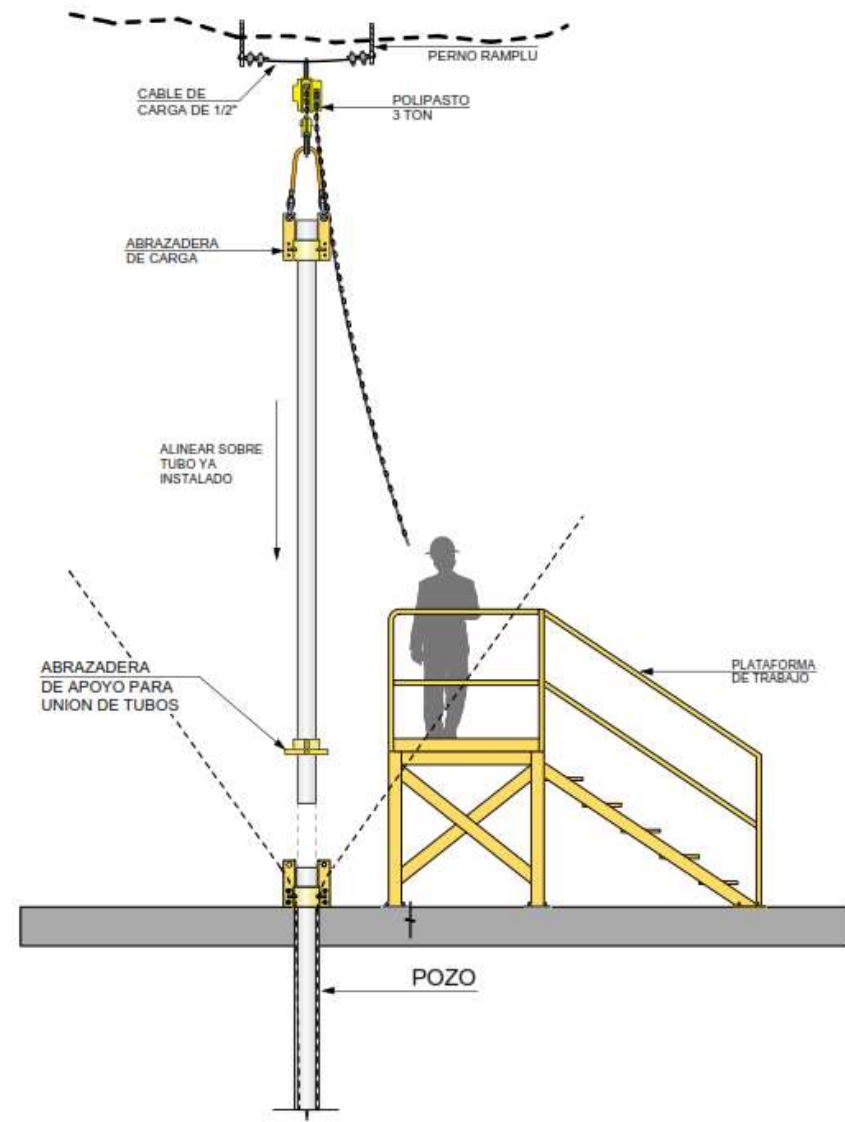
En este se registran aspectos negativos, como que la mayoría de las perforadoras subterráneas han sido diseñadas y construidas para el uso de exploración de reservas de mineral no para pozos de agua.

Otra limitante que se debe considerar es que la construcción del pozo debe realizarse con materiales livianos, dado que en el interior de la mina no se puede contar con grúas, que tenga capacidad para soportar pesos excesivos, esto también limita la instalación del equipo de bombeo, que deberá de tener las mismas consideraciones en el peso, para que durante su instalación no se den inconvenientes derivados a un mal manejo.

A continuación, se hace referencia a la implementación de sistema de pozos subterráneos en Mina Marlín ubicada en el municipio de San Miguel Ixtahuacán del departamento de San Marcos, dado que este método permite que se tenga la accesibilidad de implementar pozos en función a su desarrollo.

Se visualiza que se tendrá la limitación de la instalación de la tubería de recubrimiento del pozo, porque al estar en el interior del túnel, no se tiene la facilidad para instalarlo, pero se ha determinará un método que permita realizar la instalación de manera segura.

Figura 13. **Método de instalación de tubería de recubrimiento PVC**



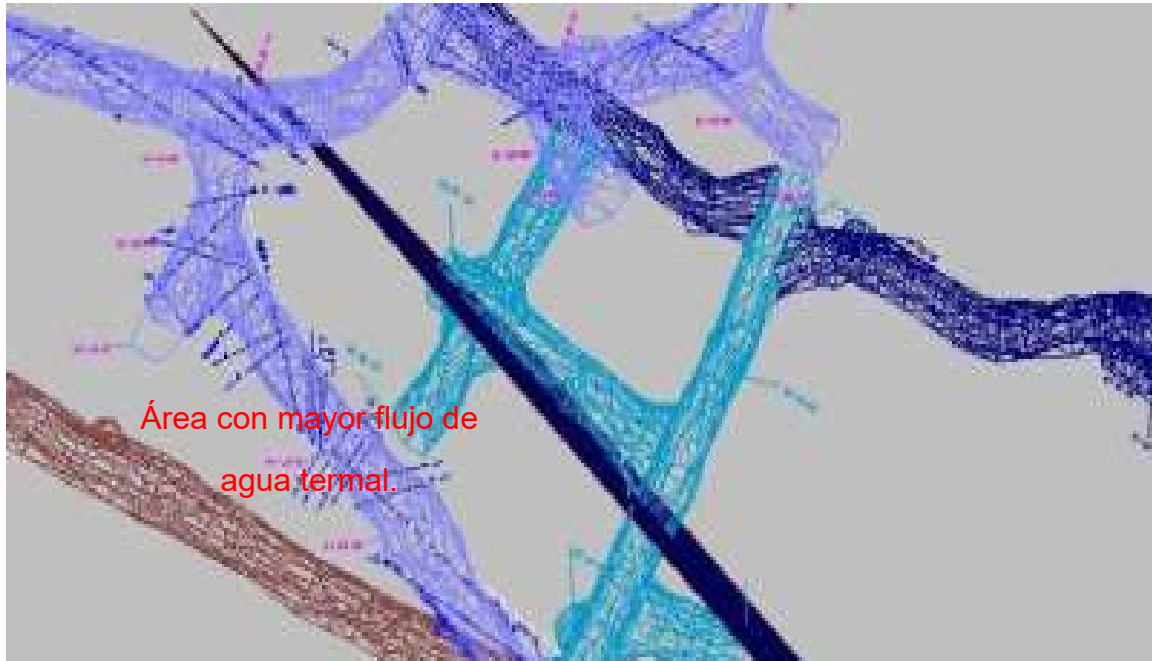
Fuente: Departamento de Obra Civil (2016), *Instalación de tubería en pozos subterráneo*.

La elección de equipo electro sumergible para el bombeo de agua se facilita, por la profundidad que tendrían los pozos, se podría producir mayor caudal. El único reto importante de hacer mención es que este deberá ser capacitado para

Una vez obtenida la información del plan de minado y la distribución de los sumideros, se identifican los lugares donde perforarán los pozos para extraer agua y abatir los niveles freáticos y para que influya el desarrollo del túnel.

Según la información del modelo hidrogeológico, se identificó que en el sector West Vero únicamente se tiene influencia del acuífero termal de baja temperatura, donde se evidencia que el mayor aporte del acuífero provenía de una falla, la cual fue mapeada y empleando el sistema Minesigth sobreponiendo los túneles desarrollados, se infirió las zonas de influencia. Se tuvo en consideración que el plan minado finaliza a una profundidad correspondiente al nivel 1425 msnm. Se muestra en la siguiente figura.

Figura 15. Falla con influencia en el acuífero termal



Fuente: elaboración propia (2016). *Mapeo de falla nivel 1475 msnm registrando mayor prevalencia de agua termal.*

A continuación, se muestra la imagen que evidencia la presencia de agua termal de baja temperatura en el nivel 1475 msnm.

Figura 16. **Área de trabajo influenciada por acuífero termal**



Fuente: fotografía propia (2016), *Desarrollo Rampa 3 West Vero*.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO

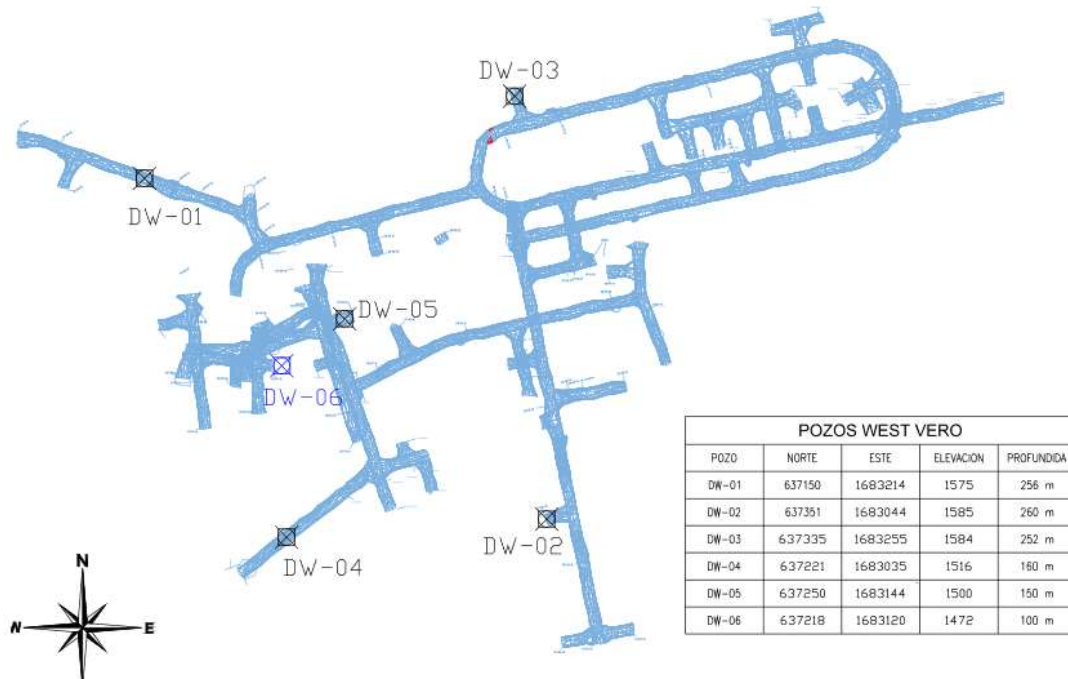
3.1. Método de perforación de pozos subterráneos

Para implementar la metodología de un sistema de pozos subterráneos, es importante conocer el modelo hidrogeológico del lugar, por lo que a continuación se busca ejemplificar la manera en se debe proceder dicha implementación, con base en la experiencia obtenida en Mina Marlín.

Este caso se genera en el sector West Vero de Mina Marlín ubicada en el municipio de San Miguel Ixtahuacán del departamento de San Marcos. Es una mina de oro y plata ubicada en la parte más profunda, donde se ha interceptado un acuífero termal de baja temperatura. Con base en la observación e interpretación de la información extraída de pruebas de bombeo y de las variables hidrogeológicas obtenidas con el programa Aquifer Test Pro, se obtiene la caracterización del acuífero, facilitando la construcción del modelo hidrogeológico, donde dicha serie de pasos se describe a continuación.

En West Vero, en la Mina Marlín, se determinaron las áreas donde se debían perforar los pozos. Por ello, se ubicaron estratégicamente para que no interrumpieran las labores previstas en el desarrollo de túneles, se evaluó la accesibilidad de conectarse a sumideros. Lo más importante era generar influencia en el abatimiento del nivel freático.

Figura 17. Modelo de perforación de pozos en el sector de West Vero



Fuente: Elaboración Propia (2016). *Modelo de planificación de perforación de pozos en West Vero.*

Dada la necesidad de pozos con un diámetro mayor de 6 pulgadas, se buscó la alternativa de utilizar la perforadora de chimeneas Raise Boring marca Robbins, dicho equipo cuenta con la capacidad de perforar pozos pilotos de 11 pulgadas de diámetro.

Figura 18. **Perforación de pozo con equipo Raise Boring Robbins**



Fuente: fotografía propia (2016). *Tomada en pozo en nivel 1475 msnm.*

La planificación de la profundidad de los pozos se determinó para mantener la influencia hasta el último nivel donde se minaría. El nivel 1425 msnm fue el último por minarse. Tomando en cuenta que se contaría con un sistema de pozos en niveles superiores a este nivel, se busca que el cono de abatimiento de los niveles dinámicos fuera inferior al nivel donde se tenía planificado finalizar el minado, esperando conseguir con ello áreas de trabajo adecuadas, donde no se tuviera saturación del terreno y las condiciones para laborar fueran idóneas, para que el ciclo de minado no tuviera demoras.

Una vez finalizado el pozo, se realiza el aforamiento de este para dejar libre de aditivos de perforación se procedía a la instalación de la tubería de recubrimiento y se dejaba listo para instalar el equipo de bombeo.

Figura 19. **Pozo finalizado donde se muestra nivel freático somero**



Fuente: fotografía propia (2016). *Tomada cuando se finalizaba la perforación del pozo.*

3.2. Diseño de pozos de bombeo

Los pozos debían tener 6 pulgadas de diámetro y sus profundidades variaban en función del nivel dentro de la mina que se perforará. Por ello, su diseño obedece a que todo su perfil estaba influenciado por el acuífero termal. Por esta razón, se perforaron y, luego, se debía instalar tubería de recubrimiento tipo PVC con agujeros de 1/2 pulgada para estabilizar las paredes del pozo y mantener el aporte dentro del tubo, donde se instala el equipo de bombeo.

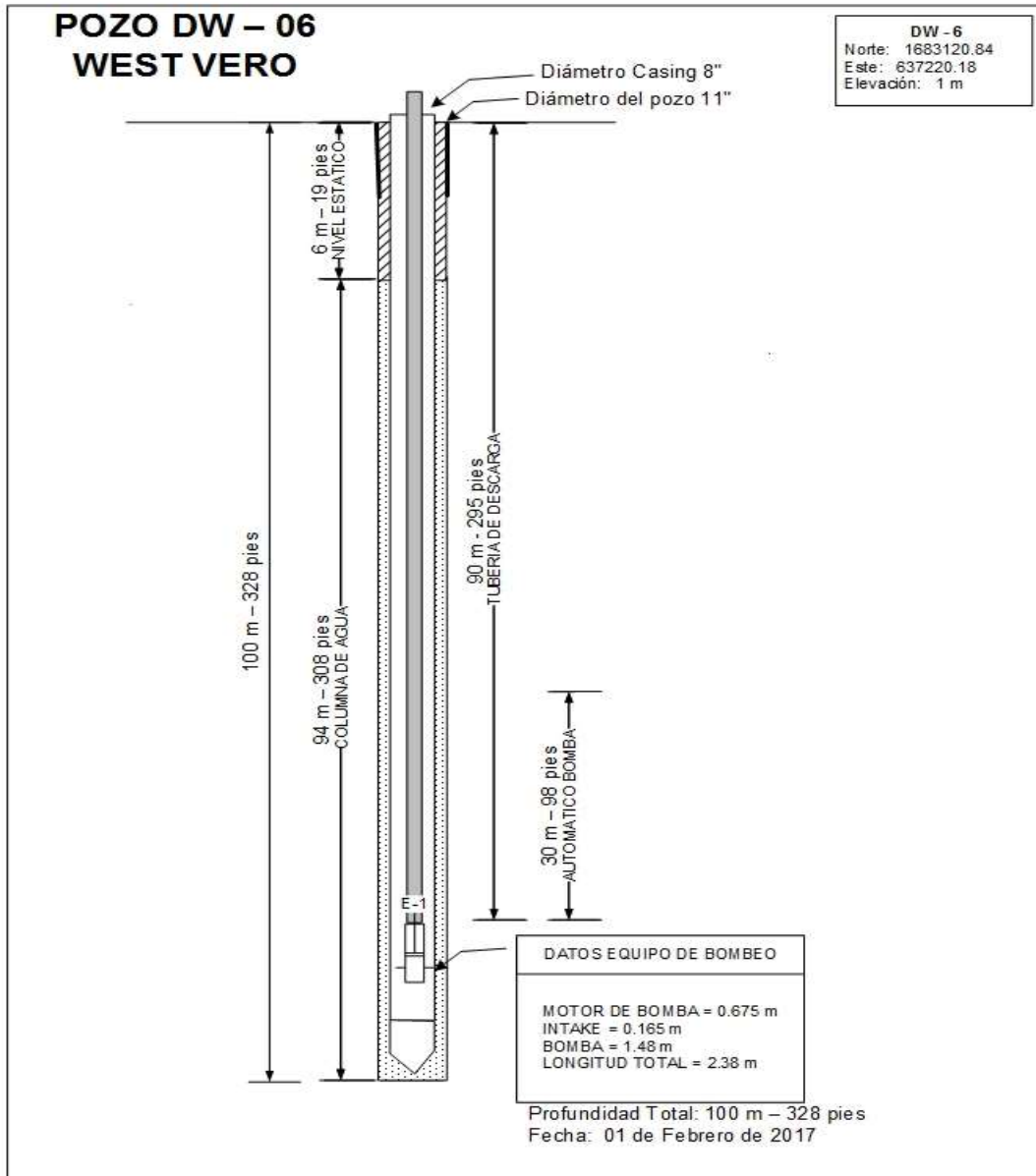
Figura 20. **Instalación de tubería PVC para recubrimiento en pozo**



Fuente: fotografía propia (2016). *Tomada durante la instalación de tubería de recubrimiento,*
octubre de 2016

La figura 20 muestra el diseño estándar de los pozos, con la única variante de la profundidad en la que sería perforado y en la que se instalaría el equipo electro sumergible de bombeo.

Figura 21. Diseño constructivo de pozos en West Vero

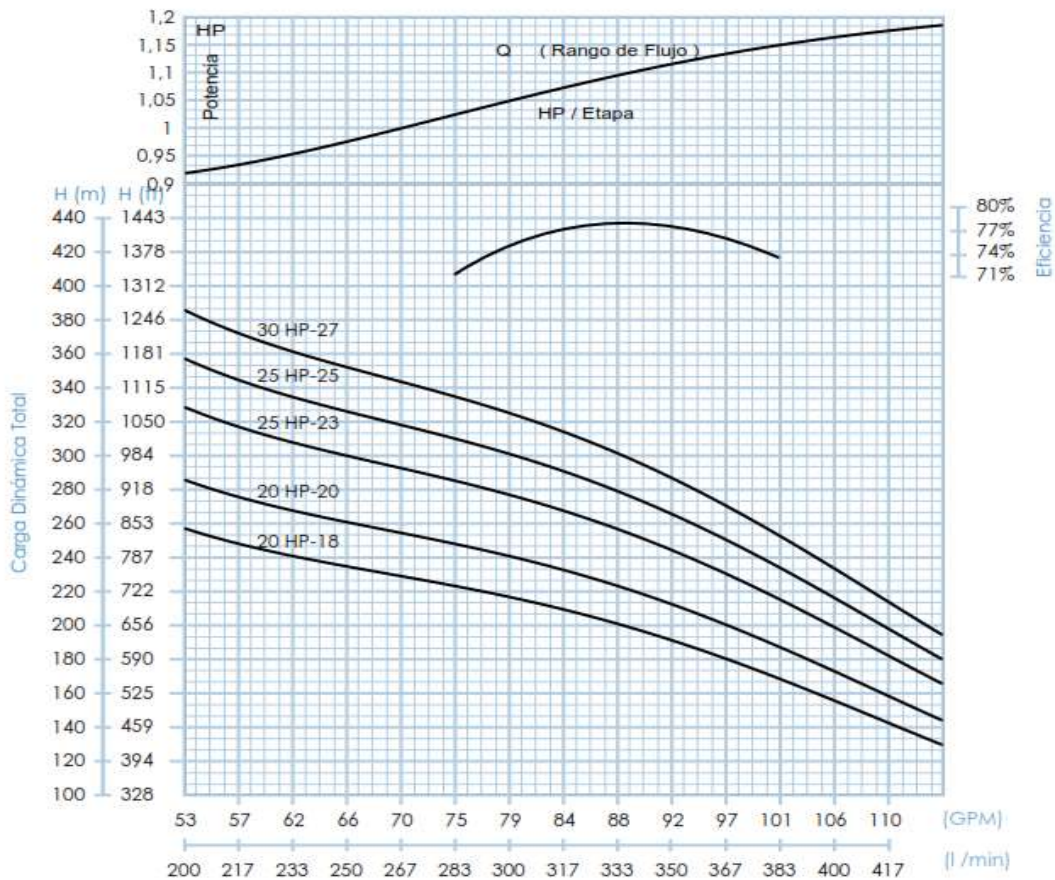


Fuente: elaboración propia (2016). *Diseño de pozo incluyendo descripción de equipo y nivel de agua.*

3.3. Selección de equipo de bombeo

La bomba que se instaló en los pozos es un equipo sumergible marca AFT, el cual tiene un diámetro de 6 pulgadas en motor y un diámetro en descarga de 3 pulgadas. Cuenta con una potencia de 20 HP, cuya tabla de rendimiento se presenta a continuación.

Figura 22. Rendimiento equipo electrosumergible



Fuente: gráfico dado por el fabricante del equipo de bombeo AFT FSS-6-85-2.

Este equipo de bombeo tiene la capacidad de extraer agua a una temperatura máxima de 60 ° C. Por lo tanto, se adaptaba a los requerimientos.

3.4. Pruebas de bombeo

Durante la prueba de bombeo en el pozo se ha determinado que el bombeo es continuo, tiene un caudal promedio de aproximadamente 142 GPM, esto fue medido mediante el uso de medidores de flujo electromagnético marca Endress y Hausser instalados en la descarga del pozo.

Figura 23. **Instalación final de pozo**



Fuente: Fotografía propia (2016). *Tomada en instalación final de pozo.*

Esta prueba se realizó durante una hora con la sonda Aqua Troll 500, se instaló a una profundidad de 60 metros y el pozo tiene una profundidad total de 100 metros.

Figura 24. **Datos obtenidos con sonda Aqua Troll 500**



Fuente: fotografía propia (2016). *Tomada durante ejecución de prueba de bombeo.*

Durante el tiempo que fue instalada la sonda, se arrancó el equipo de bombeo. Se obtuvo la siguiente tabla, que determina el abatimiento que se tiene cuando se pone en marcha la bomba, para determinar la capacidad del pozo.

Tabla VI. Datos obtenidos con sonda Aqua Troll 500

Fecha	Hora	Segundos	Presión (PSI)	Temperatura (°C)	Columna Agua (m)	Elevación (msnm)
17-02-17	10:36	0	59.784	45.25	42.074	1457.074
17-02-17	10:37	60	59.782	46.529	42.073	1457.073
17-02-17	10:38	120	66.867	47.422	47.059	1462.059
17-02-17	10:39	180	71.711	48.001	50.468	1465.468
17-02-17	10:40	240	73.113	48.436	51.455	1466.455
17-02-17	10:41	300	73.699	48.743	51.867	1466.867
17-02-17	10:42	360	74.07	48.966	52.128	1467.128
17-02-17	10:43	420	74.344	49.14	52.321	1467.321
17-02-17	10:44	480	74.518	49.27	52.444	1467.444
17-02-17	10:45	540	74.684	49.384	52.560	1467.560
17-02-17	10:46	600	74.838	49.524	52.669	1467.669
17-02-17	10:47	660	74.931	49.624	52.734	1467.734
17-02-17	10:48	720	75.061	49.705	52.826	1467.826
17-02-17	10:49	780	75.151	49.756	52.889	1467.889
17-02-17	10:50	840	75.255	49.756	52.962	1467.962
17-02-17	10:51	900	75.335	49.81	53.019	1468.019
17-02-17	10:52	960	75.38	49.809	53.050	1468.050
17-02-17	10:53	1020	75.481	49.827	53.121	1468.121
17-02-17	10:54	1080	75.584	49.808	53.194	1468.194
17-02-17	10:55	1140	75.628	49.82	53.225	1468.225
17-02-17	10:56	1200	75.699	49.819	53.275	1468.275
17-02-17	10:57	1260	75.74	49.814	53.304	1468.304
17-02-17	10:58	1320	75.769	49.808	53.324	1468.324
17-02-17	10:59	1380	75.831	49.811	53.368	1468.368
17-02-17	11:00	1440	75.896	49.803	53.413	1468.413
17-02-17	11:01	1500	75.888	49.791	53.408	1468.408
17-02-17	11:02	1560	75.969	49.805	53.465	1468.465
17-02-17	11:03	1620	76.018	49.78	53.499	1468.499
17-02-17	11:04	1680	76.052	49.805	53.523	1468.523
17-02-17	11:05	1740	76.103	49.795	53.559	1468.559
17-02-17	11:06	1800	76.105	49.783	53.560	1468.560
17-02-17	11:07	1860	76.14	49.781	53.585	1468.585

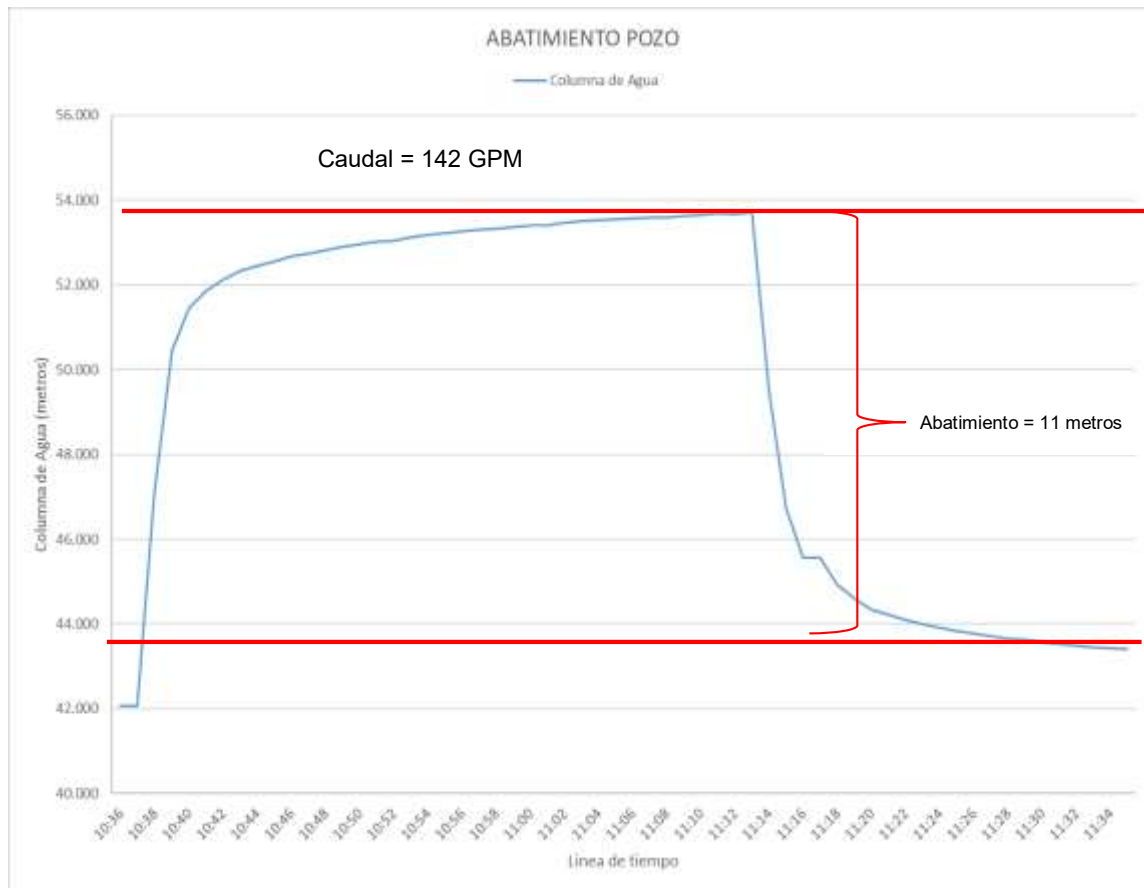
Continuación de tabla VI.

17-02-17	11:08	1920	76.156	49.803	53.596	1468.596
17-02-17	11:09	1980	76.198	49.805	53.626	1468.626
17-02-17	11:10	2040	76.221	49.777	53.642	1468.642
17-02-17	11:11	2100	76.28	49.794	53.684	1468.684
17-02-17	11:12	2160	76.275	49.796	53.680	1468.680
17-02-17	11:13	2220	76.325	49.797	53.715	1468.715
17-02-17	11:14	2280	70.327	49.779	49.494	1464.494
17-02-17	11:15	2340	66.418	49.764	46.743	1461.743
17-02-17	11:16	2400	64.737	49.742	45.560	1460.560
17-02-17	11:17	2460	64.737	49.708	45.560	1460.560
17-02-17	11:18	2520	63.838	49.682	44.927	1459.927
17-02-17	11:19	2580	63.387	49.65	44.610	1459.610
17-02-17	11:20	2640	63.016	49.611	44.349	1459.349
17-02-17	11:21	2700	62.826	49.588	44.215	1459.215
17-02-17	11:22	2760	62.651	49.538	44.092	1459.092
17-02-17	11:23	2820	62.518	49.524	43.998	1458.998
17-02-17	11:24	2880	62.398	49.495	43.914	1458.914
17-02-17	11:25	2940	62.283	49.48	43.833	1458.833
17-02-17	11:26	3000	62.206	49.448	43.779	1458.779
17-02-17	11:27	3060	62.113	49.456	43.713	1458.713
17-02-17	11:28	3120	62.03	49.437	43.655	1458.655
17-02-17	11:29	3180	62.003	49.425	43.636	1458.636
17-02-17	11:30	3240	61.904	49.416	43.566	1458.566
17-02-17	11:31	3300	61.845	49.393	43.525	1458.525
17-02-17	11:32	3360	61.799	49.374	43.492	1458.492
17-02-17	11:33	3420	61.732	49.359	43.445	1458.445
17-02-17	11:34	3480	61.694	49.358	43.418	1458.418
17-02-17	11:35	3540	61.673	49.344	43.404	1458.404

Fuente: elaboración propia, empleando datos obtenidos con sonda Aqua Troll 500.

Con la información obtenida de la sonda se calcula el abatimiento que se obtiene mediante el bombeo.

Figura 25. **Abatimiento de pozo**



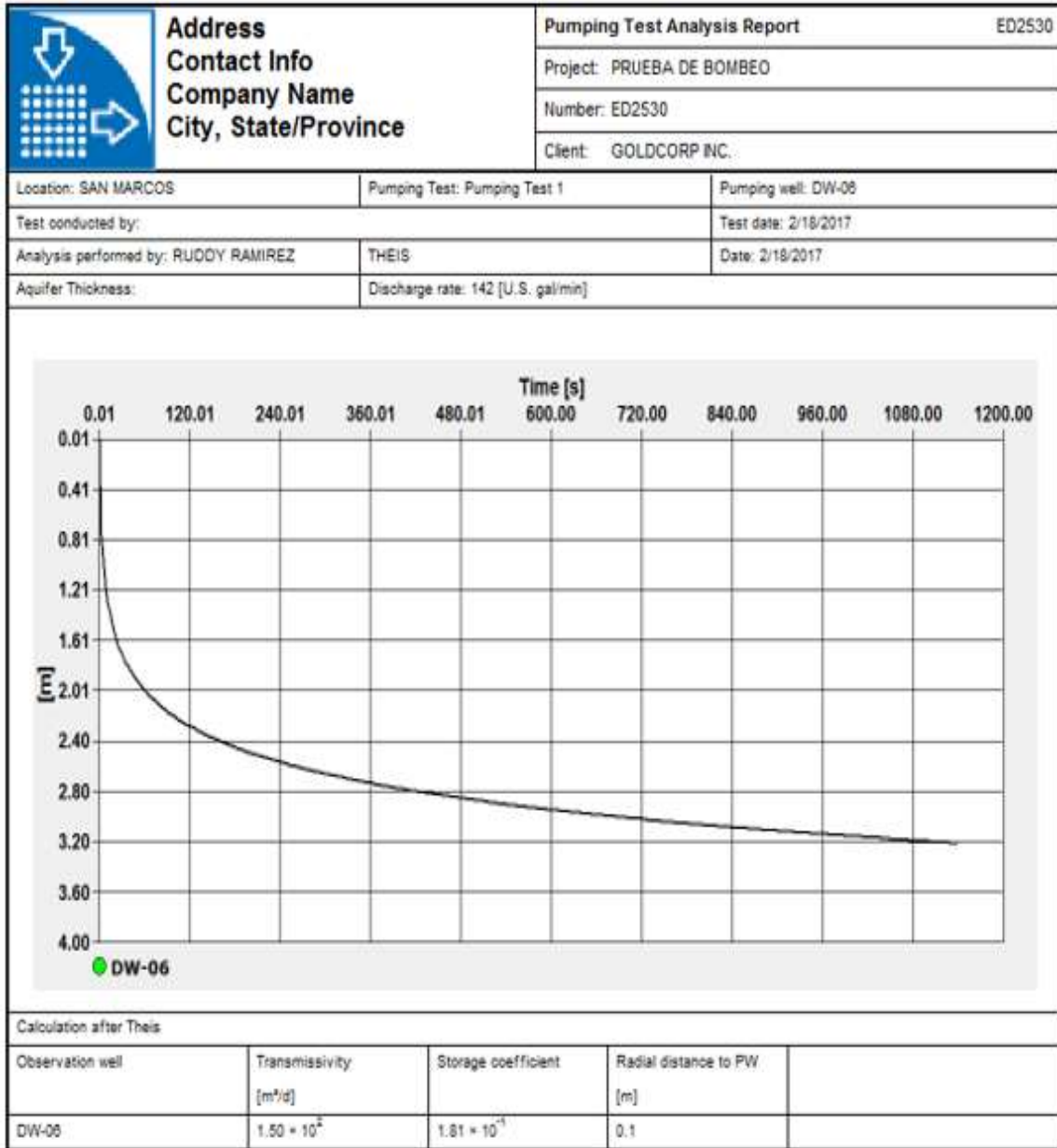
Fuente: elaboración propia, empleando resultados obtenidos con sonda Aqua Troll 500.

En la figura 25, se aprecia que la recuperación del pozo se realiza en un tiempo de 32 minutos, recuperando un total de 11 metros, de los cuales el comportamiento inicial tiende a ser de rápida recuperación. Al arrancar el equipo de bombeo se aprecia que el abatimiento de 11 metros se lleva a cabo en un tiempo de 15 minutos manteniéndose constante durante el bombeo continuo.

3.5. Determinación de variables hidrogeológicas

Para la determinación de las variables hidrogeológicas que corresponde a transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento, se emplea una aplicación llamada Aquifer test Pro, la cual es distribuida por Schlumberger, la cual, mediante la información del diseño del pozo y la prueba de bombeo, se interpreta la información y se obtiene dichas variables, en esta oportunidad de hará uso de la aplicación empleando el método de Theis.

Figura 26. Obtención de transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento



Fuente: elaboración propia, empleando aplicación de AquiferTest Pro.

3.6. Calificación del acuífero

Según la información determinada por los cálculos realizados en la aplicación AquiferTest Pro, es posible determinar la calificación de acuífero mediante la siguiente tabla.

Tabla VII. **Tabla de clasificación de acuífero**

Coefficiente de transmisividad (m ² /d)	Clase de la magnitud de la transmisividad	Denominación de la transmisividad del acuífero (del medio hidrogeológico)	Parámetros comparativos regionales aproximadamente correspondientes al coeficiente de transmisividad	Estimación de posibilidades aprovechamiento de agua subterránea. La demanda de agua puede cubrirse por extracciones	Caudal aproximado en L/s de un pozo con un descenso de 5 m
			No logarítmico: Caudal específico (L/sm)	Logarítmico: Índice de transmisividad Y	
	I	Muy alta		de gran importancia regional	> 50
	II	Alta		para abastecimiento local (sitios pequeños, plantas etc.)	5 - 10
10	III	Moderada	0.1	menores para abastecimiento local (grupos de casas, fincas pequeñas)	0.5 - 0.5
1	IV	Baja	0.01	para abastecimiento local de demanda reducida	0.005 - 0.05
0.1	V	Muy baja	0.001	hasta el abastecimiento local es muy difícil de asegurar	< 0.005
	VI	Imperceptible			

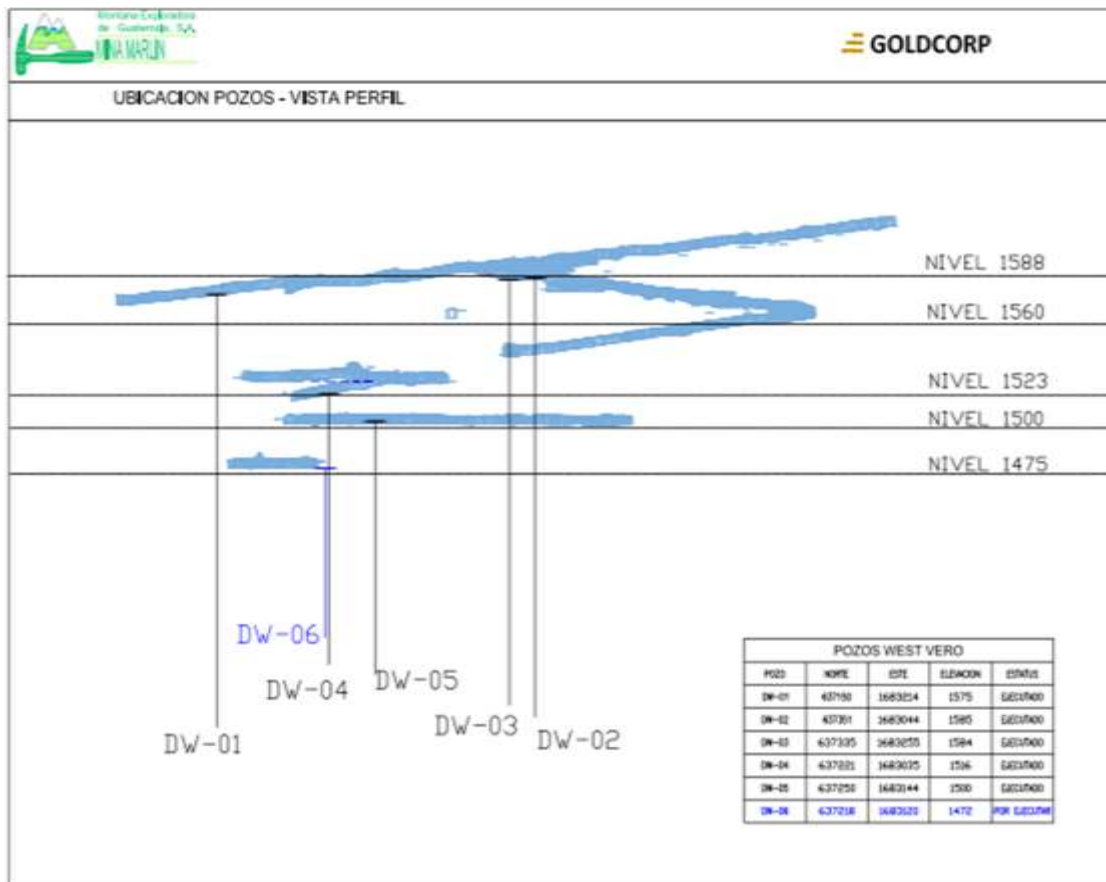
Fuente: Krásn'y (1993). *Clasificación de la magnitud de la transmisividad.*

Basado en el valor de transmisividad obtenidos con el software AquiferTest, el acuífero es considerado según su medio hidrogeológico como alto. Por lo que, para extracciones se clasifica como de menor importancia regional. Por lo tanto, en función a esta información, se determina que el bombeo generará abatimiento

en los niveles freáticos y permitirá mejorar las condiciones del túnel en el sector de West Vero, de Mina Marlín.

Esta información permite inferir que, según el medio hidrogeológico alto, fue necesario tener un sistema conformado de varios pozos, 6 en total, los que el perfil longitudinal se presenta a continuación.

Figura 27. Perfil longitudinal de pozos implementados



Fuente: elaboración propia.

3.7. Beneficios esperados con la implementación

La implementación de un sistema de bombeo subterráneo pretende ser una solución a desarrollos de túneles que son afectados por un acuífero, por lo que mediante el uso de equipo de bombeo se abate los niveles freáticos, permitiendo generar control de la saturación del terreno.

En el sector de West Vero, además, se desea mejorar las condiciones de las áreas de trabajo, dada la influencia de un acuífero termal de baja temperatura, que obstaculiza las operaciones fluidas de las actividades mineras.

A continuación, la fotografía muestra que no se había completado la implementación de los pozos, por lo que es notoria la presencia de agua en las labores.

Figura 28. **Condiciones de túnel sin implementar sistema de pozos**



Fuente: [Fotografía de Ruddy Amílcar Ramírez]. (Troncal 3 West Vero, 2016).

Después de que se implementó el sistema de pozos con sus equipos de bombeo instalados las condiciones cambiaron, como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 29. **Condiciones de túnel implementado el sistema de pozos**



Fuente: [Fotografía de Ruddy Amílcar Ramírez] (Troncal 3 West Vero, 2017).

4. SEGUIMIENTO Y CONTROL

4.1. Método de medición de flujo de agua

Para medir el flujo de agua descargado por medio del bombeo efectuado en los pozos subterráneos, es imprescindible tener un método de medición del caudal de cada uno de ellos. Por tal motivo, se debe realizar el mismo utilizando una metodología que brinde mediciones confiables y veraces, las cuales permitan generar monitoreo.

En este caso, se implementó el uso de flujómetros, de tipo electromagnético, esta elección surge por el nivel de precisión que otorgan estos dispositivos al momento de cuantificar el flujo descargado de los pozos. Permite que se pueda generar información diaria sobre el caudal promedio descargado y estimar el volumen de agua que ha sido extraído en función del tiempo.

Este tipo de flujómetro permite el cálculo de flujo promedio y volumen extraído, la colección de estos datos se puede realizar de manera diaria, por lo que se puede utilizar como herramienta de almacenamiento de esta información una hoja electrónica, que permita realizar los cálculos y almacenamiento de información.

A continuación, se muestra un ejemplo de cómo se implementa la instalación de flujómetro electromagnético en la descarga del pozo con el propósito de control de caudal extruido.

Figura 30. **Pozo con flujómetro electromagnético instalado**



Fuente: [Fotografía de Ruddy Amílcar Ramírez] (Pozo DW-05, 2016)

4.2. Método de medición de niveles de agua

Para medir niveles de agua existen varios métodos que pueden variar según las necesidades a suplir con lo que respecta a la obtención de información. También varía según al lugar donde se realizará la medición, dado que puede ser en un lugar abierto o confinado como lo es el caso de un pozo.

Cuando las mediciones se ejecutan en pozos, es necesario usar piezómetros, cuyo principio se fundamenta en la medición de la presión de agua en función a la profundidad en que se efectúa la medición, en este caso se precisa este método por tratarse de pozos subterráneos.

Para obtener estas medidas, existen distintos métodos de implementación de piezómetros, como los hidráulicos, neumáticos, cuerda vibrante, resistencia eléctrica y Casagrande. Dada la expansión de la tecnología para el monitoreo de niveles de agua, se puede contar con piezómetros multiparámetro, que integran la medición de presión de agua y temperatura según la profundidad en que se realiza la muestra e integran la funcionalidad de almacenar información en periodos programados de tiempo.

En la Mina Marlín, se implementó el uso de una sonda multiparámetro tipo Aqua Troll 500 cuya fabricante es In-Situ Inc. Se utiliza para muestrear de manera continua los niveles de agua, conocer la temperatura de esta y facilita el almacenamiento de la información en periodos programados, según las necesidades determinadas por el usuario, para la obtención de datos para calcular el abatimiento de nivel freático. Además, cuando la sonda se instala en un pozo de bombeo, esta herramienta informa de las fluctuaciones de los niveles dinámicos y al relacionarlo con el caudal se obtiene el cálculo de variables hidrogeológicas, que permite realizar la caracterización del acuífero.

4.3. Control de caudal y volúmenes de agua extraído

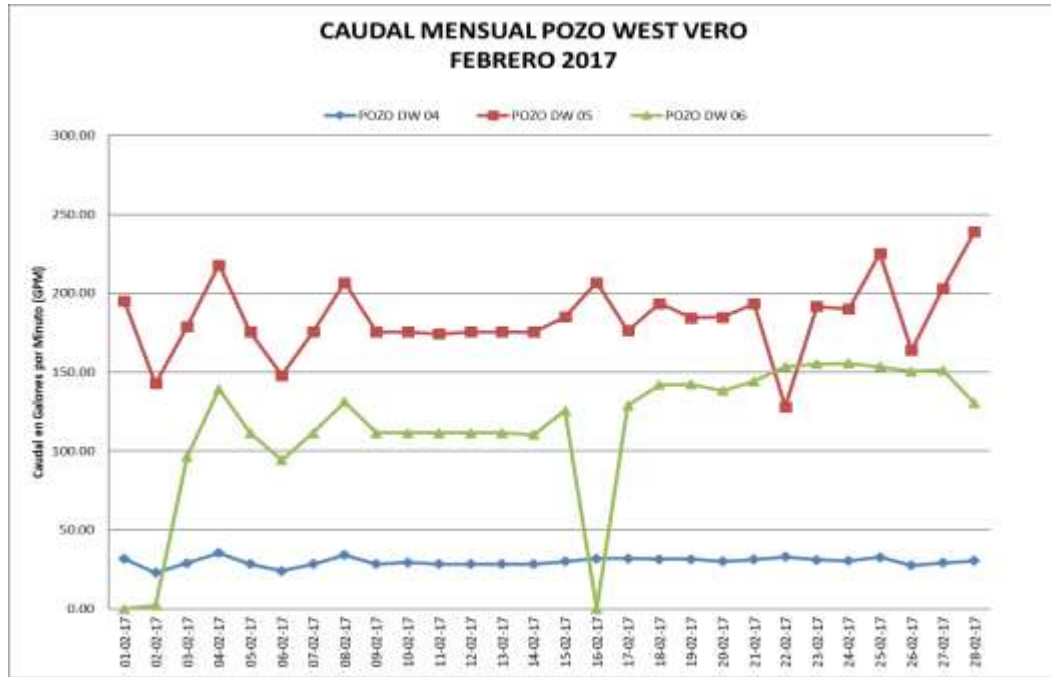
Es importante su seguimiento y control de caudal así como el volumen extraído de agua, dado que mediante esta información, se puede inferir el comportamiento que tiene el bombeo de los pozos durante el tiempo y, de esta manera, correlacionar dicha información, según su comportamiento, con el

abatimiento de niveles freáticos que puedan estar existiendo o el posible fallo del equipo electro-sumergible, dado que al verificar la información se podrán observar variaciones durante el tiempo que esté en funcionamiento el sistema de bombeo, otorgando así una fácil toma de decisiones.

Para generar control de caudal y volumen de agua, es importante contar con instrumentación confiable y precisa para la medición de estos parámetros; se debe implementar un plan de monitoreo diario que permita la recolección de la información.

A continuación, se muestra una gráfica de cómo se estructura el cálculo de los parámetros de flujo promedio, volumen extraído de agua de un pozo y de esta manera tener control sobre la descarga del pozo.

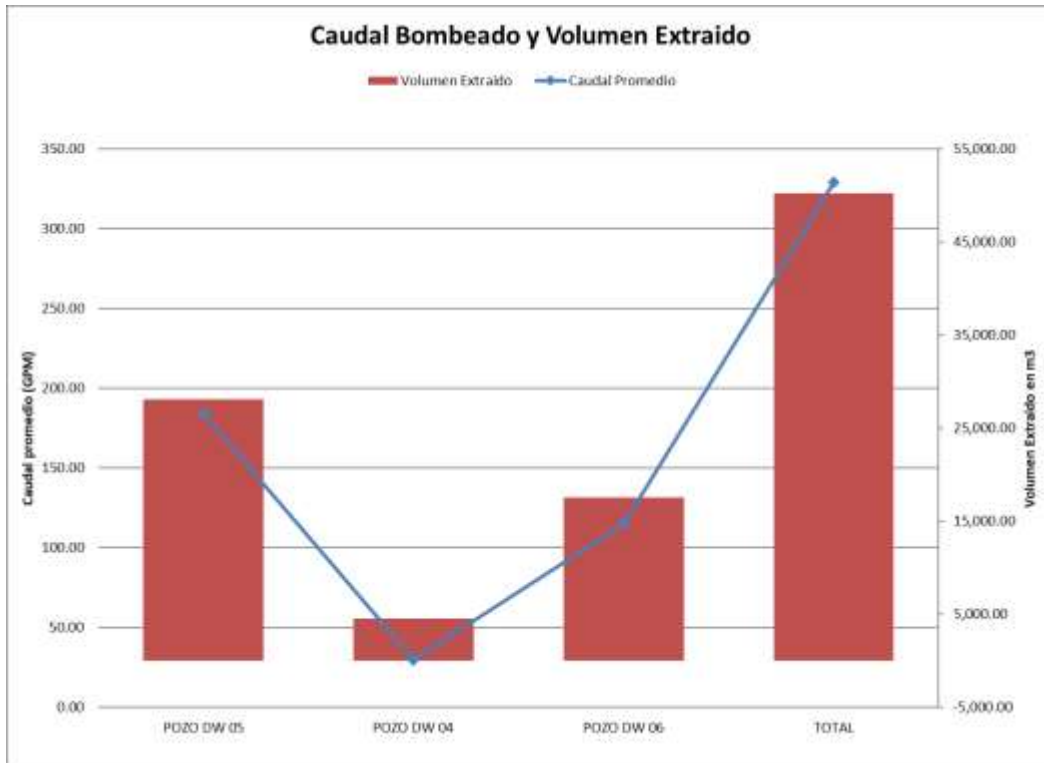
Figura 31. Caudal promedio de pozos durante un mes de bombeo



Fuente: elaboración propia.

En la figura 31, se puede interpretar que el bombeo en los pozos ha sido constante en la mayoría de los pozos y presenta la tendencia del caudal que ha sido registrado en el tiempo durante el mes. Con esta información se obtiene el gráfico de la relación que tiene el caudal promedio con el volumen extraído de agua durante el bombeo de los pozos.

Figura 32. Caudal promedio y volumen extraído mensualmente



Fuente: elaboración propia.

Esta información es importante cuando se tiene un sistema de bombeo porque a partir de ella se observa el descenso del caudal. Este dato será indicador del deterioro del equipo de bombeo o que el aporte de agua en los pozos está disminuyendo debido al descenso del nivel freático, esta última observación se debe fundamentar en la interpretación de sistema de piezómetros.

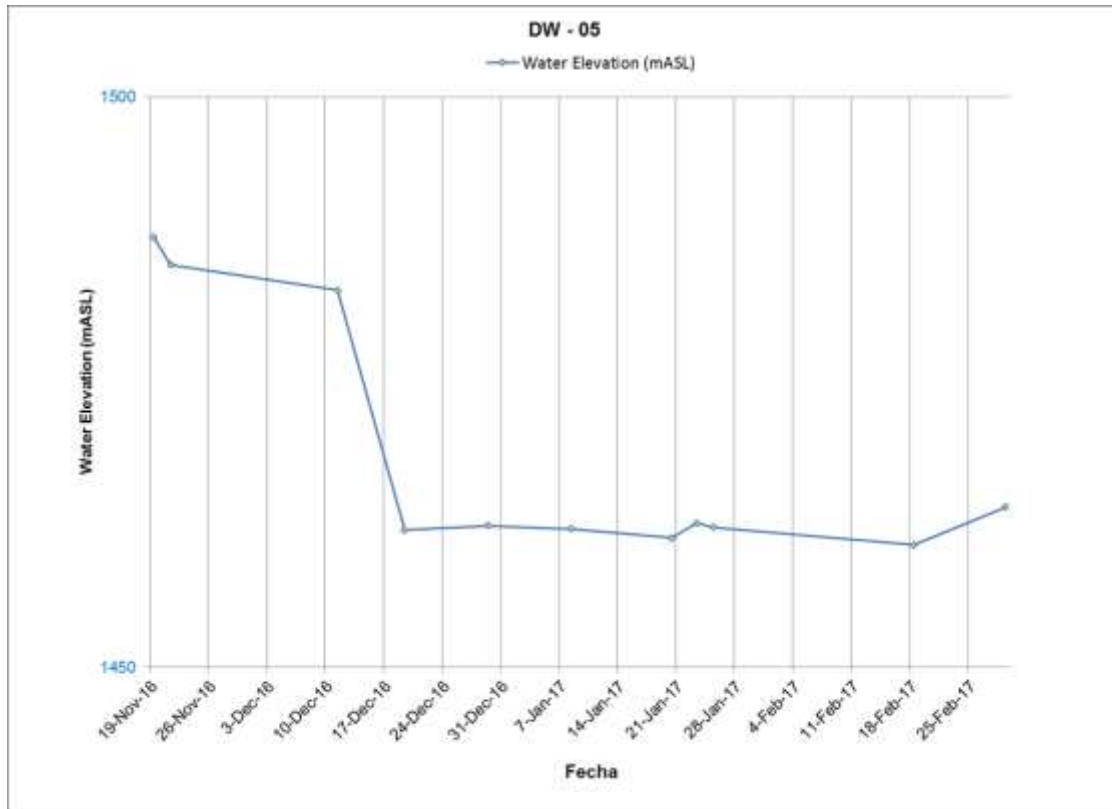
4.4. Niveles dinámicos de pozos

El nivel dinámico de un pozo se obtiene cuando se inicia la extracción de agua mediante el uso de equipos de bombeo, repercute en que se registró un descenso del nivel del agua, según la capacidad de la bomba y la rapidez con la que el acuífero aporte agua al pozo. La determinación de este parámetro se puede obtener mediante la instalación de sondas de profundidad en el pozo del que se esté extrayendo agua.

Es importante que se pueda tener control del nivel dinámico del pozo, esto con el propósito de conocer la longitud de columna de agua, con que se está operando el equipo de bombeo, dicha información permite la toma de decisiones ya sea de profundizar el equipo de bombeo, para que en ningún momento se quede bombeando en vacío y pueda generar deterioro del equipo electro sumergible.

En la figura 33 se ilustra el nivel dinámico del pozo y visualiza la tendencia del cambio de niveles de agua, la variación de nivel registrado por el pozo en función del tiempo se registra y evidenciará el descenso de nivel de agua con el tiempo y la efectividad que se tiene del bombeo en extraer agua del acuífero.

Figura 33. Nivel dinámico de pozo



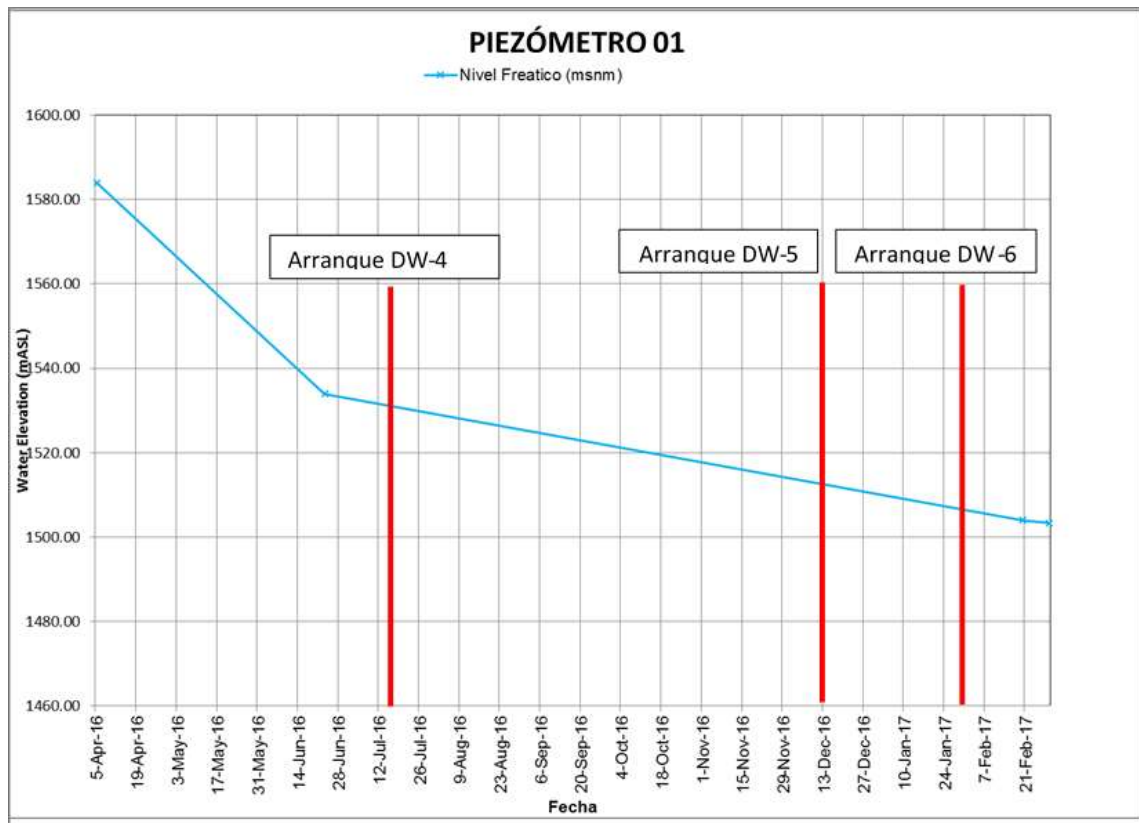
Fuente: elaboración propia.

4.5. Niveles freáticos mediante piezómetros

La determinación del nivel freático mediante piezómetros se obtiene cuando se instala instrumentación para medición de niveles de agua, en pozos en los que no se afecta por bombeo. Es importante obtener este dato porque el nivel freático o estático, indica el nivel de agua correspondiente del acuífero en sectores específicos. Por lo tanto, provee información importante para la toma de decisiones, dado que se puede determinar en función a esto, la implementación de más pozos de bombeo, para que esto se traduzca en descenso del nivel de agua.

A continuación, se visualiza la figura correspondiente a piezómetros, en los que se puede observar cómo ha sido el comportamiento del descenso del nivel de agua en el área del túnel de Mina Marlín donde se está afectando con bombeo.

Figura 34. Nivel piezómetro



Fuente: elaboración propia.

En la figura 34 se observa cómo influye el inicio de bombeo de cada pozo, en el comportamiento del nivel freático y éste como se ve afectado en su abatimiento en el transcurso del tiempo.

En el proceso de desarrollo del túnel, conocer esta información es trascendental, ya que permite conocer de manera previa en qué nivel se puede efectuar de manera segura el ciclo de minado, dado que durante su desarrollo las condiciones de saturación de agua son controladas.

5. MANTENIMIENTO Y MEDIO AMBIENTE

Para que el sistema de bombeo subterráneo funcione adecuadamente, es importante implementar un sistema de mantenimiento para garantizar el funcionamiento adecuado y continuo de los pozos. El agua extraída debe someter a un manejo adecuado del agua extraída, ya que, por sus características termal es probable que contenga elementos que deben identificarse para aplicar el manejo y tratamiento del agua descargada.

5.1. Plan de mantenimiento a equipo de bombeo y pozos

Es importante el mantenimiento de pozos para asegurar que el sistema de bombeo funcione de manera continua. Este mantenimiento se vincula con el registro del tiempo de operación de los equipos de bombeo, el caudal promedio extraído y el comportamiento que tiene en el pozo. Esto se obtiene del análisis del nivel dinámico del pozo.

Además del plan de mantenimiento de pozos, es necesario conocer la necesidad de tener bombas electro sumergibles de repuesto cuando suceda una falla mayor. De esta forma el pozo no permanecerá inhabilitado durante largo tiempo, lo cual puede ser negativo en el resultado del abatimiento del nivel freático.

A continuación, se presenta una tabla de las posibles fallas durante el funcionamiento de los equipos de bombeo electro sumergible.

Tabla VIII. **Fallas comunes en equipos electrosumergibles y posibles soluciones**

PROBLEMA	CAUSA POSIBLE	SOLUCIÓN
La bomba no enciende.	<ol style="list-style-type: none"> 1. No hay corriente o hay una fase ausente. 2. El cable es muy largo y fino. 3. Los contactos se rompieron o el relay de temperatura se accionó. 4. El cable de corriente se desconectó del cable EM. 5. La parte eléctrica se rompió. 6. Hay algún residuo en el propulsor de la bomba. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revise la conexión para encontrar la causa. 2. Utilizar un cable más grueso de alto voltaje. 3. Reemplazar los contactos. 4. Revisar la conexión y reconectar. 5. Arreglar la parte eléctrica o cambiarla. 6. Limpiar.
No hay flujo de agua La bomba hace mucha o poca fuerza.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reversa 2. Menor levantamiento que el indicado. 3. La entrada está bloqueada. 4. La tubería está bloqueada o rota. 5. El propulsor esta gastado. 6. El conjunto de rodamientos esta flojo o roto. 7. La válvula de retención esta obstruida. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cambiar la energía o invertir los cables (monofásico) 2. Ajustar el levantamiento. 3. Remover las obstrucciones. 4. Remover las obstrucciones, arreglar la tubería. 5. Cambie el propulsor. 6. Cambie el conjunto de rodamientos. 7. Cambie la válvula de retorno.
El flujo es demasiado abundante o escaso en la fuerza correcta.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Flujo abundante, pero no hay suficiente agua. 2. La bomba no está con la profundidad necesaria. No hay suficiente agua. 3. El nivel de agua es muy bajo como para alcanzar la entrada de la bomba. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cambie la bomba al flujo correcto. 2. Sumergir la bomba lo necesario. 3. Limitar o reajustar la profundidad de la bomba.
El eje automático funciona correctamente pero el manual no.	<ol style="list-style-type: none"> 1. El electrodo automático del nivel de agua esta gastado o dañado. El cable a tierra esta gastado o dañado. 2. El electrodo automático está roto. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revisar el electrodo, el cable y cambiarlos. 2. Revisar o cambiar la caja de control.

Fuente: Maquinarias y Herramientas. *Bombas preventivos*. (2018).

<https://www.demaquinasyherramientas.com/maquinas/bombas-de-agua-sumergibles-mantenimiento-y-cuidados-preventivos>.

Por lo tanto, el monitoreo constante de cada uno de los pozos que se tengan en funcionamiento en el sistema de bombeo debe hacerse de manera frecuente para identificar oportunamente cualquiera de los indicios de falla del equipo e

identificarlo en el momento preciso con el propósito de conocer la manera adecuada de dar solución.

5.2. Muestreo de calidad de agua

El muestreo de la calidad de agua es fundamental. Por tratarse de un bombeo de un acuífero termal en contacto con la roca de origen volcánica, es posible que en su composición contenga elementos que exijan un tratamiento específico del agua.

La muestra se obtiene de la toma de agua en un recipiente esterilizado e identificado con el nombre del pozo o lugar en donde se tomó la muestra. Si la muestra se toma directamente de la descarga de los pozos, es necesario que se provea el caudal promedio que está produciendo para calcular el volumen en metros cúbicos de agua que produce. De esta manera, si la muestra de agua contiene algún elemento que amerite un tratamiento especial, se tenga un estimado de los aditivos que serán utilizados, para que el agua proceda por un tratamiento y pueda ser apta para utilizarse en reproceso dentro de la mina.

Las muestras deben ser enviadas al laboratorio donde se determinan sus características para establecer un tratamiento antes de su disposición final. A continuación, se ejemplifica un análisis partiendo de un muestreo realizado en Mina Marlín.

Tabla IX. Resultados de muestras de agua

Parámetro	Nivel 1560	Nivel 1560	Nivel 1588	COGUANOR - NTG29001	
	junio	agosto	agosto	LMA	LMP
pH	16-06-15 7.63	22-08-15 7.68	22-08-15 7.25	7-7.5	
Temperatura	44.6	39.8	44.5		<34
Conductividad	5,485	3,666	4,526	100-750	
Oxígeno		4.96	1		
Sólidos	92	34	18		
Color	374	140	19		
DQO	9.13	14.4	6.71		
Alcalinidad	92.9	129	75.6		
Cloro libre	0.025				
Sulfatos	1,269	1,083	1,388		50
Sulfuro	79	22	2		
Cloruro		16	23		
Fluoruro		2.34	2.67		1.5
NH3	1	0.095	0.141		
Nitritos	0.06	0.003	0.01		
Nitratos	0.15	0.133	0.155		
Nitrógeno	2	0.919	0.162		
Hierro	0.1	0.911	0.063		
Arsénico		0.61	0.93		0.01
Sólidos disueltos		2,383	2,942		1000

Fuente: Departamento de Medio Ambiente (2015).

En los resultados de la tabla 9, el agua al ser proveniente de un acuífero termal de origen volcánico tiene como probabilidad que contenga minerales por el contacto con las rocas volcánicas. En este caso, se determina que tiene en dos puntos la prevalencia de arsénico en valores que sobrepasan los parámetros permitidos por la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR).

De acuerdo con los resultados, debe someterse a tratamiento para que cumpla con los parámetros permitidos por la Comisión Guatemalteca de Normas.

5.3. Método de tratamiento de agua

Para el tratamiento del agua, inicialmente se debe establecer una manera adecuada de conducción del flujo por medio de tuberías, que se pueda garantizar que el agua que tiene variación de sus parámetros pueda ser depositada en un área adecuada y de esta manera iniciar el tratamiento.

Cuando se realiza bombeo subterráneo en acuíferos termales, el elemento que prevalece en concentraciones mayores a las permitidas tanto por la Comisión Guatemalteca de Normas y Estándares Internacionales, corresponde al Arsénico.

El método que se elija puede variar según el volumen de agua que se extraiga mediante bombeo, cuando se tengan indicios de contener arsénico y la concentración que contenga el agua según los análisis realizados en laboratorio. En función a estas variables se puede realizar un método de tratamiento mediante Coagulación -Filtración, Oxidación - Filtración, Adsorción Utilizando Medios de Hidróxido de Hierro Granular, Intercambio de Iones, Separación de Membrana o Medios VSN-33.

5.4. Disposición final del agua postratamiento

Después del tratamiento, el agua puede estar disponible para usarse para cualquier aplicación, tanto como de procesos internos relacionados a minería o uso doméstico, esto debido a que ya se encuentra libre de arsénico.

Durante el proceso de disposición del agua, es importante generar muestreo para obtener información sobre la calidad de agua que fue tratada y se pueda tener certeza que se estén cumpliendo con los parámetros de la Comisión Guatemalteca de Normas.

CONCLUSIONES

1. El acuífero termal de baja temperatura se presenta debido a que existe conexión con un acuífero de flujo regional de mayor temperatura, el cual se desplaza debido a factores estructurales como lo son fallas extensionales a profundidad, las cuales están relacionadas con la veta de reserva de mineral.
2. De acuerdo con la caracterización geológica se pudo determinar que el acuífero termal de baja temperatura tiene influencia en la cota 1475 msnm cuyo comportamiento es surgente y esta finaliza en la cota 1390 msnm en la cual no se interceptan estructuras mineralizadas.
3. El análisis geotécnico indica que, la presencia de agua subterránea en el macizo rocoso aumenta la vulnerabilidad a derrumbes y por ende al colapso del túnel, por lo que la implementación de un sistema de bombeo que genere control del nivel freático contribuye a mejorar las condiciones geomecánicas del macizo rocoso.
4. Se identificó un acuífero termal de baja temperatura, por lo que implementar un sistema de pozos subterráneos es factible y viable para mejorar la estabilidad durante el desarrollo del túnel.
5. Definiendo el modelo hidrogeológico y conociendo el plan de minado, se pueden implementar un sistema pozos de bombeo subterráneo en áreas de influencia, con el propósito de mejorar las condiciones geomecánicas del túnel durante su desarrollo.

RECOMENDACIONES

1. Efectuar un análisis geotécnico detallado que permita conocer los aspectos estructurales, calidad y clasificación del macizo rocoso, para evaluar la factibilidad del desarrollo del túnel.
2. Considerar que antes de la desarrollar un túnel, se debe realizar estudios que permitan conocer de manera previa, la presencia de acuíferos.
3. Para mejorar las condiciones geomecánicas del túnel, se debe controlar el nivel freático, esto permitirá mejorar las condiciones de seguridad, lo que evitará que se registren colapsos o derrumbes que comprometan a los trabajadores.
4. Conocer el gradiente de temperatura del acuífero y tipificar el acuífero, esto permitirá diseñar el sistema de control de niveles freáticos, factible para mejorar las condiciones de estabilidad y seguridad del túnel.
5. El modelo hidrogeológico permite conocer la dimensión y la influencia del acuífero que afecta la estabilidad del desarrollo del túnel, asimismo permite la toma de decisiones al respecto del sistema de control de niveles freáticos a elegir, con lo cual se favorecerá las condiciones geomecánicas del lugar.

REFERENCIAS

1. Association, A. W. (2014). *Groundwater*. New York, United State of America.: American Water Works Association. Recuperado de <https://www.awwa.org/Store/Product-Details/productId/36972536>.
2. Benaventa Herrera, J. y. (1985). *Relación de las direcciones de Karstificación y del termalismo con la fracturación en las Cordilleras Béticas*. Madrid, España: Estudios Geológicos. Recuperado de <http://estudiosgeol.revistas.csic.es/index.php/estudiosgeol/article/view/700/729>.
3. Benitez, A. (1970). *Captaciones de Aguas Subterráneas*. Madrid, España: Dossat. Recuperado de https://www.academia.edu/41580279/Captacion_de_aguas_subterranas_nuevos_métodos_de_prospeccion_y_de_cálculo_de_caudales.
4. Brady, B. B. (1993). *Rock mechanics for underground mining*. London, England: Chapman and Hall. Recuperado de https://miningandblasting.files.wordpress.com/2009/09/rock-mechanics_for-underground-mining.pdf
5. Brown, E. T. (2004). *Geomechanics: The critical engineering discipline for mass mining*. Santiago de Chile, Chile: A. KarzulovicM. Alfaro. Recuperado de <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:100607>

6. Canasty, G. (1973). *Tratado Práctico de las Aguas Subterráneas*. Barcelona, España: Omega, S.A.
7. Chow, V. T. (1952). *On the Determination of Transmissivity and Storage Coefficients from Pumping Test Data*. Washington D. C. Estados Unidos: Trans Am Geophys Union. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/4c43/bfaf22311d1735e4b270aabc7cd33e61729e.pdf>
8. Cruz-Sanjulián, J. y.-R. (1975). Termalismo en España Meridional. *Boletín Geológico y Minero*. LXXXVI-II, 51-58.
9. Custodio, E. y. (1983). *Hidrología subterránea*. Barcelona, España: Omega, S.A. Recuperado de <https://doku.pub/documents/hidrologia-subterranea-custodio-y-llamas-tomo-ii-yl4zwom979qr>
10. Dawson, K. a. (1991). *Aquifer testing design and analysis of pumping and slug test*. Michigan, U.S.A.: Lewis Publishers. Recuperado de <https://www.amazon.com/Aquifer-Testing-Design-Analysis-Pumping-ebook/dp/B07CSWCTCP>
11. Departamento de Geomecánica. (2017). *Plan de gestión del control de terreno*. Guatemala, Guatemala: Autor.
12. Driscoll, F. (1989). *Groundwater and wells*. St. Paul, Minnesota, United State of America: Jhonson Division. Recuperado de <https://www.nrc.gov/docs/ML1423/ML14237A631.pdf>

13. Eddy, M. &. (1998). *Ingeniería de aguas residuales*. Madrid, España: McGraw-Hill. Recuperado de https://www.academia.edu/35963101/Ingenier%C3%ADa_de_aguas_residuales_Volumen_1_3ra_Edici%C3%B3n_METCALF_and_EDDY_FREELIBROS_ORG_pdf
14. García Martín, T. &. (2004). *Estudio y aplicación de modelos acoplados de flujo y transporte en aguas subterráneas*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/28071150_Estudio_y_aplicaciones_de_modelos_acoplados_de_flujo_y_transporte_en_aguas_subterraneas
15. Hsieh, P. (1998). *Scale effects in fluid flow through fractured geologic media. Scale Dependence and Scale Invariance in Hydrology*. New York, Estados Unidos: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511551864.013
16. Hsu, S. L. (1996). *Rock Mass Hydraulic Conductivity Estimated by Two Empirical Models*. New York, Estados Unidos: Developments in Hydraulic Conductivity Research. Recuperado de <https://www.intechopen.com/books/developments-in-hydraulic-conductivity-research/rock-mass-hydraulic-conductivity-estimated-by-two-empirical-models>
17. INGEOMINAS. (2004). *Programa de exploración de Aguas subterráneas*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de

<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/Aguas-subterraneas-enfoque-practico.PDF>

18. Johnson, E. E. (1975). *El agua subterránea y los pozos*. St. Paul, Minesota, U.S.A: Jhonson Division, UOP INC.
19. King, H. W. (1982). *Hidráulica*. México, D.F, México: Trillas, S.A. de C.V.
20. Kruseman, G. a. (1994). *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. Amsterdam, Holanda: Wageningen, The Netheriands. Recuperado de https://www.hydrology.nl/images/docs/dutch/key/Kruseman_and_De_Ridder_2000.pdf
21. Larsson, I. (1985). *Aguas subterráneas en rocas duras*. Paris, Francia: Unesco. Recuperado de https://hydrologie.org/BIB/Publ_UNESCO/SR_033_S_1985.pdf
22. Lisle, K. y. (1985). *Hidrologia para Ingenieros*. México, D.F, México: McGraw-Hill. Recuperado de https://www.academia.edu/37765494/Hidrolog%C3%ADa_para_Ingenieros_LINSLEY_KOHLER_y_PAULHUS
23. Lohoman, S. (1977). *Hidráulica Subterránea*. Barcelona, España: Ariel.
24. Masset, O. &. (2010). *Hydraulic conductivity distribution in crystalline rocks, derived from inflows to tunnels and galleries in the Central Alps*. Zürich, Suiza: Hydrogeology Journal. Recuperado de

https://doc.rero.ch/record/321258/files/10040_2009_Article_569.pdf

25. Mc. Naughton, K. (1992). *Bombas Selección, uso y mantenimiento*. México, D.F., México: McGraw-Hill. Recuperado de https://www.academia.edu/6343212/BOMBAS_Selecci%C3%B3n_uso_y_mantenimiento_McGRAW_HILL
26. Mijailov, L. (1985). *Hidrogeología*. Moscú, Rusia: MIR.
27. Neuman, S. P. (2005). *Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks*. Londres, Inglaterra: Hydrogeology Journal. Recuperado de https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/6063/articles/5111/GNL_P7XNM1F3UVXYB.pdf
28. Osorio, M. J. (2015). *Construcción de modelos hidrogeológicos en medios fracturados a partir de información escasa Construcción de modelos hidrogeológicos en medios fracturados a partir de información escasa*. Medellín, Colombia: Facultad de Minas, Escuela de Materiales. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/50012/1/1128390968.2015.pdf>
29. Pyrak-Nolte, L. (1987). *Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock*. California, Estados Unidos: Int. Cong. On rock mech. Recuperado de http://www.physics.purdue.edu/rockphys/docs/publications/fluid-flow/hydraulic_mechanical_prop.pdf

30. Rojas, N. D. (2012). *Informe Evaluación Geomecánica del Minado*. Lima, Peru: Autor.
31. Roset, J. M. (2011). *Evaluación del potencial de energía geotérmica*. Madrid España: IDAE. Recuperado de https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e9_geotermia_A_db72b0ac.pdf
32. Sánchez, E. V. (1995). *Modelo conceptual hidrogeológico y características hidráulicas del acuífero en explotación en la parte meridional de la cuenta de México* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.México.
33. Vallejo, G. d. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid, España: Pearson. Recuperado de <https://civilmas.net/libros/ingenieria-geologia-gonzalez-de-vallejo/>
34. Vélez, M. (1999). *Hidráulica de Aguas Subterráneas*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de http://bdigital.unal.edu.co/4993/1/Capitulos_1-5.pdf
35. Villanueva, M. e. (1984). *POZOS Y ACUIFEROS, TÉCNICAS DE EVALUACIÓN MEDIANTE ENSAYOS DE BOMBEO*. Madrid, España.: Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado de https://www.igme.es/biblioteca/Libros_agotados/pozos_acuiferos_2.pdf
36. Yeh, H.-D. &.C. (2013). *Recent advances in modeling of well hydraulics*. Obtenido de <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.006>

ANEXOS

Anexo 1. Testigos rocosos de la caja techo, litología Tm. Calidad Buena (II)



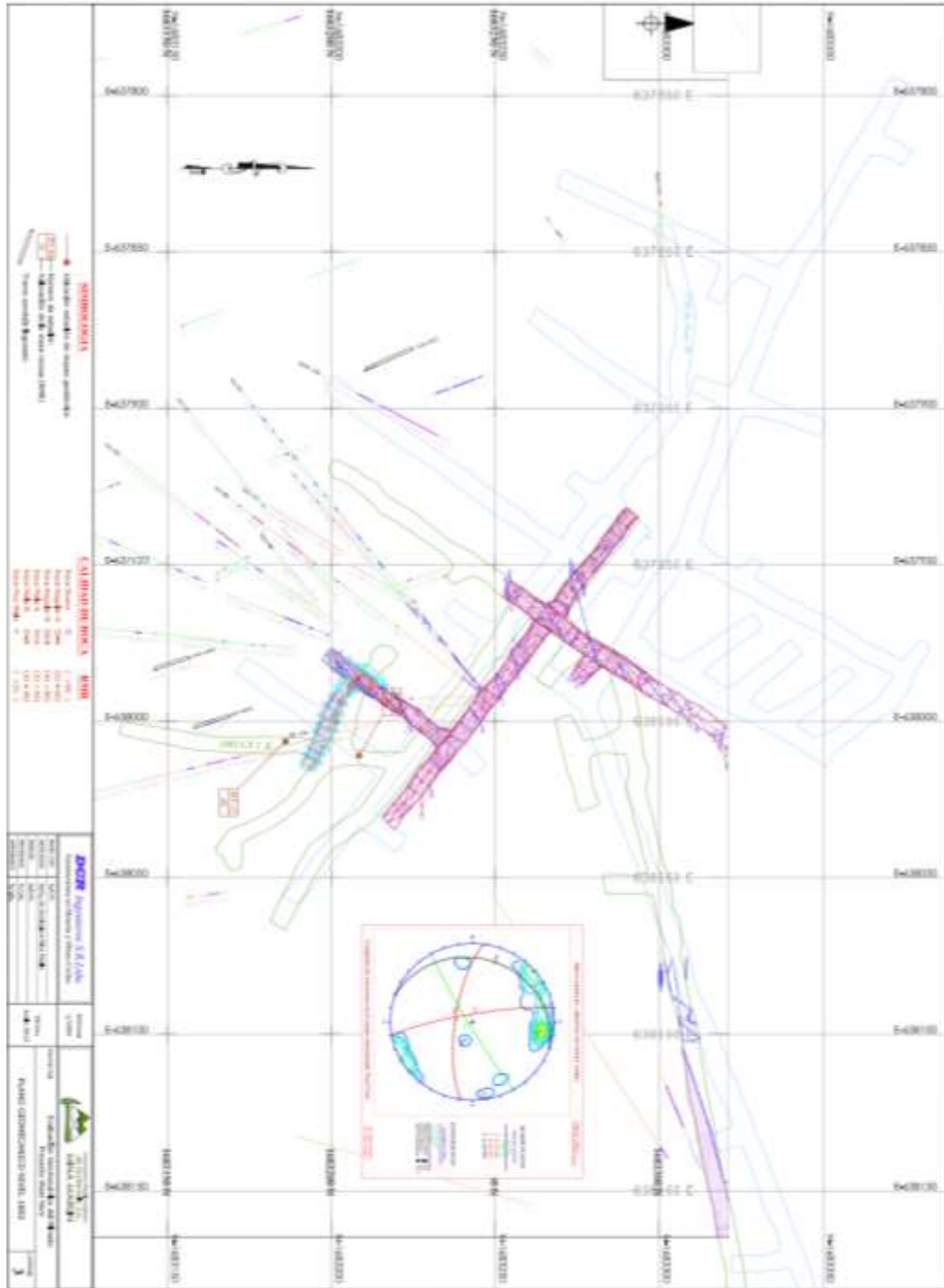
Fuente: Departamento de Geología Mina Subterránea (2012).

Anexo 2. Caja techo y el contacto con mineral. Calidad regular A y B (IIIA y IIIB)



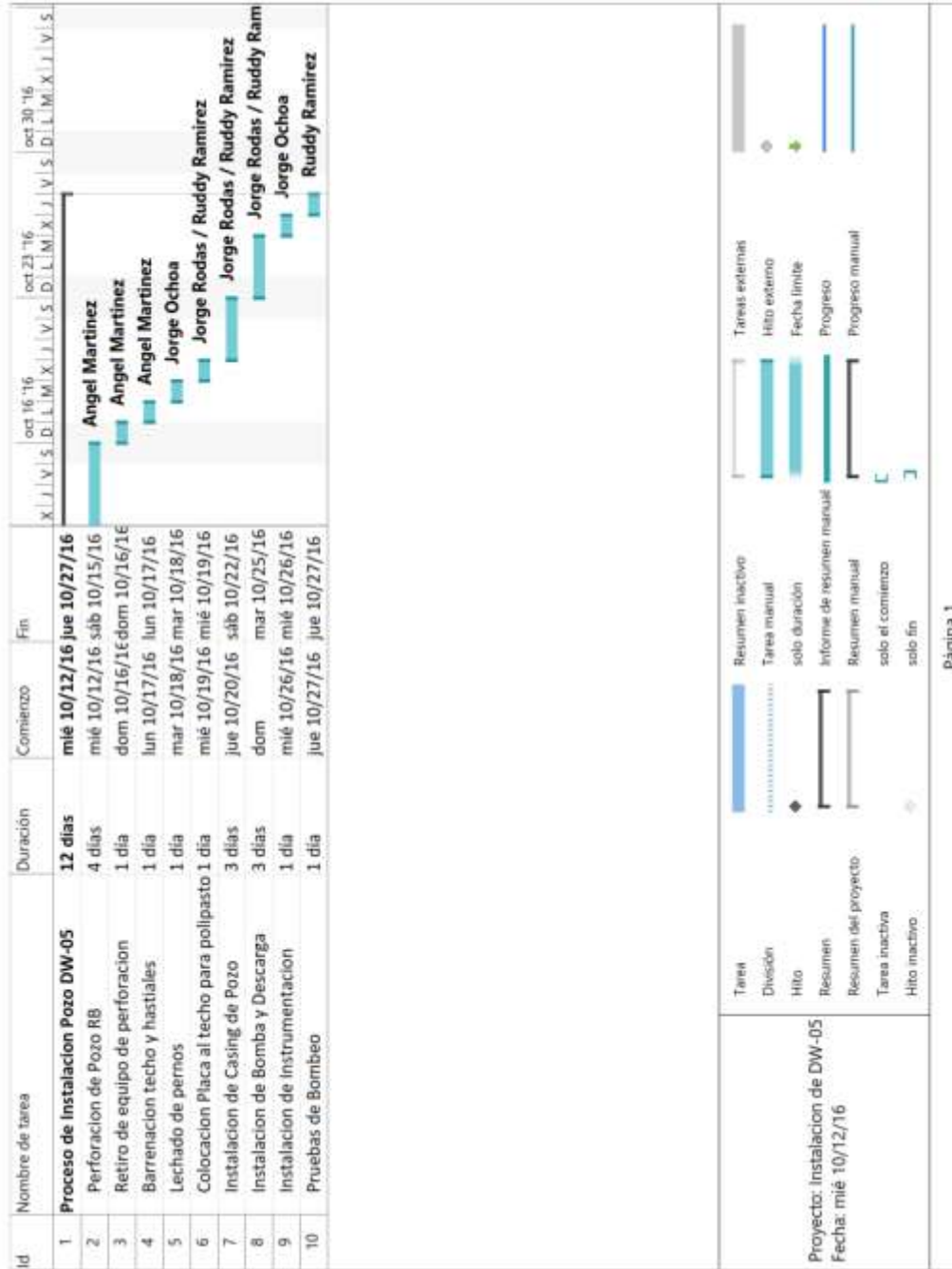
Fuente: Departamento de Geología Mina Subterránea (2012).

Anexo 3. Mapeos geomecánicos



Fuente: Departamento Geomecánica (2016).

Anexo 4. Cronograma de planificación de pozo de bombeo



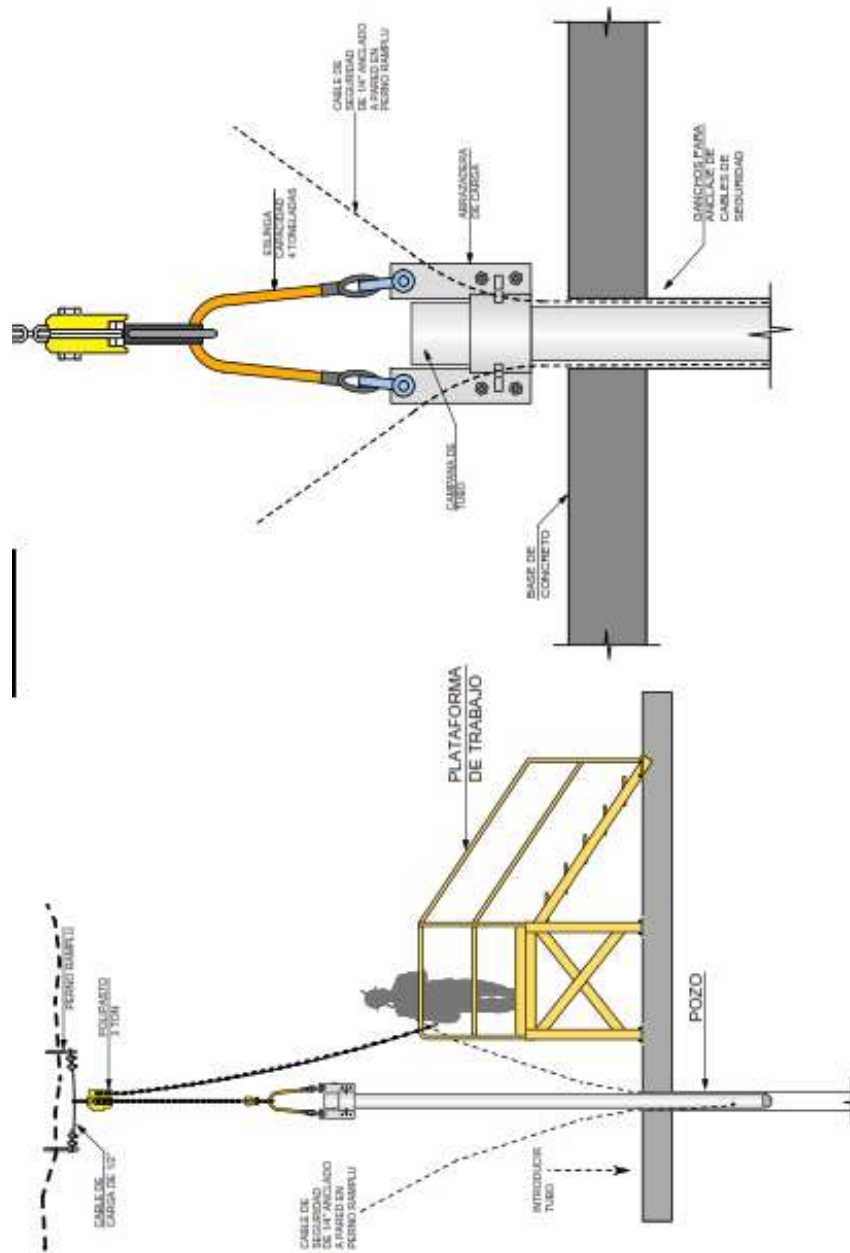
Fuente: Ingeniería Mina Subterránea (2016).

Anexo 5. Perforación de pozo subterráneo con equipo Raise Boring



Fuente: [Fotografía de Ruddy Amílcar Ramírez] (pozo DW-06, 2017)

Anexo 6. Sistema de levante y sujeción de tuberías



Fuente: *Ingeniería Mina Subterránea* (2015).

Anexo 7. Proceso de instalación de tuberías de descarga en pozo



Fuente: [Fotografía de Ruddy Amílcar Ramírez] (Pozo DW-06. 2017).

Anexo 8. Pozo instalado en mina subterránea



Fuente: [Fotografía de Ruddy Amílcar Ramírez] (Pozo DW-06. 2017).

Anexo 9. Monitoreo de caudal de pozo



Fuente: [Fotografía de Ruddy Amílcar Ramírez] (Pozo DW-06. 2017).