



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**RECALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO DE FLUJO 3D DE UN RAJO  
MINERO EN UN MEDIO FRACTURADO DE BAJA PERMEABILIDAD  
INCORPORANDO ANISOTROPÍA EN LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA  
UTILIZANDO EL *SOFTWARE MINEDW***

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

**CATALINA PAZ ESPINOZA MARCHANT**

**PROFESOR GUÍA**

MARTIN BROWN SEPÚLVEDA

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**

JOSE LUIS VILLA LORENZO  
JUVENAL LETELIER VILLALÓN

SANTIAGO DE CHILE  
2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniera Civil  
**POR:** Catalina Espinoza Marchant  
**FECHA:** septiembre 2020  
**PROFESOR GUÍA:** Martin Brown  
Sepúlveda

**RECALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO DE FLUJO 3D EN UN RAJO  
MINERO EN UN MEDIO FRACTURADO DE BAJA PERMEABILIDAD  
INCORPORANDO ANISOTROPÍA EN LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA  
UTILIZANDO EL *SOFTWARE MINEDW***

En una operación minera existen diversos problemas asociados a la gestión del agua. Algunos de los problemas más usuales son el *dewatering* y despresurizado de taludes. Una caracterización del sistema hidrogeológico del rajo y sus alrededores ayuda a gestionar y planificar las mejores soluciones a estos problemas.

En la presente memoria se busca recalibrar un modelo numérico de un rajo minero caracterizado como un acuífero fracturado y karstificado, utilizando el *software MINEDW*. El objetivo es representar la influencia estructural en el modelo mediante la comprobación de *MINEDW* como una herramienta que puede modelar un sistema fracturado y la incorporación de anisotropía mediante los ángulos Eulerianos, mejorando de esta forma, la herramienta predictiva.

La comprobación del *software MINEDW* se realiza comparando los caudales de salida con otro programa, *Slope Model*, programa que utiliza la metodología de Red de Fracturas Discretas (*DFN*). Se comparan ambos caudales con un valor analítico, entregando un error del 3,09% a *MINEDW* y 0,6% a *Slope Model*, verificando que *MINEDW* es una herramienta que puede modelar sistemas porosos y fracturados a escalas regionales y locales.

Mediante una revisión y actualización del modelo conceptual y geológico estructural del rajo, se define el nuevo modelo numérico. Con la información geológica se obtienen los ángulos Eulerianos de las unidades hidrogeológicas del rajo. Se tienen mejoras respecto al modelo 2018, con un índice SRMS de 10,2%. Se obtiene una mejora importante en las componentes del balance hídrico, con valores que se ajustan más a lo observado en terreno, pero no se perciben cambios importantes respecto a la reproducción de niveles.

Se logra construir una herramienta predictiva más robusta en cuanto a caudales, pero donde la definición de anisotropía en base a información geológica estructural no resulta ser suficiente para reproducir el comportamiento del flujo en el rajo.

*“Tarda en llegar  
Y al final, al final  
Hay recompensa”  
Gustavo Cerati (1993)*

*A mi familia.*

## AGRADECIMIENTOS

Primero, debo agradecer a mi mamá y papá por siempre creer en mí, apoyarme incondicionalmente en mis ideas, en la decisión “loca” de estudiar esta carrera con sus altos y bajos emocionales. Gracias por todos los esfuerzos que hicieron a lo largo de mi vida. A mis hermanas Loreto y Sofía, por aguantarme en mis momentos de estrés máximo. A mi abuelita y tata, por siempre preocuparse por mí, y preguntarme cómo iba en la u, aunque siempre se les olvide qué estudio. A toda mi familia, tías, tíos, primas y primos, por tener su apoyo en todo y servir de desconexión con el mundo universitario.

A Martin Brown, por confiar en mi para realizar este trabajo y los consejos que me ha entregado en este camino. A Jose Luis Villa, por su constante apoyo en sacar adelante esta memoria, resolviendo todas mis dudas (con su poco tiempo y con las 6 horas de diferencia incluidas) y dándome siempre ánimo para seguir. A todo el equipo de hidrogeología en Itasca Chile con el que tuve el placer de compartir, en especial a Manuel Gutiérrez, por su buena onda para resolver mis dudas del proyecto y de *MINEDW*. A toda la oficina de Itasca, por hacerme sentir siempre bienvenida e incluida. Mención especial a Cristian Castro, por las conversaciones y buenos momentos.

A los hidroquillos, que quiero mucho y que espero podamos cambiar un poco este país: Isa, Javi, Pau, Nati, Cony, Cami, Rodri, Ale, Cote, Fabi y Diego. Debo mencionar aparte a mi Alvarito, por la amistad tan bonita que me ha entregado y el apoyo en este largo proceso.

A las amigas y amigos que me ha entregado la universidad. Mis famonas, Ali y Andrea por acompañarme en los momentos malos y buenos de Beauchef. A todos los amigos de bachi, en especial a Gabriel y Rodrigo, por las buenas conversaciones y cervezas compartidas. A Nacho, por toda la ayuda geológica que necesitaba para este trabajo y por las conversas pandémicas. A todas y todos con los que hemos coincidido en este largo camino, espero nos topemos nuevamente.

A mis compañeras del liceo, que, si bien cada vez es más difícil vernos, ocuparon un lugar importante en mi vida estudiantil: Vivianne, Nathalia, Fran y Carol.

A mi profesora de 3ro y 4to medio en el liceo, Lorena Lastra, que, aunque ella no lo sepa, con su motivación y apoyo en clases, definió mis ganas de estudiar ingeniería.

A mi gatita Frida, por ser mi eterna compañera y mi terapeuta en esta pandemia.

Gracias por las oportunidades que he tenido en la vida, pero que ganas que estas también se presenten para todas y todos. Que estudiar no siga siendo el privilegio de unos pocos, y a seguir cambiando este país, porque la recompensa será buena.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. <b>Objetivo</b> .....	5
<b>2. CONTEXTO DEL PROYECTO</b> .....	6
<b>3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	10
3.1. <b>Medios fracturados</b> .....	10
3.2. <b>Medios anisotrópicos</b> .....	13
3.3. <b>Aplicación de anisotropía en programas de modelación de aguas subterráneas</b> .....	17
<b>4. DESCRIPCIÓN SOFTWARE A UTILIZAR</b> .....	21
4.1. <i><b>MINEDW</b></i> .....	21
4.2. <i><b>Slope Model</b></i> .....	26
<b>5. COMPARACIÓN DE CAUDALES DE UN MEDIO FRACTURADO</b> .....	30
5.1. <b>Caso base</b> .....	30
5.2. <b>Caudal teórico</b> .....	31
5.3. <b>Modelación en <i>Slope Model</i></b> .....	32
5.4. <b>Modelación en <i>MINEDW</i></b> .....	36
5.5. <b>Análisis y conclusiones</b> .....	41
<b>6. MODELO CONCEPTUAL</b> .....	44
6.1. <b>Meteorología</b> .....	44
6.2. <b>Hidrología</b> .....	54
6.3. <b>Análisis de recarga</b> .....	57
6.4. <b>Geología local</b> .....	61
6.5. <b>Hidrogeología</b> .....	62
6.6. <b>Balance Hídrico</b> .....	69
6.7. <b>Análisis y resumen de modelo conceptual Bartolina Andina</b> .....	70
<b>7. MODELO GEOLÓGICO ESTRUCTURAL 2019</b> .....	73
7.1. <b>Contexto regional geológico estructural</b> .....	73
7.2. <b>Modelo de fallas</b> .....	76
<b>8. ANISOTROPÍA DEL MODELO</b> .....	82
8.1. <b>Metodología para definición de anisotropía</b> .....	82
8.2. <b>Asignación de ángulos Eulerianos</b> .....	82
8.3. <b>Extensión del dominio estructural</b> .....	91

<b>9. MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLOGICO</b> .....	94
9.1. Discretización espacial del modelo de flujo .....	94
9.2. Unidades hidrogeológicas .....	95
9.3. Zona de Relajación ( <b>ZOR</b> ) .....	97
9.4. Condiciones de contorno.....	98
9.5. Campo de pozos de bombeo .....	99
9.6. Recarga por infiltración de lluvia .....	99
9.7. Evapotranspiración .....	101
9.8. Pozos de observación.....	102
<b>10. RESULTADOS</b> .....	105
10.1. Calibración del modelo.....	105
10.2. Balance global de masa y error de balance .....	109
10.3. Calibración de niveles piezométricos.....	110
10.4. Simulación predictiva hasta diciembre 2021.....	113
10.5. Calibración 2018.....	114
10.6. Discusión de resultados.....	117
<b>11. CONCLUSIONES</b> .....	150
<b>12. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	153
<b>13. ANEXOS</b> .....	156
13.1. ANEXO 1: Caudales obtenidos para ejercicio de validación <i>MINEDW</i> ...	156
13.2. ANEXO 2: Radiación Solar Extraterrestre .....	158
13.3. ANEXO 3: Descripción fallas Fedorovich (2019).....	159
13.4. ANEXO 4: Dominios y fallas representadas en <i>Stereonet</i> .....	161
13.5. ANEXO 5: Unidades hidrogeológicas Rajo Bartolina Andina 2020 .....	174
13.6. ANEXO 6: Parámetros calibrados modelo permanente.....	176
13.7. ANEXO 7: Parámetros calibrados modelo transiente.....	180
13.8. ANEXO 8: Comparación de piezómetros modelo 2020 y 2018 rajo Bartolina Andina.....	184

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6-1 Estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio de modelo conceptual. Fuente: Itasca, 2015. ....	45
Tabla 6-2 Estaciones meteorológicas nuevas utilizadas por la mina. Fuente: elaboración propia. ....	47
Tabla 6-3 Precipitación total anual de estaciones con su respectiva altitud. Fuente: SNC-Lavalin, 2014. ....	50
Tabla 6-4 Precipitación total anual de nuevas estaciones meteorológicas. Fuente: elaboración propia. ....	51
Tabla 6-5 Categorías de porcentaje de precipitación que recarga al acuífero. Fuente: Itasca, 2015. ....	60
Tabla 7-1 Nombre y clasificación de fallas modeladas por Fedorovich, 2019. Fuente: Elaboración propia. ....	78
Tabla 7-2 Distribución de la orientación de las fallas en los dominios estructurales. Fuente: Datos de Fedorovich (2019). ....	80
Tabla 8-1 Dip y Dip Direction del set promedio para dominios estructurales con dos sets de fracturas. ....	86
Tabla 8-2 Ángulo Eulerianos de dominios estructurales rajo Bartolina Andina. ....	89
Tabla 8-3 Ángulos Eulerianos de las fallas presentes en el modelo. ....	90
Tabla 9-1 Unidades hidrogeológicas presentes en el modelo. Fuente: elaboración propia. ....	96
Tabla 9-2 Rango de porcentajes de precipitación utilizada para la recarga. ....	101
Tabla 9-3 Piezómetros instalados en modelo numérico Bartolina Andina. ....	103
Tabla 10-1 Piezómetros calibrados para modelo estacionario. ....	105
Tabla 10-2 Valores para determinar la robustez de un modelo según <i>Australian Groundwater Modelling Guidelines</i> . ....	105
Tabla 10-3 Parámetros definidos para el modelo permanente. ....	106
Tabla 10-4 Parámetros calibrados en modelo anterior. ....	115
Tabla 10-5 Valores de aforos realizados en ríos de la cuenca. ....	132
Tabla 10-6 Comparación clasificación de fallas en <i>MINEDW</i> y Fedorovich. ....	138

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Problemas relacionados a la operación minera. A) Inundaciones en el fondo del rajo afecta las operaciones y seguridad del proyecto siendo necesaria la implementación de sistemas de dewatering. B) Deslizamiento de un talud resultado de condiciones de pendientes saturadas. Fuente: Read y Beale, 2013. . 2	2
Figura 1-2 Pasos para elaboración de un modelo hidrogeológico. Fuente: elaborado propia en base a información obtenida de SEIA (2012) .....	3
Figura 2-1 Mina Bartolina Andina. Fuente: Google Earth.....	6
Figura 2-2 Esquema del área de estudio. Fuente: elaboración propia.....	7
Figura 2-3 Mapa de fracturación de afloramientos calcáreos alrededor del entorno del rajo Bartolina Andina. Fuente: obtenido de Itasca (2015), modificado para este documento.....	8
Figura 3-1 Clasificación de medios porosos y fracturados. Fuente: Cook, 2003....	10
Figura 3-2 Aproximaciones de modelación de acuíferos fracturados. a) Red de fracturas actual; b) Modelo medio poroso equivalente; c) Modelo medio poroso equivalente donde las zonas altamente fracturadas se representan como región con mayor conductividad hidráulica; d) Modelo porosidad dual; e) Modelo fracturas discretas, donde las mayores fracturas se modelan explícitamente. Fuente: Cook, 2003. ....	11
Figura 3-3 Acuíferos isotrópicos y anisotrópicos: a) Acuífero isotrópico sedimentario, b) acuífero anisotrópico sedimentario, y c) acuífero fracturado anisotrópico. Fuente: Singhal y Gupta, 2010 .....	14
Figura 3-4 Cubo con las nueve componentes de los tres vectores de velocidad, actuando en un punto sobre las tres caras del cubo. Fuente: Elaboración propia. 15	15
Figura 3-5 Representación de un elemento de volumen en acuífero anisotrópico. Fuente: elaboración propia.....	17
Figura 3-6 Módulo en <i>MINEDW</i> para definir propiedades de las unidades hidrogeológicas, entre ellas, los ángulos Eulerianos. Fuente: elaboración propia. 18	18
Figura 3-7 Ángulos Eulerianos, donde $x_1, x_2$ y $x_3$ corresponden a los ejes x,y,z, respectivamente. Fuente: Diersch, 2014.....	20
Figura 4-1 Evolución de la topografía de un proyecto minero simulado en <i>MINEDW</i> , con sus respectivas unidades hidrogeológicas. Fuente: Itasca, 2017. . 23	23
Figura 4-2 Desagregación de elementos prismáticos triangulares. Fuente: Itasca, 2016. ....	25
Figura 4-3 Representación de los nodos y resortes en <i>Slope Model</i> . Fuente: Pedemonte, 2018. ....	27
Figura 4-4 Evolución de una red de flujo en fracturas en <i>Slope Model</i> . En la imagen de la derecha se observa la creación de la nueva red de "tubos" debido a un esfuerzo inducido. Fuente: Itasca, 2010.....	28
Figura 4-5 Pestaña de caracterización del fluido en <i>Slope Model</i> , donde se incorporan las condiciones de borde del problema. Fuente: Elaboración propia. . 29	29

Figura 5-1 Geometría del macizo rocoso a modelar. Fuente: elaboración propia.	31
Figura 5-2 Macizo rocoso representado en el <i>software</i> . El disco azul representa la ubicación de la fractura. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 5-3 Propiedades del macizo rocoso modelado. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 5-4 Condición de borde para el flujo en el modelo. Fuente: Elaboración propia.	35
Figura 5-5 Gráfico del comportamiento de caudal de salida entregado por <i>Slope Model</i> . La línea verde representa el caudal de salida del modelo. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 5-6 Mallado resultante en <i>Rhino 6</i> , con las dimensiones del caso base. Fuente: elaboración propia.	37
Figura 5-7 Zonas definidas en el macizo. En verde se representa la roca y en azul la fractura. La imagen A muestra el macizo sin malla y en la imagen B se muestra la roca con la malla, donde la zona de fractura corresponde al mallado más denso. Fuente: elaboración propia.	38
Figura 5-8 Propiedades de las unidades del modelo. Los datos deben ingresarse en metros/días. Fuente: elaboración propia.	38
Figura 5-9 Nodos de condición de borde en la zona de fractura. Fuente: elaboración propia.	39
Figura 5-10 Modelo final en <i>MINEDW</i> . La zona roja corresponde a la roca y los puntos verdes son los nodos de condición de borde en la entrada de la zona de fractura. Fuente: elaboración propia.	40
Figura 5-11 Gráfico del comportamiento del caudal de salida obtenido por <i>MINEDW</i> . Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 5-12 Comparación de caudales simulados con valor teórico. Fuente: elaboración propia.	42
Figura 6-1 Estaciones meteorológicas SENAMHI y Bartolina Andina. Fuente: elaboración propia.	46
Figura 6-2 Estaciones meteorológicas nuevas del rajo Bartolina Andina, instaladas desde el 2014. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 6-3 Variación mensual de la temperatura por estación. Fuente: Gráfico realizado por SNC Lavin (2014), obtenido del informe Itasca (2015).	48
Figura 6-4 Variación mensual de la temperatura para nuevas estaciones. Fuente: elaboración propia.	49
Figura 6-5 Precipitación media mensual. Fuente: Gráfico realizado por SNC Lavin (2014), obtenido del informe Itasca (2015).	49
Figura 6-6 Precipitación media mensual para nuevas estaciones de la mina. Fuente: elaboración propia.	50
Figura 6-7 Registro de temperatura para cada estación de monitoreo meteorológica. Fuente: Itasca, 2018.	52
Figura 6-8 Temperatura media mensual de las estaciones meteorológicas disponibles. Fuente: Itasca, 2018.	53

Figura 6-9 Radiación solar extraterrestre promedio en las estaciones disponibles. Fuente: Itasca, 2018.....	53
Figura 6-10 Evapotranspiración potencial en rajo Bartolina Andina. Fuente: Itasca, 2018. ....	54
Figura 6-11 Ríos y quebradas en cuenca Bartolina. Fuente: elaboración propia. .	55
Figura 6-12 Aforos realizados en el río Bartolina, en estaciones ubicadas en la zona final del río, aguas abajo de la ubicación del rajo. Fuente: Itasca, 2015.....	56
Figura 6-13 Valores a considerar en los parámetros del modelo de recarga según modelo APLIS. Fuente: Itasca, 2015.....	59
Figura 6-14 Distribución de la recarga entorno al rajo Bartolina. Fuente: Itasca, 2015. ....	61
Figura 6-15 Mapa geológico del área de estudio del proyecto Bartolina Andina. Fuente: Realizado por Golder (2010), obtenido del informe Itasca (2015).....	62
Figura 6-16 Campo de pozos de bombeo presentes en el proyecto. Fuente: Itasca, 2018. ....	63
Figura 6-17 Pozos de observación presentes en el proyecto. Fuente: Itasca, 2017. ....	64
Figura 6-18 Rangos de conductividad para cada unidad litológica identificada. En el eje vertical se indica el nombre de la unidad y el número de ensayos <i>packer</i> realizado en la unidad. Fuente: Itasca, 2017.....	65
Figura 6-19 Conductividad hidráulica (m/s) de calizas vs profundidad (m). Fuente: Itasca, 2015.....	66
Figura 6-20 Conductividad (m/s) de intrusivos vs profundidad. Fuente: Itasca, 2015. ....	66
Figura 6-21 Límites hidrogeológicos del modelo. Fuente: elaboración propia. ....	68
Figura 6-22 Balance hídrico de la cuenca. Fuente: elaboración propia.....	70
Figura 7-1 Reconstrucción de las placas tectónicas para el periodo de 198 a 1 Ma. En el recuadro de detalle se muestra las posiciones relativas de la placa Sudamericana y las placas oceánicas. Fuente: Fedorovich, 2019.....	74
Figura 7-2 Dominios geotécnicos del Perú. Fuente: Fedorovich, 2019.....	75
Figura 7-3 Sección transversal del rajo Bartolina Andina, donde se identifican algunas de las formaciones más cercanas al rajo y fallas regionales anticlinales y sinclinales. Fuente: Fedorovich, 2019. ....	76
Figura 7-4 Vista oblicua de modelo de fallas 2017. Las fallas más pequeñas de color verde oscuro corresponden a fallas mapeadas que no se ajustan a la intersección de la perforación. Fuente: Fedorovich, 2017. ....	77
Figura 7-5 Dominios estructurales del rajo Bartolina Andina. Fuente: Fedorovich, 2019. ....	81
Figura 8-1 Representación en 2D y 3D de set de fracturas para el dominio estructural 2, utilizando <i>Stereonet</i> . Fuente: Elaboración propia. ....	83
Figura 8-2 Ángulos Eulerianos. Fuente: Diersch, 2014. ....	83
Figura 8-3 Definición del primer ángulo Euleriano, para el dominio estructural 2. Fuente: elaboración propia.....	84

Figura 8-4 Definición del segundo ángulo Euleriano, para el dominio estructural 2. Fuente: elaboración propia.....	85
Figura 8-5 A) Set de fracturas del dominio estructural 3AW. B) Set estructural promedio del dominio 3AW. Fuente: elaboración propia.....	86
Figura 8-6 Set de fracturas del dominio estructural 5B. Las flechas verdes representan la orientación de cada set de fractura y las flechas azules la entrada del flujo al dominio. Fuente: elaboración propia.....	87
Figura 8-7 Dominio estructural 3C y 1AE. Fuente: elaboración propia.....	88
Figura 8-8 Mapa geológico regional de la zona del rajo Bartolina Andina. Fuente: obtenido de Golder (2010), modificado para el presente documento.....	91
Figura 8-9 Límite de extensión de los dominios estructurales. Fuente: obtenido de Golder (2010), modificado para el presente documento.....	92
Figura 8-10 A) Dominios estructurales entregados por Fedorovich (2019) representados en MINEDW. B) Dominios estructurales extendidos en MINEDW. Fuente: elaboración propia.....	93
Figura 9-1 Discretización espacial en planta y vertical del modelo <i>MINEDW</i> . Fuente: Itasca, 2017.....	95
Figura 9-2 Definición de nuevas unidades del modelo numérico. A) Dominios estructurales actuales definidos en la zona del rajo. B) Unidades Hidrogeológicas del modelo anterior. Fuente: elaboración propia.....	96
Figura 9-3 Unidades Hidrogeológicas finales del modelo Bartolina Andina. Fuente: elaboración propia.....	97
Figura 9-4 Condiciones de contorno del modelo numérico. Fuente: elaboración propia.....	98
Figura 9-5 Ubicación pozos de bombeo considerados en el modelo <i>MINEDW</i> . Fuente: elaboración propia.....	99
Figura 9-6 Gráfico de regresión lineal de pluviometría vs altitud. Fuente: Itasca, 2017.....	100
Figura 9-7 Distribución de la recarga en el modelo numérico. En verde se tiene la zona de calizas, celeste el área del rajo, en rosado el tranque de relaves, azul es zona de volcánico y rojo el intrusivo. Fuente: elaboración propia.....	101
Figura 9-8 Definición de evapotranspiración en <i>MINEDW</i> . Fuente: elaboración propia.....	102
Figura 9-9 Ubicación piezómetros y pozos de observación.....	104
Figura 10-1 Resultados de la calibración estacionaria.....	107
Figura 10-2 Niveles iniciales obtenidos de la calibración permanente. Fuente: elaboración propia.....	107
Figura 10-3 Balance de masas del modelo numérico transiente. Fuente: elaboración propia.....	109
Figura 10-4 Error numérico del balance de masas del modelo transiente.....	110
Figura 10-5 Gráficos de calibración de piezómetros en cada zona del modelo.....	113
Figura 10-6 Balance de masas obtenido del modelo predictivo.....	114

Figura 10-7 Balance de masas calibración transiente modelo anterior. Fuente: elaboración propia.....	116
Figura 10-8 Gráficos de calibración de piezómetros obtenidos del modelo anterior. ....	117
Figura 10-9 Niveles en río Bartolina.....	119
Figura 10-10 Niveles en río Amaru.....	120
Figura 10-11 Nivel en centro del rajo. ....	120
Figura 10-12 Niveles en S y SO del rajo. ....	121
Figura 10-13 Niveles en zona Campamento.....	122
Figura 10-14 Niveles en Killari, al NO del rajo.....	122
Figura 10-15 Niveles Wayra Alto.....	123
Figura 10-16 Niveles en Wayra Bajo.....	124
Figura 10-17 Niveles en zona O del rajo. ....	125
Figura 10-18 Pozo de bombeo PW1-7 ubicado en cercanías del piezómetro TH1-11_P3.....	126
Figura 10-19 Equipotenciales modelo 2018, para agosto 2018. ....	127
Figura 10-20 Equipotenciales modelo 2020, para agosto 2018. ....	127
Figura 10-21 Gráfico comparación de caudal de recarga del modelo transiente en año 2018 y 2020.....	128
Figura 10-22 Gráfico comparación caudal de <i>seepage</i> en el rajo para modelación transiente en año 2018 y 2020. ....	129
Figura 10-23 Gráfico comparación caudal de carga en ríos y quebradas para la modelación transiente en año 2018 y 2020.....	130
Figura 10-24 Caudal simulado en modelo transiente 2020 para río Bartolina.....	130
Figura 10-25 Caudal simulado en modelo transiente 2020 para río Antawara....	131
Figura 10-26 Caudal simulado en modelo transiente 2020 para río Amaru. ....	131
Figura 10-27 Comparativo de recarga para escenario predictivo.....	132
Figura 10-28 Comparativo de <i>seepage</i> para escenario predictivo. ....	133
Figura 10-29 Comparativo de CHEAD para escenario predictivo. ....	133
Figura 10-30 Componentes del balance que variaron en modelo isotrópico y anisotrópico. ....	134
Figura 10-31 Ubicación de dominios isotrópicos del rajo en el modelo en <i>MINEDW</i> . ....	135
Figura 10-34 Piezómetros en dominio 3C.....	136
Figura 10-35 Piezómetro dominio 1AE.....	136
Figura 10-34 Piezómetro dominio 5B.....	136
Figura 10-35 Piezómetro dominio 3B.....	137
Figura 10-36 Comparación de niveles en modelo isotrópico y anisotrópico 2020. ....	139
Figura 10-37 Piezometría con anisotropía obtenida para el período agosto 2018. ....	141
Figura 10-38 Piezometría con isotropía obtenida para el período agosto 2018. .	142

Figura 10-39 Distribución de posibles nuevos macros dominios para definir nuevas UH.....	146
Figura 13-1 Dominio 1AE .....	161
Figura 13-2 Dominio 1AW .....	161
Figura 13-3 Dominio 1BE .....	161
Figura 13-4 Dominio 2.....	162
Figura 13-5 Dominio 3AW .....	162
Figura 13-6 Dominio 3B .....	162
Figura 13-7 Dominio 3C .....	163
Figura 13-8 Dominio 4.....	163
Figura 13-9 Dominio 5A .....	163
Figura 13-10 Dominio 5B.....	164
Figura 13-11 Dominio 2E.....	164
Figura 13-12 Bartolina.....	164
Figura 13-13 LORENA .....	165
Figura 13-14 ISIDORA .....	165
Figura 13-15 ISABELLA_1 .....	165
Figura 13-16 ISABELLA_2 .....	166
Figura 13-17 ISABELLA_3.....	166
Figura 13-18 Chuymani.....	166
Figura 13-19 PAZ.....	167
Figura 13-20 FRANCISCA .....	167
Figura 13-21 Rita.....	167
Figura 13-22 VIVIANA.....	168
Figura 13-23 ALEJANDRA .....	168
Figura 13-24 CAROL.....	168
Figura 13-25 LORETO .....	169
Figura 13-26 LUCIA .....	169
Figura 13-27 BERTA.....	169
Figura 13-28 MARIA.....	170
Figura 13-29 Perla.....	170
Figura 13-30 ANDREA .....	170
Figura 13-31 ALINA.....	171
Figura 13-32 ANA.....	171
Figura 13-33 SONIA.....	171
Figura 13-34 PAULA .....	172
Figura 13-35 JAVIERA .....	172
Figura 13-36 NATALIA .....	172
Figura 13-37 CAMILA.....	173
Figura 13-38 CONSTANZA .....	173
Figura 13-39 LORENA splay.....	173
Figura 13-40 IRENE .....	174

# 1. INTRODUCCIÓN

En el contexto de una operación minera existen diversos problemas asociados a la gestión del agua. Ejemplos de estos problemas son el desaguado de la mina o *dewatering* en inglés, y la despresurización de taludes, ambos mostrados en la Figura 1-1. Respecto al primero, cuando un rajo abierto intercepta un acuífero, el flujo de agua subterránea ingresa hacia el rajo, la cual puede dificultar las operaciones de la mina como el transporte de mineral, movimiento de maquinaria o afectando la tronadura. Para que la mina pueda proceder, las empresas mineras deben bombear y descargar esta agua a otro lugar (ELAW, 2010). En cuanto al despresurizado, cuando la presión del agua que actúa dentro de discontinuidades y espacios porosos del macizo rocoso reducen la tensión efectiva, se genera una reducción de la resistencia al corte del macizo rocoso. Por lo tanto, el objetivo de la despresurización es lograr disipar localmente las presiones de poros al interior del talud y así mejorar el rendimiento de esta pendiente, aumentando su factor de seguridad, evitando su colapso (Read y Beale, 2013).

Debido a los problemas anteriormente descritos, es que, para poder mejorar las condiciones operativas del rajo, reducir costos de minería y mejorar el desempeño en seguridad del proyecto resulta importante realizar una caracterización correcta del sistema hidrogeológico del lugar para así definir claramente los objetivos de los planes de *dewatering* y despresurizado del rajo que garantice un funcionamiento apto para el propósito del proyecto. Una planificación e implementación exitosa de un programa puede tener impactos significativos en el desempeño económico de la mina (Read y Beale, 2013).

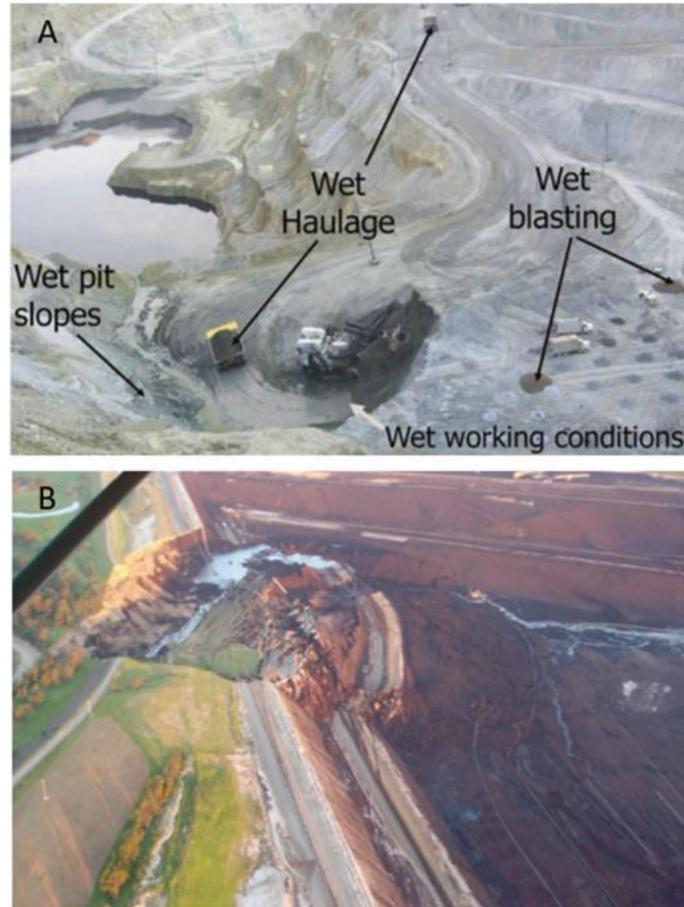


Figura 1-1 Problemas relacionados a la operación minera. A) Inundaciones en el fondo del rajo afecta las operaciones y seguridad del proyecto siendo necesaria la implementación de sistemas de dewatering. B) Deslizamiento de un talud resultado de condiciones de pendientes saturadas. Fuente: Read y Beale, 2013.

Para cuantificar y evaluar los potenciales efectos de un proyecto o actividad minera sobre un acuífero y en la misma operación minera, es que cobra relevancia la modelación (Scanlon et al., 2003). El punto de partida para cualquier proyecto que afecte la componente hidrogeológica de un lugar debe ser la construcción de un modelo conceptual. El modelo conceptual permite representar de forma simplificada el sistema acuífero real basándose en antecedentes técnicos disponibles como la hidrología, geología, hidrogeología, etc. La elaboración de un modelo conceptual requiere de una revisión detallada de la información disponible, lo que servirá de sustento técnico a la hora de definir las condiciones hidrogeológicas que serán representadas posteriormente en un modelo numérico. Con los resultados obtenidos en la modelación numérica se pueden realizar planificaciones adecuadas en el contexto minero, entre ellos la solución de los problemas de desaguado y despresurizado. En la Figura 1-2 se resume los pasos que considera la modelación hidrogeológica.

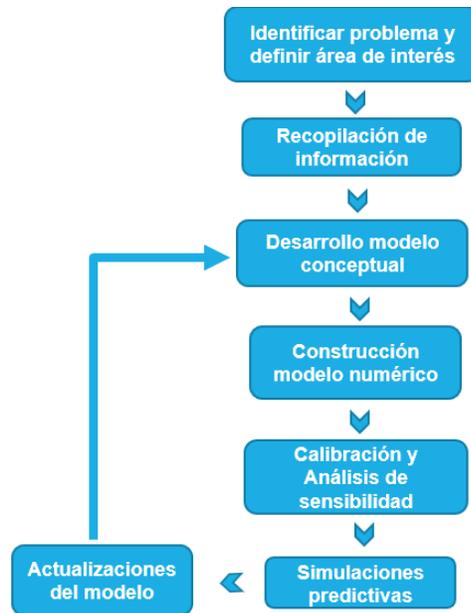


Figura 1-2 Pasos para elaboración de un modelo hidrogeológico. Fuente: elaborado propia en base a información obtenida de SEIA (2012)

A medida que pasa el tiempo de operación de un proyecto, la información se va constantemente actualizando. Por ejemplo, se tienen nuevos caudales de bombeo, nueva piezometría, nueva data meteorológica o nueva información geológica. Respecto a este último punto, a medida que las excavaciones de un rajo abierto avanzan, nuevas estructuras geológicas van apareciendo o se van actualizando estructuras registradas en etapas previas de proyecto. La incorporación de esta información es importante, ya que va constantemente retroalimentando el modelo conceptual definido en los inicios del proyecto y mejora las predicciones que se pueden obtener del modelo numérico, ayudando en la planificación del proyecto.

El proyecto minero que se estudia en esta memoria, que por temas de confidencialidad se denomina “Bartolina Andina” es un rajo abierto ubicado en los Andes Peruanos. Este rajo se ubica sobre un acuífero fisurado, parcialmente karstificado (Itasca, 2017), por lo que la fracturación en la zona es una característica determinante. Diversos autores han estudiado la importancia de la fracturación de un macizo rocoso en el transporte del flujo. Singhal y Gupta (2010) mencionan que “el origen y el movimiento del agua subterránea en rocas cristalinas está controlado parcialmente por sus fracturas y otras discontinuidades” (Singhal y Gupta, 2010; Romero, 2014). Gong y Rossen (2016) en su investigación sobre reservorios naturalmente fracturados mencionan que estudios de campos y experimentos de laboratorios muestran canalizaciones de flujo en fracturas individuales y trayectorias de flujo altamente preferenciales en redes de fracturas.

En los acuíferos fracturados, al estar el flujo controlado por fracturas, generalmente representan medios anisotrópicos y heterogeneos (Singhal, 2008; Berkowitz, 2002).

Uno de los desafíos de la modelación es poder representar las influencia de las estructuras en el medio y el comportamiento anisotrópico. Lograr una representación cercana a la realidad del medio fracturado puede ser de utilidad para obtener resultados cercanos a lo observado en terreno.

En esta memoria se pretende realizar una recalibración del rajo Bartolina Andina para lograr mejorar la representatividad estructural y anisotrópica del modelo de flujo del proyecto, caracterizado como un medio fracturado de baja permeabilidad. Esto se logrará por medio de dos procesos, i) Verificando que el programa a utilizar, que usa la metodología del Medio Poroso Equivalente puede representar un medio donde el flujo está dominado por las estructuras y ii) Incorporando anisotropía a la conductividad hidráulica en el modelo numérico utilizando la información geológica del modelo actualizada. Con la retroalimentación al modelo conceptual actual de Bartolina Andina se mejora y actualiza la información disponible para el modelo numérico. Esta recalibración se realiza utilizando el *software* desarrollado por Itasca, *MINEDW*, un código de flujo de aguas subterráneas de elementos finitos, destinado a estudiar el comportamiento de flujos subterráneos en proyectos mineros, que permite modelar incorporando anisotropía en las unidades hidrogeológicas por medio de los ángulos Eulerianos.

## **1.1. Objetivo**

### **1.1.1 Objetivo general**

El objetivo del trabajo propuesto es mejorar la herramienta hidrogeológica predictiva a través de la recalibración de un modelo ya realizado, caracterizado como un medio de baja permeabilidad con zonas preferenciales a través de fracturas y fallas. Esto se logrará comprobando que el programa a utilizar, *MINEDW*, puede representar la influencia de las estructuras en el transporte de flujo e incluyendo al modelo numérico del rajo, la opción de anisotropía en la conductividad hidráulica. Esto permitirá mejorar la planificación de la operación minera mejorando los sistemas de desagüados y garantizar la estabilidad de los taludes existentes.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Para llevar a cabo el objetivo propuesto se proyectan las siguientes tareas y objetivos específicos:

- Mediante una revisión bibliográfica se estudiarán los medios fracturados anisotrópicos y se determinará la forma en que los *softwares* de elementos finitos incorporan la anisotropía a sus modelos.
- Realización de un ejercicio de validación del *software MINEDW* para representar un medio dominado por estructuras geológicas (fractura).
- Revisión del modelo conceptual y geológico estructural del proyecto y actualizarlo con la nueva información recibida del rajo. A partir de la información geológica estructural se definen los ángulos Eulerianos de las diferentes unidades hidrogeológicas del rajo.
- Con los valores de conductividad hidráulica anisotrópica, se calibrará el modelo actual en *MINEDW* y se compararán los resultados obtenidos con la simulación realizada en el modelo anterior.

## 2. CONTEXTO DEL PROYECTO

El modelo numérico por recalibrar corresponde al proyecto minero Bartolina Andina. Por temas de confidencialidad se han modificado todos los nombres originales del proyecto y ninguna figura referente a la zona lleva coordenadas asociadas. En la Figura 2-1 se muestra el rajo en estudio, ubicado en algún lugar de los Andes peruanos. El proyecto cuenta con un yacimiento que se encuentra actualmente en explotación (operaciones comenzaron el 2015) y tiene una proyección de vida de 20 años aproximadamente. Se espera que en los primeros 5 años Bartolina Andina produzca 2 Mton finas de cobre concentrado.



Figura 2-1 Mina Bartolina Andina. Fuente: Google Earth.

El área de explotación y de instalaciones mineras se ubican en la cuenca del río Bartolina, que drena hacia el río Antawara, ubicado al S-E de la cuenca. Al sur del proyecto y del río Bartolina se encuentra el río Amaru, tributario del río Antawara por su margen izquierdo. Un esquema de la cuenca completa se muestra en la Figura 2-2.

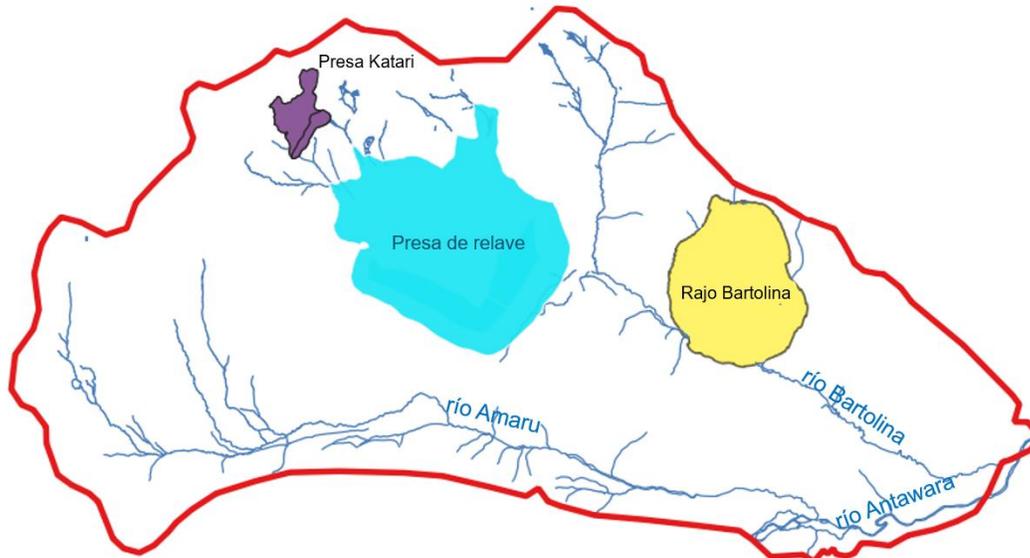


Figura 2-2 Esquema del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

En el sector del rajo y la cuenca en estudio existe un sistema acuífero que se ubica principalmente en las calizas de la formación Bartolina. Se trata de un acuífero fisurado y parcialmente karstificado atravesado por rocas intrusivas que individualizan las calizas en distintos bloques (Itasca, 2017). Las rocas fracturadas juegan un rol importante en el transporte de flujo. Son conductos claves para el transporte de agua y contaminantes, ya que generan vías principales para el flujo, a través de rocas impermeables o de baja permeabilidad (Watanabe et al., 2008; Berkowitz, 2002).

La fracturación es determinante en esta cuenca, ya que es uno de los principales factores que determina las características geomorfológicas e hidrológicas de un macizo carbonático. En macizos kársticos, las fracturas decimétricas y centimétricas juegan un papel más directo en la infiltración del agua meteórica. Las de tamaño decamétrico a kilométrico (observables en foto aérea) condicionan la alineación de algunas formas de absorción, como las dolinas. Las fracturas plurikilométricas (visibles a imagen satelital), aportan información sobre sistemas regionales de flujo subterráneo o límites de sistemas acuíferos (Itasca, 2015). En la Figura 2-3 se observa la fracturación presente en el área carbonática que rodea el entorno del rajo Bartolina Andina.

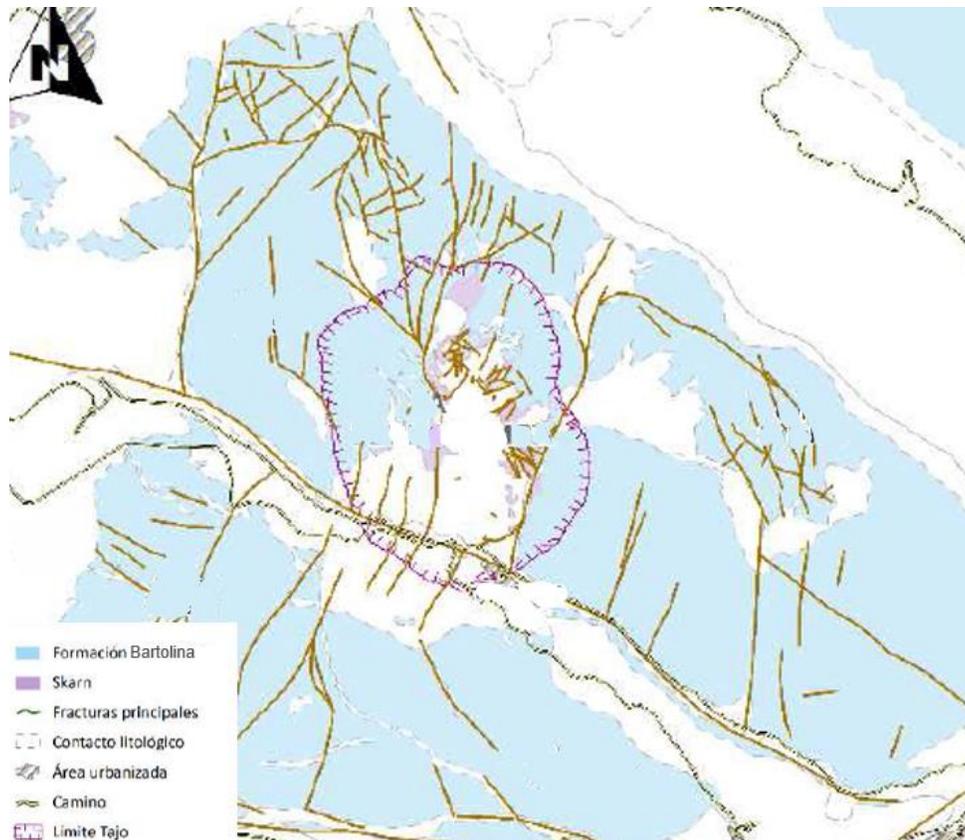


Figura 2-3 Mapa de fracturación de afloramientos calcáreos alrededor del entorno del rajo Bartolina Andina. Fuente: obtenido de Itasca (2015), modificado para este documento.

La definición de la zona kárstica de Bartolina Andina fue estudiada a profundidad en el informe desarrollado por Itasca (2015). En este informe se menciona que la karstificación está controlada por el tipo de litología, pendiente, estructura geológica (fracturación y geometría) y régimen pluviométrico de la zona. Este último punto resulta importante, ya que esta zona andina se caracteriza por tener precipitaciones entre los 800 mm/año y 1000 mm/año.

El acuífero recibe recarga de precipitaciones, la cual puede ser de forma difusa (por afloramientos carbonáticos fisurados) o por sumideros kársticos. Los sumideros aparecen a lo largo de fracturas o de contactos litológicos, donde depresiones o colapsos generados reflejan la pérdida de suelo debido a la infiltración del agua en las calizas. Esto genera sumideros de diámetro relativamente estrecho (4-6 m), con varios metros de profundidad y flujo interno y vertical. Los sumideros implican que la recarga de los acuíferos se produce de forma rápida y concentrada. Se ha identificado un sumidero kárstico al sur de la cuenca en estudio, el que sólo entra en funcionamiento en épocas de abundantes lluvias, mientras que el resto del tiempo aparece seca o inundada sin llegar a ser surgente (Itasca, 2015).

En el contexto anterior, debido a que se tiene un cuerpo rocoso compuesto de fracturas, casi ninguna de sus propiedades tiene igual magnitud en distintos puntos de este, por lo que resulta clave comprender el comportamiento anisotrópico del agua subterránea en la roca. Esto permitirá evaluar con mayor eficiencia el potencial hidrogeológico del acuífero y es un aporte importante en el mejoramiento de modelos hidrogeológicos conceptuales y, por ende, en la construcción de modelos numéricos de flujo de agua subterránea (Romero, 2014).

El lograr representar fielmente el comportamiento estructural que tiene el rajo mediante un modelo numérico, ha sido un desafío el cual Itasca ha llevado a cabo en los últimos años. La empresa a cargo del proyecto minero ha encargado la realización de diversos estudios geológicos estructurales, los cuales han ayudado a comprender de mejor manera el comportamiento anisotrópico del proyecto y lograr realizar un modelo numérico lo más cercano a la realidad.

En los últimos años diversos estudios se han realizado para entender el comportamiento estructural que presenta el rajo. El estudio más actual corresponde al realizado por Fedorovich (2019). En él se actualizan las fallas incorporadas en el modelo numérico anterior, y se incorporan dos nuevas fallas. También, en la zona del rajo define nuevos dominios estructurales, lo que permite definir con más detalle zonas en el rajo que presentan un mismo comportamiento estructural, a partir de la información de *dip* y *dip direction* de cada dominio. Con esta información, se pueden definir las direcciones preferentes que tendrá la fracturación del lugar, logrando representar la anisotropía que tiene el área del rajo y sus alrededores.

En los siguientes capítulos se detalla el estudio de los medios anisotrópicos, se realiza una recopilación de la información recogida por Itasca para la realización del modelo conceptual y numérico y se detalla la metodología utilizada para la definición de la anisotropía en el medio. Con esta información se procederá a recalibrar el modelo y compararlo con los resultados de la calibración anterior del proyecto.

### 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el presente capítulo se realiza una recopilación de diversas investigaciones enfocadas en el estudio de medios fracturados y la incorporación de anisotropía en estos. El objetivo es describir los medios anisotrópicos y su implicancia en la ecuación de gobierno de las aguas subterráneas, realizar una explicación de las diferentes metodologías de modelación de medios fracturados y comprender el mecanismo que usan los programas de elementos finitos para incorporar la anisotropía en los modelos.

#### 3.1. Medios fracturados

##### 3.1.1 Clasificación de acuíferos fracturados

Cook (2003) realiza una clasificación de los acuíferos. Menciona que se pueden considerar como un continuo entre medios porosos y sistemas de conductos. Lo anterior se observa en la Figura 3-1, donde se muestra la siguiente clasificación de los medios porosos y fracturados.

- Para el medio poroso homogéneo (Figura 3-1.a) el flujo pasa a través de los espacios que se forman entre los granos de arena.
- En el medio poroso heterogéneo (Figura 3-1.b) se presentan flujos preferenciales debido a las variaciones de tamaño entre los granos de arena.
- En los medios porosos fracturados donde la matriz del acuífero posee una alta permeabilidad, el agua puede moverse a través de esta matriz (Figura 3-1.c). Para los casos donde el medio poroso fracturado la permeabilidad sea despreciable, el agua se almacena en la matriz (Figura 3-1.d).
- En medio puramente fracturado el flujo del agua subterránea es solo a través del conducto, y la matriz del acuífero entre los conductos es impermeable y no tiene porosidad (Figura 3-1.e).

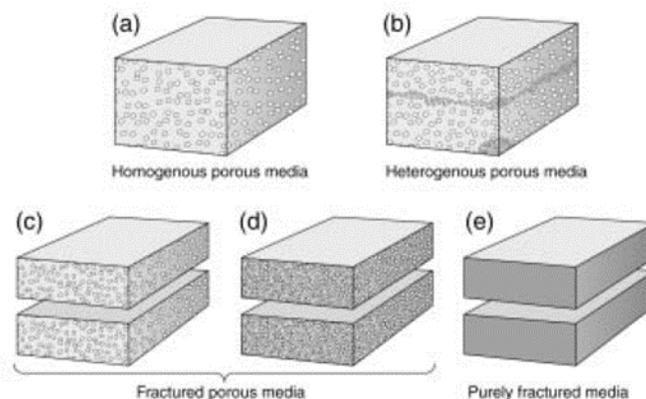


Figura 3-1 Clasificación de medios porosos y fracturados. Fuente: Cook, 2003

### 3.1.2 Metodologías de modelación de medios fracturados

Los acuíferos fracturados se pueden representar en diversos modelos conceptuales, donde la dificultad radica en describir la heterogeneidad asociada a las fracturas. Las aproximaciones existentes se pueden agrupar en tres clases: i) aproximación del medio equivalente poroso, ii) aproximación de la porosidad dual y iii) aproximación de red fracturas discretas (*DFN*), las cuales se muestran en la Figura 3-2 y se describirán a continuación.

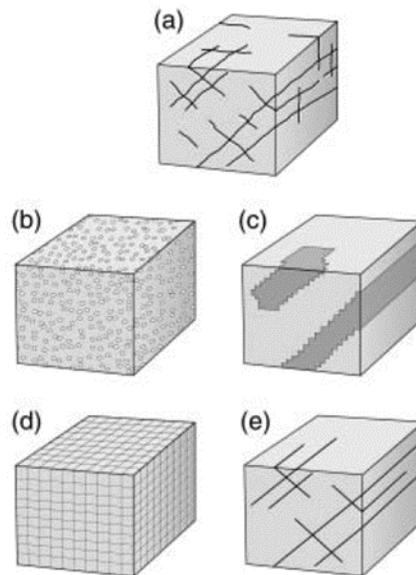


Figura 3-2 Aproximaciones de modelación de acuíferos fracturados. a) Red de fracturas actual; b) Modelo medio poroso equivalente; c) Modelo medio poroso equivalente donde las zonas altamente fracturadas se representan como región con mayor conductividad hidráulica; d) Modelo porosidad dual; e) Modelo fracturas discretas, donde las mayores fracturas se modelan explícitamente.

Fuente: Cook, 2003.

#### 3.1.2.1 Modelo de Medio Poroso Equivalente

En esta aproximación las fracturas no se tratan de forma explícita, si no que la heterogeneidad de la roca se modela usando un pequeño número de regiones, donde cada una se modela como un medio poroso equivalente (Cook, 2003). Singhal y Gupta (2010) mencionaron que, si un sistema rocoso presenta muchas fracturas interconectadas en varias direcciones, se puede considerar que el sistema se comporta como un medio poroso continuo a grandes escalas. La aproximación presenta resultados razonables para un sistema regional, pero a escalas locales es más pobre.

La aproximación asume que un volumen elemental representativo (REV) puede ser definido caracterizado por sus parámetros hidráulicos efectivos (conductividad

hidráulica, porosidad, almacenamiento específico). Como se describió anteriormente en la Figura 3-2, se intenta representar una zona de fractura significativamente más grande que el resto mediante una alta conductividad hidráulica.

Cuando la densidad de fracturas es alta y la matriz intermedia es muy pequeña, se puede tratar el sistema como un continuo donde el almacenamiento hidráulico y la transmisividad están representadas por una suma acumulada considerando fracturas y matriz de la roca. En estos casos las ecuaciones de flujo convencionales de aguas subterráneas son usadas. Un ejemplo de esta implementación para simulación de flujo subterráneo es el *software MODFLOW*, que se ha aplicado satisfactoriamente a acuíferos fracturados donde la respuesta hidráulica es importante (no el transporte) (Cook, 2003).

El modelo tiene la limitación en la simulación de anisotropía en el medio.

### **3.1.2.2 Modelo de porosidad dual**

En el caso que la roca que contiene la red de fracturas presenta permeabilidad intergranular, entonces los dos medios van a presentar una ecuación de flujo, una para la red de fracturas y otra para la roca matriz. Se produce un intercambio de flujo entre las fracturas y la roca matriz, el cual se representa con un término que describe la tasa de intercambio másico. La geometría de la red de fracturas se representa por un pequeño número de parámetros geométricos.

La principal ventaja de esta aproximación es la modelación del flujo en régimen transiente, ya que se puede simular el retraso en la respuesta hidráulica en un sistema de roca fracturada causado por el fluido almacenado en la matriz menos permeable de la roca matriz (Cook, 2003). Primero se va liberando en las fracturas, y luego se va liberando agua de la matriz a medida que se genera un gradiente hidráulico entre el agua de la roca matriz y las fracturas. La desventaja de este modelo es que tiene la tendencia de sobre simplificar y sobre regularizar la geometría de la red de fracturas y también la dificultad de determinar los parámetros de entrada para estos modelos.

### **3.1.2.3 Modelo de Red de Fracturas Discretas (DFN)**

Esta aproximación corresponde a sistema de roca donde no existe una permeabilidad intra-granular y el flujo se concentra en la red de fracturas. Se realiza una caracterización explícita de las propiedades de la fractura, incluyendo apertura, orientación y largo. El flujo a través de las fracturas es equivalente al flujo entre dos placas paralelas, donde su separación es equivalente a la apertura de la fractura modelada.

Se requiere expertiz para extrapolar las propiedades de escalas pequeñas a escalas de grandes dimensiones, por eso se recomienda la aproximación *DFN* para escalas menores, donde el flujo y transporte ocurre en las fracturas discretas. Es necesario

tener una gran capacidad computacional para simular una red de fracturas discretas y se requiere una simplificación de los detalles, especialmente cuando se deben simular regiones de gran escala (Cook, 2003). Para lograr simular en escalas mayores, la clave es definir las fracturas activas y conectadas que controlan el flujo en el sistema.

Un uso recurrente de modelos *DFN* es para determinar los parámetros de medios porosos equivalentes requeridos en las aproximaciones de medios continuos. Del modelo *DFN* se pueden derivar propiedades hidráulicas equivalentes basadas en la caracterización explícita de fracturas (Cook, 2003).

### **3.2. Medios anisotrópicos**

Las formaciones geológicas no suelen presentar las mismas características en toda su composición, pueden tener diferencias en texturas y en las direcciones o dimensiones que las estructuras presentan. Debido a lo anterior, es que mediciones de diferentes características hidráulicas de estos medios, como el almacenamiento específico o conductividad hidráulica, no será igual en todas las direcciones y dependerá de donde se realice la medición. Domenico y Schwartz (1998) mencionan que el término anisotrópico se utiliza para describir aquellos materiales donde la permeabilidad o conductividad es diferente en todas las direcciones. Aquellos materiales donde la permeabilidad es la misma en todas las direcciones es isotrópico.

La Figura 3-3 ilustra a modo de ejemplo como una roca porosa formada por granos esféricos presenta una conductividad isotrópica (Fig 3-3.a). Después se observa una formación estratificada, donde los granos presentan una forma más tabular, por lo tanto, se tendrá anisotropía, ya que la conductividad paralela al plano de depositación será mayor a la vertical (Fig 3-3.b). Para el último caso, la roca fracturada presenta anisotropía debido a la presencia de fracturas que presentan diferentes orientaciones. En este caso, la conductividad será mayor en la fractura que en la roca de caja (Fig 3-3.c).

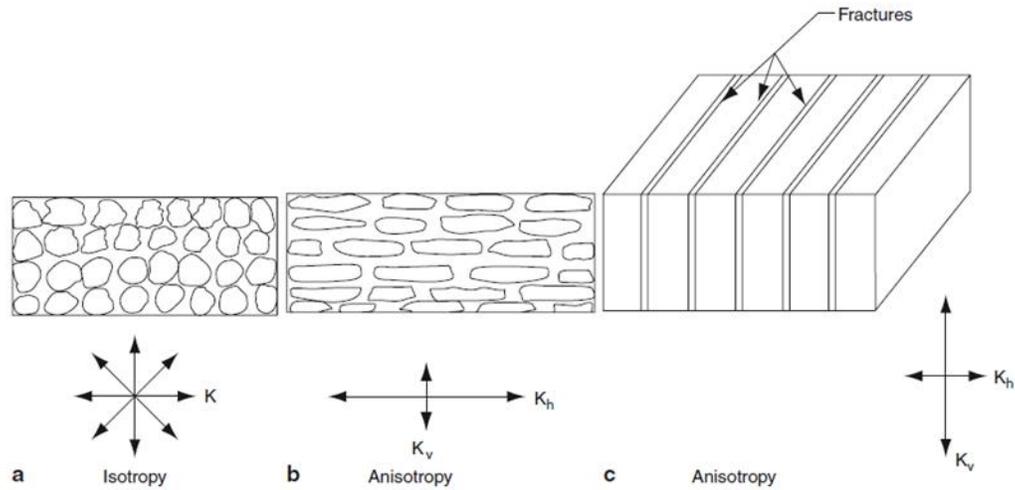


Figura 3-3 Acuíferos isotrópicos y anisotrópicos: a) Acuífero isotrópico sedimentario, b) acuífero anisotrópico sedimentario, y c) acuífero fracturado anisotrópico. Fuente: Singhal y Gupta, 2010

Según Singhal y Gupta (2010) es posible afirmar que la anisotropía es una propiedad tensorial. Recordando el planteamiento de la ley de Darcy, se asume que la conductividad es independiente de la dirección, teniendo:

$$q = -K \cdot \frac{dh}{dl} \quad (1)$$

La ecuación (1) es correcta para el caso de un medio isotrópico ( $K_x = K_y = K_z$ ). Para el caso anisotrópico, aparte de tener las conductividades por cada eje x, y, z, se tiene que la componente de la velocidad también es un vector que puede resolverse como componentes paralelas a los ejes x, y, z. Estos ejes forman los bordes de un cubo por donde circula el flujo, observado en la Figura 3-4 (Domenico y Schwartz, 1998).

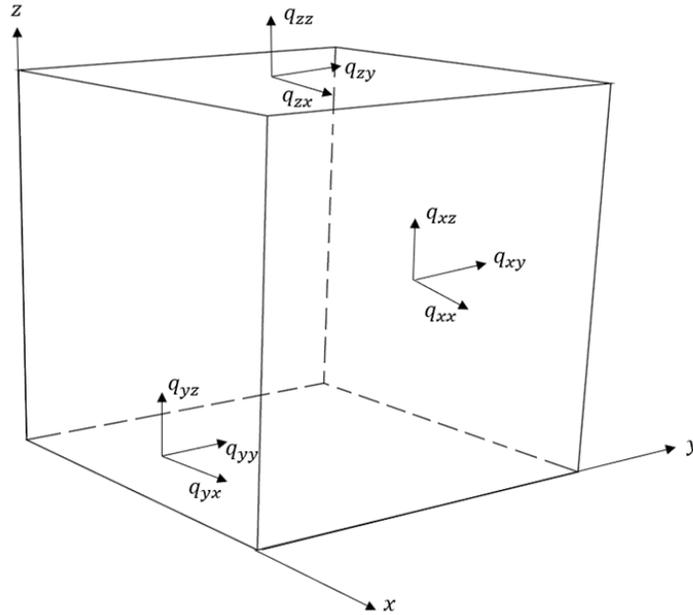


Figura 3-4 Cubo con las nueve componentes de los tres vectores de velocidad, actuando en un punto sobre las tres caras del cubo. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3-4 las componentes del vector de velocidad  $q_x$  en el plano del cubo normal al eje  $x$  se transforma en  $q_{xx}$ ,  $q_{xy}$  y  $q_{xz}$ . La componente  $q_{xx}$  es una componente que actúa a lo largo del eje de la normal. De esta forma, la ecuación de Darcy para cada eje quedará (Domenico y Schwartz, 1998):

- Para el plano normal a  $x = q_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z}$
- Para el plano normal a  $y = q_y = -K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z}$
- Para el plano normal a  $z = q_z = -K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$

Al escribirse de esta forma la ley de Darcy, la ecuación que gobierna el flujo en aguas subterráneas se expande a:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} + K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} + K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} + K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - W \quad (2)$$

El tensor de la conductividad hidráulica en un material anisotrópico se obtendrá representando las componentes de la conductividad de las ecuaciones anteriores en una forma matricial:

$$\begin{matrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{matrix} \quad (3)$$

Si las direcciones principales de anisotropía coinciden con las direcciones x,y y z de los ejes coordenados, las componentes  $K_{xy}, K_{xz}, K_{yx}, K_{yz}, K_{zx},$  y  $K_{zy}$  son iguales a cero.

En caso de que no sea posible alinear las direcciones principales con el sistema coordenado global, la expresión (3) permitirá relacionar las componentes del flujo en las direcciones que haya gradiente. Para este último caso, Anderson et. al (2015) menciona que los valores del tensor de permeabilidad no son los que se suelen obtener de mediciones en terreno o laboratorio, ya que esos valores asumen que las componentes principales del tensor están alineadas con el eje coordenado. Debido a esto, es que es mejor pensarlo en términos matemáticos que relacionan un gradiente de flujo con  $q$ , como lo muestra la ecuación del flujo en (2). La ecuación (2) suele ser resuelta fácilmente por aquellos códigos que utilizan el método de elementos finitos (entre ellos, *MINEDW* o *FEFLOW*), ya que considera cada elemento modelado por separado, por lo que pueden asignar coordenadas locales a cada elemento e incorporar la matemática respectiva para realizar la transformación de coordenadas al sistema coordenado global (Anderson, 2015).

Por otro lado, McWhorter y Sunada (1977) mencionan como ejemplo de anisotropía que la conductividad hidráulica será menor en direcciones normales a la estratificación comparado a una dirección paralela a esta. Esta anisotropía puede ser el resultado de patrones de fracturas o canales en la roca que genera direcciones preferenciales para el movimiento del fluido.

Los mismos autores plantearon que al existir anisotropía en un sistema, la ley de Darcy requiere generalizarse ya que la conductividad no puede tratarse como un escalar. En la Figura 3-5 se muestra un medio homogéneo anisotrópico, donde la anisotropía es generada por las múltiples fracturas en la dirección x, a diferencia del eje y. Dado lo anterior, la conductividad hidráulica será mayor en la horizontal que en la vertical. Un gradiente de la cota piezométrica se genera, orientado a 45° respecto la horizontal, resultando en la velocidad de Darcy ( $\bar{q}$ ). Dada que la componente horizontal de la velocidad es mayor que la vertical, el vector de velocidad generado favorece a la dirección horizontal (McWhorter y Sunada, 1977).

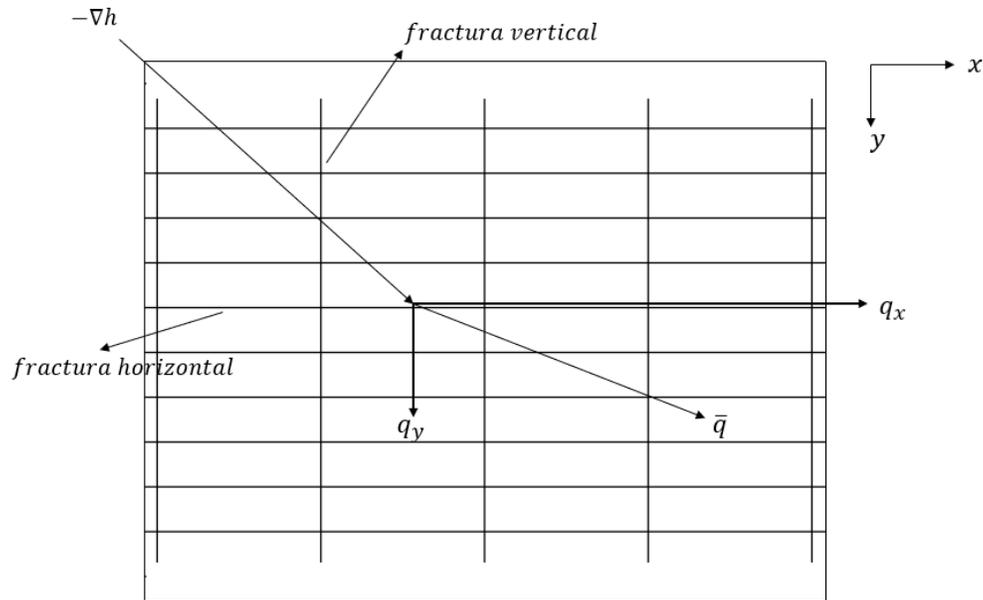


Figura 3-5 Representación de un elemento de volumen en acuífero anisotrópico. Fuente: elaboración propia.

McWhorter y Sunada (1977) mencionaron que siempre es posible encontrar tres ejes coordenados ortogonales (direcciones principales) donde las nueve componentes de la matriz de conductividades se reduzcan a la matriz diagonal.

### 3.3. Aplicación de anisotropía en programas de modelación de aguas subterráneas

Existen programas que presentan la opción de incorporar anisotropía en un modelo. Uno de estos programas es *MINEDW*, código creado por Itasca que permite modelar incorporando anisotropía en la conductividad hidráulica definiendo los respectivos ángulos Eulerianos de giro a la respectiva unidad hidrogeológica definida, como se muestra en la Figura 3-6.

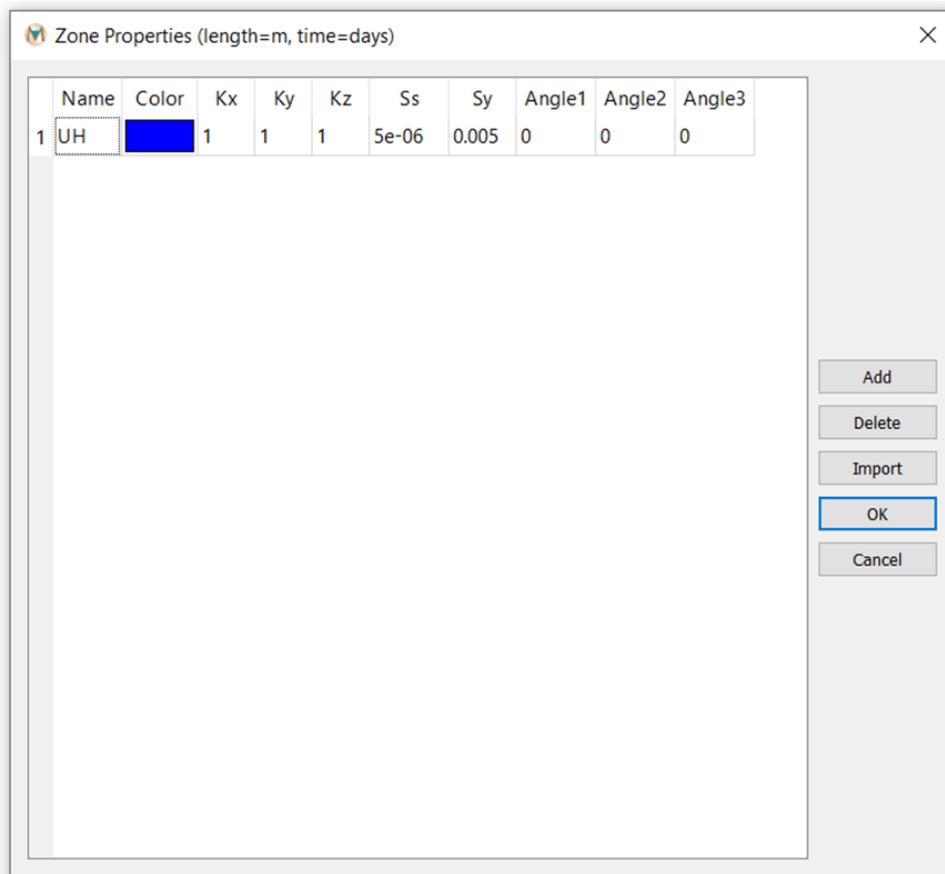


Figura 3-6 Módulo en *MINEDW* para definir propiedades de las unidades hidrogeológicas, entre ellas, los ángulos Eulerianos. Fuente: elaboración propia.

El cálculo y definición de la anisotropía en el programa es exactamente igual a la utilizada en otro programa de elementos finitos, *FEFLOW*. Como existe bibliografía completa respecto a los métodos matemáticos que utiliza *FEFLOW* se estudia este programa.

El código *FEFLOW* es un programa de elementos finitos que permite simular flujo y procesos de transporte de masa y calor en medios porosos y fracturados (Diersch, 2014). Este programa permite incorporar anisotropía en la conductividad hidráulica tanto para modelos en 2D y 3D.

En la guía de usuario de *FEFLOW 6.1* (2012) se presentan las siguientes formas en que el programa incluye la anisotropía en 3D:

- Anisotropía paralela al eje: se aplica por defecto. Las conductividades  $K_x$ ,  $K_y$  y  $K_z$  están dirigidas a lo largo del eje  $x$ ,  $y$  y  $z$ , respectivamente.
- Anisotropía general con ángulos calculados: las direcciones principales para las conductividades principales coinciden con la

inclinación de la capa. La inclinación se determina separadamente para cada elemento.

- Anisotropía general con ángulos definidos por usuario: direcciones principales y ángulos de Euler necesarios para la rotación de los ejes coordenados están definidos como propiedades del material para cada elemento. Esta última es la forma que utiliza *MINEDW*.

Diersch (2014) menciona que la conductividad es dada a lo largo de sus direcciones principales  $x_i^m$  ( $i = 1,2,3$ ), el cual no está orientado en las coordenadas globales cartesianas  $x_i$  ( $i = 1,2,3$ ). Debido a eso, la conductividad a lo largo de la dirección principal  $x_i^m$  se representa como una matriz diagonal:

$$K_{ij}^m = \begin{pmatrix} K_1^m & 0 & 0 \\ 0 & K_2^m & 0 \\ 0 & 0 & K_3^m \end{pmatrix} \quad (4)$$

La cual puede transformarse a un sistema de coordenadas globales cartesianas  $x_i$  mediante:

$$K_{ij} = A_{li} K_{lk}^m A_{kj} \quad (5)$$

O

$$K_{ij} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} \\ A_{13} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_1^m & 0 & 0 \\ 0 & K_2^m & 0 \\ 0 & 0 & K_3^m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \quad (6)$$

El elemento  $A_{ij}$  en la matriz de rotación corresponde a los cosenos direccionales de los ángulos de rotación.

Para el caso de la anisotropía en 3D, Diersch (2014) menciona que es necesario conocer los tres ángulos Eulerianos ( $\phi, \theta, \psi$ ), mostrados en la Figura 3-7. El símil de estos ángulos en *MINEDW* son *Angle1*, *Angle2* y *Angle3*, respectivamente. Si los ángulos son conocidos, los cosenos direccionales de la matriz de rotación se expresan como:

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \phi - \cos \theta \sin \phi \sin \psi & \cos \psi \sin \phi + \cos \theta \cos \phi \sin \psi & \sin \psi \sin \theta \\ -\sin \psi \cos \phi - \cos \theta \sin \phi \cos \psi & -\sin \psi \sin \phi + \cos \theta \cos \phi \cos \psi & \cos \psi \sin \theta \\ \sin \theta \sin \phi & -\sin \theta \cos \phi & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

Esta forma general de anisotropía en 3D se utiliza en *FEFLOW*, ingresando las direcciones principales  $(K_1^m, K_2^m, K_3^m)$  y los ángulos Eulerianos.

Los casos generales de matriz de rotación se expresan como las siguientes matrices:

- Rotación sobre el eje  $x_3$ :

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \theta = \psi = 0^\circ \quad (8)$$

- Rotación sobre el eje  $x_2$ :

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad \phi = -90^\circ; \psi = 90^\circ \quad (9)$$

- Rotación sobre el eje  $x_1$ :

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad \phi = \psi = 0^\circ \quad (10)$$

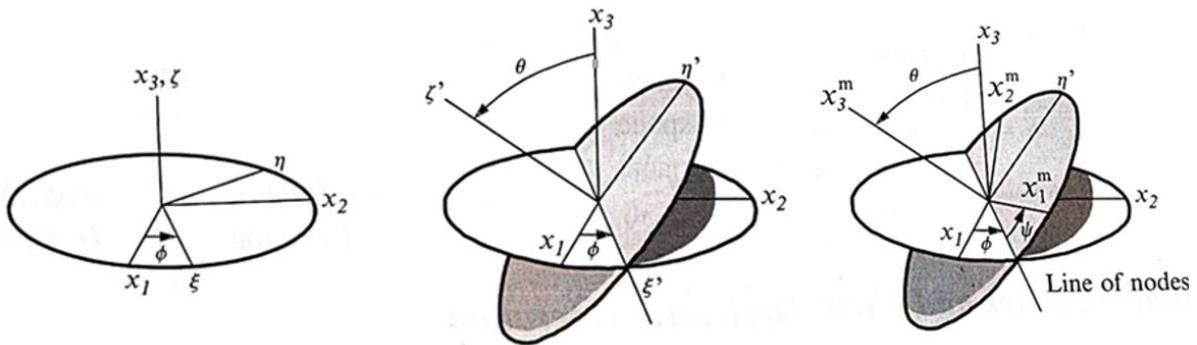


Figura 3-7 Ángulos Eulerianos, donde  $x_1, x_2$  y  $x_3$  corresponden a los ejes x,y,z, respectivamente.  
Fuente: Diersch, 2014.

## 4. DESCRIPCIÓN SOFTWARE A UTILIZAR

En el presente capítulo se describen los *softwares* usados en el desarrollo de la memoria. Ambos son desarrollados por la consultora Itasca y sus descripciones se basan en los manuales y guías de usuario proporcionadas por la empresa.

Los resultados que entregan los siguientes programas a utilizar permiten el estudio de flujo en medio fracturado, donde *MINEDW* utiliza la metodología del Medio Poroso Equivalente y *Slope Model* por medio de la Red de Fractura Discretas. Ambos programas serán de utilidad para realizar la comparación de caudales en un medio fracturado y verificar que *MINEDW*, a pesar de utilizar una metodología destinada a modelar a nivel regional, si se le entregan los parámetros adecuados, puede modelar un flujo a través de un medio fracturado.

### 4.1. *MINEDW*

El *software MINEDW* es un código comercial de elementos finitos escrito en C++, destinado a estudiar el comportamiento de flujos subterráneos en proyectos mineros (Itasca, 2016). Utiliza los *solvers SAMG (Algebraic Multigrid Methods System)* y *PCG (Preconditioned Conjugate Gradient)*. Permite resolver aquellas limitaciones en las estimaciones de flujo en operaciones mineras que otros códigos de modelación de flujo de aguas subterráneas no estiman de manera tan exacta. Algunas de estas limitaciones son:

- Dificil representación de la evolución de la topografía de minas a rajo abierto.
- Representación deficiente de la zona de alteración superficial (ZOR) y su movimiento con la topografía.
- Representación deficiente de las superficies de afloramiento de agua en rajos y en *pit lakes*.

Para resolver las limitaciones antes mencionadas, es que *MINEDW* posee las siguientes características:

- La discretización de elementos finitos 3D utilizan prismas de bases triangulas o tetraedros, y la discretización puede ser variable. Lo anterior resulta útil al modelar problemas relacionados a minería, donde la geología es compleja y los gradientes hidráulicos elevados.
- Los nodos del modelo pueden variar su posición el tiempo. Esto permite una representación detallada de los trabajos subterráneos y de la topografía en las minas a cielo abierto, logrando simular el plan de minado y su variación de topografía en el tiempo, como se observa en la Figura 4-1.
- Permite simular flujo de agua en condiciones saturadas y no saturadas, acorde con la posición de los niveles piezométricos del modelo.

- Utilización de condiciones de contorno flexibles, como condiciones de contorno de nivel (constante o variable), de flujo (constante o variable) y mixtas.
- Zonas de elevada permeabilidad se pueden simular mediante la unión de pares de nodos, lo cual facilita la representación precisa en el modelo túneles, fallas muy conductivas o pozos que bombean agua de diferentes unidades hidrogeológicas.
- El modelo permite simular los intercambios de agua entre el río y el sistema subterráneo, mostrando las pérdidas y ganancias del flujo superficial.
- Simula la pérdida de agua del suelo por evapotranspiración, siendo esta inversamente proporcional a la profundidad del nivel de agua.
- La excavación y rellenos en minas pueden simularse de acuerdo con el plan de minado. Esto es muy útil para predecir de manera detallada las condiciones hidrogeológicas y geotécnicas de la mina, y así conocer cuáles serán los flujos de agua en las paredes de las excavaciones durante las operaciones mineras.
- Se puede simular una conductividad hidráulica variable en el tiempo, a medida que varían las zonas de alrededor de las excavaciones, operaciones de relleno y otros escenarios posibles del proyecto.
- El código es muy estable numéricamente, lo que es importante para aquellos casos donde la discretización es grande y los gradientes hidráulicos elevados.
- Presenta una potente visualización 3D, representando la geología, dominios del modelo, geometría de la mina, presiones de poros en 3D y en secciones 2D.

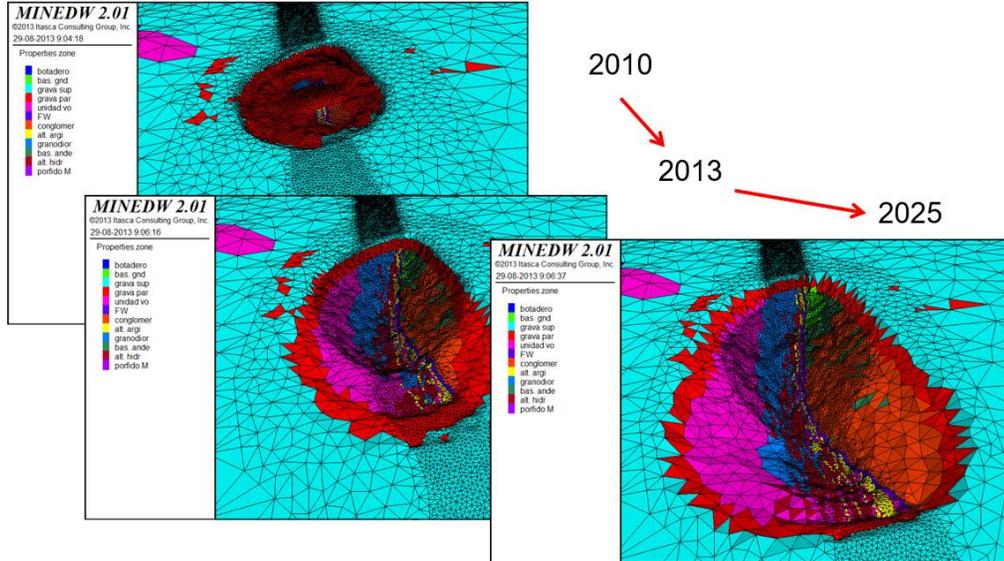


Figura 4-1 Evolución de la topografía de un proyecto minero simulado en *MINEDW*, con sus respectivas unidades hidrogeológicas. Fuente: Itasca, 2017.

#### 4.1.1 Ecuaciones subrutina *MINEDW*

*MINEDW* está compuesto de un programa principal y una serie de subrutinas en la cuales resuelve los distintos problemas y ecuaciones correspondientes a cada caso. Esta sección se centrará en la descripción de la subrutina principal, la cual realiza los principales cálculos para la implementación del método de elementos finitos. Para más información respecto a las demás subrutinas del programa se sugiere revisar el manual correspondiente.

Los cálculos que realiza la subrutina se basan en la ecuación general del flujo subterráneo, mostrada en la ecuación (11) pero con una variación:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K'_{xx} k_R \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K'_{yy} k_R \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K'_{zz} k_R \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S'_s \frac{\partial h}{\partial t} - W = 0 \quad (11)$$

Donde  $k_R$  corresponde a la conductividad hidráulica relativa y  $K'_{xx}$ ,  $K'_{yy}$  y  $K'_{zz}$  son las conductividades hidráulicas efectivas en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ ,  $S'_s$  el almacenamiento específico efectivo y  $W$  son las entradas o salidas al sistema por unidad de volumen.

La ecuación (11) asume que el sistema de coordenadas está alineado con las principales componentes del tensor de la conductividad hidráulica. La conductividad hidráulica efectiva se deriva usando la ecuación Forchheimer para flujo en régimen darciano y no darciano, en medio isotrópico, que tiene la forma de la ecuación (12).

$$\frac{dh}{dl} = \frac{1}{K} q + b q^2 \quad (12)$$

Donde:

$h$ : cota piezométrica

$q$ : descarga de aguas subterráneas en la dirección del gradiente hidráulico

$l$ : dirección del flujo subterráneo

$K$ : conductividad hidráulica bajo condiciones de flujo Darciano

$b$ : coeficiente

Para el caso general de flujo saturado, con medio anisotrópico y  $l$  orientado arbitrariamente dentro de un sistema de coordenadas rectangular, la ecuación (12) se puede reescribir como la siguiente ecuación:

$$q_i = \sum_j \left( \frac{1}{\frac{1}{K_{ij}} + b_{ij}q} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (13)$$

Donde:

$q_i$ : componente de la descarga subterránea en la dirección  $x_i$  [ $Lt^{-1}$ ]

$K_{ij}$ : tensor de la conductividad hidráulica para flujo darciano [ $LT^{-1}$ ]

$b_{ij}$ : tensor del coeficiente  $b$  de la ecuación (12) [ $L^{-2}T^{-2}$ ].

De la ecuación (13), el tensor de conductividad hidráulica efectiva resulta en:

$$K'_{ij} = \frac{1}{\frac{1}{K_{ij}} + b_{ij}q} \quad (14)$$

*MINEDW* simula flujo saturado-no saturado para el cálculo del nivel freático y *seepage*. La conductividad hidráulica relativa sobre el nivel freático tiene un valor pequeño que está relacionado a la tasa promedio de la percolación vertical en la zona no saturada. Bajo el nivel freático, esta conductividad tiene un valor unitario. Las condiciones se expresan matemáticamente en la siguiente ecuación:

$$k_R(P) = \begin{cases} k'_R & \text{para } P < 0 \\ 1 & \text{para } P \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

Donde:

$$P = h - z \quad (16)$$

$P$ : cota piezométrica [L]

$z$ : coordenada vertical [L]

$k'_R$ : conductividad hidráulica relativa en el dominio sobre el nivel freático.

#### 4.1.2 Malla de elementos finitos

La malla de elementos finitos define la geometría del sistema. Consiste en una configuración de tetraedros sólidos. Debido a que los tetraedros son difíciles de trabajar, la malla real se ensambla a partir de elementos prismáticos con una sección transversal triangular. Los prismas están orientados espacialmente con caras triangulares subhorizontales y caras cuadriláteras subverticales. La Figura 4-2 muestra la desagregación de elementos prismáticos triangulares en tetraedros.

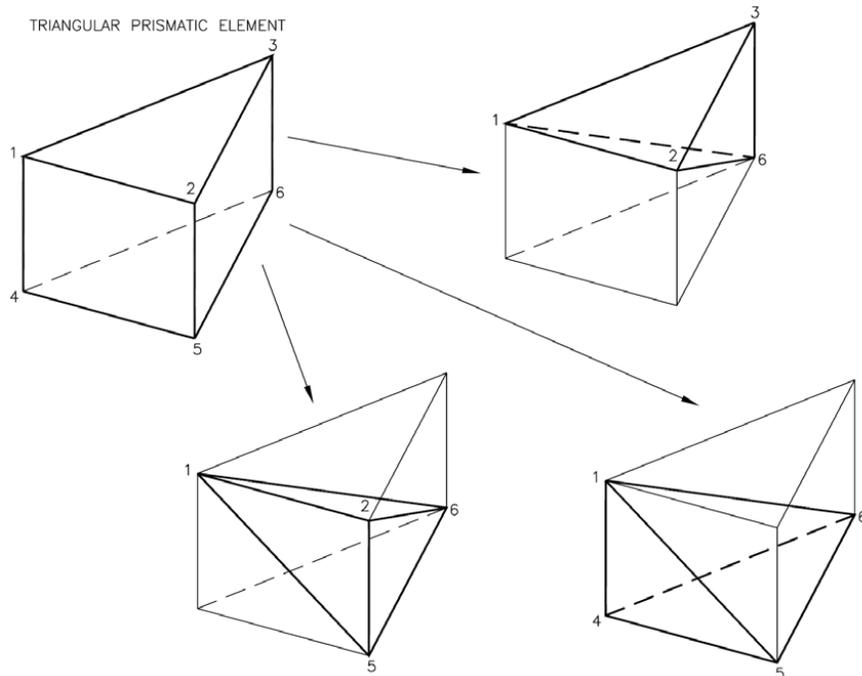


Figura 4-2 Desagregación de elementos prismáticos triangulares. Fuente: Itasca, 2016.

#### 4.1.3 Condiciones de borde permitidas

En *MINEDW* se pueden incorporar seis tipos de condiciones de borde al sistema:

1. Carga constante: permite incorporar una carga específica que puede ser constante en el tiempo, variable en el tiempo (en tiempos específicos o a nivel anual) o como un nodo de dren. Esta última condición puede generarse

cuando el agua subterránea descarga a una tubería de drenaje subterránea o a una pared de un rajo.

2. Flujo variable: permite incorporar condiciones de borde de flujo variable. Se usa para simular un dominio de gran extensión sin la necesidad de extender el dominio del modelo. Para que se implemente correctamente la condición, el límite del modelo debe estar lejos de cualquier esfuerzo hidráulico, para que este no afecte la condición de borde.
3. Pozos de bombeo: permite incorporar valores de entrada o salidas como pozos de bombeo. Pueden modelarse definiendo un caudal de bombeo o una carga específica.
4. Ríos: esta condición se usa para simular la interacción entre un río y un acuífero. Mediante la ecuación de Manning obtiene el caudal como un canal abierto. Las interacciones se simulan comparando la cota del acuífero con el nivel de agua en el río a lo largo del tiempo, pudiendo transferir agua a través del lecho del río.
5. Recarga: permite simular una recarga variada en el tiempo y en el espacio. Se pueden seleccionar diferentes zonas en el modelo con distintas recargas y diferentes series de tiempo de precipitación. Permite agregar zonas donde la recarga es controlada por condiciones orográficas, aplicable en regiones montañosas.
6. Evaporación: simula la descarga de agua desde un nivel freático poco profundo debido a la evapotranspiración de áreas con vegetación o a evaporación del suelo desnudo. La tasa de evaporación depende de la profundidad local del nivel freático, la tasa evapotranspiración potencial, tamaño del área de evaporación y la profundidad de extinción (profundidad a la cual la evapotranspiración se hace cero).

#### **4.2. Slope Model**

El *software Slope Model* es un código en desarrollo, creado por Itasca destinado a estudios de estabilidad de taludes. El programa implementa una versión del enfoque *Synthetic Rock Mass (SRM)* (Pierce et al., 2007) aplicada al caso específico de taludes mineros. Este enfoque, a diferencia de las metodologías convencionales usadas para el análisis de estabilidad de taludes aplicada a rocas fracturadas (métodos continuos), representa correctamente la física de la deformación de las discontinuidades y fracturas de la roca intacta, simulando los “puentes de roca” entre las nuevas discontinuidades y fracturas formadas a medida que la roca se somete a distintos esfuerzos (Itasca, 2012). Debido a que este es un enfoque nuevo, debe probarse y validarse cuidadosamente antes de usarse en la práctica, por lo que, en caso de aplicarse en estudios de estabilidad, es recomendable comparar los resultados con otro *software* de modelación destinado a estos estudios.

El tipo de modelación que usa es de tipo discreta. Se diferencia de los métodos continuos por la existencia de contactos entre los cuerpos discretos que componen el sistema. Dentro de los métodos discontinuos, se tiene el método *Distinct Element Method (DEM)*, usado por *Slope Model*, el cual consiste en una solución numérica utilizada para describir el comportamiento mecánico de cuerpos discontinuos. El *DEM* fue desarrollado para el análisis de problemas mecánicos de rocas utilizando bloques de polígonos deformables. Lo que caracteriza a este método es que permite el desplazamiento y rotación de cuerpos discretos y reconoce nuevos contactos automáticamente a medida que avanza en el cálculo (Pedemonte, 2018).

El programa permite incorporar una *DFN* en forma de discos. Puede modelar el flujo a través de la red de fracturas y de la matriz rocosa, y las presiones resultantes se pueden exportar para calcular las tensiones efectivas en el talud. También permite estudiar otros aspectos relacionados a la interacción fluido/mecánico como la deformación en la presión del fluido debido a esfuerzos, o la apertura de fractura debido a esfuerzos. Por lo tanto, *Slope Model* permite simular la evolución del campo de presiones y del flujo debido a las actividades mineras y su efecto en la estabilidad de taludes (Itasca, 2012).

La “malla” que utiliza *Slope Model* es un ensamblaje de nodos conectados por resortes no lineales. Los resortes que conectan los nodos y representan los contactos de roca pueden romperse (creando nuevas microgrietas) (ver Figura 4-3).

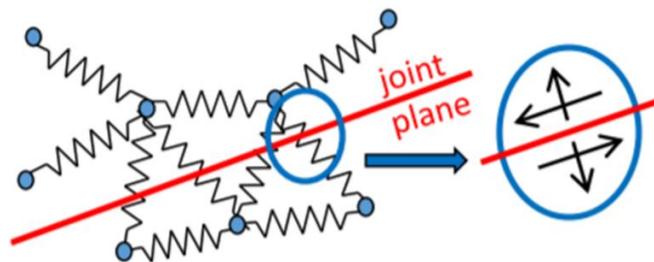


Figura 4-3 Representación de los nodos y resortes en *Slope Model*. Fuente: Pedemonte, 2018.

#### 4.2.1 Modelo de flujo en *Slope Model*

En *Slope Model* se puede simular flujo en fracturas y en la matriz rocosa, donde en ambos se resuelve de distinta manera. El flujo en la fractura se resuelve usando la geometría del modelo de flujo, la cual es una red de nodos y “tubos” creadas en función de la red de fractura inicial y las fracturas generadas en el modelo sólido. El flujo en la matriz utiliza las presiones de poros almacenadas en los resortes del modelo sólido. Puede existir intercambio entre las fracturas y la matriz rocosa.

Debido a que en la presente memoria sólo se simula flujo en la fractura, sin intercambio con la matriz, se describirá la formulación de la primera solamente. Para

más información respecto al comportamiento de flujo en matriz, revisar el manual creado por Itasca (2010).

#### 4.2.1.1 Flujo en fractura

El flujo en las fracturas se resuelve dentro de la red de “nodos de fluido” conectados por “tubos” (elementos de flujo unidimensional). Las presiones del fluido se almacenan en los nodos. Los “tubos” permiten el flujo entre cada nodo. Un nodo de fluido está conectado a todos los demás nodos de fluido dentro de una distancia igual a la resolución de la red, que puede especificarse por el usuario.

Al comienzo de la simulación, la red de flujo se genera en las uniones preexistentes específicas (es decir, la *DFN* entregada al modelo). A medida que se crean microgrietas, debido a ruptura de los resortes de la red según las fuerzas aplicadas, el código crea automáticamente nuevos nodos de fluido y los conecta (usando los “tubos” de flujo), con la red de flujo existente, como se observa en la Figura 4-4.

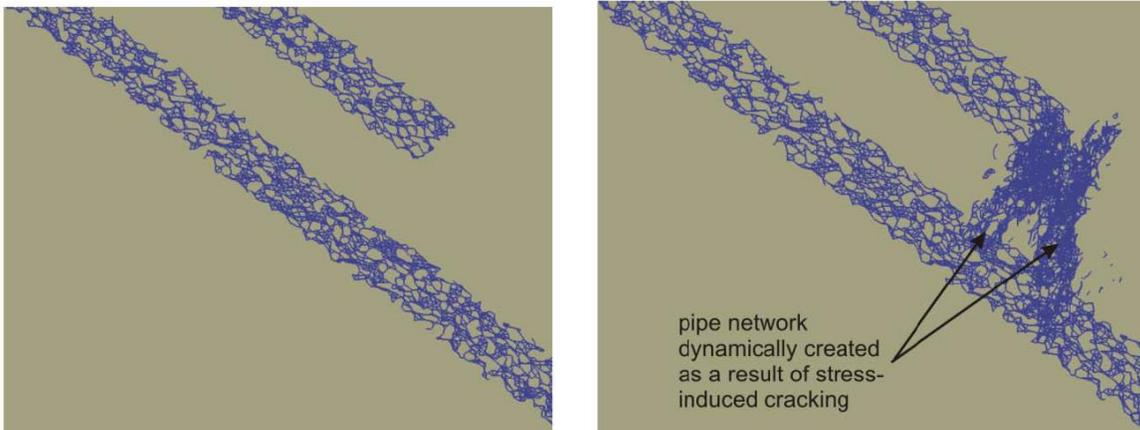


Figura 4-4 Evolución de una red de flujo en fracturas en *Slope Model*. En la imagen de la derecha se observa la creación de la nueva red de "tubos" debido a un esfuerzo inducido. Fuente: Itasca, 2010

El caudal a lo largo de un “tubo” desde el nodo de fluido “A” hasta el nodo “B”, se calcula en función de la siguiente relación:

$$q = \beta k_r \frac{a^3}{12\mu} [p^A - p^B + \rho_w g(z^A - z^B)] \quad (17)$$

Donde  $a$  es la apertura hidráulica,  $\mu$  es la viscosidad del fluido,  $p^A$  y  $p^B$  son las presiones del fluido en los nodos “A” y “B”, respectivamente,  $z^A$  y  $z^B$  las elevaciones de los nodos “A” y “B”, respectivamente, y  $\rho_w$  la densidad del fluido. La permeabilidad relativa está en función de la saturación  $s$ :

$$k_r = s^2(3 - 2s) \quad (18)$$

El parámetro  $\beta$  es un adimensional de calibración, una función de la resolución del fluido, que se utiliza para hacer coincidir la conductividad de una red de “tubos” con la conductividad de una fractura, representada como placas paralelas con una apertura.

#### 4.2.1.2 Condiciones de borde de flujo

El programa permite incorporar dos tipos de condiciones de borde para el flujo, Presión Constante (*Constant Pressure*) y Gradiente de Presión (*Pressure Gradient*), las que se observan en la Figura 4-5.

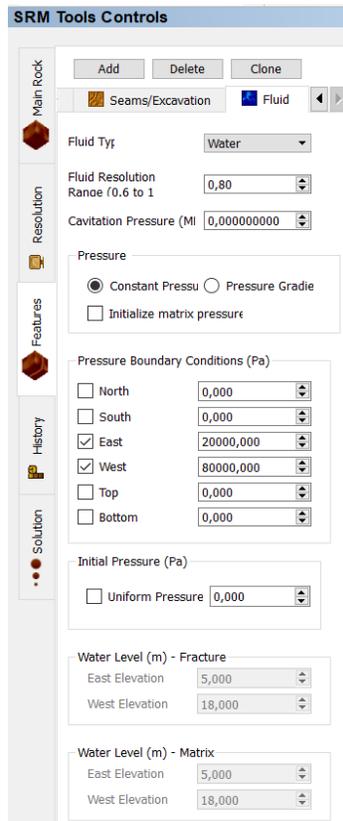


Figura 4-5 Pestaña de caracterización del fluido en *Slope Model*, donde se incorporan las condiciones de borde del problema. Fuente: Elaboración propia.

Para la condición Presión Constante se deben ingresar al modelo los valores que tendrán las presiones (en Pascales) en cada borde del macizo rocoso, por lo que se deben definir la presión que tendrá la cara Norte, Sur, Este, Oeste, Arriba y Abajo del macizo. Estos valores permanecerán constantes a lo largo de toda la simulación.

Para la condición Gradiente de Presión se deben ingresar los niveles de agua, en metros, que tendrá el fluido en la cara Este y Oeste del macizo. Se pueden ingresar tanto para la fractura o la matriz. Esta condición genera un nivel freático en el macizo.

## 5. COMPARACIÓN DE CAUDALES DE UN MEDIO FRACTURADO

En el presente capítulo se describen los resultados obtenidos de la modelación de un caso base de flujo por fractura en una matriz rocosa. El objetivo de este ejercicio es lograr verificar que *MINEDW*, aparte de poder incorporar anisotropía en sus modelos, permite representar fielmente el flujo a través de estructuras. Esto se realiza comparando un problema simple modelado en los dos programas descritos en el Capítulo 4, que utilizan diferentes metodologías de modelación, *MINEDW* utiliza la metodología de Medio Poroso Equivalente y *Slope Model* la Red de Fracturas Discretas. Mediante la comparación de los caudales de salida obtenidos de los softwares se verifica que, entregando los parámetros adecuados, *MINEDW* puede representar un flujo a través de fracturas.

### 5.1. Caso base

La selección del problema a representar se realiza considerando las limitaciones que posee el *software Slope Model*, estas son:

- Al ser un programa en desarrollo y al no utilizarse otro programa que use la misma metodología de modelación de flujo para comparar un resultado obtenido, es conveniente que resuelva un problema ya validado por sus creadores.
- Otro criterio de selección es que las condiciones de borde del problema se puedan representar en *MINEDW*, ya que como se mencionó en el capítulo anterior 6, *Slope Model* sólo puede incorporar dos tipos de condiciones de borde a sus modelos.
- Debido a la metodología de modelación que posee (Red de Fracturas Discretas) los tiempos de simulación son computacionalmente muy altos.

Tomando en cuenta los puntos anteriores, es que el caso base a modelar corresponde a un ejercicio de validación del *software Slope Model*, realizado por Itasca.

El problema modelado se muestra en la Figura 5-1. Corresponde a un problema de flujo permanente no saturado, donde el flujo va exclusivamente por la fractura y no existe intercambio de flujo con el macizo rocoso (Itasca, 2012).

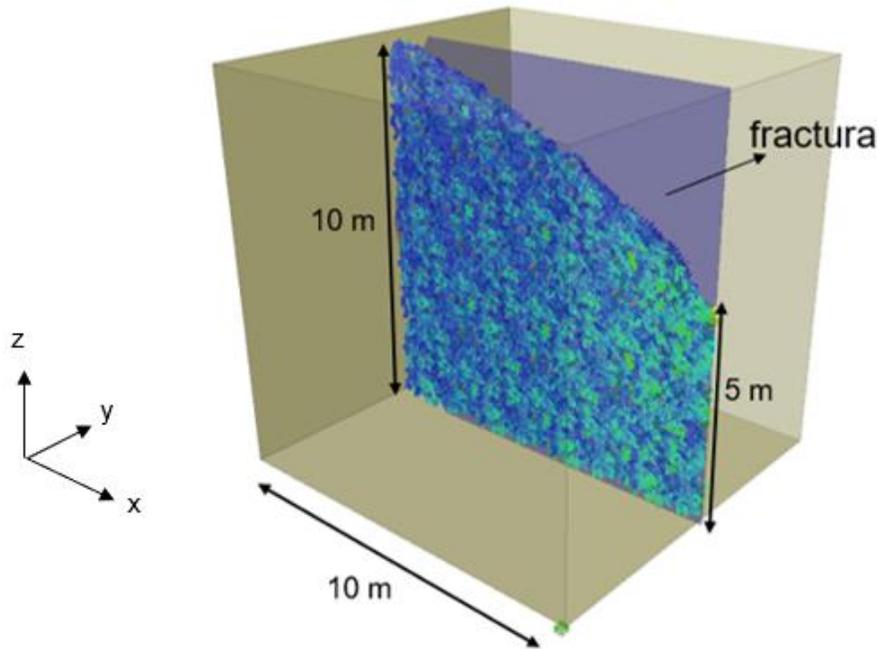


Figura 5-1 Geometría del macizo rocoso a modelar. Fuente: elaboración propia.

Las dimensiones del modelo son:

$$h_1 = 10 [m]$$

$$h_2 = 5 [m]$$

$$L = 10 [m]$$

$$alto = 10 [m]$$

$$ancho = 10[m]$$

Las propiedades del modelo son:

$$apertura\ fractura\ (a) = 2 \times 10^{-4}\ m$$

$$viscosidad\ dinámica\ (\mu) = 10^{-3}\ Pa \cdot s$$

$$densidad\ del\ fluido\ (\rho_w) = 1000\ kg/m^3$$

## 5.2. Caudal teórico

Los caudales de salida resultantes de cada modelo se comparan con un valor teórico entregado por la ecuación de Dupuit (Strack, 1989), modificada para un medio fracturado. La ecuación es la siguiente:

$$Q\left(\frac{m^3}{s}\right) = \frac{k \cdot \rho_w \cdot g \cdot a}{\mu} \cdot \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} \quad (19)$$

El valor  $k$  corresponde a la permeabilidad de la fractura, y se obtiene según la siguiente ecuación:

$$k = \frac{a^2}{12} \quad (20)$$

Donde:

$k$  ( $m^2$ ): permeabilidad de fractura

$g$  ( $\frac{m}{s^2}$ ): gravedad

$a$  ( $m$ ): apertura fractura

$\mu$  ( $Pa \cdot s$ ): viscosidad dinámica

$\rho_w$  ( $\frac{kg}{m^3}$ ): densidad del agua

El caudal teórico obtenido al reemplazar los valores anteriormente definidos es:

$$Q = 2,435 \times 10^{-5} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Los resultados obtenidos según cada modelo se comparan con el valor teórico por medio del siguiente cálculo de error:

$$error (\%) = \frac{Q_{simulado} - Q_{teórico}}{Q_{teórico}} \quad (21)$$

### 5.3. Modelación en *Slope Model*

El caso base se modela en *Slope Model* como se muestra en la Figura 5-2. Las dimensiones del modelo son las mismas descritas anteriormente. La fractura se ubica al medio del modelo, a 5 m del origen con una apertura de  $2 \times 10^{-4}$  m.

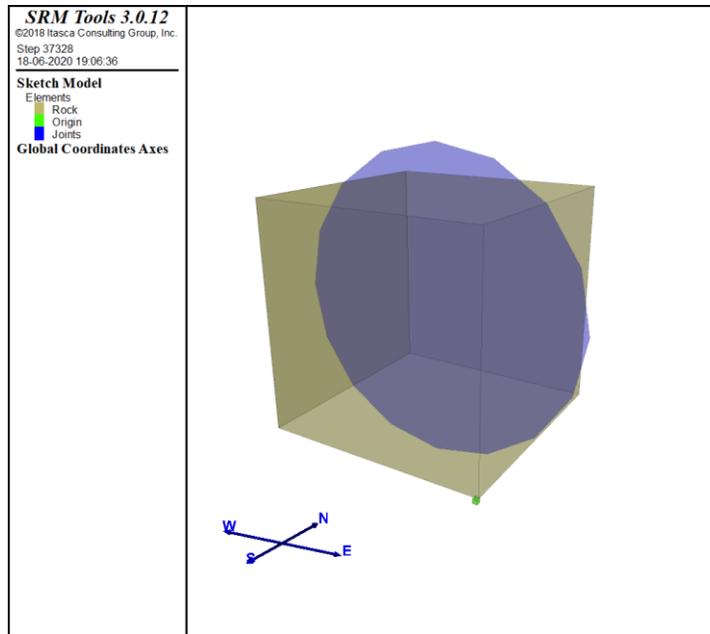


Figura 5-2 Macizo rocoso representado en el software. El disco azul representa la ubicación de la fractura. Fuente: Elaboración propia.

El tipo de roca a utilizar se denomina “Test Rock” que es una roca entregada por defecto en el software y presenta las características mostradas en la Figura 5-3.

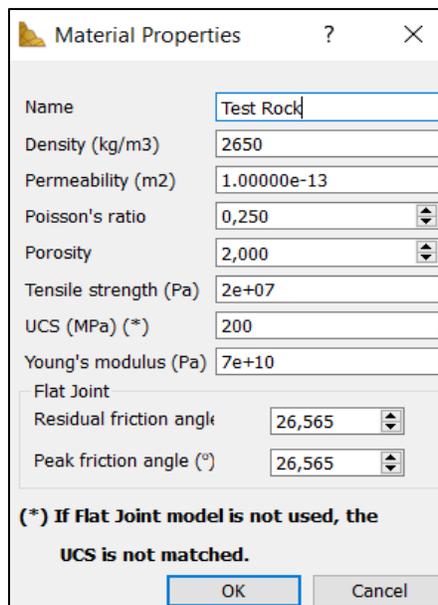


Figura 5-3 Propiedades del macizo rocoso modelado. Fuente: Elaboración propia.

De estas propiedades resulta importante considerar que *Slope Model* trabaja en términos de permeabilidad. En este programa se considera que el flujo va exclusivamente por la fractura, por lo que el dato de permeabilidad de la roca no resulta relevante. Pero para la modelación en *MINEDW* resulta importante

considerar este valor, ya que no se puede especificar un flujo exclusivo por la fractura, por lo que es necesario definir la conductividad hidráulica que tendrá el macizo y la fractura. A partir del valor de permeabilidad de la roca se puede determinar la conductividad hidráulica del macizo, que se usará posteriormente en *MINEDW*, mediante la ecuación (22).

$$K = k \cdot \frac{\rho g}{\mu} \quad (22)$$

Donde:

$\rho$  ( $\frac{kg}{m^3}$ ): densidad agua

$g$  ( $\frac{m}{s^2}$ ): gravedad

$\mu$  ( $Pa \cdot s$ ): viscosidad dinámica

Utilizando una densidad de agua de  $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$ , gravedad  $g = 10 \frac{m}{s^2}$  y viscosidad dinámica de  $\mu = 0,001 Pa \cdot s$ , y reemplazando el valor de  $k$  entregado por el programa se tiene una conductividad hidráulica de:

$$K_{roca} = 10^{-6} \frac{m}{s}$$

La conductividad hidráulica que tendrá la fractura se obtiene reemplazando los valores anteriores en la ecuación (20) y (22), resultando en el siguiente valor:

$$K_{fractura} = 3 \times 10^{-2} \frac{m}{s}$$

La condición de borde utilizada corresponde a "Gradiente de Presión" sólo en la fractura y se define un nivel de agua en el lado Oeste y Este de 10 m y 5 m, respectivamente, como se observa en la Figura 5-4.

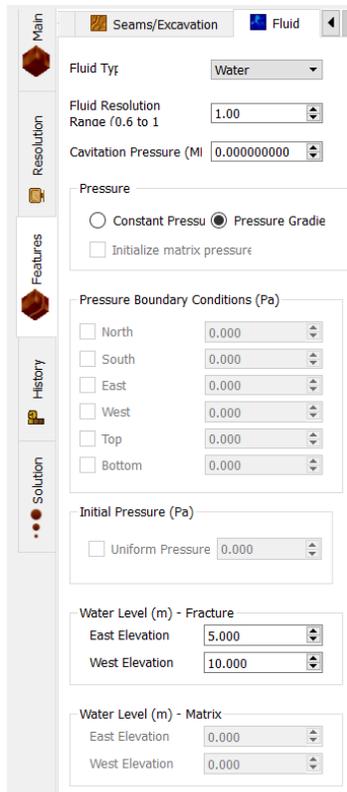


Figura 5-4 Condición de borde para el flujo en el modelo. Fuente: Elaboración propia.

Las caras superior, inferior, norte y sur del macizo permanecen impermeables.

El modelo corresponde a un caso permanente, ya que los tiempos de corrida del *software* son muy altos. En *Slope Model* para modelar un caso permanente se debe ingresar en el tiempo de simulación 0 s, pero para poder inicializar el flujo es necesario colocar un tiempo pequeño distinto de cero, que en este caso corresponde a 0,1 s. De todas formas, el caudal de salida al que tiene el sistema se alcanza rápidamente y corresponde al régimen permanente. Para comparar con el valor entregado por *MINEDW*, se extrapola a 100 s el valor, ya que se asume que el valor se mantiene constante.

### 5.3.1 Resultados *Slope Model*

Para obtener los resultados de caudal de salida en el modelo se selecciona la opción “*History*”, la cual grafica el comportamiento del caudal de salida en el modelo. El gráfico entregado por *Slope Model* se observa en la Figura 5-5. En ANEXO 1 se encuentran los valores.

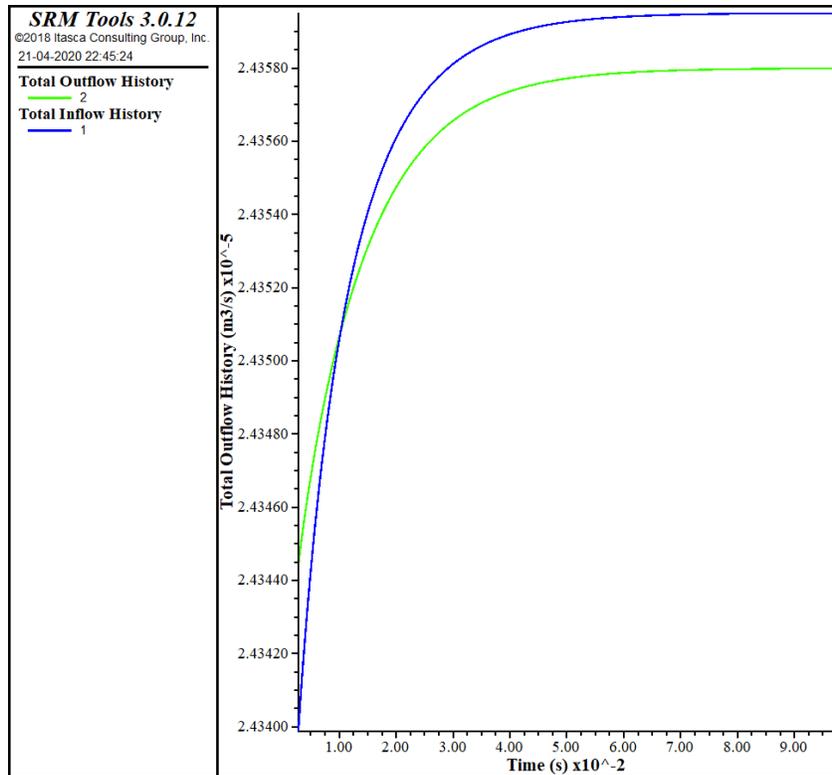


Figura 5-5 Gráfico del comportamiento de caudal de salida entregado por *Slope Model*. La línea verde representa el caudal de salida del modelo. Fuente: Elaboración propia.

El valor del caudal de salida tiende a:

$$Q_{slope} = 2,44 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

Mediante la ecuación (21) se obtiene el error:

$$error_{slope} = 0,6\%$$

#### 5.4. Modelación en *MINEDW*

Para modelar el caso en base en *MINEDW* es necesario crear una malla para importarla al programa. La malla se crea utilizando el programa *Rhinoceros 6*, un *software* de diseño, donde la malla resultante se muestra en la Figura 5-6. La zona más oscura corresponde a la ubicación de la fractura, la cual al ser de espesor pequeño ( $2 \times 10^{-4} m$ ) su mallado es más fino.

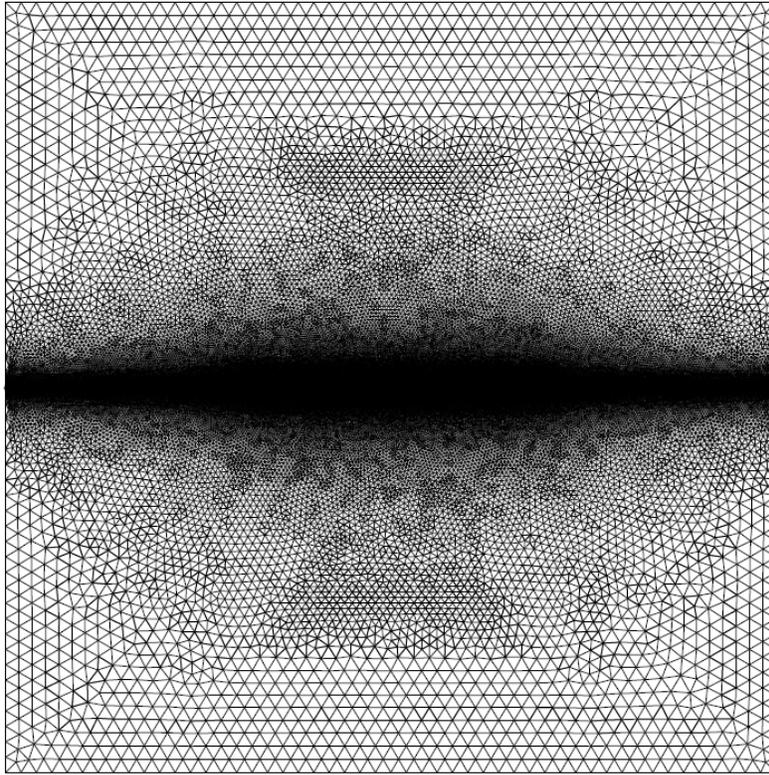


Figura 5-6 Mallado resultante en *Rhino 6*, con las dimensiones del caso base. Fuente: elaboración propia.

La malla se importa a *MINEDW* donde se determinan sus respectivas zonas, mostradas en la Figura 5-7. La zona verde corresponde a la zona de roca y la azul a la fractura. Las propiedades de la fractura se resumen en la Figura 5-8. Se decide considerar isotropía en la conductividad hidráulica en la matriz de roca, y anisotropía en la fractura, ya que así se asegura que exista menos intercambio de flujo con el macizo rocoso en el eje  $y$ .

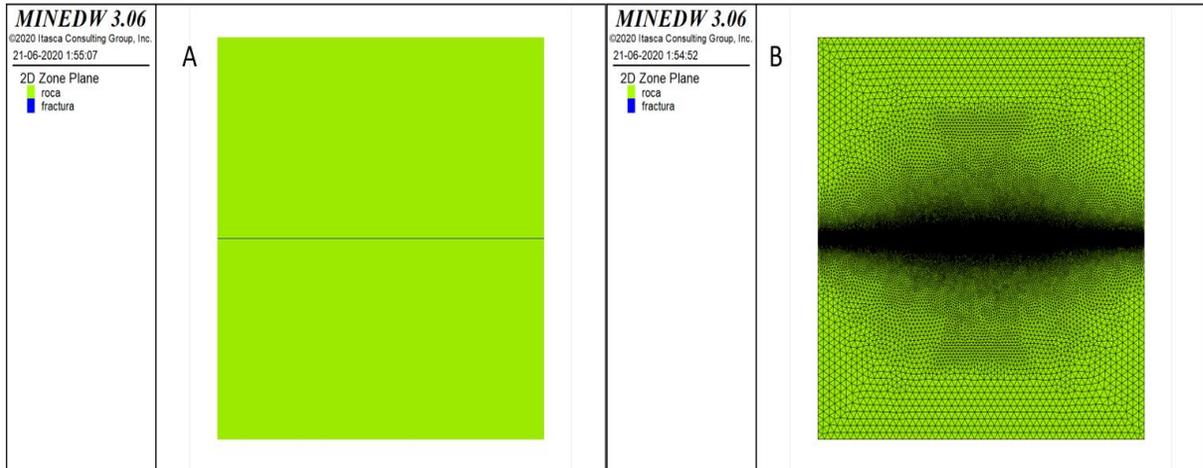


Figura 5-7 Zonas definidas en el macizo. En verde se representa la roca y en azul la fractura. La imagen A muestra el macizo sin malla y en la imagen B se muestra la roca con la malla, donde la zona de fractura corresponde al mallado más denso. Fuente: elaboración propia.

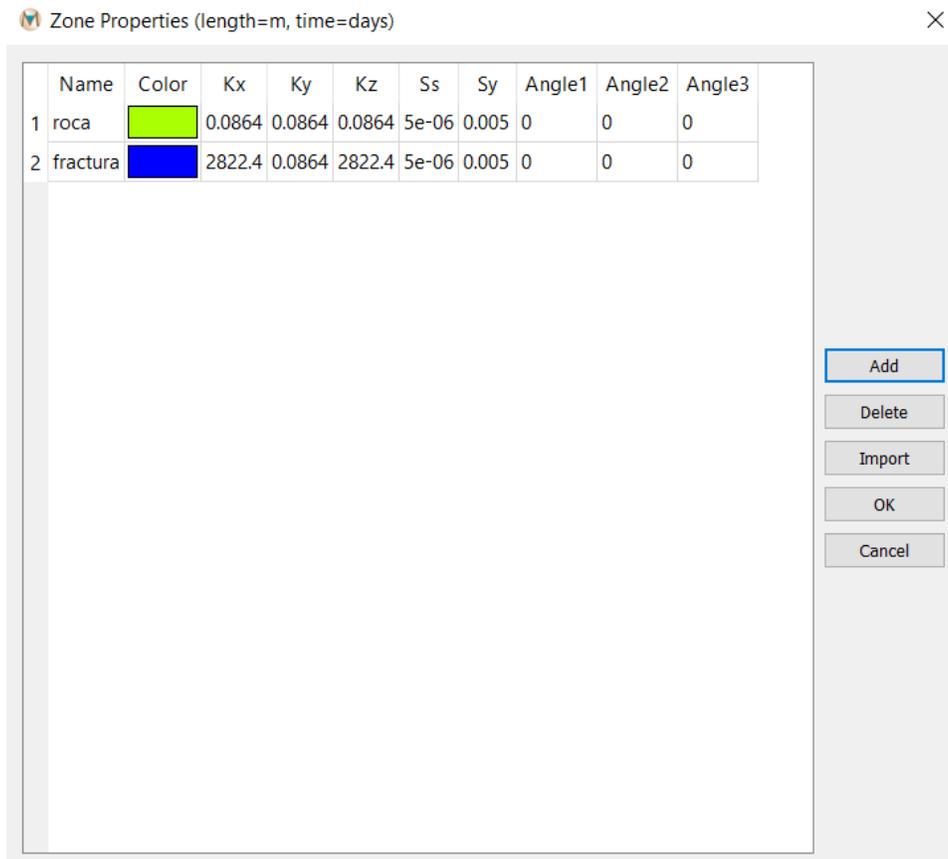


Figura 5-8 Propiedades de las unidades del modelo. Los datos deben ingresarse en metros/días. Fuente: elaboración propia.

Para asegurarse que el flujo vaya sólo por la fractura, las condiciones de borde se ubican sólo en los nodos de entrada y salida de la fractura. La condición seleccionada para los nodos es de carga constante (*constant head*), donde la entrada está a 10 m y los nodos de salida a 5 m. La ubicación de las condiciones de borde se muestra en la Figura 5-9.

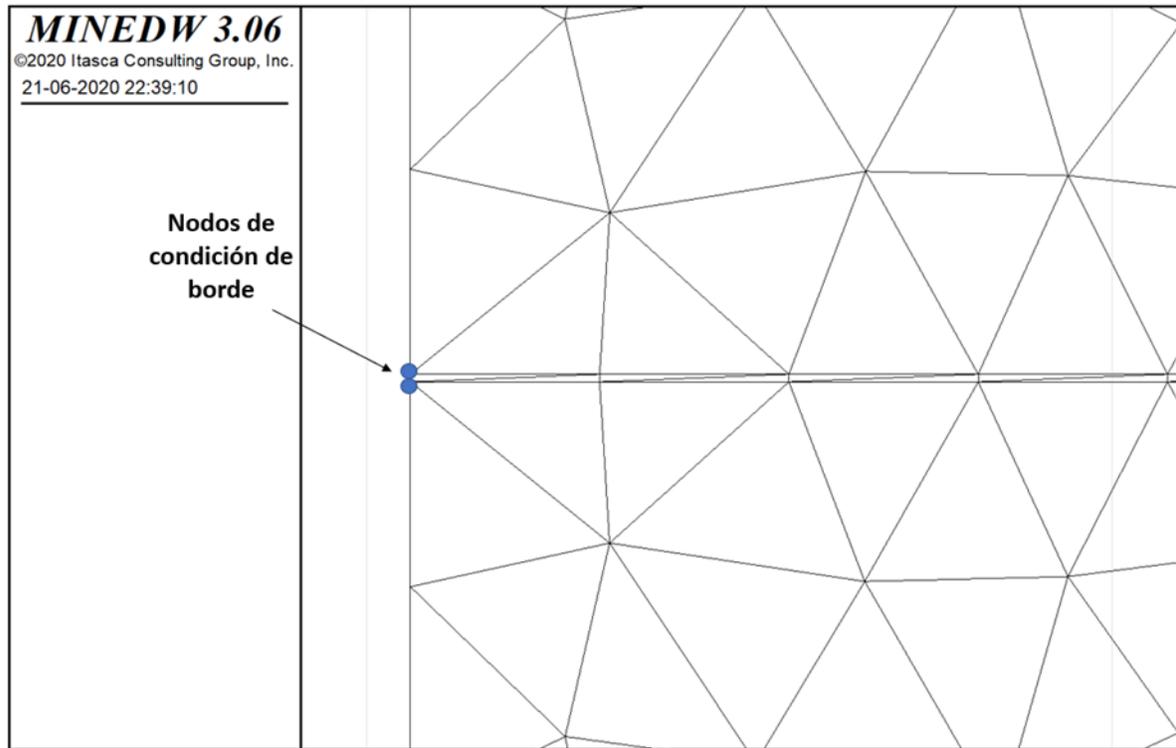


Figura 5-9 Nodos de condición de borde en la zona de fractura. Fuente: elaboración propia.

Para representar mejor el comportamiento del flujo en un medio fracturado, a la salida del modelo se define un *leakance factor* de  $6 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/d. Este factor se define al momento de definir la carga constante de los nodos de salida del modelo y representa la resistencia al flujo entre el cuerpo de agua superficial (la carga constante de 5 m ubicada a la salida) y el acuífero (macizo rocoso).

El modelo final con la respectiva ubicación de las condiciones de borde se observa en la Figura 5-10. Se definieron 10 layers.

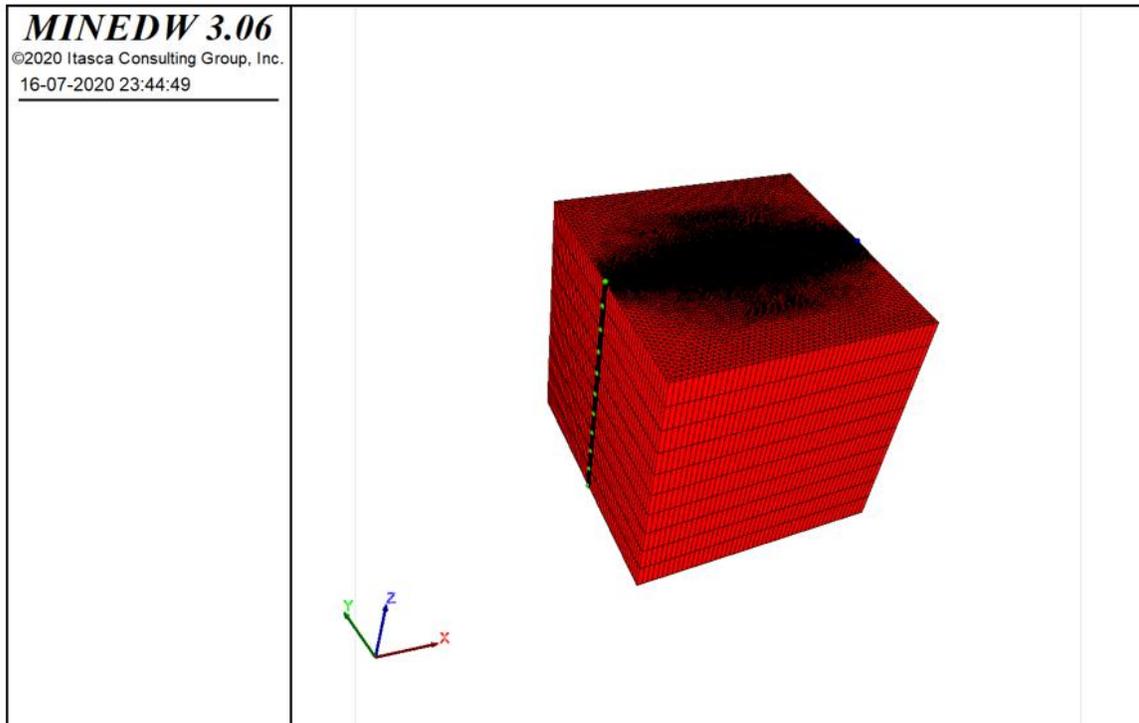


Figura 5-10 Modelo final en *MINEDW*. La zona roja corresponde a la roca y los puntos verdes son los nodos de condición de borde en la entrada de la zona de fractura. Fuente: elaboración propia.

#### 5.4.1 Resultados *MINEDW*

El modelo se corre para un régimen permanente. Los datos de caudales de salida del sistema se exportan a *Excel* y se grafican, obteniendo el gráfico de la Figura 5-11. En el ANEXO 1 se encuentran los valores obtenidos.

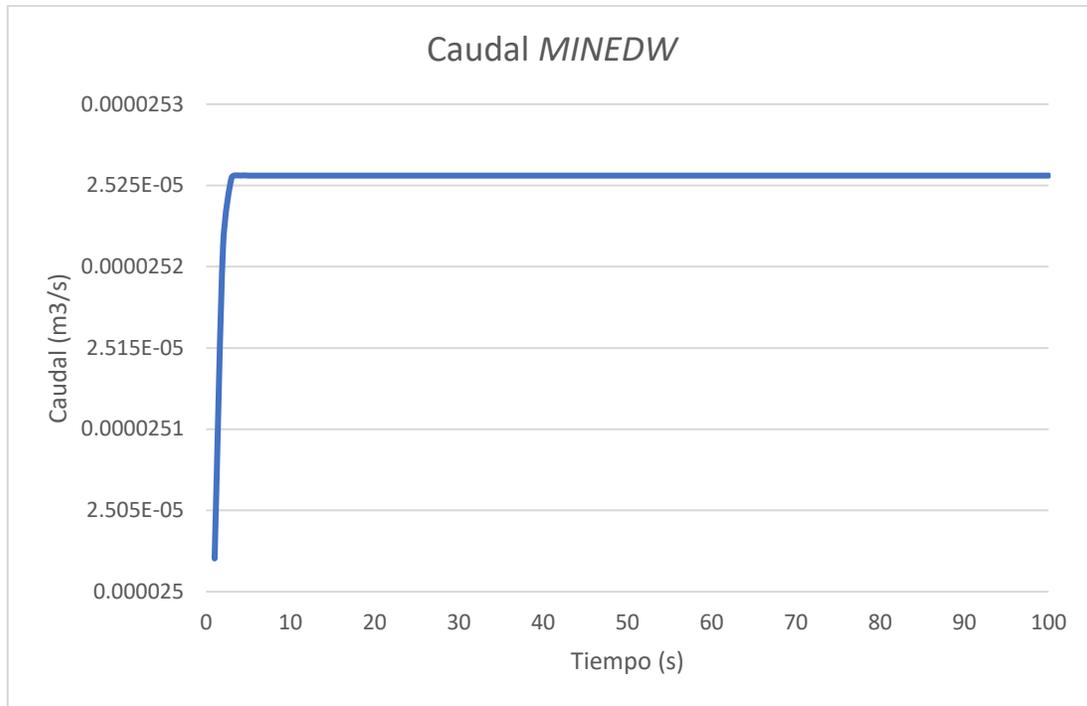


Figura 5-11 Gráfico del comportamiento del caudal de salida obtenido por MINEDW. Fuente: Elaboración propia.

Del análisis de los datos se observa que el valor de caudal al que se tiende es:

$$Q_{MINEDW} = 2,53 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

Calculando el error mediante la ecuación (21):

$$error_{MINEDW} = 3,09\%$$

## 5.5. Análisis y conclusiones

Para comparar los valores de ambos programas con el valor teórico se grafican como lo muestra la Figura 5-12. El valor de caudal entregado por *MINEDW* está por sobre el valor analítico y el obtenido por *Slope Model* está por debajo.

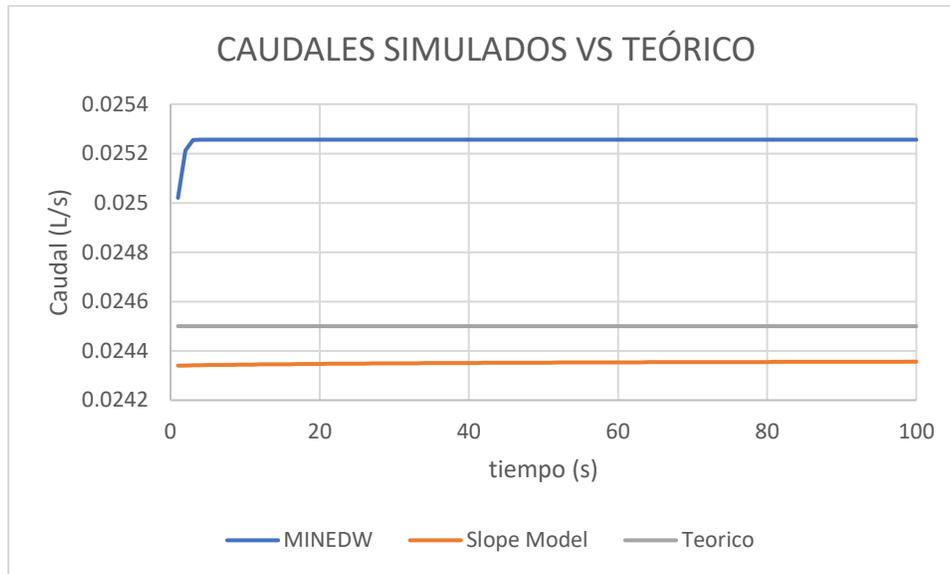


Figura 5-12 Comparación de caudales simulados con valor teórico. Fuente: elaboración propia.

El error experimental que presenta *Slope Model* (error de 0,6%) para el problema modelado, resulta muy cercano a la solución analítica. Por otro lado, el caudal obtenido por el software *MINEDW* (error de 3,09%) entrega un error mayor que *Slope Model*, pero bastante pequeño. La resolución de este sencillo problema permite verificar que *MINEDW* podría representar un medio fracturado, tanto a nivel regional como local, entregando los parámetros adecuados para cada uno.

Considerando que el problema modelado corresponde a un ejercicio simple de validación, permite entregar una noción de cómo funcionan las diferentes metodologías de modelación de flujo en un medio fracturado. Según el objetivo que se tenga, podría resultar mucho más conveniente en términos de optimización de tiempo, utilizar el software *MINEDW* para representar un medio fracturado regional y local. Si bien los parámetros geométricos de las fracturas no es posible definirlos directamente, por medio de otro programa (definiendo en *Slope Model* la geometría y diseñando la malla en *Rhino 6* en este caso) se puede definir una malla que represente la geometría de la fractura. En *MINEDW* también se pueden definir diferentes tipos de condiciones de borde.

En caso de querer modelar en el futuro algún problema incorporando una *DFN* utilizando *MINEDW*, se debe considerar que las características geométricas de las fracturas se deben definir al momento de crear el mallado del problema. Respecto a *Slope Model*, ha sido creado con la finalidad de usarse sólo en modelos locales. Debe ser comparado con otros programas ampliamente validados que utilicen la metodología de Red de Fracturas Discretas, ya que es un software en desarrollo. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que en caso de disponer de un set de fracturas con aperturas superiores a las del ejercicio modelado en esta memoria ( $2 \times 10^{-4}$  m), el tiempo computacional que tomará *Slope Model* será alto.

Finalmente, se puede concluir que *MINEDW* es capaz de representar un medio fracturado incorporando en la modelación características estructurales que definen el comportamiento del flujo en un medio fracturado: la anisotropía y el flujo preferente por fracturas o fallas geológicas.

## 6. MODELO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se describen las principales características del proyecto Bartolina Andina. Corresponde a una recopilación de diferentes informes desarrollados por Itasca para la realización del modelo numérico. El principal informe corresponde al modelo conceptual realizado por Itasca (2015), donde el área de estudio corresponde a una zona más extensa que la modelada en el programa actual, ya que considera la realización de dos futuros rajos (aparte del rajo Bartolina) en la zona. Debido a esto, es que el área de Bartolina Andina es parte de una microcuenca de una zona mayor. La información de este informe, más actualizaciones realizadas por la empresa minera e Itasca se incorporan en este capítulo.

Los informes utilizados para la recopilación de la información del modelo conceptual son:

- Itasca (2015a) Modelo hidrogeológico conceptual Bartolina Andina. Informe IPSAC-7004001/2015-001.
- Itasca Perú & Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA) (2015b) Trabajos de reconocimiento geológico e hidrogeológico en el área del Karst de Bartolina Andina.
- Itasca (2017). Actualización del Modelo de Presión de Poros del Tajo Bartolina y Propuesta de Drenaje para el Periodo 2017 a 2019. Informe IPSAC-7004.009/2017-001.
- Itasca (2018). Actualización del Modelo de Presión de Poros del Tajo Bartolina y Propuesta de Drenaje para el Periodo 2019 a 2021. Informe IPSAC 7004.012/2018-01.

El objetivo del capítulo es lograr representar de forma simplificada los elementos más importantes del sistema físico del área de estudio y su comportamiento mediante la actualización de información recopilada, para luego incorporarlos al actual modelo numérico en *MINEDW*.

### 6.1. Meteorología

La información hidrometeorológica es una herramienta primordial para el desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual, ya que permitirá determinar la disponibilidad hídrica y posteriormente definir la recarga del lugar. Los datos recopilados corresponden a datos obtenidos por diferentes consultoras anteriormente.

Para definir la temperatura, precipitación y evaporación de la zona se utilizaron siete estaciones meteorológicas (a excepción de la evaporación) que se ubican fuera del área del proyecto, con registros entre los años 1964-2012 y cuatro estaciones locales instaladas en la mina Bartolina Andina, con registros entre los años 2006-2009 y 2014. Es importante mencionar que la representatividad de los datos es baja,

ya que las estaciones se encuentran en cuencas alejadas de la zona del proyecto, y los datos disponibles son escasos, ya que algunas estaciones se encuentran paralizadas o clausuradas.

La última información entregada a Itasca corresponde a tres estaciones cercanas al rajo minero, las cuales presentan datos desde el 2015 (año que empiezan las operaciones del proyecto) hasta agosto de 2018 (último año de información recibida desde la minera). Esta información es posterior a la realización del modelo conceptual de Itasca, por lo que su análisis se usa sólo para los inputs del modelo numérico, que se mencionan en el Capítulo 9. De todas formas, se incluyen los gráficos de precipitación, temperatura y evaporación de estas estaciones, las cuales presentan la misma tendencia que las demás estaciones analizadas en el modelo conceptual previo.

Las estaciones utilizadas en el modelo conceptual corresponden a las de la Tabla 6-1. La Figura 6-1 muestra la ubicación geográfica de las estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

Tabla 6-1 Estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio de modelo conceptual. Fuente: Itasca, 2015.

<b>Estación</b>	<b>Altitud (msnm)</b>	<b>Fuente</b>	<b>Años de registro</b>
Sofía	3454	SENAMHI	1965-2012
Ana	3253		
Frida	3741		
Sonia	3817		
Benjamín	3358		
Carlos	3047		
Viviana	3160		
Alejandra 1	3792	Mina Bartolina Andina	2006-2009 y 2014
Alejandra 2	3780		
Loreto	4121		
Luis	3944		
Sergio	3923		

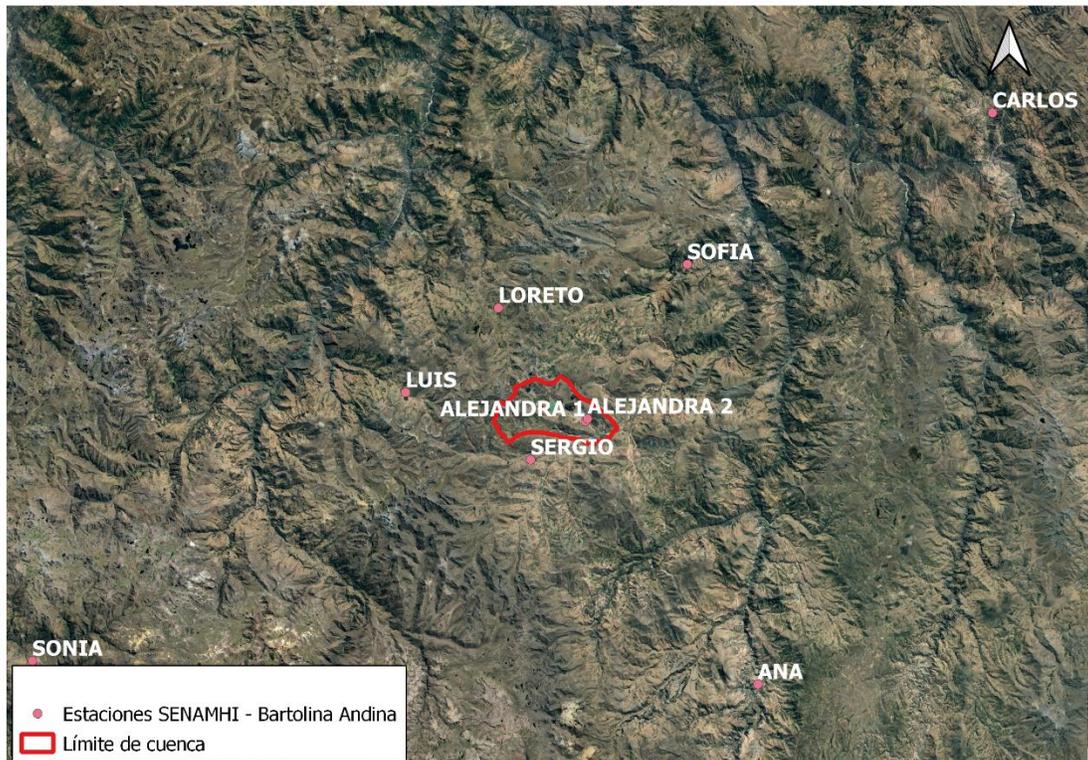


Figura 6-1 Estaciones meteorológicas SENAMHI y Bartolina Andina. Fuente: elaboración propia.

Las nuevas estaciones meteorológicas instaladas desde el 2014 son las que se muestran en la Tabla 6-2. La estación Raúl es la única que parte con mediciones desde el 2014. Las estaciones Tania y Ema empiezan a registrar datos desde el 2015. La ubicación geográfica de estas estaciones se muestra en la Figura 6-2.



Figura 6-2 Estaciones meteorológicas nuevas del rajo Bartolina Andina, instaladas desde el 2014.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-2 Estaciones meteorológicas nuevas utilizadas por la mina. Fuente: elaboración propia.

Estación	Altitud (msnm)	Fuente	Años de registro
Raúl	3792	Mina Bartolina Andina	2014 (sólo Raúl)-2018
Ema	4250		
Tania	4317		

### 6.1.1 Temperatura

Para analizar la temperatura se usaron los registros de temperatura mensual de seis estaciones pertenecientes al SENAMHI: Carlos, Ana, Sofía, Sonia, Viviana y Benjamín; y cuatro estaciones locales operadas por la mina Bartolina Andina: Alejandra, Sergio, Luis y Loreto.

El comportamiento de la temperatura media mensual se observa en el gráfico de la Figura 6-3. Se observa un régimen térmico anual variable, presentando una tendencia similar en todas las estaciones. El período comprendido entre mayo-agosto es el más frío y el período octubre-diciembre el más cálido. Se obtiene que,

a mayor cota altimétrica, se registran temperaturas más bajas. La temperatura promedio de las estaciones va entre los 8°C y 14°C.

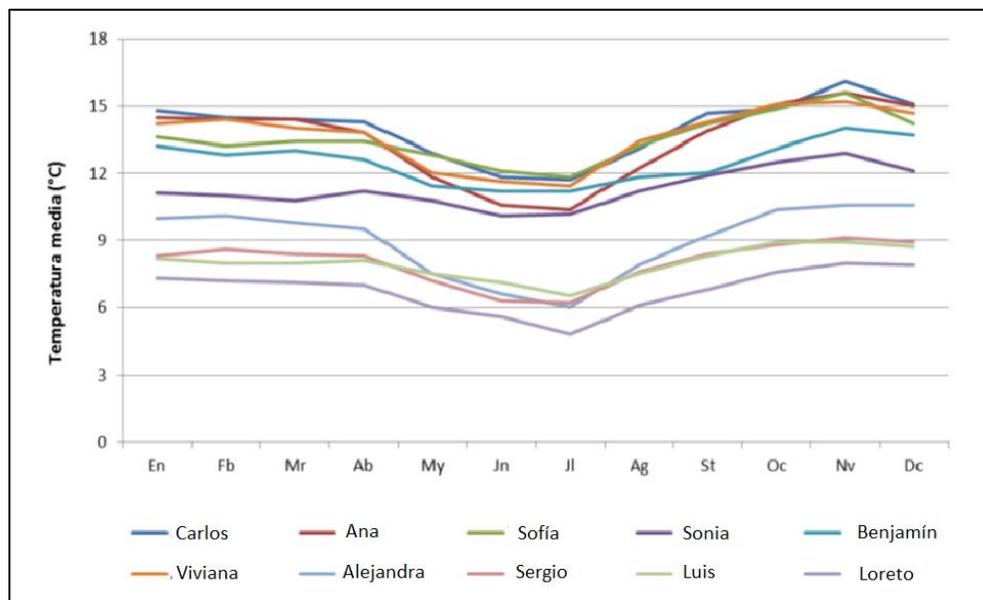


Figura 6-3 Variación mensual de la temperatura por estación. Fuente: Gráfico realizado por SNC Lavin (2014), obtenido del informe Itasca (2015).

El comportamiento de las temperaturas registradas en las nuevas estaciones de Bartolina Andina se muestra en el gráfico de la Figura 6-4. Estas estaciones siguen la tendencia de las estaciones Alejandra, Loreto, Luis y Sergio, que son las más cercanas al proyecto. La estación Tania, que se ubica a mayor cota altimétrica, es la que presenta los valores de temperatura más bajos. Los rangos de temperatura mínima y máxima promedio en las estaciones Ema, Tania y Raúl corresponden a 5,5°C y 10,5 °C, respectivamente.

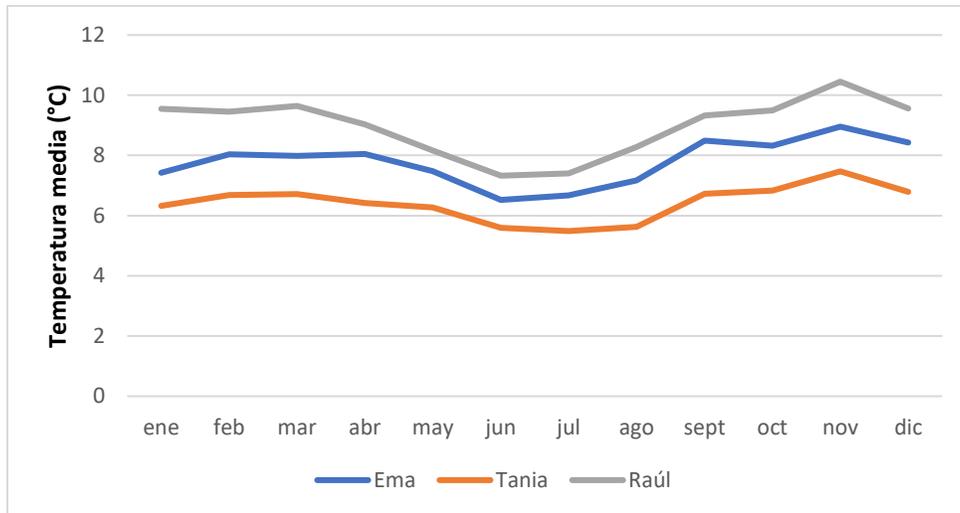


Figura 6-4 Variación mensual de la temperatura para nuevas estaciones. Fuente: elaboración propia.

### 6.1.2 Precipitaciones

Las precipitaciones se obtienen de las estaciones de la Tabla 6-1 y 6-2. Se analizan los datos mensuales de las distintas estaciones, obteniéndose el gráfico de la Figura 6-5. Los datos corresponden a los años 2006-2007 y las estaciones consideradas son las más próximas al área del proyecto. Se observa un régimen similar en todas las estaciones, distinguiéndose dos periodos a lo largo del año 1) época húmeda entre los meses de diciembre y marzo, con precipitaciones que se presentan el 73% del total anual; y 2) una época seca entre mayo a septiembre, con precipitaciones inferiores al 6% del promedio anual (Itasca, 2015).

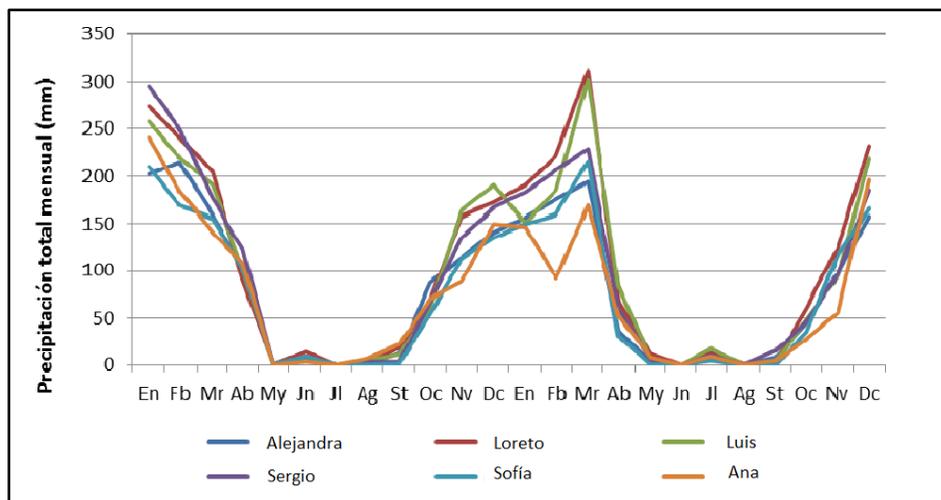


Figura 6-5 Precipitación media mensual. Fuente: Gráfico realizado por SNC Lavin (2014), obtenido del informe Itasca (2015).

Las precipitaciones obtenidas para los años 2015-2018 se observan en el gráfico de la Figura 6-6. Presentan la misma tendencia que las estaciones anteriormente

analizadas. La mayor precipitación promedio mensual se obtiene en la estación Ema y se registra en el mes de febrero con valor de 250 mm/mensual, y la más baja se tiene en la estación Raúl, teniendo un valor de 2,5 mm/mensual.

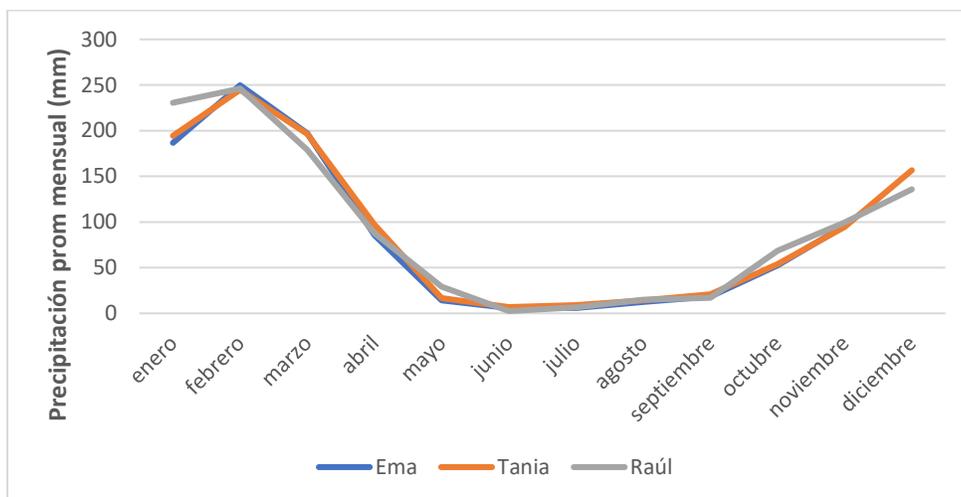


Figura 6-6 Precipitación media mensual para nuevas estaciones de la mina. Fuente: elaboración propia.

Los valores de precipitación total anual para las estaciones consideradas, con su respectiva altitud se muestran en la Tabla 6-3. Los datos correspondientes a las estaciones Alejandra, Loreto, Luis, Sergio, Sofía y Ana fueron obtenidos por la consultora SNC Lavalin (2014).

Tabla 6-3 Precipitación total anual de estaciones con su respectiva altitud. Fuente: SNC-Lavalin, 2014.

Estación	Altitud (msnm)	Precipitación (mm/a)
Ana	3253	763,9
Benjamín	3358	763,4
Sofia	3454	903,7
Alejandra	3792	948,0
Sonia	3817	881,2
Sergio	3923	970,7
Luis	3944	1051,4
Loreto	4121	1124,3

Los valores de precipitación total anual promedio para las estaciones nuevas de Bartolina Andina en el período 2015-2018 son las que muestra la Tabla 6-4. Los

valores son del orden de las estaciones más cercanas al proyecto (estaciones Loreto, Luis, Sergio y Alejandra).

Tabla 6-4 Precipitación total anual de nuevas estaciones meteorológicas. Fuente: elaboración propia.

Estación	Altitud (msnm)	Precipitación (mm/a)
Raúl	3792	1062,7
Ema	4250	977,3
Tania	4317	1023,7

### 6.1.3 Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial (ETP) se incorpora al modelo utilizando el método de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), el cual necesita solo datos de temperatura y radiación solar, ambos medidos por las estaciones de Bartolina Andina. La expresión general es:

$$ET_0 = 0,0135 \cdot (t_{med} + 17,78) \cdot R_s \quad (23)$$

Donde:

$ET_0$ : evapotranspiración potencial diaria, mm/día

$t_{med}$ : temperatura media, °C

$R_s$ : radiación solar incidente, convertida a mm/día

La radiación solar incidente,  $R_s$ , se obtiene a partir de la radiación solar extraterrestre ( $R_0$ ), que llega a la parte exterior de la atmósfera y sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera (Sánchez, 2014). Para obtener  $R_s$ , Samani (2000) propone la siguiente fórmula:

$$R_s = R_0 \cdot KT \cdot (t_{max} - t_{min})^{0,5} \quad (24)$$

Donde:

$R_0$ : radiación solar extraterrestre, en mm/día

$KT$ : coeficiente

$t_{max}$ : temperatura máxima diaria

$t_{min}$ : temperatura mínima diaria

El valor de  $R_0$  se obtiene de tablas, en función de la latitud y mes. El coeficiente  $KT$  es un coeficiente empírico que se puede obtener a partir de datos de presión atmosférica, pero Hargreaves recomienda  $KT = 0,162$  para regiones en interior y  $KT = 0,19$  para regiones costeras (Samani, 2000). El promedio entre los valores

resulta en  $KT = 0,17$  y es el valor que se usa con más frecuencia. Finalmente, reemplazando (24) en (23) y utilizando el valor promedio de  $KT$  se obtiene:

$$ET_0 = 0,0023 \cdot (t_{med} + 17,78) \cdot R_0 \cdot (t_{max} - t_{min})^{0,5} \quad (25)$$

El valor de ETP fue calculado por Itasca (2018) utilizando los datos meteorológicos diarios de las estaciones de la Tabla 6-2. Los datos que se utilizan corresponden al período de enero 2015 y agosto 2018, pero existen períodos donde no existe información.

Los datos utilizados para el cálculo son:

- Temperatura media diaria (°C)
- Temperatura máxima diaria (°C)
- Temperatura mínima diaria (°C)
- Radiación solar extraterrestre (mm/d)

La variable temperatura de cada estación de monitoreo se gráfica y se muestra en la Figura 6-7. Además, en la Figura 6-8 se observa el promedio de las variables obtenido con las medidas de las tres estaciones de monitoreo.

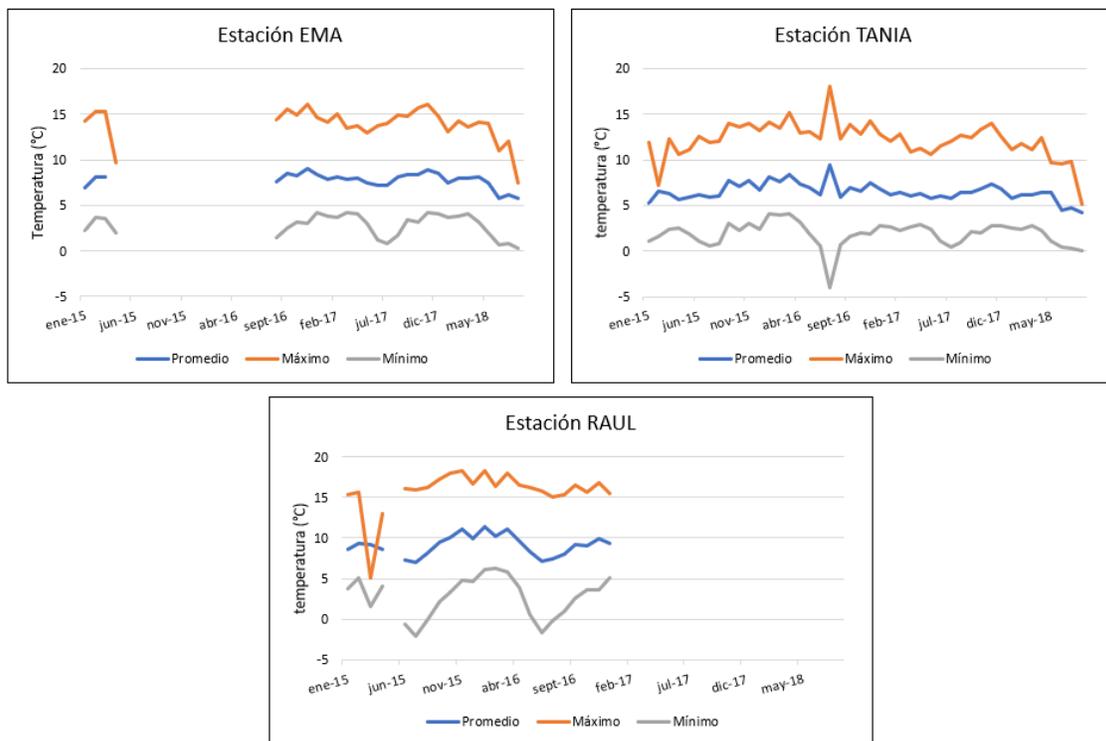


Figura 6-7 Registro de temperatura para cada estación de monitoreo meteorológica. Fuente: Itasca, 2018.

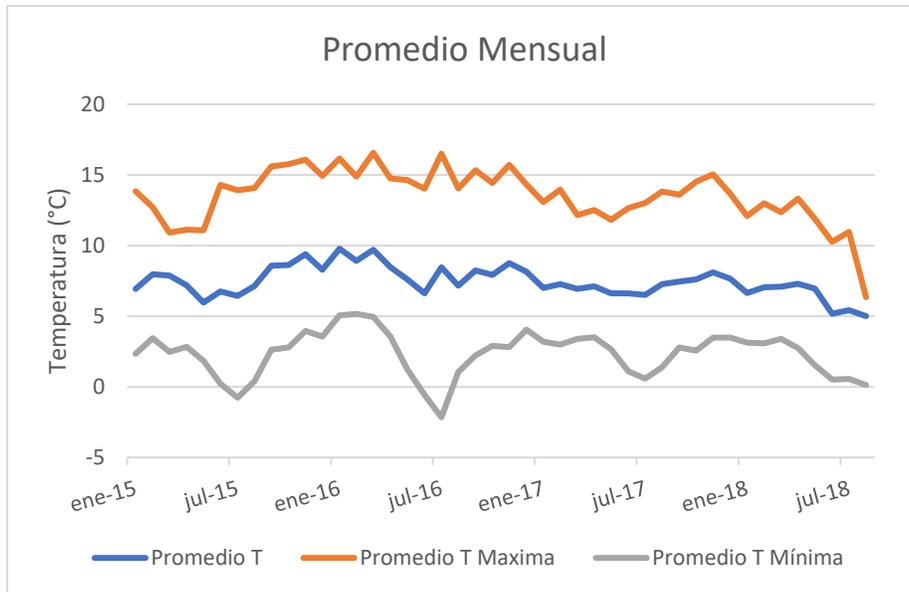


Figura 6-8 Temperatura media mensual de las estaciones meteorológicas disponibles. Fuente: Itasca, 2018.

La radiación solar extraterrestre promedio se calcula en base a la tabla de ANEXOS 2, utilizando el valor correspondiente a latitud 18 de hemisferio sur. El comportamiento de este parámetro se muestra en el gráfico de la Figura 6-9.

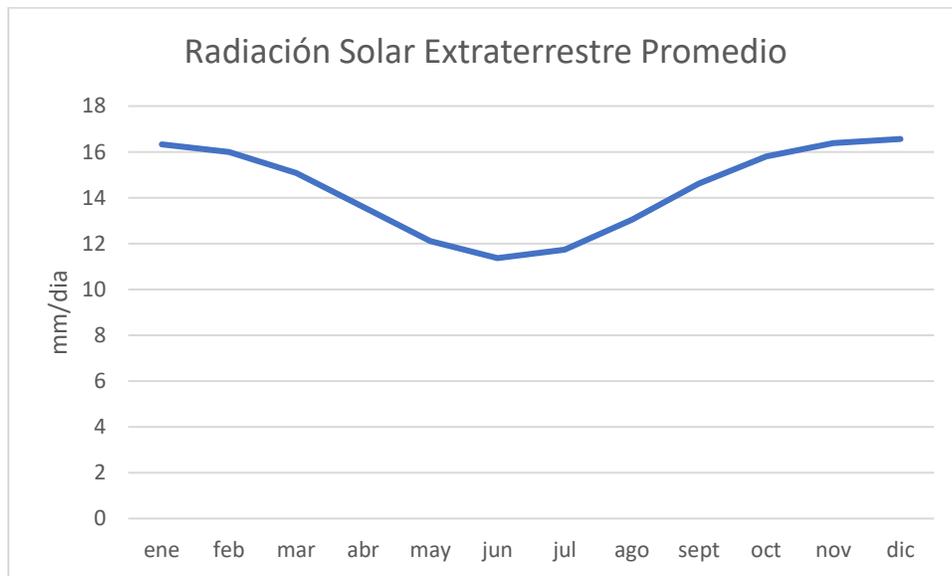


Figura 6-9 Radiación solar extraterrestre promedio en las estaciones disponibles. Fuente: Itasca, 2018.

Los valores de ETP calculados por el método de Hargreaves arrojan un rango de valores entre 1,5 y 3,5 mm/día, lo que se traduce en valores entre 20 y 40 l/s de evaporación considerando la superficie del Rajo Bartolina. Las mayores tasas de evapotranspiración se producen en los meses de noviembre y diciembre, mientras

que las tasas más bajas se producen entre mayo y junio, lo que se observa en el gráfico de la Figura 6-10.

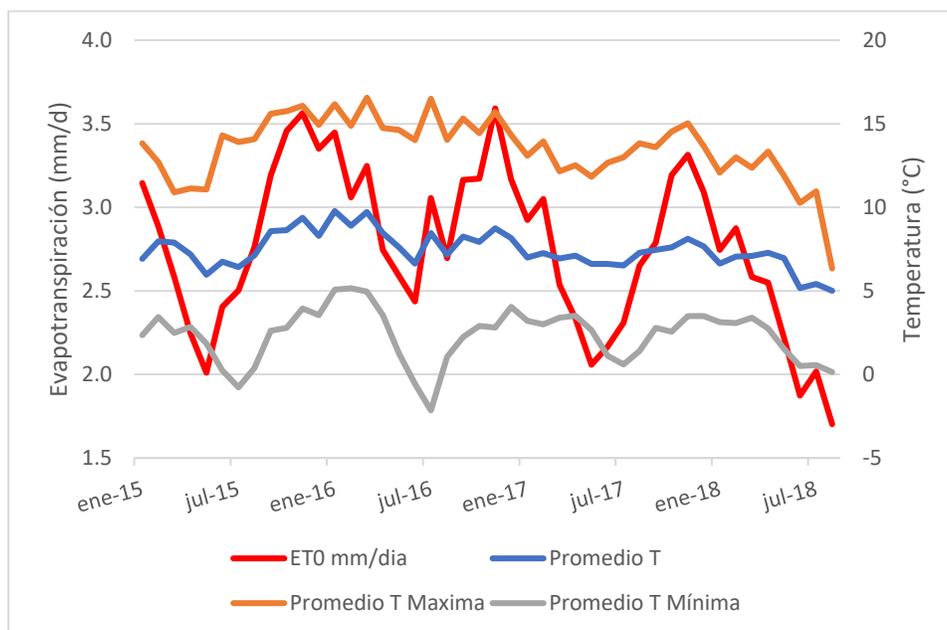


Figura 6-10 Evapotranspiración potencial en rajo Bartolina Andina. Fuente: Itasca, 2018.

## 6.2. Hidrología

El área de estudio se centra en la cuenca del río Bartolina y Amaru, mostrados en la Figura 6-11. En el informe realizado por Itasca (2015) el estudio se centra en un área más grande a la modelada actualmente, ya que contempla la realización de dos rajos más, los cuales, a la fecha, no parten su funcionamiento. La información hidrológica presentada en esta memoria corresponde a una unificación de las dos cuencas (Bartolina y Amaru).

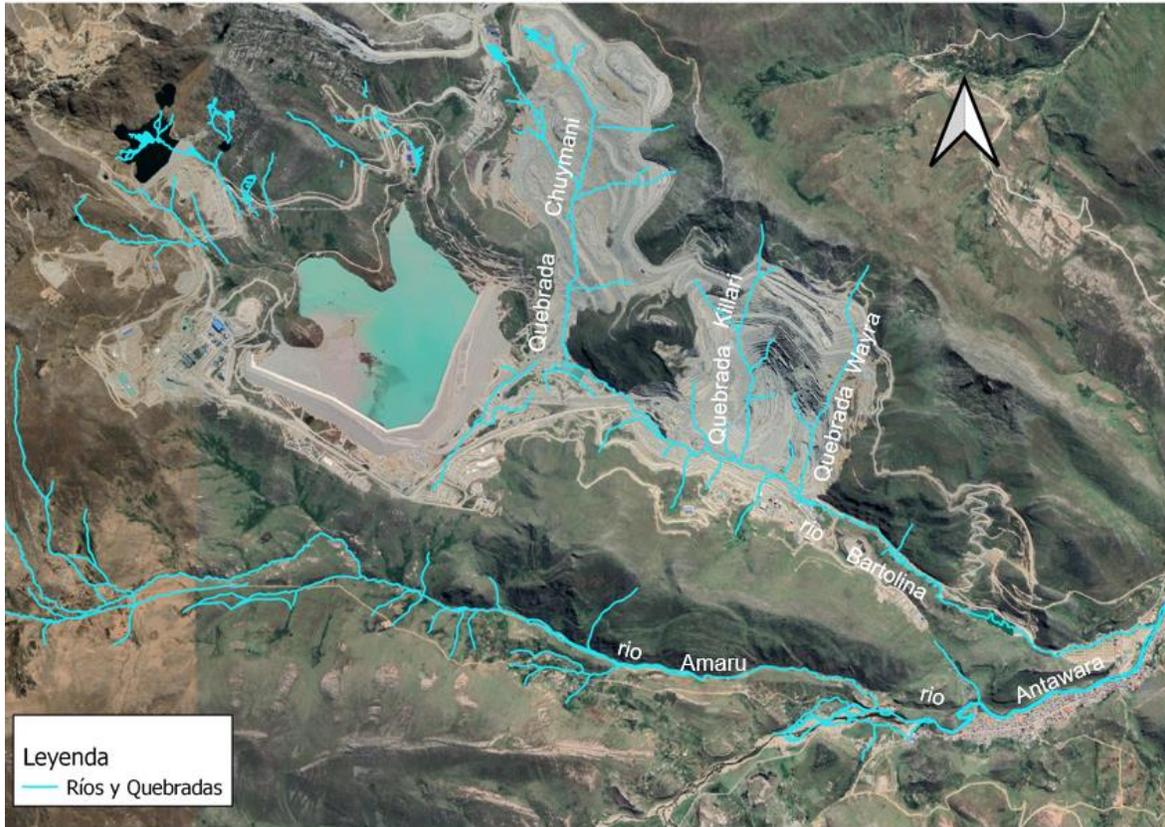


Figura 6-11 Ríos y quebradas en cuenca Bartolina. Fuente: elaboración propia.

Las características hidrológicas son caracterizadas con información obtenida durante los años 2006, 2007 y 2008 donde se realizó un programa de monitoreo de flujo base, donde midieron flujos en ríos, arroyos y manantiales ubicados en el área de estudio. También se suma información obtenida de los datos recogidos el 2014 por la mina Bartolina Andina.

La cabecera de la cuenca Bartolina se encuentra a una elevación aproximada de 4600 msnm, y en su desembocadura, en el río Antawara, se sitúa a unos 3600 msnm. Los principales afluentes de río Bartolina son los ríos Wara y Chuymani, ubicados en el lado izquierdo. En la cabecera hay una laguna y dentro de la zona hay diversos manantiales permanentes todo el año.

Según el análisis hidrológico de la microcuenca, donde se analizaron distintas estaciones hidrometeorológicas, se obtiene que la respuesta hidrológica de la cuenca frente a precipitaciones es rápida, produciéndose un incremento de la escorrentía superficial en un corto plazo y aumentando significativamente el caudal circulante por los cauces fluviales principales. Como ejemplo, en la Figura 6-12, se presentan los aforos realizados en tres estaciones durante el 2014. El caudal mínimo aforado en el río Bartolina, según Itasca (2015), es el orden de 36 a 56 L/s y el máximo fluctúa entre los 34 y 89 L/s.

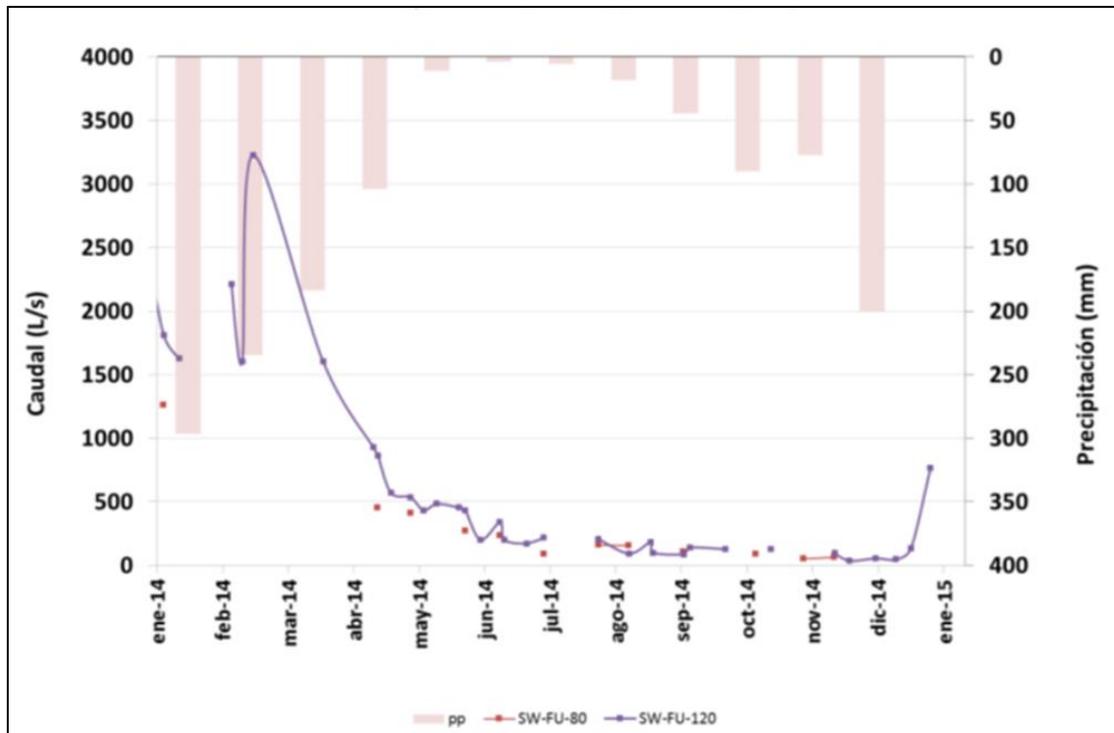


Figura 6-12 Aforos realizados en el río Bartolina, en estaciones ubicadas en la zona final del río, aguas abajo de la ubicación del rajo. Fuente: Itasca, 2015.

La condición anteriormente presentada corresponde al estado base del río, el cual presenta en un general un comportamiento bastante estacional. En la actualidad, el río se encuentra muy antropizado, con infraestructuras que afectan el cauce natural del río modificando secciones o pendientes, alterando el caudal circulante e incluso el régimen fluvial. Las infraestructuras presentes en el área son:

- Presa de agua fresca de Katari: zona de cabecera.
- Presa de relaves: aguas arriba de la quebrada de Chuymani y el rajo Bartolina.
- Poza de sedimentación: aguas arriba del rajo Bartolina y en la confluencia de la quebrada Chuymani.
- Poza de clarificación: aguas abajo del rajo Bartolina y antes los manantiales del barrio Antawara.

Las estructuras anteriormente mencionadas se encuentran total o parcialmente impermeabilizadas, por lo que la relación río-acuífero se ve modificada.

Otro aspecto importante para considerar en la estimación de la línea base del río, ya que el río recibe aportes de canales perimetrales (aguas no contactadas) que bordean los botaderos y el rajo. Estos caudales no están aforados o con datos

continuos. A su vez, el río recibe también las aguas bombeadas del interior del rajo (procedentes de pozos y balsas de drenaje).

Respecto al río Antawara, que se ubica en el punto de salida de la cuenca, este confluye con río Amaru. Tiene una longitud de 4 km, y presenta un gradiente relativamente bajo. Se encuentra en el margen derecho del río el manantial de Antawara. El comportamiento del río presenta relación con la pluviometría de la zona, coincidiendo los caudales punta con el período de lluvias y caudal base con el período de estiaje. El río Antawara se comporta como un río ganador, actuando a nivel base.

La cabecera del río Amaru se encuentra a una elevación de 4600 msnm, lugar donde pequeños cursos de agua confluyen en dirección sur y forman el río Amaru, que continúa su curso en dirección Este hasta encontrar al río Antawara. Tiene una longitud de 13 km. Los análisis realizados por Itasca, muestran que presenta pérdidas de caudal en su tramo final, lo que recargaría el acuífero subyacente y devuelve parte del caudal en algún punto aguas abajo del río Antawara.

### **6.3. Análisis de recarga**

Los estudios realizados por Itasca determinan que las áreas de recarga se sitúan en las zonas altas de la cabecera, y las descargas se producen en forma de manantiales y/o a través de los ríos que drenan el área de estudio (Itasca, 2018). La mayoría de los manantiales se dan en la zona de contacto entre calizas y rocas intrusivas, siendo el más importante el manantial de Antawara, ubicado en el punto de salida de la cuenca.

Para el cálculo de recarga y descarga se tienen dos estudios realizados por Itasca, el primero corresponde al realizado dentro del modelo conceptual (Itasca, 2015) y se obtiene un valor de recarga obtenido por un modelo hidrológico realizado en SWAT (*Soils and Water Assessment Tool*), código de la plataforma ArcGis. En el segundo informe la recarga es obtenida mediante un estudio de karst, mediante el método APLIS.

El método SWAT modela diferentes procesos hidrológicos que suceden a nivel de laderas y vertientes de cuencas o microcuencas. Requiere diversos parámetros de entrada como la información topográfica (relieve, variación y dirección de la pendiente, red de drenaje), tipo y usos de suelos y datos meteorológicos (precipitación, temperatura, evaporación, etc.) (Itasca, 2015). El análisis realizado por Itasca (2015) busca representar una zona más extensa que la considerada en el modelo actual, ya que toma en cuenta toda el área donde se desarrollarán los futuros rajos mineros del proyecto. De todas formas, el modelo se desarrolla en la cuenca del rajo Bartolina Andina, ya que en ese entonces era la única zona donde se tenía más información recopilada.

Como resultado, el modelo SWAT entrega que para el período 2000-2015 la precipitación media es de 1008,07 mm/año y en promedio la recarga anual para ese mismo período es de 173,08 mm, que corresponde a un 17% de la precipitación en la cuenca. También se obtiene un valor de recarga para cada unidad litológica presente en la cuenca de Bartolina Andina. La variación de la recarga para las calizas es de entre un 12% y 23% (valor que en estudio posterior se corrige), intrusivos con rango entre 11% y 25% de la precipitación y volcánicos entre un 7% y 11% de precipitación. La variabilidad de la recarga para cada unidad litológica depende en gran parte de la variación de la altitud y de la pendiente. En zonas de mayor presencia de rocas intrusivas, que se encuentran a mayor altitud y presentan geomorfologías más redondeadas (producto de la erosión glacial), se observa un mayor porcentaje de recarga, mientras que, en calizas de menor altitud, con geomorfologías más abruptas, se observa un menor porcentaje de recarga. Las zonas con mayor presencia de roca volcánica presentan mejores porcentajes de recarga ya que estos afloramientos se observan en las cotas más bajas de la cuenca (Itasca, 2015).

Debido a que el área que rodea el rajo presenta una gran zona de calizas karstificada resulta necesario conocer de manera más acabada el comportamiento de la recarga en esa zona, ya que es una zona preferente donde el agua ingresa al acuífero. Debido a esto, Itasca desarrolla un estudio centrado exclusivamente en esta zona (Itasca, 2015). Este estudio de recarga corresponde a un estudio kárstico utilizando el modelo APLIS. Este modelo permite estudiar la tasa de recarga autóctona en acuíferos carbonáticos (expresada como un porcentaje de la precipitación) combinando diferentes variables geográficas (altitud y pendiente) y geológicas (litología, formas de infiltración y suelo). La tasa media de recarga anual y su distribución espacial se obtiene de la superposición cartográfica de los mapas de estas variables, mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El área del estudio está caracterizada por rocas carbonáticas permeables por fisuración y karstificación. Sin embargo, en ciertos sectores aflora material de baja permeabilidad (depósitos cuaternarios) que cubren los carbonatos e impiden la infiltración directa del agua de lluvia. Esto, en conjunto a la elevada pendiente que presentan algunas zonas del área de estudio, sobre todo en las laderas de los valles de Bartolina Andina, puede provocar escorrentía superficial.

La estimación realizada por el modelo presenta un carácter cuantitativo, pero una parte de las variables que se utilizan en el método son de carácter cualitativo (zonas preferenciales de infiltración y suelo), por ello se deben convertir a valores numéricos para su tratamiento. La transformación se realiza según los valores de las tablas de la Figura 6-13.

A		B		C	
Altitud (m)	Puntuación	Pendiente (%)	Puntuación	Litología	Puntuación
> 2700	10	≤3	10	Calizas y dolomías karstificadas	10 - 9
2400 - 2700	9	3 - 5	9	Mármoles fracturados algo karstificados	8 - 7
2100 - 2400	8	5 - 10	8	Calizas y dolomías fisuradas	6 - 5
1800 - 2100	7	10 - 15	7	Arenas y gravas, coluviones	4
1500 - 1800	6	15 - 20	6	Brechas y conglomerados	3
1200 - 1500	5	20 - 30	5	Rocas plutónicas y metamórficas	2
900 - 1200	4	30 - 45	4	Esquistos, pizarras, limos y arcillas	1
600 - 900	3	45 - 65	3		
300 - 600	2	65 - 100	2		
≤300	1	> 100	1		

D		E	
Desarrollo de formas de infiltración preferencial	Puntuación	Suelos	Puntuación
Alto desarrollo de las formas de infiltración preferencial	10	Litsoles	10
Desarrollo moderado de las formas de infiltración preferencial	5	Aerosoles Álbicos y Xerosoles Cálcidos	9
Escaso desarrollo o ausencia de las formas de infiltración preferencial	1	Regosoles Calcáreos y Fluvisoles	8
		Regosoles Eútricos, Dístricos y Solonchaks	7
		Cambisoles Cálcidos	6
		Cambisoles Eútricos	5
		Histosoles Eútricos, Luvisoles Órticos y Cálcidos	4
		Luvisoles Crómicos	3
		Planosoles	2
		Vertisoles Crómicos	1

F	
Características hidrogeológicas de los materiales que afloran (F <sub>h</sub> )	Puntuación
Características acuíferas	1
Otros	0,1

Figura 6-13 Valores a considerar en los parámetros del modelo de recarga según modelo APLIS.  
Fuente: Itasca, 2015.

Los valores de la figura van de 1 a 10. El valor 1 indica una mínima incidencia de los valores en esa variable en la recarga del acuífero, mientras que 10 indica la máxima influencia en la recarga.

Para la variable “Altitud” se observa una progresión aritmética, donde la precipitación y la recarga del acuífero aumentan conforme la altitud. En el modelo actual se puntúa con valor 10, ya que este método está diseñado para zonas de recarga situadas entre 0 y 2700 msnm, por lo que se puntúa con el máximo valor.

En la variable “Pendiente” los valores disminuyen conforme la pendiente aumenta, ya que a mayor pendiente, mayor escorrentía y menor recarga.

Para la variable “Litología” se basa en función de los criterios hidrogeológicos relacionados a la permeabilidad (grado de fracturación y karstificación).

Para la variable “Infiltración” toma en cuenta la abundancia de formas de absorción y su capacidad potencial de infiltración preferencial.

En la variable “Suelo” la diferencia entre cada uno se hace en base a las características de espesor y textura de sus horizontes, que están relacionadas con el tipo y permeabilidad del suelo. Sobre esta variable no se tenía información

detallada, por lo que en base a la clasificación de suelos del Ministerio de Agricultura y Riego del Gobierno de Perú se define como Leptosol éutrico, kastanozem-háplico.

La tasa de recarga calculada por medio de un algoritmo se multiplica por un “Factor Hidrogeológico (Fh)” que considera la capacidad del terreno de dejar pasar el agua en la vertical. El Fh tiene dos valores: 1 para materiales que tiene características acuíferas (debido a litología, porosidad o grado de fracturación), y 0.1 para aquellas litologías que no son acuíferos.

El algoritmo para estimar la recarga es:

$$R = \left[ \frac{(A + B + 3C + 2D + E)}{0.9} \right] \cdot Fh$$

Los valores de recarga se agrupan en cinco grupos según el porcentaje de lluvia que recarga al acuífero, mostrado en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5 Categorías de porcentaje de precipitación que recarga al acuífero. Fuente: Itasca, 2015.

<b>Recarga (%P)</b>	<b>Clase de recarga</b>
≤ 20	Muy Baja
20-40	Baja
40-60	Moderada
60-80	Alta
> 80	Muy Alta

Después del análisis, se concluye que los relieves calcáreos del entorno de Bartolina presentan una tasa de recarga de clase Moderada. Un 11% de la superficie de afloramiento de los relieves entorno a Bartolina presentan una tasa de recarga Baja y Muy Baja. En dichas zonas, la tasa de infiltración es menor a 40% de la precipitación. En la Figura 6-14, se muestra la distribución de la recarga en la zona cerca al rajo Bartolina Andina.

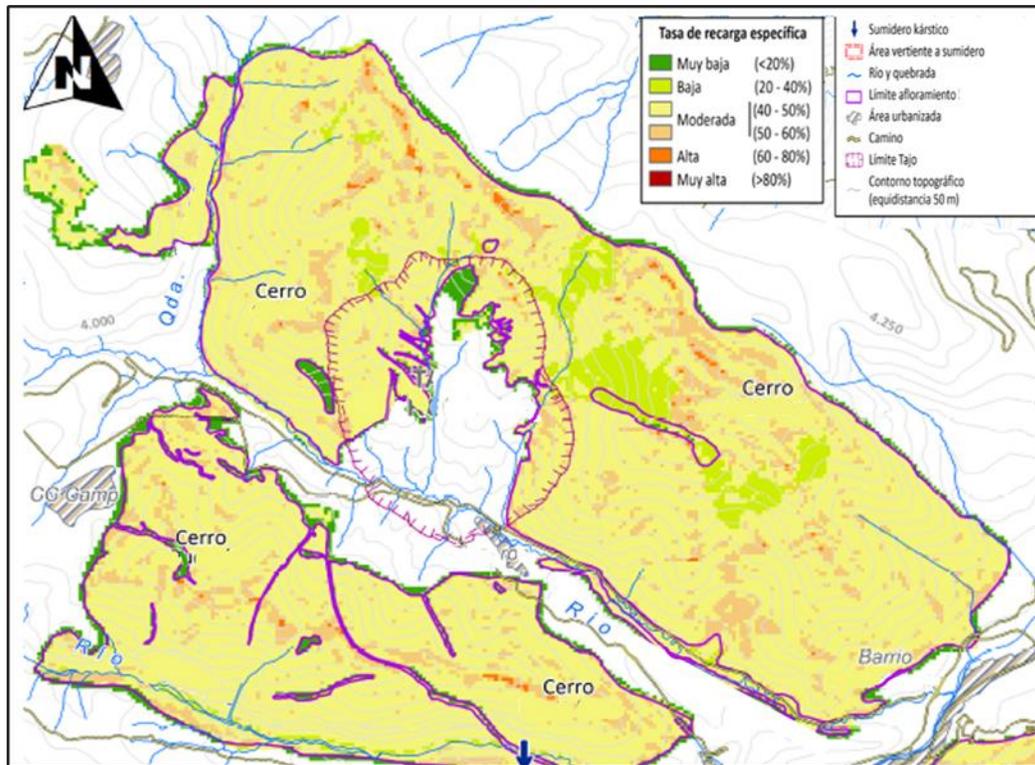


Figura 6-14 Distribución de la recarga entorno al rajo Bartolina. Fuente: Itasca, 2015.

Finalmente, se determina que el área de calizas que rodea a la zona del rajo presenta un rango de recarga entre 40% y 60% de la precipitación, según el estudio de karst. La zona de intrusivos y volcánicos se caracteriza con los valores entregados por el estudio SWAT, entre 11% y 25% y 7% y 11% de la precipitación, respectivamente.

#### 6.4. Geología local

La geología local del lugar presenta unidades litoestratigráficas que corresponden a unidades sedimentarias cretácicas y terciarias, unidades intrusivas, volcánicas y depósitos cuaternarios de origen glacial y aluvial recientes. La distribución y extensión cartográfica de estas unidades se muestran en la Figura 6-15.

La geología estructural del área de estudio se profundiza en el Capítulo 7 del presente trabajo.

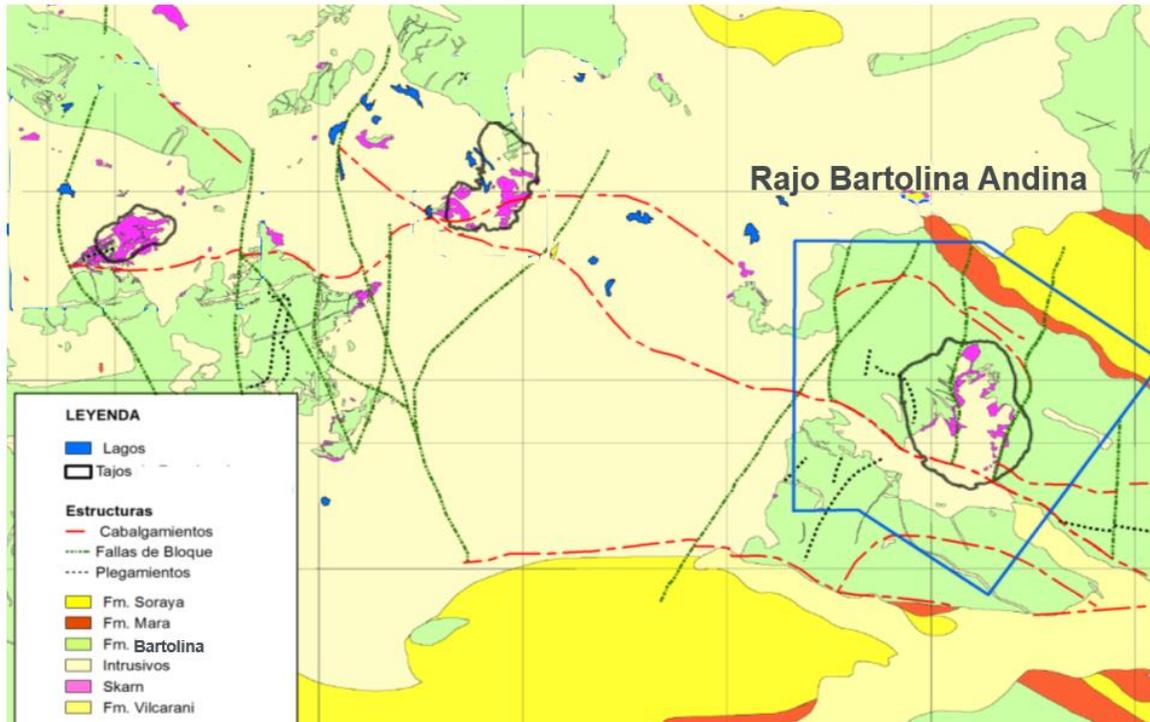


Figura 6-15 Mapa geológico del área de estudio del proyecto Bartolina Andina. Fuente: Realizado por Golder (2010), obtenido del informe Itasca (2015).

## 6.5. Hidrogeología

### 6.5.1 Pozos de observación y pozos de bombeo

El proyecto cuenta con 21 pozos de bombeo, ubicados en los alrededores del rajo, como se muestra en la Figura 6-16.

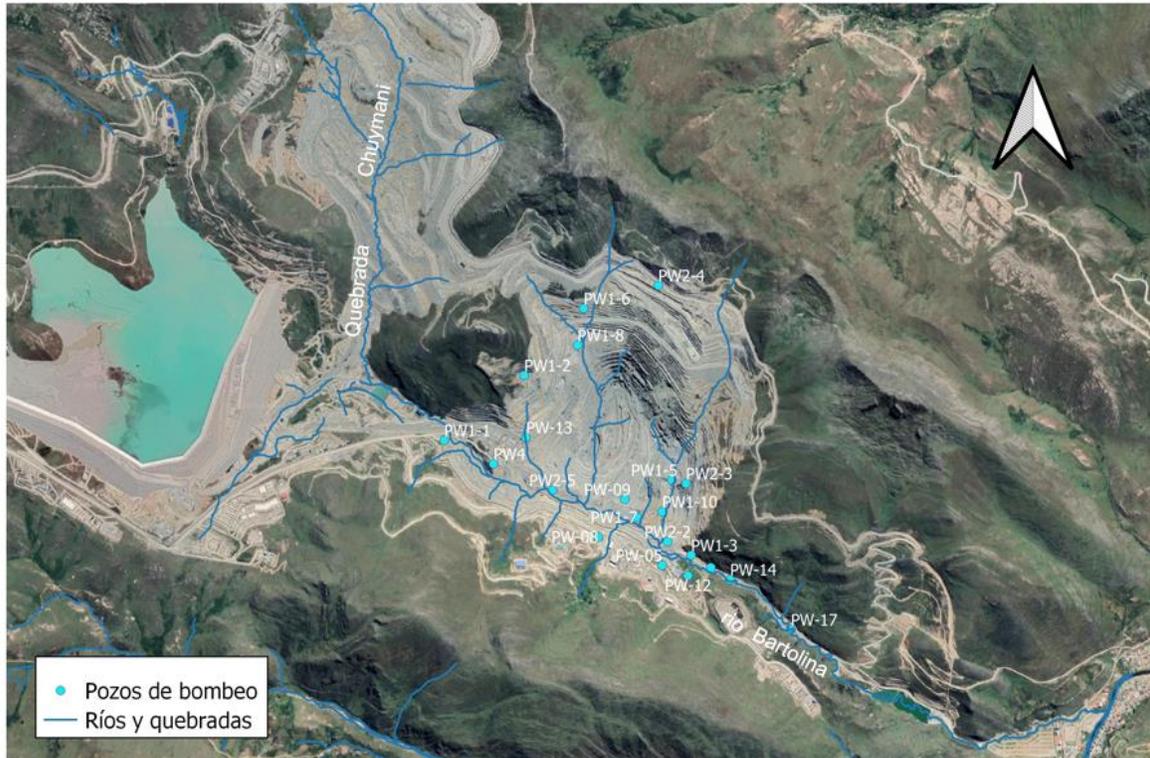


Figura 6-16 Campo de pozos de bombeo presentes en el proyecto. Fuente: Itasca, 2018.

Se disponen de 49 piezómetros distribuidos en toda el área del proyecto, donde hay una mayor densidad de estos en la zona del rajo. La Figura 6-17 muestra la ubicación de los pozos de observación en el proyecto.



de magnitud en la mayoría de los casos y superior a 8 órdenes de magnitud para las calizas y rocas intrusivas.

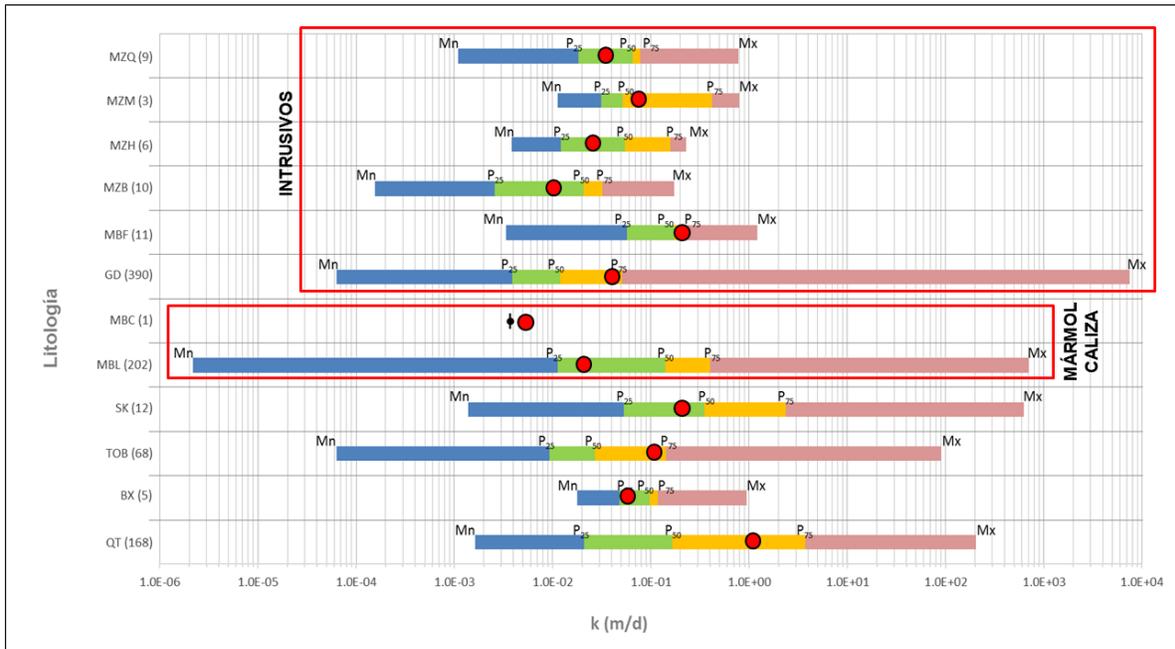


Figura 6-18 Rangos de conductividad para cada unidad litológica identificada. En el eje vertical se indica el nombre de la unidad y el número de ensayos *packer* realizado en la unidad. Fuente: Itasca, 2017.

De la Figura 6-18 también se desprende que las calizas e intrusivos presentan mayores rangos en sus valores de conductividad. Análisis realizados por Itasca (2015) presentan que las calizas más frescas presentan valores de conductividad hidráulica menores, mientras que las calizas meteorizadas o karstificadas presentan valores más altos, con diferencias de hasta 5 órdenes de magnitud. La misma variación sucede con la roca intrusiva. En las Figura 6-19 y 6-20 se muestran la variación de las conductividades en caliza e intrusivo según profundidad.

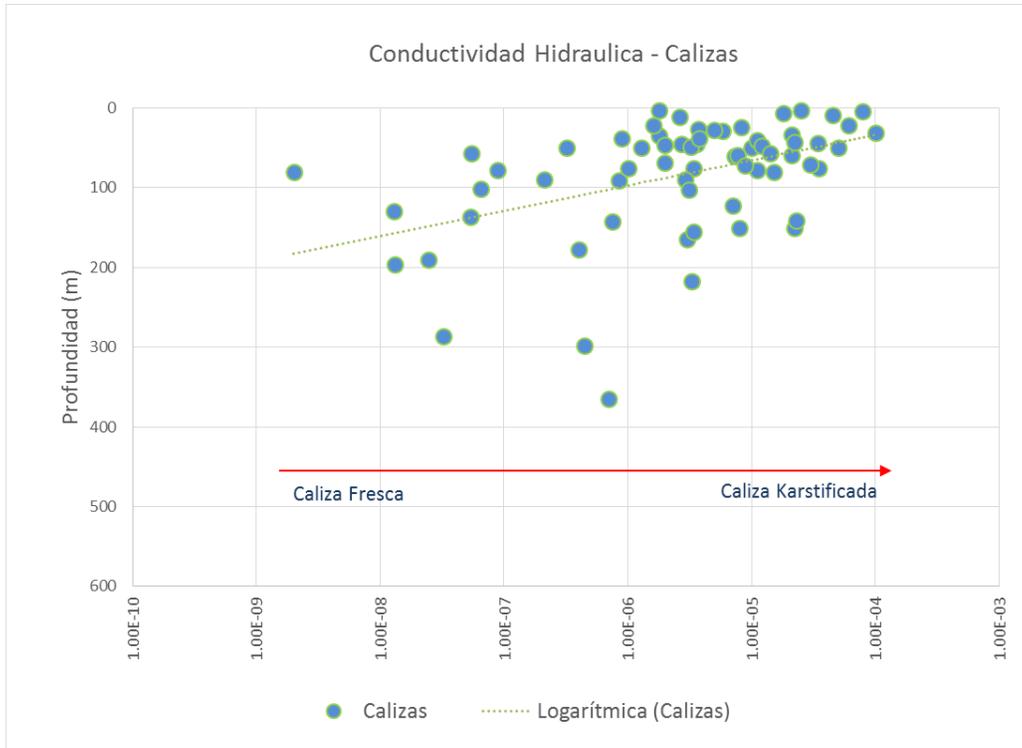


Figura 6-19 Conductividad hidráulica (m/s) de calizas vs profundidad (m). Fuente: Itasca, 2015.

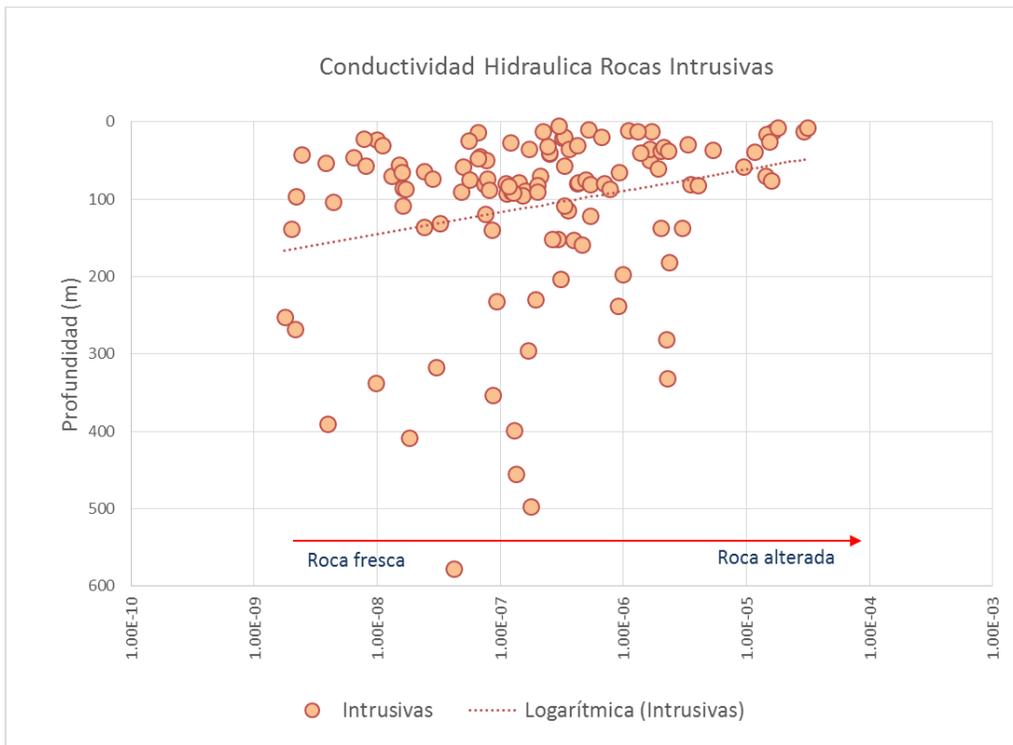


Figura 6-20 Conductividad (m/s) de intrusivos vs profundidad. Fuente: Itasca, 2015.

En las figuras anteriores se puede ver una ligera tendencia de que la conductividad decrece con la profundidad, la fracturación y karstificación controlan la conductividad. Existen permeabilidades altas a profundidades superiores a los 100 m y hasta 200 m, lo que podría evidenciar que el flujo subterráneo está condicionado por los dominios estructurales en el caso de las rocas intrusivas, y la existencia de un karst profundo desarrollado en el caso de las calizas (Itasca, 2015).

### **6.5.3 Límite hidrogeológico del modelo**

El área del modelo tiene un área de 73 km<sup>2</sup>, abarca la cuenca de Bartolina y Amaru, los altos de Antawara hasta el río Antawara y el rajo Bartolina Andina. Los límites son definidos considerando piezometrías definidas a lo largo de los años 2014, 2015 y 2016, el substrato geológico y la extensión de las cuencas hidrográficas de los ríos Bartolina y Amaru.

Los límites asignados se muestran en la Figura 6-21 y son los siguientes:

- Límite impermeable (límite de cuenca):
  - Divisoria de aguas occidental de las cuencas Amaru y Bartolina al oeste del modelo.
- Límite impermeable (contacto geológico):
  - Contacto geológico entre formación Mara y Bartolina al norte del rajo Bartolina.
  - Contacto geológico entre las formaciones Mara y Soraya y la formación Bartolina, y las rocas intrusivas al sur de rajo Bartolina.
- Límite permeable (nivel base):
  - Tramo del río Antawara que colinda con el barrio Antawara, al SE del modelo.

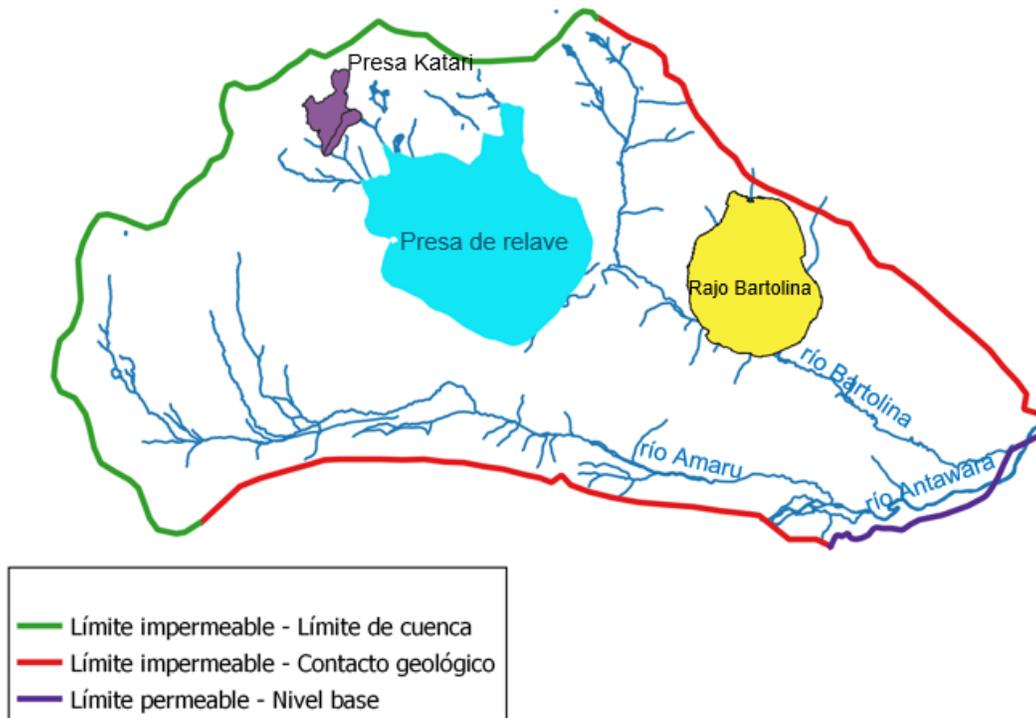


Figura 6-21 Límites hidrogeológicos del modelo. Fuente: elaboración propia.

#### 6.5.4 Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas identificadas en Bartolina Andina son las siguientes:

- Depósitos Cuaternarios

Unidad hidrogeológica formada por depósitos glaciares, aluviales y fluvio-glaciares, los cuales se presentan sobre el basamento rocoso y se extienden tanto en los fondos de los valles como en sus vertientes. Los depósitos cuaternarios que se considera en el área modelada se extienden en el tramo bajo de los ríos Bartolina y Amaru y en la zona del río Antawara. En esta unidad se realizaron 168 ensayos a profundidades variables entre 3 a 35 m, presentando una conductividad hidráulica de  $1E-06$  m/s (Itasca, 2017).

- Depósitos Volcánicos

Esta unidad se observa en el sector sureste del área de estudio y aguas abajo del río Bartolina y río Amaru sobre rocas calizas. El espesor de estos depósitos varía entre 30 y 50 m y presentan baja permeabilidad, por lo que su conexión con las rocas que le subyacen es limitada. En esta unidad se realizaron 68 ensayos con una conductividad hidráulica promedio  $2E-07$  m/s (Itasca, 2017).

- Rocas Intrusivas

Unidad presenta una importante distribución areal, compuesta principalmente por granodioritas y monzonitas. Se encuentra altamente meteorizada hasta una profundidad de 50 m, aproximadamente. A profundidades mayores, las rocas se presentan frescas y mucho más competentes, por lo que su permeabilidad característica es más baja. En esta unidad se realizaron 493 ensayos a profundidades variables entre 4 y 570 m. Los rangos de conductividad son muy variables en respuesta tanto a la profundidad, como al grado de alteración y presencia de discontinuidades, obteniéndose una dispersión de valores de hasta 8 órdenes de magnitud. Los valores mínimos van desde  $8E-08$  m/s que corresponden a tramos de roca fresca hasta  $8E-02$  m/s correspondiente a rocas más alteradas y meteorizadas. La conductividad promedio es de  $2E-07$  m/s (Itasca, 2017).

- Calizas

La unidad está formada por calizas masivas, compactas y estratificadas con un espesor total reconocido de hasta 800 m. Esta unidad se extiende por todo el ámbito de estudio y principalmente en el entorno del rajo Bartolina. Las calizas presentan a veces algún grado de karstificación superficial. Se han realizado 202 ensayos a profundidades variables desde 2 a 360 m, con valores de conductividad hidráulica mínima de  $2E-11$  m/s, en caliza fresca e inalterada a máxima de  $7E-03$  m/s, en caliza alterada y karstificada, con valores medios del orden de  $2E-06$  m/s (Itasca, 2017).

- Skarn

La unidad está asociada a mineralización, de tipo endoskarn o exoskarn. Se realizaron 11 pruebas de conductividad, presentando valores con un rango amplio de conductividades entre  $1E-08$  y  $8E-03$  m/s, con una media de  $5E-06$  m/s. El skarn se encuentra asociado al substrato carbonatado o intrusivo alternado sus características originales, por lo que se ha tratado como substrato alterado, en él se han modificado sus características hidrogeológicas iniciales (Itasca, 2017).

## 6.6. Balance Hídrico

En el balance hídrico de la cuenca, mostrado en la Figura 6-22, se toman en cuenta los elementos que directa o indirectamente contribuyen en aportes y extracciones de agua al sistema subterráneo. Las condiciones en la zona de la cuenca de Bartolina y Amaru orientan el análisis a la disponibilidad de precipitación (infiltración de agua lluvia) como entrada principal de agua al sistema, y las salidas a través de los manantiales, los ríos, las extracciones desde los pozos implementados por Bartolina Andina, evapotranspiración y los afloramientos de agua en el propio rajo (*seepage*), y el río Antawara, al SE del modelo.

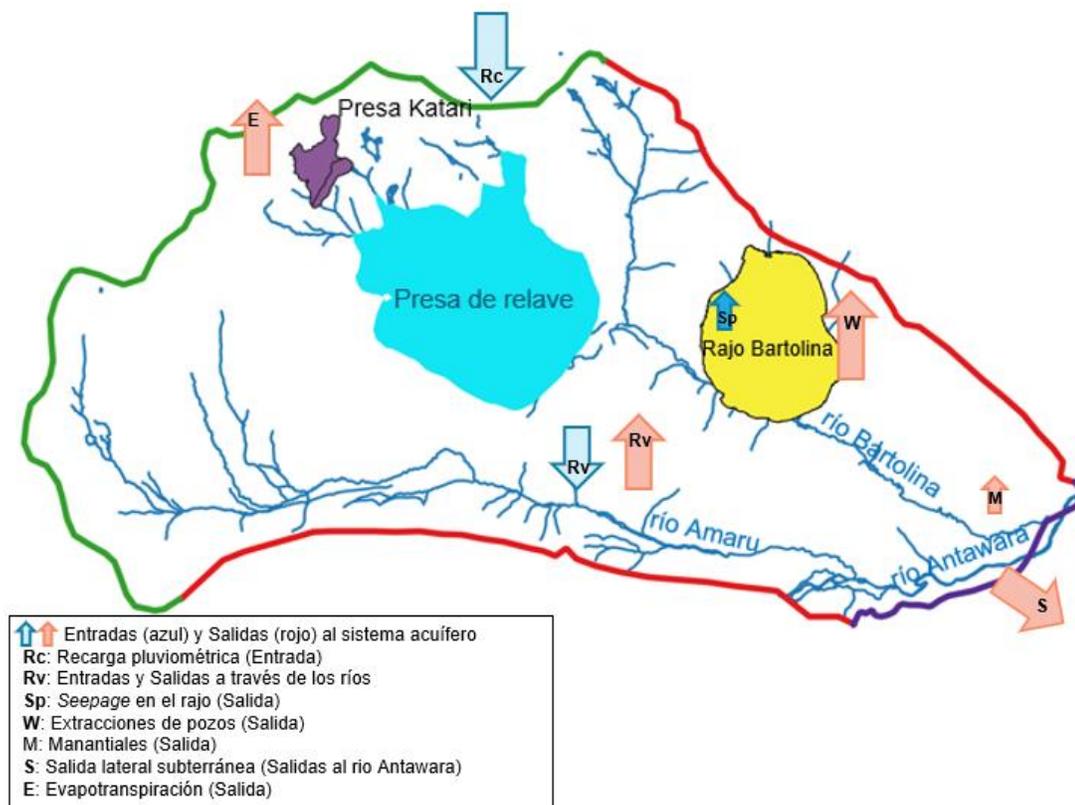


Figura 6-22 Balance hídrico de la cuenca. Fuente: elaboración propia.

## 6.7. Análisis y resumen de modelo conceptual Bartolina Andina

El modelo conceptual presentado corresponde a una recopilación de diversos informes y datos obtenidos por Itasca en el transcurso de los años. La información meteorológica de la cuenca comprendida antes del 2014 (gráficos de precipitación, temperatura y caudales bases de los ríos presentes), corresponde a información obtenida por Itasca a través de informes elaborados por otras consultoras. Los únicos datos recibidos directamente por la empresa minera corresponden a información comprendida entre los años 2014 y agosto del 2018. Estos datos corresponden a las estaciones más cercanas al rajo (estación Tania, Ema y Raúl). La información entregada por las estaciones brindaría una noción más precisa de cómo sería el comportamiento hidrológico del lugar. Sin embargo, resulta complejo realizar un análisis hidrológico con una data de medición tan corta, por lo tanto, el comportamiento hidrológico de la cuenca del rajo Bartolina Andina es determinado en gran medida, por los análisis realizados a estaciones de los alrededores de la cuenca en estudio.

Es importante mencionar que las diversas campañas de mediciones realizadas por las consultoras a lo largo de los años presentan un denominador común: la falta de datos meteorológicos históricos en la zona. Las estaciones meteorológicas del

SENAMHI ubicadas en los alrededores de la cuenca del rajo tienen una alta intermitencia en las mediciones, existiendo series de años continuos donde no hay datos. Esto conlleva a que las consultoras que analizaron esta información tuvieron que realizar un análisis estadístico complejo de relleno de datos. Esto dificulta el entendimiento del comportamiento hidrológico de la cuenca, complejizando la certeza que tendrán los resultados del modelo numérico del rajo.

A pesar de lo anterior, se ha podido caracterizar el área del rajo, ya que el comportamiento de las estaciones más actuales del rajo sigue la tendencia de las estaciones más alejadas de la zona. Complementando esta información con los análisis de diversos ensayos hidráulicos realizados en la zona y con la completa información geológica que se tiene del lugar, se ha logrado caracterizar la cuenca en estudio y se obtiene la información necesaria para definir las variables del modelo numérico. Respecto a la información geológica, esta se profundiza en el Capítulo 7 donde se realiza una recopilación más profunda a este tema, que complementa a la información presentada en este capítulo.

Respecto a la caracterización de la cuenca en estudio y rajo Bartolina Andina existe un sistema acuífero presente principalmente, en las calizas de la Formación Bartolina. Este es un acuífero fisurado y parcialmente karstificado, con rocas intrusivas que atraviesan el acuífero, individualizando las calizas en diferentes bloques. La roca intrusiva divide el acuífero de calizas en subsistemas más o menos interconectados entre sí (Itasca, 2018).

El flujo subterráneo se produce de NO-SE, siendo dominado por las principales discontinuidades estructurales, aunque esta dirección podría variar según variaciones locales a causa la estructura geológica local y topografía.

Las zonas de recarga se identifican en las zonas altas y medias de cabecera de la cuenca, ubicadas principalmente en el área de calizas karstificadas que rodean el área del rajo. Las descargas se producen en forma de manantiales y/o ríos que drenan el área de estudio. Los manantiales que se generan en la cuenca se provocan en zonas donde existe un contacto entre calizas y rocas intrusivas.

La recarga se produce principalmente a partir de infiltración directa de agua lluvia, y se registra un menor aporte provocado por pérdidas de caudal en los cauces de los ríos Bartolina y Amaru. Como menciona el estudio de karst (Itasca, 2015), la recarga se define entre un 40% y 60% de la precipitación, aumentando con la altura según la variación de la pluviometría con la altitud. Las estructuras kársticas ubicadas en los alrededores del rajo son las áreas donde se infiltra preferencialmente el agua. Por otro lado, la tasa de recarga de las rocas intrusivas se ha considerado entre el 11 y 25% de la precipitación y para volcánicos entre 7% y 11% de la precipitación.

Los rangos de permeabilidad de las unidades hidrogeológicas se han asignado a partir de los resultados de los ensayos de caracterización hidrogeológica

disponibles. En los datos se observa una gran dispersión en los valores de conductividad hidráulica, con rangos de hasta 8 órdenes de magnitud en calizas e intrusivos (Itasca, 2018). La roca fresca e inalterada presenta valores de conductividad bajos o muy bajos, en cambio las rocas alteradas, meteorizadas o karstificadas presentan valores de conductividad hidráulica altos.

Con esta información se definen las principales componentes del modelo numérico, detallado en el Capítulo 9 del presente informe. El siguiente capítulo complementa la información de este y sirve de base para la definición de la anisotropía del acuífero.

## 7. MODELO GEOLÓGICO ESTRUCTURAL 2019

En esta sección se mencionarán los principales aspectos del modelo geológico estructural del rajo Bartolina Andina. El objetivo principal de un modelo geológico estructural es entender la deformación de las rocas y modelar las fallas mayores importantes para la estabilidad de taludes del diseño de la mina. A medida que ha avanzado la excavación de la mina Bartolina Andina se han realizado varios modelos estructurales del 2015 al 2019.

La información que se presenta a continuación corresponde a la última actualización del modelo estructural realizado por Fedorovich (2019). Este último informe proporciona la información necesaria para actualizar las fallas consideradas en el modelo anterior realizado en *MINEDW* con la información proporcionada por Fedorovich (2017).

### 7.1. Contexto regional geológico estructural

#### 7.1.1 Evolución y contexto de las placas tectónicas

La evolución de la región sur de Perú se debe a los movimientos de las placas tectónicas que sucedieron aproximadamente hace 200 Millones de años (Ma). Estos movimientos de placas son las fuerzas motrices que desarrollan las fallas mayores y plegamientos de la región.

La condición actual de subducción en la zona, donde la placa de Nazca, que se mueve hacia el Este, pasa por debajo de la placa Sudamericana, no es la condición que se ha encontrado en la mayor parte de la historia deformacional del Perú. La secuencia de cohesiones y subducciones se inician con la orogenia andina, donde en el Jurásico (aproximadamente a 198 Ma) una importante dorsal de extensión Este-Oeste dirigió la placa Farallón hacia el norte a lo largo del margen occidental de Sudamérica (ver Figura 7-1A). En este periodo se desarrolló una cuenca intracratónica (Cuenca Arequipa) al interior de la placa Sudamericana. La depositación marina calcárea dentro de esta cuenca podría haber producido calizas similares a las encontradas en Bartolina. Entre 173 a 152 Ma, intrusiones significantes estuvieron activas, las cuales originaron el Batolito de la Costa, en la actualidad al Sur del Perú.

Finalizando el periodo cretácico (aproximadamente a 65 Ma) la placa de Nazca se dirigió hacia el Norte, mientras que el continente Sudamericano se movió hacia el Oeste (ver Figura 7-1B). Estos movimientos podrían haber producido mezclas de fallamiento, tanto de cabalgamiento y rumbo, como también plegamientos.

Durante el periodo Terciario (aproximadamente a 37 Ma), la placa Sudamericana continuó con movimiento hacia el Norte, y se opuso por el movimiento dirigido al Oeste del Cratón Sudamericano (ver Figura 7-1C). En este periodo de tiempo la intrusión de los Plutones sucedió en la región de Bartolina Andina.

La placa Sudamericana cambia su movimiento hacia el Este (aproximadamente 37 Ma a 20 Ma), provocando un levantamiento tectónico en respuesta al magmatismo, fallamiento de cabalgamiento y de rumbo, el que continua hasta el presente, donde la placa de Nazca subduce debajo de la Sudamericana (ver Figura 7-1D).

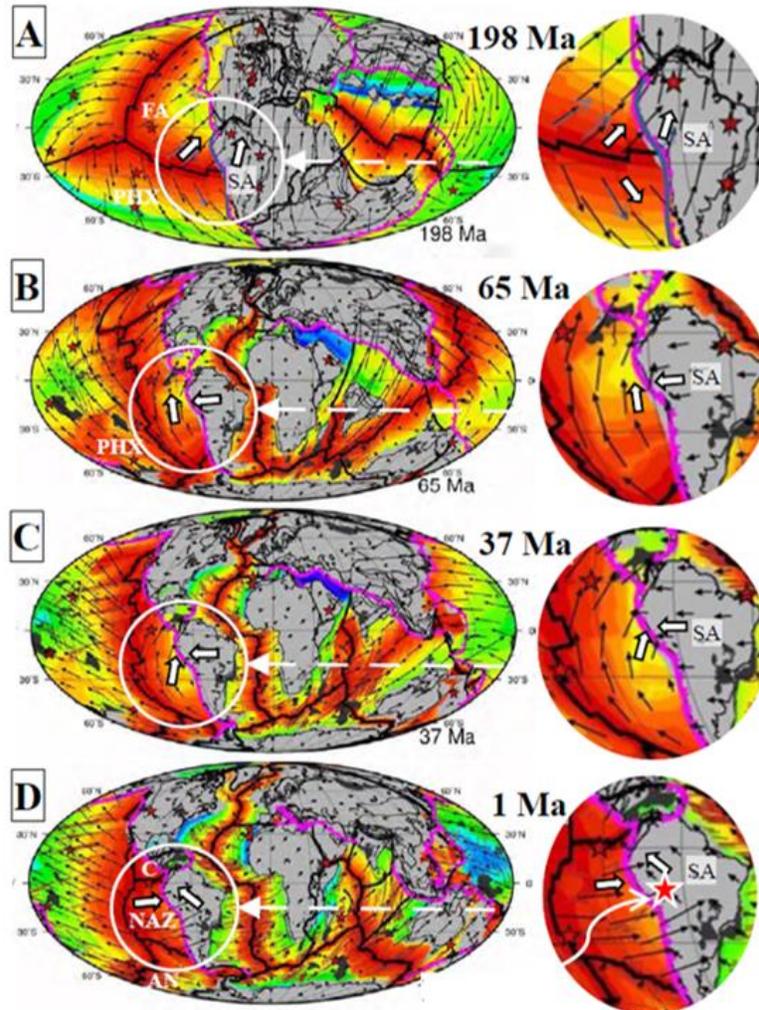


Figura 7-1 Reconstrucción de las placas tectónicas para el periodo de 198 a 1 Ma. En el recuadro de detalle se muestra las posiciones relativas de la placa Sudamericana y las placas oceánicas.

Fuente: Fedorovich, 2019.

### 7.1.2 Dominios regionales geotectónicos

Las principales unidades litológicas en Perú son producto del movimiento de placas en diversas trayectorias sucedido desde ante del Jurásico hasta el presente. Las unidades se dividieron en 13 dominios geotectónicos, donde la mina Bartolina Andina se encuentra en el dominio de la cordillera occidental del Perú Central. Una deflexión importante en los dominios de la cordillera oriental y occidental es la deflexión de Abancay, la que parece tener una asimetría S (ver Figura 7-2).



Figura 7-2 Dominios geotécnicos del Perú. Fuente: Fedorovich, 2019

### 7.1.3 Tipos de rocas regionales relevantes para la mina

La unidad de roca más antigua en los alrededores de Mina Bartolina Andina corresponde a la Formación Soraya, formada por cuarzo arenitas que forma el núcleo de un anticlinal NW-SE. Esta unidad Fedorovich (2017) la describe como areniscas cuarzosas bien litificadas de textura granulas media, y espesor que varía de 350- 1000 m.

Flanqueando a Fm Bartolina está la Fm Mara (suprayacente) del cretácico inferior, comprendida por pizarras limoníticas y areniscas con cuarzo arenitas intercaladas.

Hacia arriba está la Fm Bartolina del cretáceo medio. Las calizas presentes en la formación son rocas encajonantes de varias fases intrusivas dentro del depósito de Bartolina Andina.

La secuencia sedimentaria es cortada por una intrusión diorítica a monzodiorítica denominada como Unidad Llajua o Plutón Bartolina. Esta intrusión al parecer es parte de un complejo intrusivo regional conocido como Batolito de Andahuaylas-Yauri, compuesta de series dispersas de plutones del cretáceo tardío al paleógeno.

El Plutón de los alrededores del área de interés es un cuerpo granodiorítico tonalítico de gran escala denominado como Unidad Progreso.

La roca más joven se conforma por tufos piroclásticos, ceniza soldadas y piedra pómez depositadas probablemente por el complejo volcánico Vilcarini.

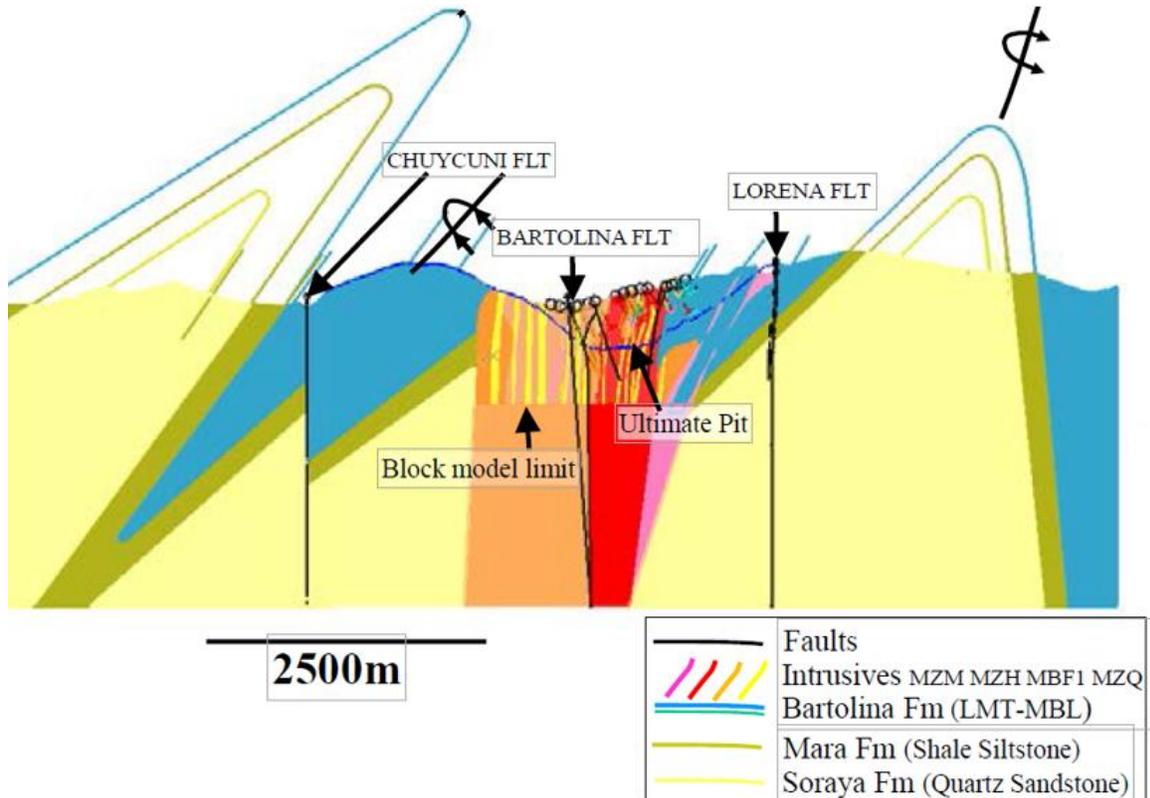


Figura 7-3 Sección transversal del rajo Bartolina Andina, donde se identifican algunas de las formaciones más cercanas al rajo y fallas regionales anticlinales y sinclinales. Fuente: Fedorovich, 2019.

## 7.2. Modelo de fallas

Fedorovich (2019) realizó un modelo de fallas basado en información de mapeos realizados desde el 2003 al 2018 y en perforaciones realizadas en fallas. Las fallas modeladas son caracterizadas como Cohesivas o No Cohesivas, definida cada una como:

- Zonas de brecha de falla No-Cohesivas: matriz de baja resistencia que soporta fragmentos de la roca caja. Son estructuras frágiles con un componente dúctil. Estas fueron sometidas a una alteración de arcillas como resultado de la interacción fluido-roca, y están mineralizadas localmente con Crisocola y Calcopirita. Suelen ser conductoras de agua.
- Cizallas Cohesivas: zonas de elevada deformación compuestas por foliación de cizalla definida por crecimiento de mineral orientado y granos aplanados, granos

rotados, paneles de roca más masiva, lineaciones en el plano de cizalla y alteración intensa y mineralización local de cobre. Suelen ser menos conductoras de agua.

### 7.2.1 Fallas modeladas

En el modelo geológico estructural realizado en el año 2017 se incluyeron mapeos realizados hasta enero del 2016. El modelo de falla obtenido en ese periodo se muestra en la Figura 7-4 y considera 27 fallas.

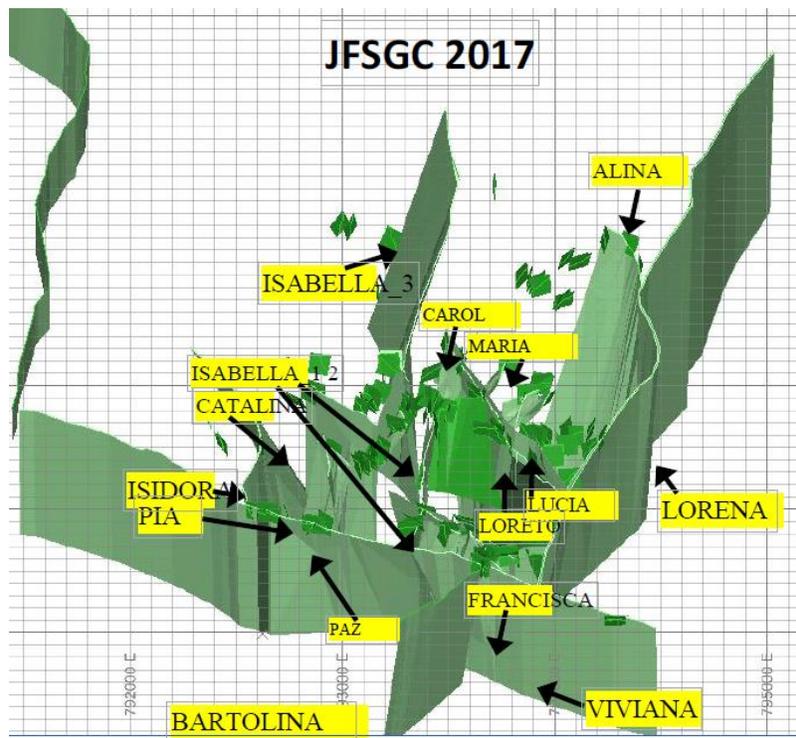


Figura 7-4 Vista oblicua de modelo de fallas 2017. Las fallas más pequeñas de color verde oscuro corresponden a fallas mapeadas que no se ajustan a la intersección de la perforación. Fuente: Fedorovich, 2017.

El modelo estructural del año 2019 considera tres fallas más, basadas en la información de mapeos realizada en octubre 2018 por Fedorovich (2019) y actualizaciones de los *wireframe* (archivos DXF de las fallas) de fallas modeladas anteriormente. Los nombres de las fallas con su respectiva clasificación de Cohesiva o No Cohesiva se muestran en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1 Nombre y clasificación de fallas modeladas por Fedorovich, 2019. Fuente: Elaboración propia.

<b>Nombre de fallas Fedorovich 2019</b>	<b>Cohesiva/No Cohesivo</b>	<b>Nombre de fallas Fedorovich 2019</b>	<b>Cohesiva/No Cohesivo</b>
Falla BARTOLINA	C	Falla BERTA	NC
Falla LORENA	NC	Falla MARIA	NC
Falla ISIDORA	NC	Falla CATALINA	NC
Falla ISABELLA 1	NC	Falla ANDREA	NC
Falla ISABELLA 2	C	Falla ALINA	NC
Falla ISABELLA 3	C	Falla ANA	NC
Falla CHUYMANI	NC	Falla SONIA	NC
Falla PAZ	NC	Falla PAULA	NC
Falla FRANCISCA	NC	Falla JAVIERA	NC
Falla PIA	NC	Falla NATALIA	NC
Falla VIVIANA	NC	Falla CAMILA	NC
Falla ALEJANDRA	C	Falla CONSTANZA	NC
Falla CAROL	NC	Falla LORENA SPLAY	NC?
Falla LORETO	C	Falla IRENE	NC
Falla LUCIA	NC	Falla CAROLINA	-

Las fallas LORENA SPLAY, IRENE y CAROLINA son las nuevas fallas consideradas. La falla CAROLINA no está clasificada, ya que no logró ser interceptada en ninguna perforación.

Otras características de las fallas fueron obtenidas por Fedorovich (2019). Algunas de estas corresponden a buzamiento promedio, dirección de buzamiento, espesor de falla, entre otras características las cuales se resumen en ANEXO 3.

En este modelo, el autor también clasificó las fallas como regionales o inter-rampa. Las fallas regionales (o también mencionadas como mayores en el informe de Fedorovich 2019) corresponden a aquellas fallas que presentan mayor persistencia en la región de estudio y un espesor considerable. Las fallas más persistentes corresponden a BARTOLINA Y LORENA. La falla BARTOLINA es una falla mayor

normal lateral izquierda que se hunde NE. Según la información de perforaciones, fue subdividida en tres segmentos de falla con puentes de en su mayoría, roca intacta. La falla LORENA según el informe presenta un espesor de 2.2-12 m. Se ondula y tiene una inclinación variable de 80° O a vertical. La falla CHUYMANI también es una falla mayor con una estructura en dirección N-S al oeste del rajo. La falla ISIDORA es una falla mayor de 3.3 m de espesor con una geometría curva.

Respecto a la relación de las fallas con la conductividad del agua, el autor menciona que las fallas no cohesivas son más conductoras, ya que presentan una mayor porosidad en comparación a su roca circundante. Esto lo comprueba ya que observó que el agua goteaba en las fallas mapeadas caracterizadas de esta forma.

La dirección longitudinal de las fallas presenta al parecer un grado más alto de permeabilidad para el flujo de aguas subterráneas. Fedorovich (2019) respalda lo anterior porque observó un claro contraste entre las zonas de brecha de falla no cohesiva y la roca masiva adyacente, la cual podría ser una roca intrusiva, calizas estratificadas y mármol.

### **7.2.2 Dominios estructurales**

Los dominios estructurales del rajo minero fueron actualizados a pedido de la empresa a cargo del proyecto. Fedorovich (2019) define 15 dominios estructurales definidos específicamente en el área del rajo. La delimitación de estos nuevos dominios estructurales está basada en la orientación de la estratificación presente en la zona.

El análisis de estructuras que se analizan para esta memoria corresponde a las fracturas (*Joints*, en inglés) del área del rajo, donde los datos fueron obtenidos de perforaciones en la zona, obteniendo un total de 31.786 fracturas. Se escogen los dominios de las fracturas ya que la fracturación es uno de los principales factores que determinan las características hidrogeológicas de un macizo carbonático, característica clara del rajo en estudio (Itasca, 2015). Si bien el autor menciona que en general las fracturas no presentan un relleno apreciable (Fedorovich, 2019), y no hay una mención explícita del aporte de éstas al transporte de agua en el rajo, de igual forma se considera su análisis ya que la modelación de las fallas regionales más importantes del rajo se realiza de forma explícita en el modelo, por lo que al agregar el análisis de las fracturas se estará abarcando de forma más completa el comportamiento estructural del rajo. El análisis de ambas estructuras geológicas es de utilidad para definir la anisotropía del modelo, puesto que entrega una referencia de cómo están orientadas las fallas y fracturas en la zona, y, por lo tanto, en qué dirección preferente el agua es transportada en el área.

Los dominios definidos se muestran en la Figura 7-5. La Tabla 7-2 resume los dominios con sus respectivos ángulos (*dip*) y direcciones de buzamiento (*dip direction*).

Tabla 7-2 Distribución de la orientación de las fallas en los dominios estructurales. Fuente: Datos de Fedorovich (2019).

<b>Dominio</b>	<b>Fallas contadas</b>	<b>Set</b>	<b>Dip (°)</b>	<b>Dip direction (°)</b>
1AE	15	1	72	263
1AE		2	90	219
1AE		3	28	34
1AW	609	1	76	152
1AW		2	70	220
1BW	Sin datos			
1BE	543	1	79	325
1BE		2	72	230
1C	1829	1	74	232
2	7247	1	86	222
3AW	9520	1	81	257
3AW		2	87	221
3AE	Sin datos			
3B	5528	1	87	30
3B		2	84	257
3C	2669	1	46	124
3C		2	75	36
3C		3	60	232
4	1236	1	89	44
4		2	52	130
5A	628	1	82	250
5A		2	87	19
5B	1934	1	59	22
5B		2	80	219
5B		3	59	102
5C	Sin datos			
5D	Sin datos			
2E	28	1	70	272
		2	25	41

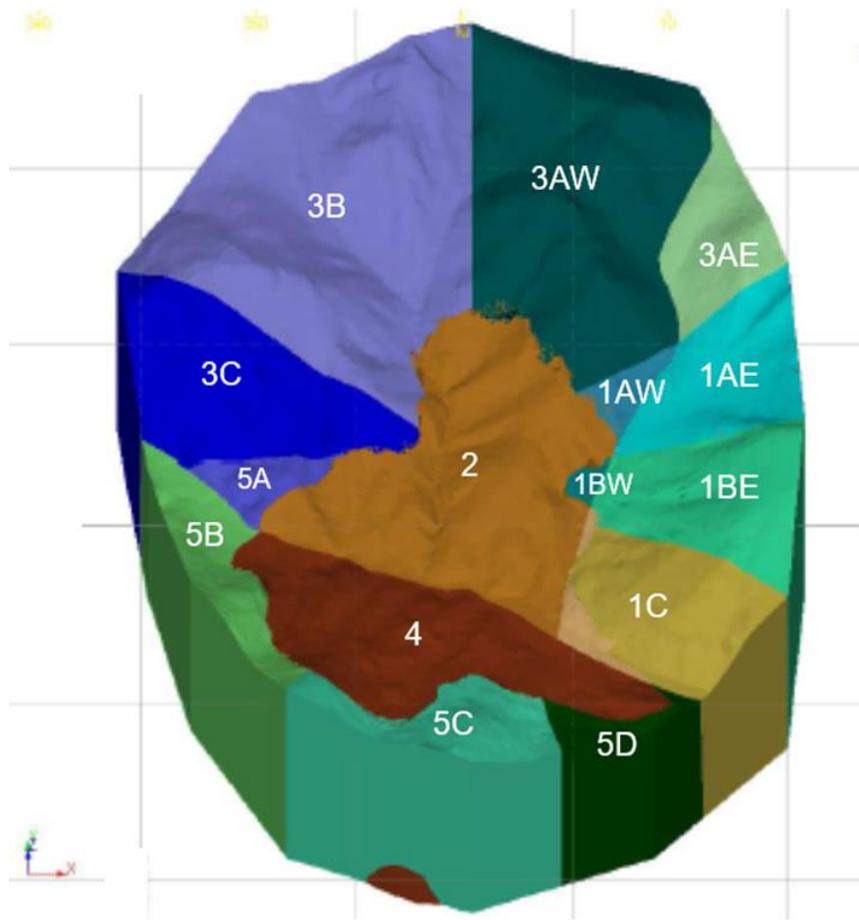


Figura 7-5 Dominios estructurales del rajo Bartolina Andina. Fuente: Fedorovich, 2019.

## 8. ANISOTROPÍA DEL MODELO

En el presente capítulo se muestra la metodología utilizada y los resultados obtenidos para la definición de los ángulos anisotrópicos en el modelo. En base a la información geológica estructural realizada por Fedorovich (2019) y recopilada en el Capítulo 7, más la información del modelo numérico anterior generado en *MINEDW*, se asignan las nuevas unidades hidrogeológicas que tendrá el modelo con sus respectivos ángulos de anisotropía.

### 8.1. Metodología para definición de anisotropía

Para obtener los ángulos anisotrópicos del modelo se realizan los siguientes pasos:

- Los dominios estructurales definidos por Fedorovich (2019) se le asocia su respectivo ángulo de buzamiento y dirección de buzamiento, mostrado en la Tabla 7-2.
- Utilizando el programa *Stereonet* se visualizan los diferentes sets de fracturas. El *software* tiene la opción de ver los sets en 2D y en 3D, facilitando el análisis.
- Al visualizar los sets de fracturas, para el caso en que haya dos sets de datos se define una dirección promedio entre los dos, y así se buscan los ángulos anisotrópicos para esta dirección promedio. En caso de que haya tres sets de datos, el dominio se define como isótropo.
- Se repite el mismo procedimiento para las fallas del modelo.
- El dominio estructural se encuentra definido sólo para la zona del rajo, pero el área modelada abarca la cuenca completa, por lo que es necesario saber si es posible extender estos dominios a la cuenca en su totalidad. Para esto, se compara el modelo geológico local con la distribución de los dominios.

### 8.2. Asignación de ángulos Eulerianos

En la zona del rajo se definen 16 dominios estructurales, donde se obtiene la información de *dip* y *dip direction* para cada set de fracturas (ver Tabla 7-2). Para visualizar esta información se utiliza *Stereonet*, *software* que permite representar datos de orientación de discontinuidades estructurales. La Figura 8-1 muestra cómo el programa visualiza en 2D y 3D un set de fractura para el dominio 2. En ANEXO 4 se encuentran todos los dominios representados con sus respectivos sets de fracturas.

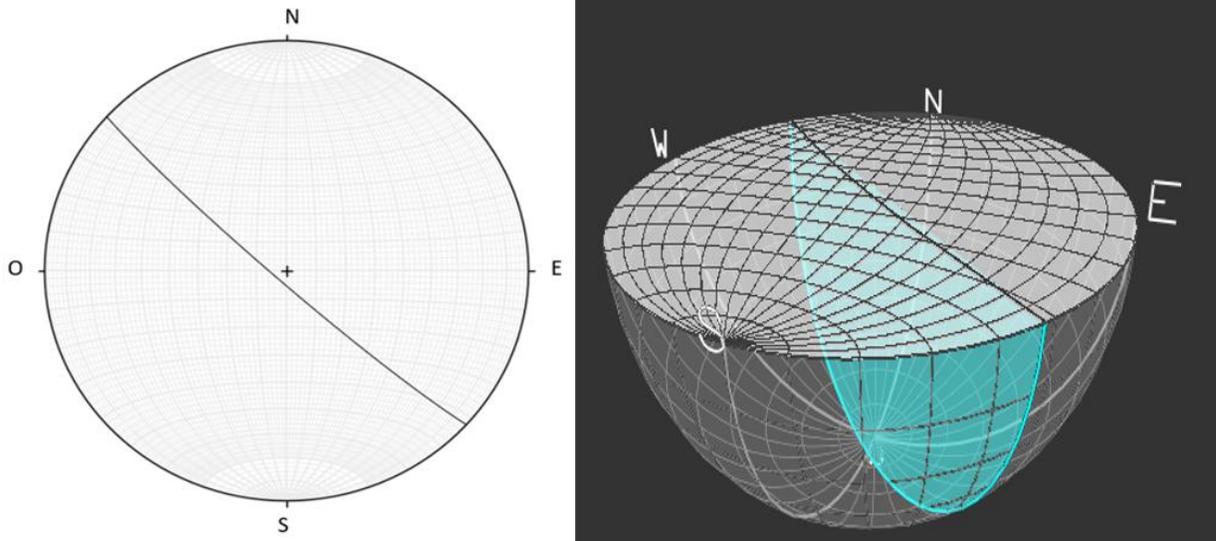


Figura 8-1 Representación en 2D y 3D de set de fracturas para el dominio estructural 2, utilizando Stereonet. Fuente: Elaboración propia.

Los dominios 2 y 1C presentan solo un set de fracturas informadas, por lo que tienen una única dirección preferente para el flujo. Los ángulos Eulerianos por obtener se muestran en la Figura 8-2. Es importante mencionar que el último giro Euleriano (correspondiente al ángulo  $\psi$ ) no se considera, ya que no se tiene la información geológica para obtener ese valor.

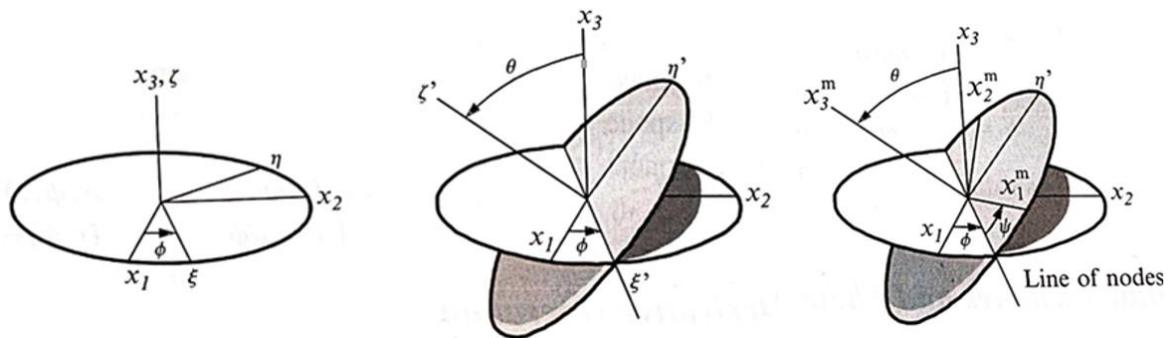


Figura 8-2 Ángulos Eulerianos. Fuente: Diersch, 2014.

Para obtener el primer ángulo ( $\phi$ ) se orienta el eje  $y$  en la dirección Norte y el eje  $x$  en la dirección Este del Stereonet, como lo muestra la Figura 8-3. El valor del primer ángulo será el ángulo formado entre el eje  $x$  y  $x'$  definido en la dirección del set de fractura. La proyección estereográfica entregada por Stereonet entrega los valores de cada ángulo. Por lo tanto, mediante el dato de *dip direction* es posible definir el primer ángulo Euleriano.

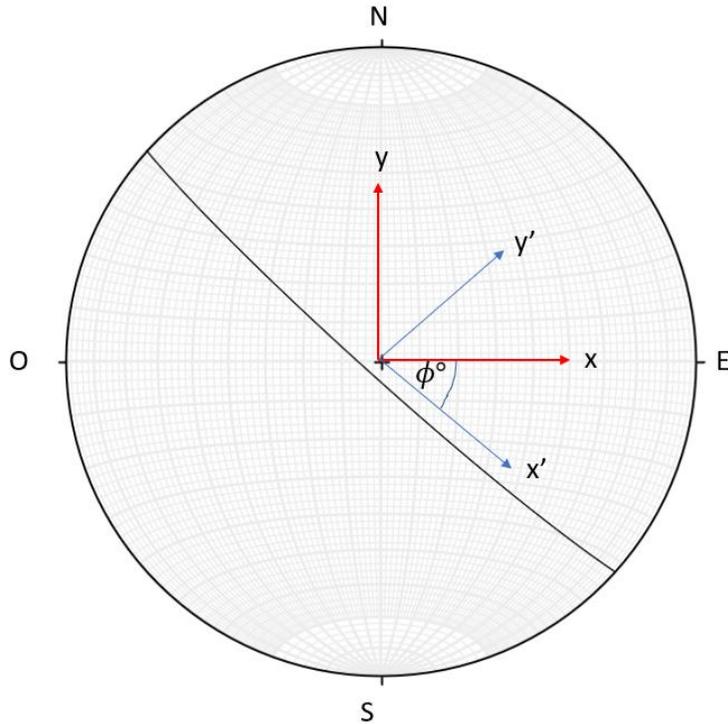


Figura 8-3 Definición del primer ángulo Euleriano, para el dominio estructural 2. Fuente: elaboración propia.

El giro en sentido antihorario se considera positivo y en sentido horario negativo, por lo tanto, para el dominio estructural 2 el primer ángulo se define:

$$\phi = -(132^\circ - 90^\circ) = -42^\circ$$

Para asignar el segundo ángulo Euleriano resulta más fácil visualizar en 3D el set de fractura del dominio. Se define un eje  $z$  perpendicular al plano y un eje  $z'$  en dirección paralela al plano del set de fractura, mostrado en la Figura 8-4, donde el ángulo formado entre los dos ejes representa el segundo ángulo Euleriano,  $\theta$ . Por lo tanto, mediante el dato de *dip* es posible obtener el segundo ángulo de giro.

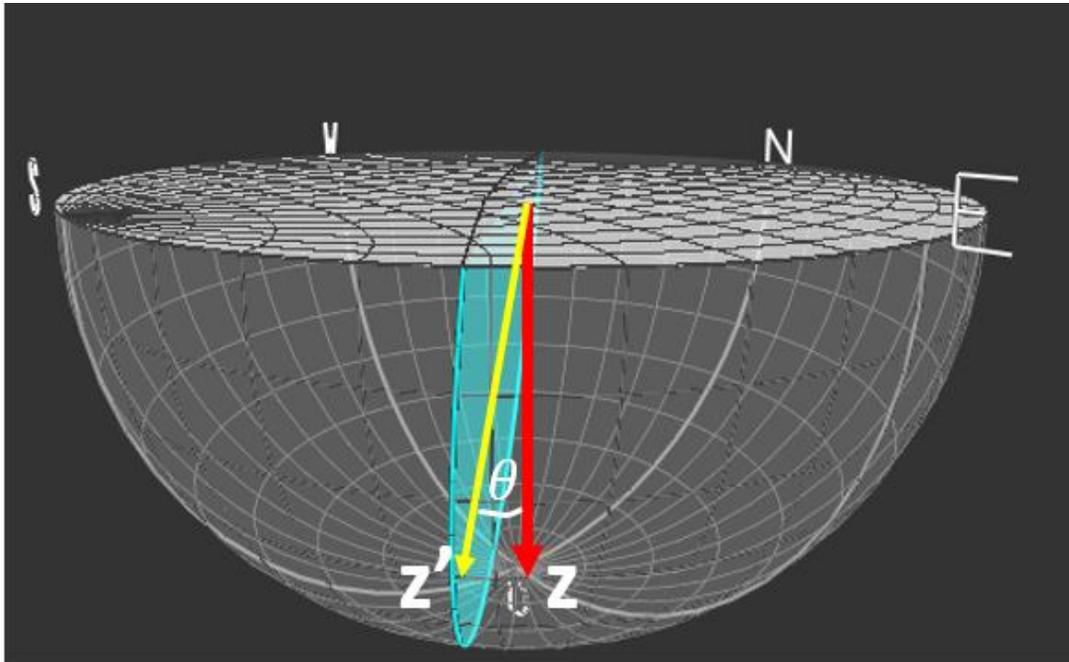


Figura 8-4 Definición del segundo ángulo Euleriano, para el dominio estructural 2. Fuente: elaboración propia.

El giro del eje  $z'$  se define como horario, tomando de referencia el eje  $x'$ . El segundo ángulo Euleriano para el dominio estructural 2 se define como:

$$\theta = -(90^\circ - 86^\circ) = -4^\circ$$

Los ángulos del dominio 1C y de todas las fallas del modelo se obtienen de la misma forma presentada para el dominio estructural 2, ya que el dominio 1C presenta un único set de fracturas y para el caso de las fallas, cada una cuenta con su respectivo dato de *dip* y *dip direction*.

Para los dominios estructurales donde hay dos sets de fracturas se define una dirección preferente. La dirección preferente entre ambos sets se obtiene como el promedio entre las dos. En la Figura 8-5 se observa el caso del dominio estructural 3AW que tiene dos sets de fracturas, y la dirección promedio que se obtiene. Este promedio en algunos casos se obtiene como el promedio matemático entre *dip* y *dip direction* de cada set, pero en otros se define una dirección que se acomode a los dos sets. En la Tabla 8-1 se resumen los *dip* y *dip direction* del set promedio para aquellos dominios estructurales que presenten dos sets de datos.

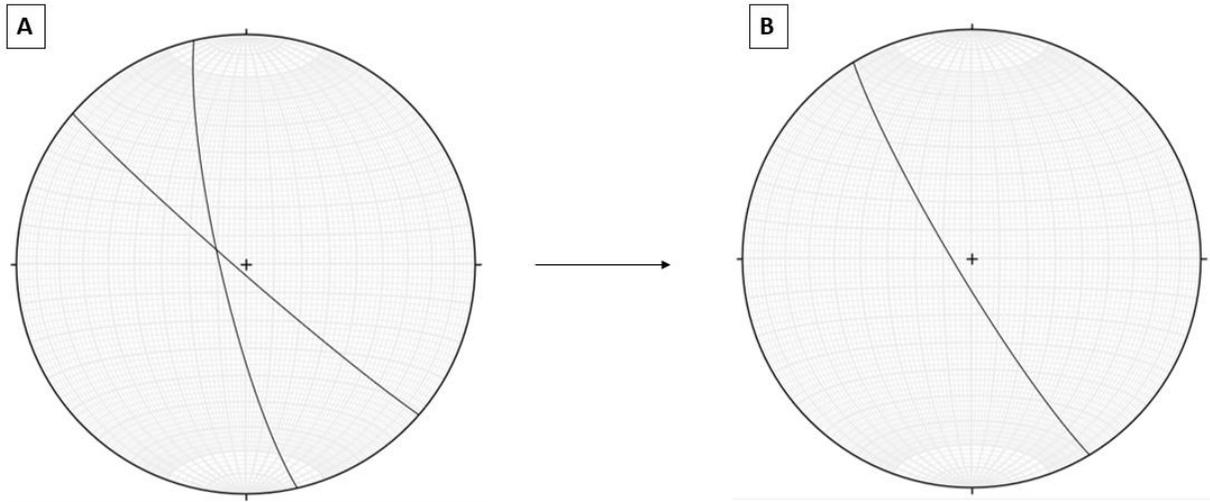


Figura 8-5 A) Set de fracturas del dominio estructural 3AW. B) Set estructural promedio del dominio 3AW. Fuente: elaboración propia.

Tabla 8-1 Dip y Dip Direction del set promedio para dominios estructurales con dos sets de fracturas.

Dominio	Fallas contadas	Set	Dip (°)	Dip direction (°)	Dip nuevo (°)	Dip direction nuevo (°)
1AW	609	1	76	152	73	186
1AW		2	70	220		
1BE	543	1	79	325	76	200
1BE		2	72	230		
3AW	9520	1	81	257	84	239
3AW		2	87	221		
3B	5528	1	87	30	85,5	240
3B		2	84	257		
4	1236	1	89	44	65	183
4		2	52	130		
5A	628	1	82	250	90	40
5A		2	87	19		

Con los nuevos *dip* y *dip direction* definidos para cada dominio, se obtienen los ángulos Eulerianos de la misma forma explicada anteriormente para el dominio estructural 2.

Para el caso de aquellos dominios estructurales que presenten tres sets de fracturas se definen isótopos. En la Figura 8-6 se presentan los sets del dominio estructural 5B. Se puede observar en la figura que al tener el set 1 de fracturas el flujo entrará (o saldrá) del dominio en dirección N-S, diferente a la que tienen los set 2 y 3. Es

importante mencionar que el set de fracturas muestra la tendencia que tenderá a moverse el flujo en el dominio, ya que el agua encontrará diferentes “caminos” para moverse, pero el set define una dirección promedio de orientación de las fracturas en ese lugar. Debido a esta tercera orientación, es que se considera el dominio como isótropo, ya que se tiene en general una distribución del agua homogénea en la zona.

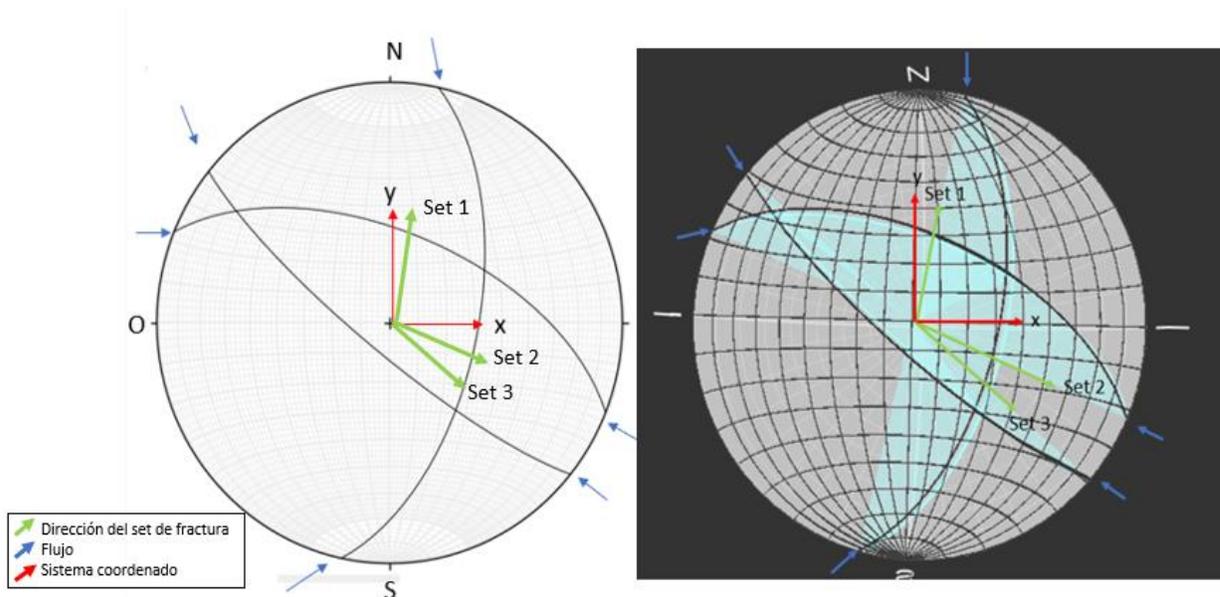


Figura 8-6 Set de fracturas del dominio estructural 5B. Las flechas verdes representan la orientación de cada set de fractura y las flechas azules la entrada del flujo al dominio. Fuente: elaboración propia.

El mismo análisis del dominio 5B se realiza con los otros dos dominios que presentan tres sets de fracturas, el dominio 3C y 1AE, mostrados en la Figura 8-7. Ambos se consideran isótropos debido a que el set 1 en ambos dominios determina una dirección diferente para el flujo. Para el caso del dominio 1AE, el set 1 entrega una dirección similar para el flujo, pero al ser una orientación casi planar, entrega otra componente de dirección para el flujo.

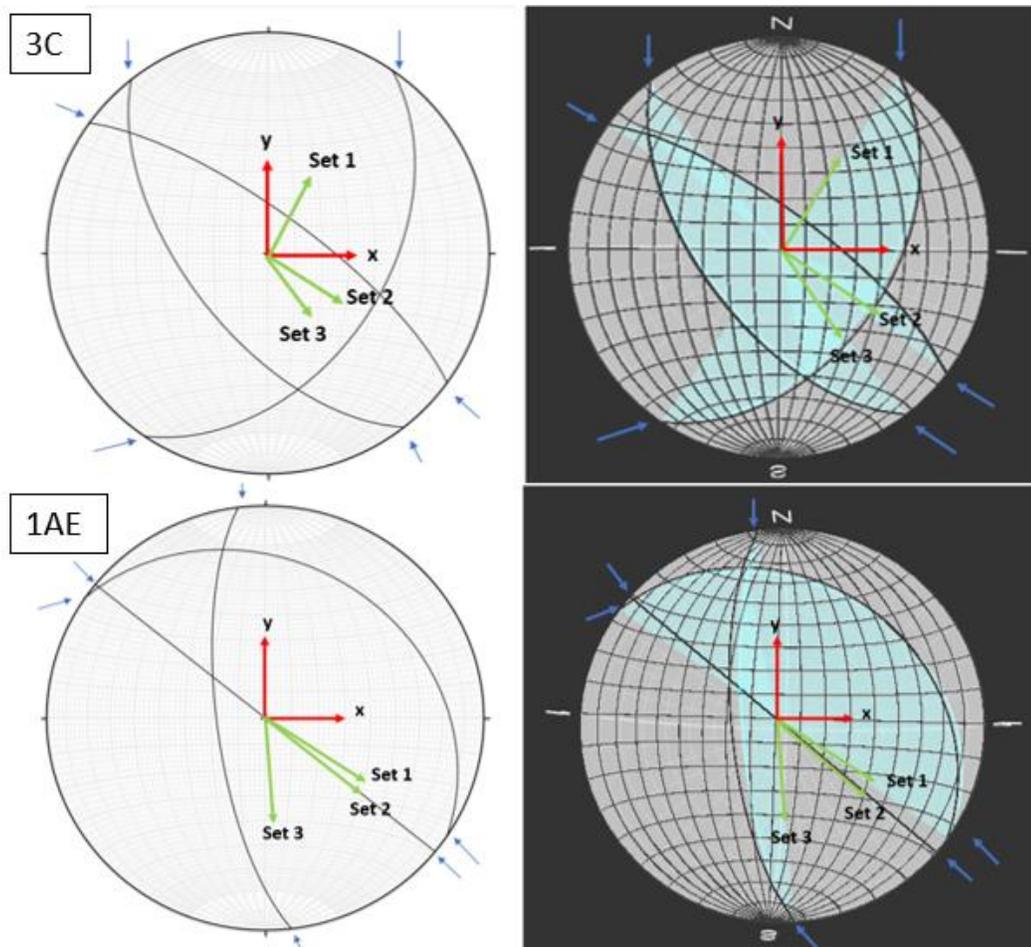


Figura 8-7 Dominio estructural 3C y 1AE. Fuente: elaboración propia.

Realizando el análisis a todos los dominios y fallas, los ángulos Eulerianos para cada uno se muestran en la Tabla 8-2 y 8-3.

Tabla 8-2 Ángulo Eulerianos de dominios estructurales rajo Bartolina Andina.

<b>Dominio Estructural</b>	<b>Isótropo/Anisótropo</b>	<b><math>\Phi</math> (°)</b>	<b><math>\Theta</math> (°)</b>
1AW	A	-6	-17
1BE	A	-20	-14
1C	A	-52	-16
2	A	-42	-4
2E	A	-60	25
3AW	A	-59	-6
3B	A	-60	-4
4	A	-4	-25
5A	A	-40	0
5B	I	-	-
5C	I	-	-
5D	I	-	-
1BW	I	-	-
1AE	I	-	-
3AE	I	-	-
3C	I	-	-

Tabla 8-3 Ángulos Eulerianos de las fallas presentes en el modelo.

Fallas	$\Phi$ (°)	$\theta$ (°)
BARTOLINA	-34	10
LORENA	72	8
ISIDORA	-71	18
ISABELLA 1	-98	0
ISABELLA 2	-84	-5
ISABELLA 3	-103	-15
CHUYMANI	-105	0
PAZ	-42	-13
FRANCISCA	-30	20
PIA	-84	7
VIVIANA	10	-5
ALEJANDRA	-53	-15
CAROL	-64	-10
LORETO	-102	-50
LUCIA	9	-18
BERTA	15	-10
MARIA	-105	-20
CATALINA	-42	-4
ANDREA	-49	-30
ALINA	-41	-15
ANA	-20	-30
SONIA	-26	12
PAULA	-97	-5
JAVIERA	-101	-11
NATALIA	-120	-4
CAMILA	-54	5
CONSTANZA	-130	0
LORENA SPLAY	-120	-16
IRENE	-76	-16
FALLA REGIONAL	-34	10

### 8.3. Extensión del dominio estructural

El dominio estructural del rajo está definido solo en el área del rajo, con 500 m de extensión extra, pero el modelo numérico contempla el área de la cuenca completa del río Bartolina Andina, por lo que es necesario extender los dominios para lograr representar en un área más extensa la fracturación que presenta la zona de estudio.

Para extender los dominios es necesario contemplar la información geológica regional de la zona. En el Capítulo 6 se presenta un mapa geológico regional de la zona, el cual sirve de guía para la extensión de los dominios. En la Figura 8-8 se muestra el mismo mapa geológico del Capítulo 6 pero con la proyección de la cuenca Bartolina. Este es el único mapa geológico con el que se cuenta, por lo que no se alcanza a abarcar completamente la cuenca (zona Este).

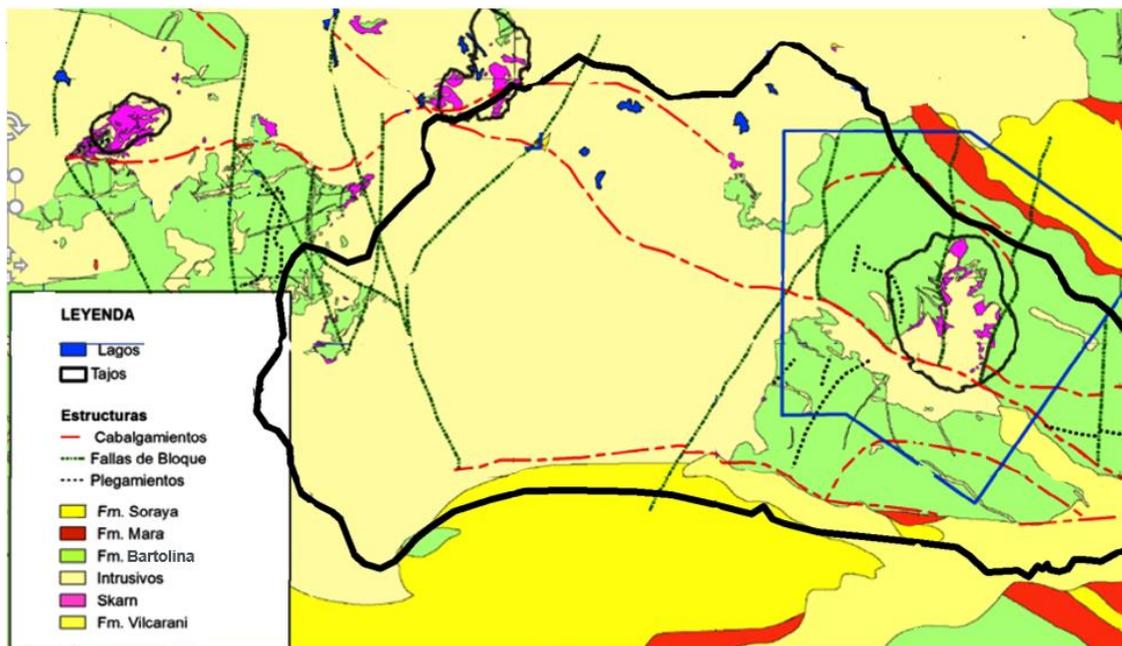


Figura 8-8 Mapa geológico regional de la zona del rajo Bartolina Andina. Fuente: obtenido de Golder (2010), modificado para el presente documento.

Para extender los dominios estructurales se toma como referencia las fallas de bloques y la intersección de formaciones geológicas. Las fallas de bloques generan en el área del rajo una suerte de corredores N-S con mismas propiedades estructurales, lo que coincidiría con algunos límites puestos en los dominios estructurales definidos por Fedorovich (2019). En el caso de los límites de formaciones geológicas estos definen zonas de diferente litología, por lo que igual se considera como un límite para la extensión de los dominios.

En la Figura 8-9 se muestra el límite de la extensión de los dominios estructurales. El límite geológico por el lado Oeste viene dado por la falla de bloque de dirección NE-SO, ya que esta delimita en el relieve de la zona en forma de quebrada y también delimita litológicamente, ya que se encuentra en el borde dos formaciones geológicas (la formación Bartolina caracterizada por calizas y la formación de intrusivos). El límite al sur de la cuenca se encuentra dado por el cabalgamiento geológico que coincide con el cambio de formación (límite entre formación Bartolina y formación Vilcarani) y en el relieve con la ubicación del río Amaru. En el Este se extienden los dominios hasta la falla de bloque de dirección N-S que coincide en el relieve con un cerro.

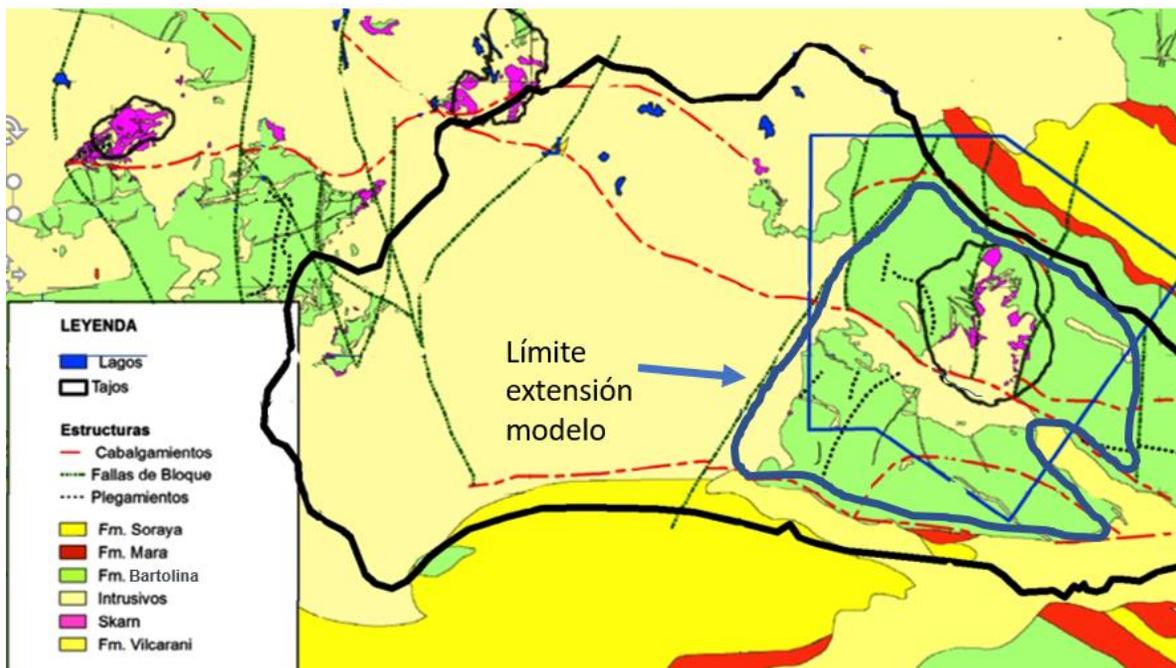


Figura 8-9 Límite de extensión de los dominios estructurales. Fuente: obtenido de Golder (2010), modificado para el presente documento.

Considerando todo lo anterior, los dominios estructurales se extienden en el modelo de *MINEDW* y se obtiene la extensión mostrada en la Figura 8-10B.

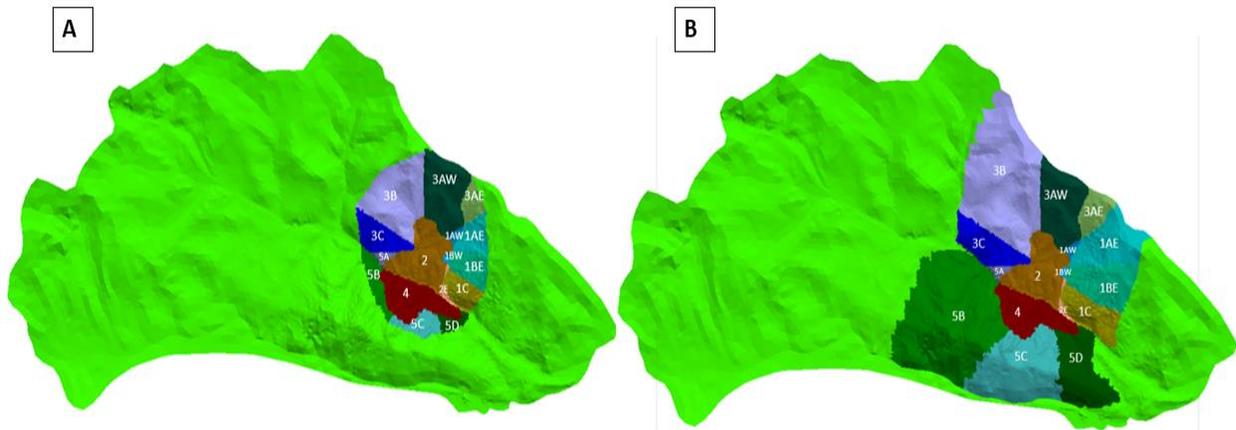


Figura 8-10 A) Dominios estructurales entregados por Fedorovich (2019) representados en MINEDW. B) Dominios estructurales extendidos en MINEDW. Fuente: elaboración propia.

Debido a la incorporación de los dominios estructurales con sus respectivos ángulos Eulerianos, se tendrán nuevas unidades hidrogeológicas las cuales se actualizarán según el modelo de bloques ya existente de la cuenca. El detalle de la obtención de estas nuevas unidades se explica en el Capítulo 9.

## 9. MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLÓGICO

El modelo numérico del rajo Bartolina Andina fue diseñado por Itasca durante el año 2017. Este modelo se ha ido actualizando constantemente a medida que la empresa minera ha ido proporcionando nueva información. El período de análisis comprende entre los meses de enero 2014 y agosto 2018, que son los meses que Bartolina Andina ha entregado información de pozos de bombeo y datos meteorológicos.

La información utilizada para el desarrollo del modelo numérico se obtiene principalmente del modelo conceptual desarrollado por Itasca (2015a) e informes realizados posteriormente que se mencionan en el Capítulo 6 de la presente memoria.

### 9.1. Discretización espacial del modelo de flujo

El programa *MINEDW* utiliza una malla de elementos finitos que se ha definido considerando los siguientes elementos: límites del modelo, extensión y forma del rajo, las fallas principales y dominios estructurales (Fedorovich, 2019), la red fluvial y la ubicación de pozos de bombeo del rajo.

La malla no se ha modificado respecto a la última calibración realizada en 2018 por Itasca, mostrada en la Figura 9-1. En esta se ha tenido en consideración las dimensiones y geometría de los bancos del sector del rajo para definir el tamaño de los elementos (triángulos) de la malla. También se ha refinado el mallado a lo largo de las quebradas y de las fallas principales, como en sectores donde existen pozos de bombeo, para conseguir una mejor representación de las estructuras y gradientes de flujo que pueden estar asociados. La variación del tamaño de los elementos se ha optimizado considerando una buena transición del tamaño de los triángulos entre zonas que requieren más detalle y zonas más alejadas o perimetrales del modelo. Esto asegura una mayor fiabilidad y estabilidad numérica del modelo (Itasca, 2017).

El tamaño de los elementos varía entre 10-15 m en las fallas y 20-25 m en el rajo. En zonas alejadas se alcanza un máximo de 200 m. Para la discretización vertical se tienen 32 *layers* donde en las 20 primeras *layers* superficiales se refinan estas capas.

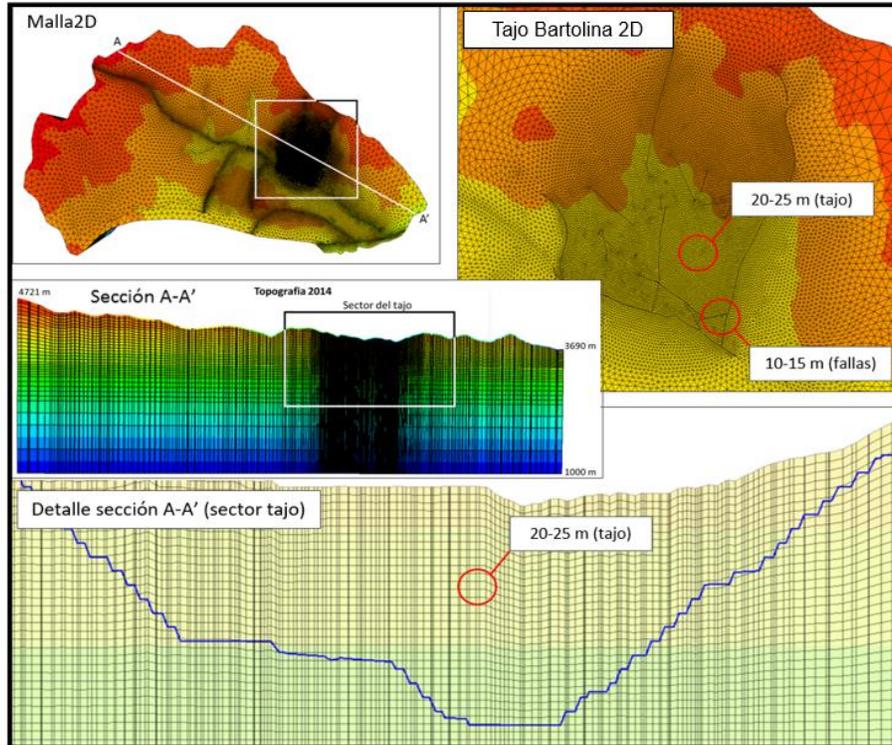


Figura 9-1 Discretización espacial en planta y vertical del modelo *MINEDW*. Fuente: Itasca, 2017.

## 9.2. Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas que se definen para el modelo se obtienen a partir de ensayos hidráulicos realizados en diferentes campañas por otras consultoras. En el Capítulo 6 se detallan los ensayos realizados y se realiza una descripción de cada una de las unidades. Los nombres de las diferentes unidades se muestran en la Tabla 9-1. Estas unidades corresponden a las definidas en el modelo anterior, con la excepción que las fallas se agrupan en 4 grupos según conductividad. En el modelo presente se decide insertar de forma individual cada una de las fallas, por lo que a las unidades de la Tabla 9-1 se deben sumar las 30 fallas modeladas mencionadas en la Tabla 7-1 del Capítulo 7.

Tabla 9-1 Unidades hidrogeológicas presentes en el modelo. Fuente: elaboración propia.

Unidad	ID	Unidad	ID
Mármol	MBL	Monzonita biotítica fina	MBF
Granodiorita	GD	Toba	TOBA
Exoskarn	SK	Arenisca	SND
Mármol con calcosina	MBC	Lutita	SHL
Endoskarn	ENDO	Aluvial	ALV
Brecha de contacto	BX	Caliza	LMT
Monozonita biotítica	MZB	Falla regional	F-REG
Monzonita horbléndica	MZH	Monzonita máfica	MZM
Monzonita cuarcífera	MZQ		

Para definir las unidades que tiene el modelo actual se hace coincidir las unidades hidrogeológicas de la Tabla 9-1 con los dominios estructurales definidos en el nuevo modelo estructural, como se muestran en la Figura 9-2. De la superposición del dominio estructural y la respectiva unidad se obtienen las nuevas unidades hidrogeológicas mostradas en la Figura 9-3.

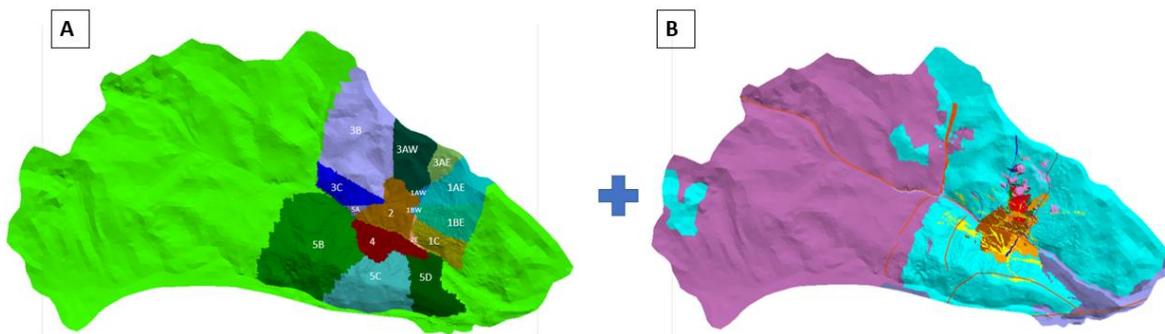


Figura 9-2 Definición de nuevas unidades del modelo numérico. A) Dominios estructurales actuales definidos en la zona del rajo. B) Unidades Hidrogeológicas del modelo anterior. Fuente: elaboración propia.

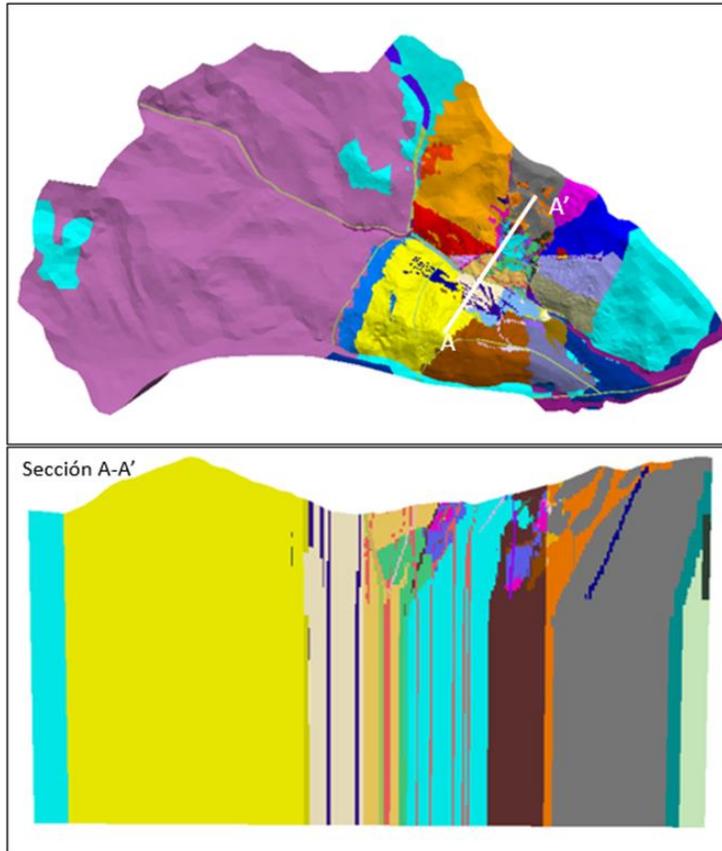


Figura 9-3 Unidades Hidrogeológicas finales del modelo Bartolina Andina. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, el modelo cuenta con 161 unidades hidrogeológicas las cuales se resumen en la tabla de ANEXO 5. Aquellas zonas donde no se extendieron los dominios se tienen unidades isotrópicas.

### 9.3. Zona de Relajación (ZOR)

El código *MINEDW* permite incluir en el rajo una Zona de Relajación (*ZOR*) que se entiende como una zona superficial de mayor conductividad hidráulica producida por la descompresión del material a medida que avanza el rajo en profundidad. Esta zona va aumentando progresivamente de espesor con la profundización del rajo, provocando que las zonas más próximas a la superficie del talud presenten mayor permeabilidad. La *ZOR* es equivalente a la zona de daño definida en el área geomecánica y su espesor  $s$  define en base a la experiencia de Itasca como un  $1/3$  de la profundidad de rajo en cada sector y a medida que avanza el plan de minado (Itasca, 2017).

En la construcción del modelo se ha considerado la *ZOR* con un espesor de  $1/4$  la profundidad del rajo para cada tiempo de cálculo, manteniendo en todo momento 3 capas de una potencia del 33.3% del espesor total. Los multiplicadores de la

conductividad hidráulica original asignadas a cada capa corresponden desde la superficie a profundidad, a  $10 \cdot K$ ,  $5 \cdot K$  y  $2 \cdot K$ .

#### 9.4. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno del modelo numérico son definidas de acuerdo con la información entregada en el modelo conceptual. En la Figura 9-4 se muestra un esquema de las condiciones de borde.

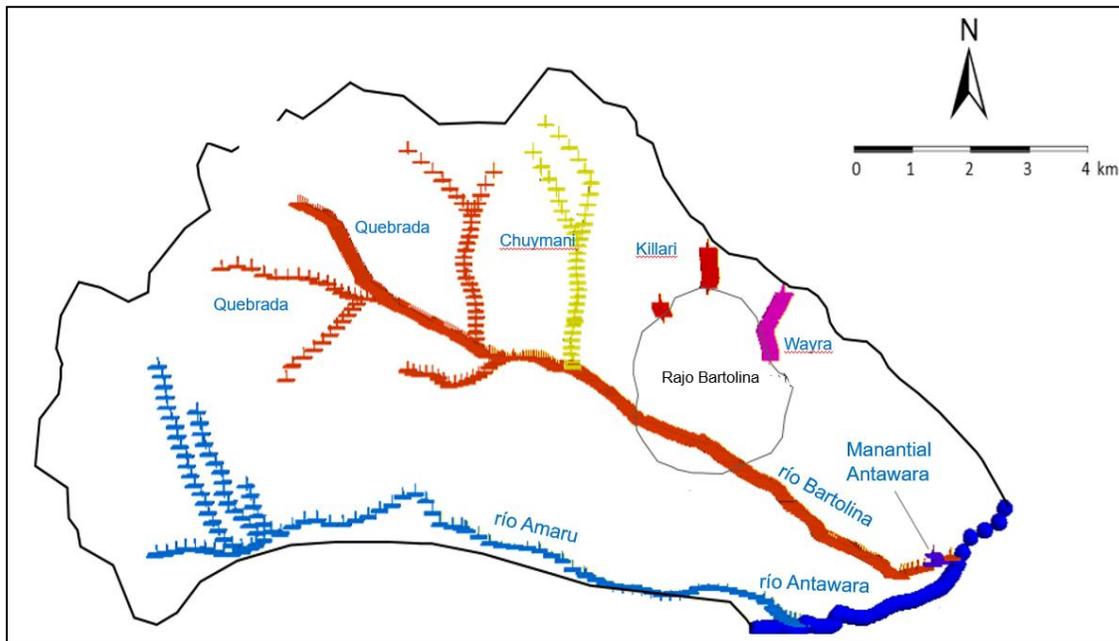


Figura 9-4 Condiciones de contorno del modelo numérico. Fuente: elaboración propia.

**Condición de Nivel Constante (*Constant Head*):** La condición de carga constante consiste en fijar un nivel piezométrico determinado, en este caso definido de acuerdo con la piezometría trazada en el modelo conceptual. Esta condición se define a lo largo del río Antawara, en el extremo S-E del modelo.

**Condición de Drenes (*Drain*):** Esta condición ha sido establecida para la red fluvial del modelo para simular la transferencia de agua desde el acuífero a los ríos, las zonas karstificadas y los manantiales. También se utiliza para simular los sistemas de drenaje en el área del rajo. Esta condición se define para los ríos Bartolina, Amaru, Chuymani, Killari y Wayra. Para el manantial Antawara a la salida de la cuenca también se define esta condición. Entre diciembre de 2017 y abril de 2018 se perforaron 10 drenes en la zona del rajo los cuales se incluyen en el modelo.

**Ultimate:** No es estrictamente una condición de contorno, pero se utiliza para delimitar el área del rajo, el cual colapsará la malla a medida que avanza el plan de minado en sus etapas.

## 9.5. Campo de pozos de bombeo

Los pozos de bombeo considerados corresponden a los entregados por la empresa minera a cargo de Bartolina Andina, mostrados en la Figura 9-5. La información de bombeo que se cuenta corresponde a los meses comprendidos entre enero 2014 y agosto 2018.

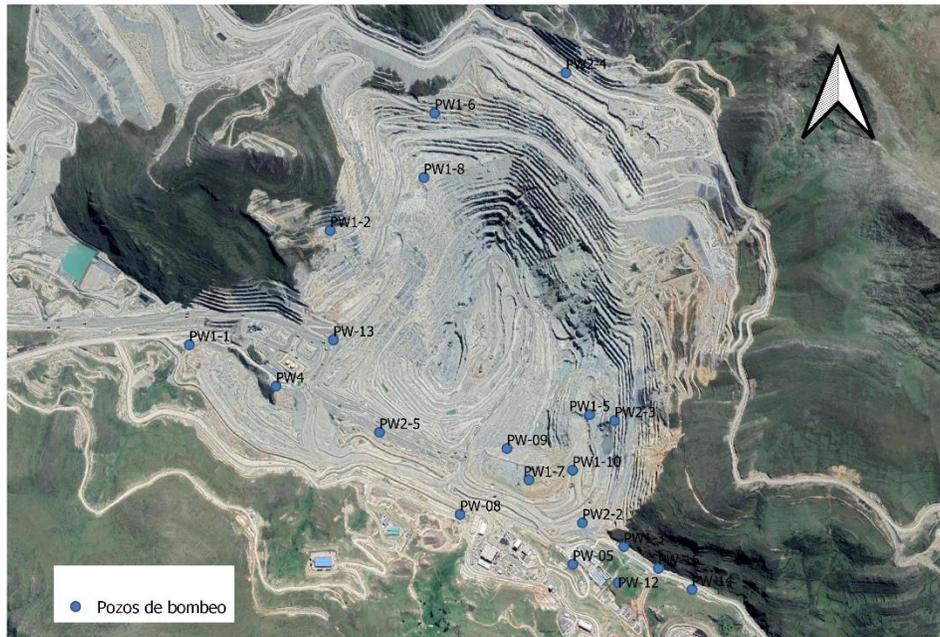


Figura 9-5 Ubicación pozos de bombeo considerados en el modelo *MINEDW*. Fuente: elaboración propia.

## 9.6. Recarga por infiltración de lluvia

Según la información entregada en el Capítulo 6, la recarga al modelo se produce principalmente a partir de la infiltración directa de agua de lluvia.

En el modelo, las tasas de recarga se obtienen a partir de datos pluviométricos disponibles entregados por la empresa minera a partir de enero 2014 hasta agosto 2018 de las estaciones Tania, Ema y Raúl.

*MINEDW* permite introducir la recarga al modelo considerando los siguientes criterios:

1. Variación de la recarga con la altitud: *MINEDW* permite introducir la ecuación de la recta de regresión de la pluviometría vs altitud, la que se muestra en la Figura 9-6. Como la serie de datos pluviométricos locales disponibles no son suficientes, para el cálculo de la ecuación de la recta vs altitud se ha considerado los datos históricos del conjunto de estaciones meteorológicas regionales analizadas en el Capítulo 6.

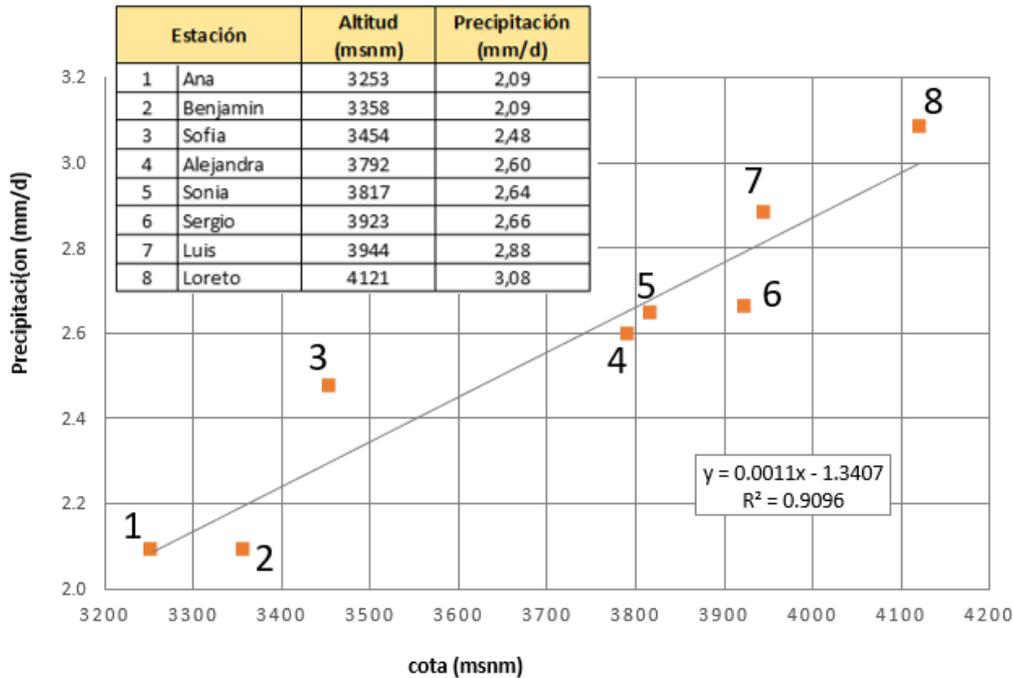


Figura 9-6 Gráfico de regresión lineal de pluviometría vs altitud. Fuente: Itasca, 2017.

2. Variación mensual de la recarga: En *MINEDW* se debe expresar la precipitación mensual como un factor de la precipitación anual. El factor mensual se obtiene según la siguiente ecuación:

$$Factor\ mensual = \frac{Precipitación\ mensual \times 12}{Precipitación\ anual} \quad (26)$$

A partir de la información existente, se ha introducido al modelo para cada uno de los años de simulación (2014 a 2018) el factor mensual correspondiente. Para la simulación predictiva (desde los años 2019 a 2021) se considera el promedio de factores mensuales según mes.

Los factores de la actual calibración presentan una variación respecto al modelo anterior ya que se identificó errores en algunos valores de precipitación utilizados. Posiblemente fueron errores de digitación, pero esto provoca una leve baja en los factores a utilizar.

3. Diferenciación de zonas con diferentes tasas de recarga: En este modelo se han diferenciado cinco zonas diferentes de recarga caracterizado según dominio litológico y estructura, como se observa en la Figura 9-7. Las zonas son calizas, volcánicos, intrusivos, área del rajo y tranque de relaves. Los rangos utilizados en los dominios litológicos se basan en los valores entregados en el modelo conceptual. Para el área del rajo se utiliza el rango de calizas y para el tranque de relaves se dispone de información de tasa de infiltración entregada por la empresa minera, los cuales se ingresan directamente (en mm/d) al modelo.

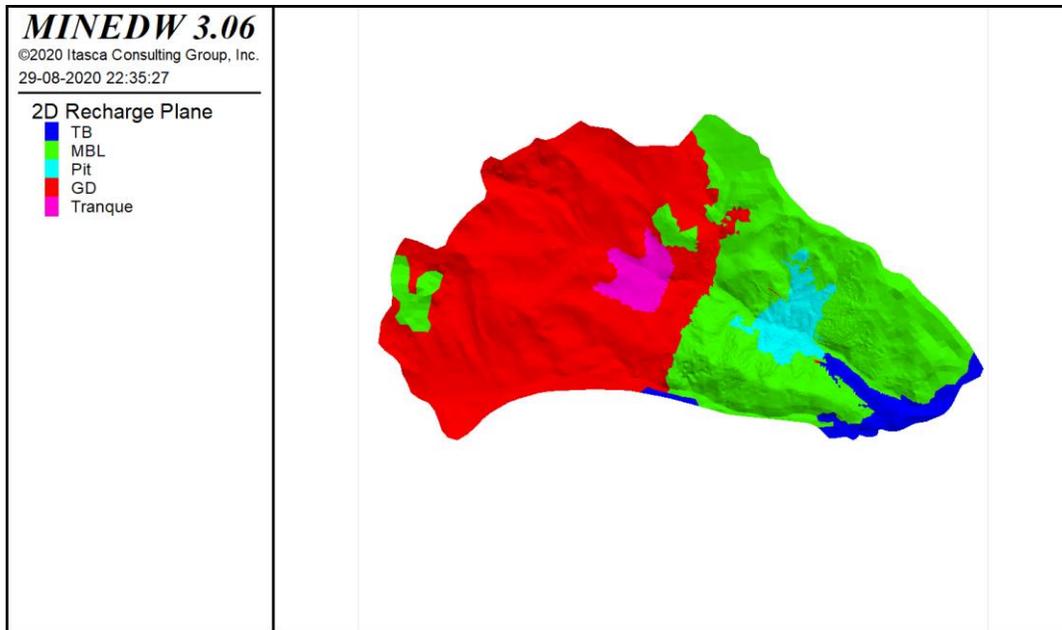


Figura 9-7 Distribución de la recarga en el modelo numérico. En verde se tiene la zona de calizas, celeste el área del rajo, en rosado el tranque de relaves, azul es zona de volcánico y rojo el intrusivo. Fuente: elaboración propia.

Los rangos de recarga utilizados se observan en la Tabla 9-2. Para cotas más altas el porcentaje de recarga es mayor, para cotas menores el rango llega hasta el 5% de precipitación. Estos valores son los utilizados en la calibración anterior a la actual, con excepción de los límites máximos de calizas y en la zona del rajo las cuales tenían valores máximos de 80%, alejados a los rangos entregados en el modelo conceptual.

Tabla 9-2 Rango de porcentajes de precipitación utilizada para la recarga.

Zona	Recarga (% de precipitación)
Calizas	50-5
Intrusivo	10-5
Volcánico	5
Rajo	50-5

## 9.7. Evapotranspiración

En el Capítulo 6 se detalla la metodología utilizada para la obtención de la evapotranspiración, donde se utiliza el método de Hargreaves. Para ingresar el valor a *MINEDW* se debe tener el siguiente factor:

$$\text{Factor evaporación} = \frac{\text{Evaporación mensual}}{\text{Máxima evaporación}} \quad (27)$$

Los datos utilizados se tienen del año 2015 hasta agosto 2018. Como la modelación comienza en enero 2014 se replican los datos del 2015 en 2014. Para los valores posteriores a agosto de 2018 se replican los datos del 2015, por ejemplo, para septiembre 2018 se ha considerado el valor de septiembre 2015, para octubre 2018 se considera octubre 2015, y así sucesivamente.

La evapotranspiración se define exclusivamente en la zona del rajo, como se observa en la Figura 9-8.

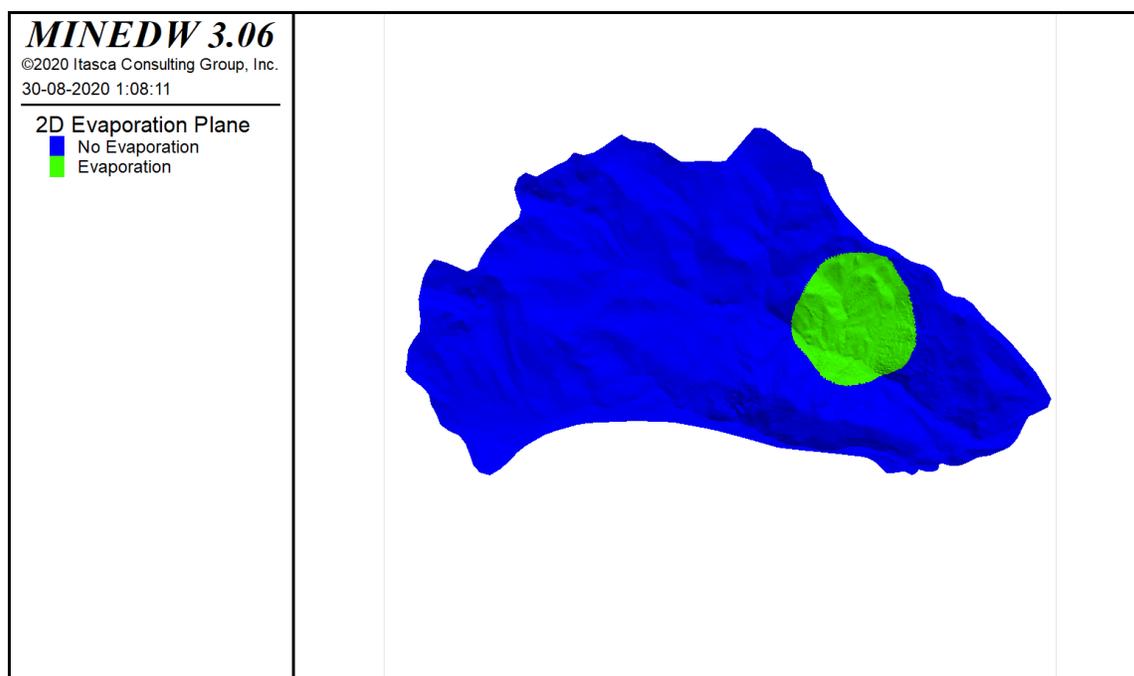


Figura 9-8 Definición de evapotranspiración en *MINEDW*. Fuente: elaboración propia.

### 9.8. Pozos de observación

El modelo cuenta con piezómetros distribuidos en toda su extensión, pero la mayor concentración de estos se encuentra en el sector del rajo Bartolina. El modelo cuenta con piezómetros tipo cuerda vibrante (CV) y Casagrande (CG). Los piezómetros que se seleccionan para calibrar son 56 y se muestran en la Tabla 9-3. La ubicación espacial de estos piezómetros se encuentra en la Figura 9-9.

Tabla 9-3 Piezómetros instalados en modelo numérico Bartolina Andina.

<b>Piezómetro</b>	<b>Tipo</b>	<b>Piezómetro</b>	<b>Tipo</b>
MW06-01A	CG	TH2-1	CG
MW06-01C	CG	TH2-5	CG
MW06-2A	CG	FBGT07-3-P1	CV
MW06-6A	CG	FBGT07-3-P2	CV
MW06-8A	CG	FBGT07-2	CV
MW06-03B	CG	FBGT07-4-P1	CV
MW06-04A	CG	FBGT07-4-P2	CV
MW06-05A	CG	TH-01_P3	CV
MW09-3B	CG	TH-01_P2	CV
MW09-4A	CG	TH-02_P3	CV
MW09-6A	CG	TH-02_P2	CV
TH-02	CG	TH-04_P3	CV
TH-03A	CG	TH-04_P1	CV
TH-07	CG	TH-05_P3	CV
TH-08	CG	TH-05_P1	CV
TH-12(PW-09)	CG	TH1-3_P3	CV
TW09-01	CG	TH1-3_P2	CV
OBS-01B_P1	CG	TH1-1_P2	CV
OBS-01B_P2	CG	TH-15_P3	CV
OBS-2B_P1	CG	TH-15_P2	CV
OBS-2B_P2	CG	TH-13_P2	CV
TH2-7	CG	TH1-11_P3	CV
TH2-10	CG	TH1-11_P2	CV
F3-INC-04	CG	TH1-8A_P3	CV
TH2-9	CG	TH1-8A_P2	CV
TH17-1	CG	TH2-4_P2	CV
TH17-2	CG	TH2-2_P2	CV
TH1-12	CG	HU16-5_P2	CV



## 10. RESULTADOS

### 10.1. Calibración del modelo

#### 10.1.1 Modelo estacionario

Para la calibración del modelo estacionario se ha fijado como fecha de referencia enero de 2014, ya que para esta fecha no existía excavación minera en el área de estudio.

Los piezómetros seleccionados para la calibración estacionaria son aquellos que presentan data en enero 2014 y son los que se muestran en la Tabla 10-1.

Tabla 10-1 Piezómetros calibrados para modelo estacionario.

Piezómetro	Tipo	Piezómetro	Tipo
MW06-01A	CG	TH-08	CG
MW06-01C	CG	TH-12(PW-09)	CG
MW06-2A	CG	TW09-01	CG
MW06-6A	CG	OBS-01B_P1	CG
MW06-8A	CG	OBS-01B_P2	CG
MW06-03B	CG	OBS-2B_P1	CG
MW06-05A	CG	OBS-2B_P2	CG
MW09-6A	CG	FBGT07-3-P2	CV
TH-02	CG	FBGT07-2	CV
TH-03A	CG	FBGT07-4-P1	CV
TH-07	CG	FBGT07-4-P2	CV

Para verificar que el modelo se encuentra bien calibrado y con errores numéricos despreciables se ha utilizado lo indicado en la *Australian Groundwater Modelling Guidelines* (Barnett, 2012), que se resume en la Tabla 10-2, indicando los índices medibles tanto para niveles como para el balance de un modelo hidrogeológico.

Tabla 10-2 Valores para determinar la robustez de un modelo según *Australian Groundwater Modelling Guidelines*.

Parámetros	Valor utilizado	Buen ajuste
Niveles	SRMS	<10%
Balance	Residual	<1%

El SRMS corresponde al Error Cuadrático Medio Estandarizado y representa el porcentaje de error o cociente del RMS y la pérdida total de carga en el sistema (PTCS):

$$SRMS = \frac{RMS}{NE^{sim} - NE^{med}} \times 100$$

Donde el *RMS* es el Error Cuadrático Medio:

$$RMS = \frac{1}{n} \sum \left( (NE^{sim} - NE^{med})^2 \right)^{1/2}$$

El SRMS obtenido para esta modelación resulta de un 11%, el cual es levemente mayor al recomendado.

En el proceso de calibración se consideran los valores de parámetros hidráulicos obtenidos en el modelo calibrado anterior y se modifican dentro de los rangos conceptuales para reproducir los valores observados en terreno y definidos en el modelo conceptual, como caudales, niveles, zonas de *seepage*, etc. Pero buscando cumplir con los parámetros de la Tabla 10-2. En el caso del modelo estacionario, los valores calibrados de los parámetros hidráulicos se muestran en la Tabla 10-3. Las demás unidades se agrupan todas con los mismos valores, por ejemplo, los MBL (mármol) de los demás dominios llevan el mismo valor. Para ver en detalle estos valores, revisar la tabla en ANEXO 6.

Tabla 10-3 Parámetros definidos para el modelo permanente.

Nombre	ID	Kx (m/d)	Ky (m/d)	Kz (m/d)	Ss	Sy	Angulo 1	Angulo 2	Angulo 3
MBL	1	0,0172	0,0172	0,0172	0,0000005	0,001	0	0	0
GD	2	0,0412	0,0412	0,0412	0,0000001	0,001	0	0	0
MZQ	3	0,0036116	0,0036116	0,0036116	0,0000005	0,001	0	0	0
TOBA	4	0,12	0,12	0,012	0,000005	0,01	0	0	0
ALV	5	1	1	0,1	0,01	0,15	0	0	0
F_REG	6	0,5	0,5	0,5	0,0000001	0,001	-34	10	0
MBL(3B)	7	0,00172	0,00172	0,00172	0,0000005	0,001	-60	-4	0
MBL(2)	21	40	40	40	0,0000005	0,001	-42	-4	0
SK(2)	33	30	30	30	0,0000005	0,001	-42	-4	0
MBC(2)	41	0,4	0,4	0,4	0,0000005	0,001	-42	-4	0
ENDO (3B)	42	0,0015567	0,0015567	0,0015567	0,0000001	0,001	-60	-4	0
ENDO(2)	49	0,15567	0,15567	0,15567	0,0000001	0,001	-42	-4	0
BX(2)	55	0,5564	0,5564	0,5564	0,00001	0,01	-42	-4	0
MZB(2)	69	0,10035	0,10035	0,10035	0,0000005	0,001	-42	-4	0
MZH (3B)	71	0,0038	0,0038	0,0038	0,0000005	0,001	-60	-4	0
MZH(2)	77	0,237853	0,237853	0,237853	0,0000005	0,001	-42	-4	0
MZM (3B)	79	0,011232	0,011232	0,011232	0,0000005	0,001	-60	-4	0
MZQ(2)	103	0,6	0,6	0,6	0,0000005	0,001	-42	-4	0
MBF(2)	110	1,2096	1,2096	1,2096	0,0000005	0,001	-42	-4	0
LMT(2)	132	0,56458	0,56458	0,56458	0,0000005	0,001	-42	-4	0

El fin de la calibración estacionaria es obtener los niveles iniciales para la calibración transiente, por lo que se busca una buena representación de los niveles iniciales que existían en el área de estudio en la fecha considerada, los que se muestran en la Figura 10-1.

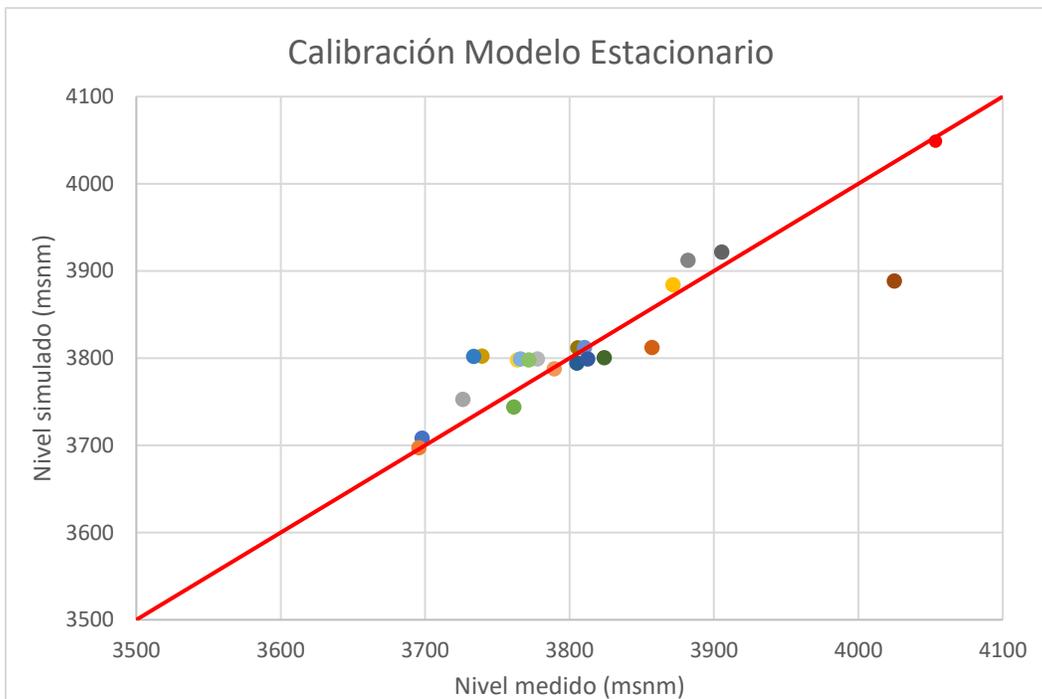


Figura 10-1 Resultados de la calibración estacionaria.

Los niveles iniciales obtenidos se muestran en la Figura 10-2.

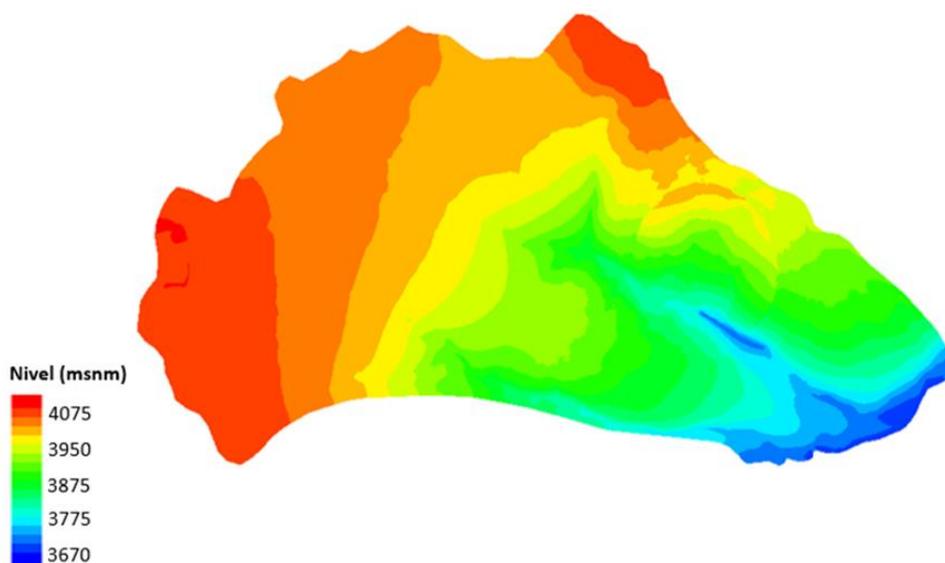


Figura 10-2 Niveles iniciales obtenidos de la calibración permanente. Fuente: elaboración propia.

### 10.1.2 Modelo transiente

El objetivo de la calibración en régimen transiente es lograr representar lo más fielmente la información entregada en el modelo conceptual respecto al balance de masa y niveles piezométricos del rajo. Respecto al balance de masas se busca que intente representar el modelo conceptual y las observaciones de campo descritas por el cliente. En el caso de los niveles piezométricos se busca que los puntos de observación del modelo muestren una variación temporal de niveles lo más cercano a los niveles medidos en terreno.

El período de calibración corresponde a los meses comprendidos entre enero 2014 y agosto 2018, que corresponde al último mes de información recibida por Itasca de parte de la empresa minera.

Los parámetros calibrados de las 161 unidades hidrogeológicas corresponden a la porosidad drenable ( $S_y$ ) y a las conductividades hidráulicas de cada unidad hidrogeológica. Los rangos de variación de cada valor están siempre en los márgenes entregados según el modelo conceptual. Los valores utilizados se encuentran en ANEXO 7.

En el modelo anterior realizado por Itasca, las rocas intrusivas, calizas, skarn y endoskarn se consideran unidades isótropas en el sentido que sus valores  $K_x, K_y, K_z$  son los mismos. En las formaciones cuaternarias (ALV) y volcánicas (TOBA), las cuales presentan un carácter sedimentario, se define una permeabilidad vertical menor en un orden de magnitud a la horizontal, es decir,  $K_x = K_y = 10K_z$ . Esto debido a la formación de los materiales sedimentarios, ya que, al depositarse por gravedad, se crean planos horizontales preferenciales de flujo. Se mantiene en el modelo actual estas características.

Respecto a las fallas, estas se definen con valores de  $K_x = K_z = 10K_y$ , debido a que son fallas verticales y el flujo va preferente longitudinalmente a través de estas. Los valores de conductividad hidráulica utilizadas para las fallas toman como referencia las obtenidas en la calibración anterior, cambiando algunas en un orden más o menos. El valor de las fallas más conductoras es de 0,5 m/d, mientras que las fallas menos conductoras son de 0,04 m/d. La falla regional (F\_REG) es la unidad que posee mayor conductividad, 0,5 m/d. La falla LORENA se ha definido con una conductividad menor comparada con el resto (0,04 m/d), dado que en informes anteriores se menciona que existe evidencia de ensayos de bombeo y piezómetros que indican que posee un carácter de barrera impermeable (Itasca, 2017).

## 10.2. Balance global de masa y error de balance

El balance de masas del modelo transiente se muestran en la Figura 10-3. Este balance considera el período entre enero 2014 y agosto 2018.

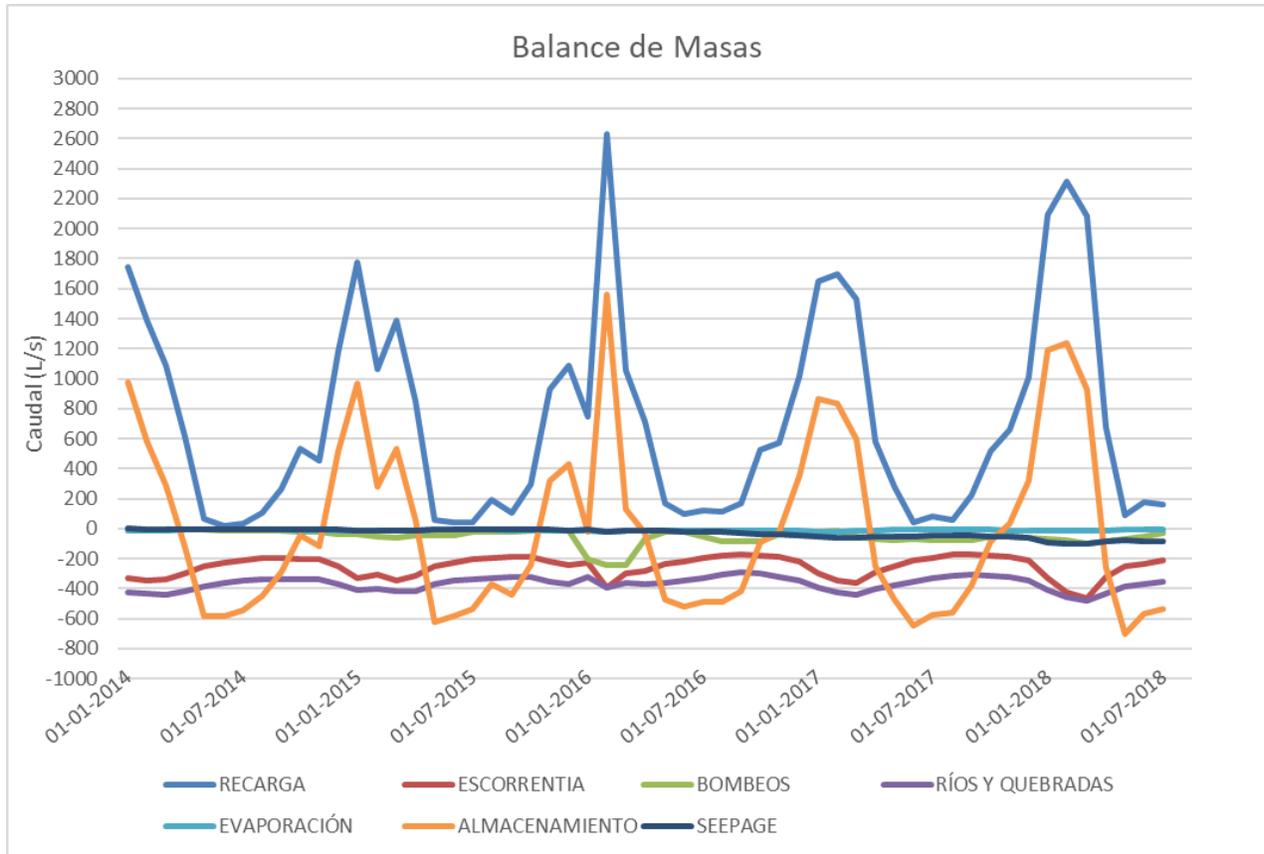


Figura 10-3 Balance de masas del modelo numérico transiente. Fuente: elaboración propia.

De los parámetros que intervienen el balance de masas es destacable el valor de la recarga por infiltración de lluvia (RECARGA). Este valor es la principal entrada de agua al sistema. Se observa claramente el comportamiento estacional de las precipitaciones, obteniéndose los valores máximos durante los meses de verano, donde el *peak* llega a 2600 l/s y valores mínimos en los meses de invierno, donde 33 l/s es el valor más bajo. El almacenamiento en la cuenca (ALMACENAMIENTO) responde a la variación de la recarga, como es de esperar.

La principal salida del sistema hídrico se produce a través del tramo del río Antawara, a la salida SE de la cuenca y definido en el modelo como un nivel base. Este valor está incluido en la condición RÍOS Y QUEBRADAS junto a los ríos, manantiales y drenes mencionados en el Capítulo 9. Los valores de esta condición fluctúan ente los 300 y 400 l/s.

Los caudales de bombeo (BOMBEO) corresponden a los datos entregados por la empresa minera.

El valor de *SEEPAGE* corresponde al afloramiento de agua en el rajo. Este valor entre enero 2014 y agosto 2016 presenta un comportamiento estacional con valores bajo los 20 l/s. Después de esta última fecha presenta un valor creciente, alcanzando 92 l/s de *seepage*.

El error del balance de masas global del modelo transiente para el período de calibración, es decir, el valor Residual se muestra en la Figura 10-4. Se observa que el valor cumple con los requisitos de la Tabla 10-2.

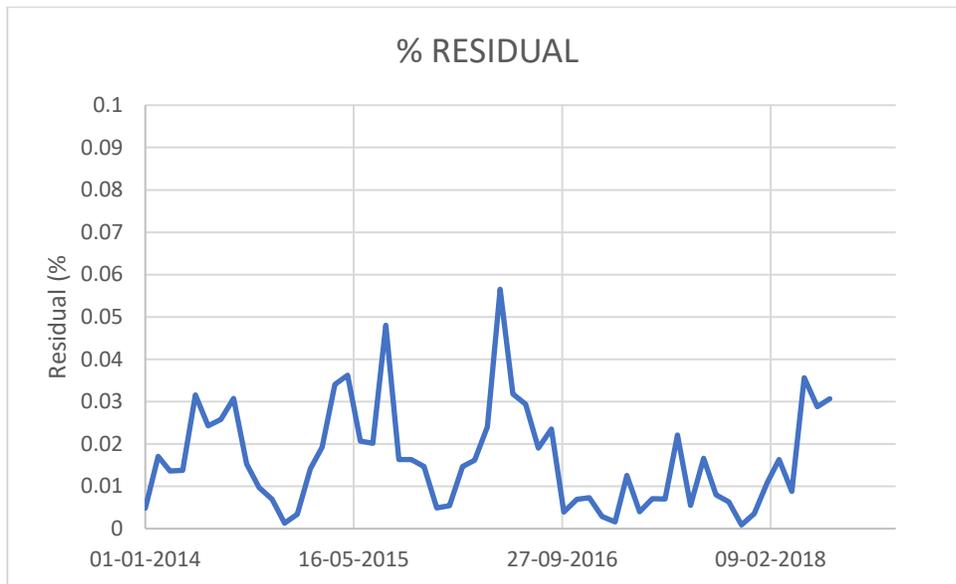


Figura 10-4 Error numérico del balance de masas del modelo transiente.

### 10.3. Calibración de niveles piezométricos

En la calibración del modelo transiente se utilizan 55 piezómetros de la red de monitoreo. Estos piezómetros se separan según zonas en la cuenca para facilitar su análisis. Las zonas definidas son:

1. Río Bartolina

MW06-1A – MW06-1C – MW06-2A – MW06-6A – MW06-8A

2. Río Amaru

MW09-3B – MW09-4A

3. Centro del rajo

TH2-10

4. S y SO del rajo

MW06-3B – MW09-6A – TH2-5 – TH04-P3 – TH04-P1 – TH1-11P3 – TH1-11P2 – TH-02 – TH-03A – F3-INC-04 – TH17-2 – TH02-P3 – TH02-P2 – TH1-1P2 – TH-13P2 – HU16-5P2

5. Campamento

TH2-7 – TH01-P3 – TH01-P2 – TH05-P3 – TH05-P1 – TH1-3-P3 – TH1-3-P2 – TH-15-P3 – TH-15-P2 – TH2-2-P2

6. Killari (NO del rajo)

MW06-5A – TH2-9 – TH17-1

7. Wayra Alto (NE del rajo)

MW06-4A – TH-08 – TH2-1 – FBGT07-3-P1 – FBGT07-3-P2 – FBGT07-2

8. Wayra Bajo (SE del rajo)

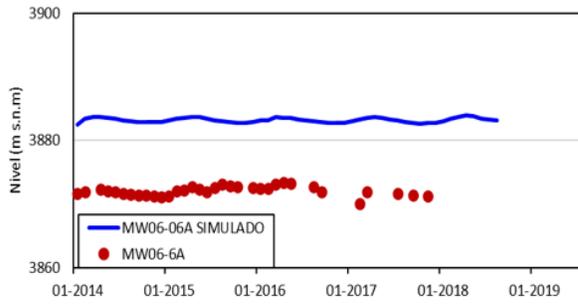
TH-07 – TH-12(PW-09) – TW09-01 – OBS-01B-P1 – OBS-01B-P2 – OBS-2B-P1 – OBS-2B-P2 – FBGT07-4-P1 – FBGT07-4-P2

9. O del rajo

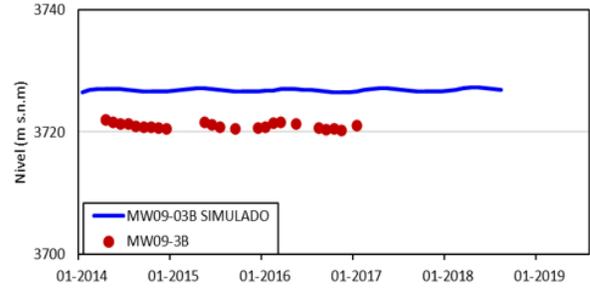
TH1-12 – TH1-8A-P3 – TH1-8A-P2 – TH2-4-P2

A continuación, se presenta la evolución de un piezómetro por cada zona. En ANEXO 8 se encuentra el comportamiento obtenido de todos los piezómetros.

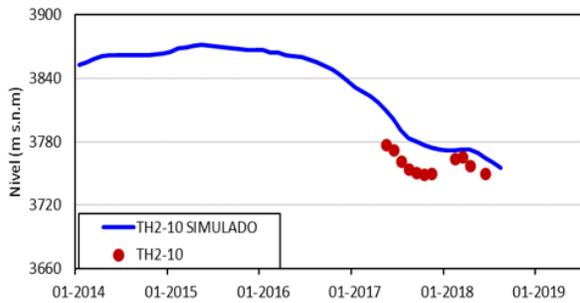
**Calibración Piezómetro MW06-6A**



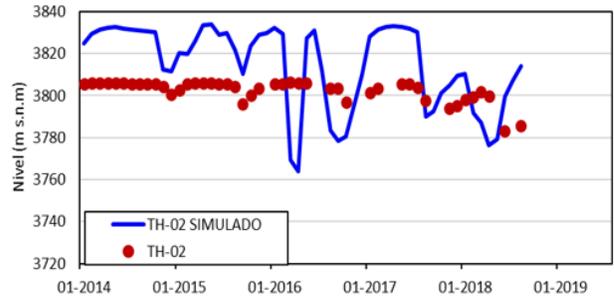
**Calibración Piezómetro MW09-3B**



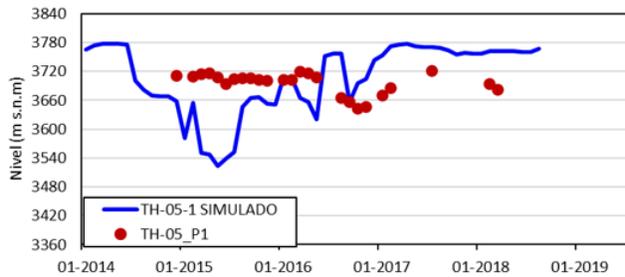
**Calibración Piezómetro TH2-10**



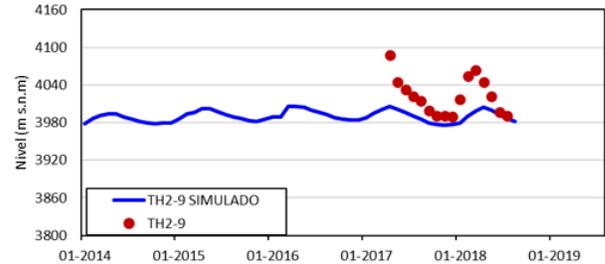
**Calibración Piezómetro TH-02**



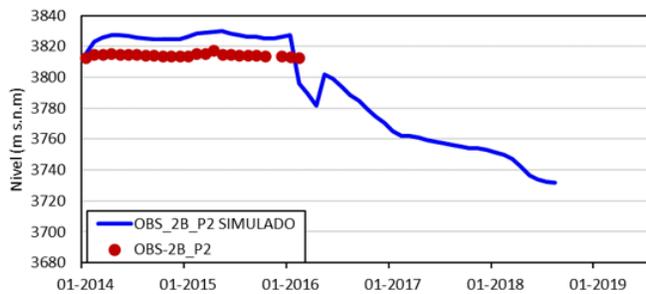
**Calibración Piezómetro TH-05\_P1**



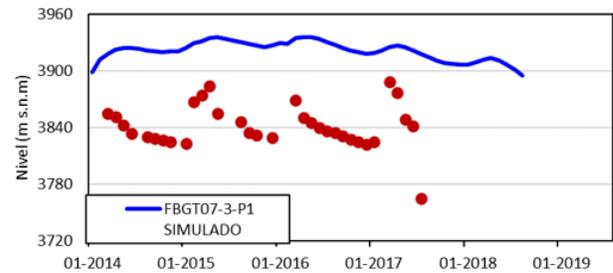
**Calibración Piezómetro TH2-9**



**Calibración Piezómetro OBS-2B\_P2**



**Calibración Piezómetro FBGT07-3-P1**



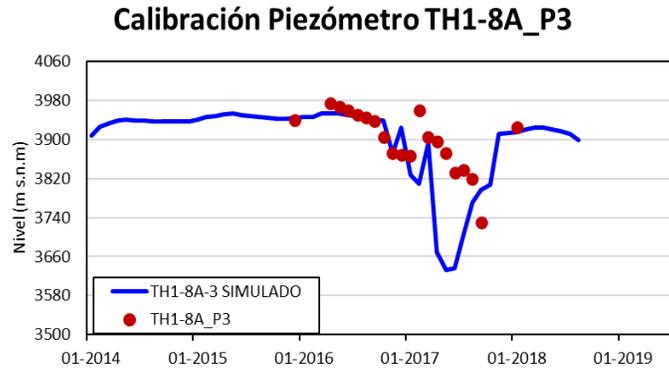


Figura 10-5 Gráficos de calibración de piezómetros en cada zona del modelo.

El ajuste de niveles obtenidos presenta un valor de SRMS de 10,2%, siendo un valor levemente más alto que el recomendado en la Tabla 10-2.

#### **10.4. Simulación predictiva hasta diciembre 2021.**

La simulación predictiva abarca desde septiembre 2018 hasta diciembre 2021. Para lograr esta simulación se ha incluido tres topografías correspondientes a los meses de diciembre de los años 2019, 2020 y 2021. Estas son topografías que la empresa minera proyecta que tendría el rajo en esos años.

En el modelo se utilizan los parámetros obtenidos de la calibración transiente y los definidos en el Capítulo 8. Respecto a los datos de pozos de bombeo, estos se simulan proyectando el último caudal registrado.

El balance de masas obtenido para la etapa predictiva con la nueva recalibración se muestra en la Figura 10-6.

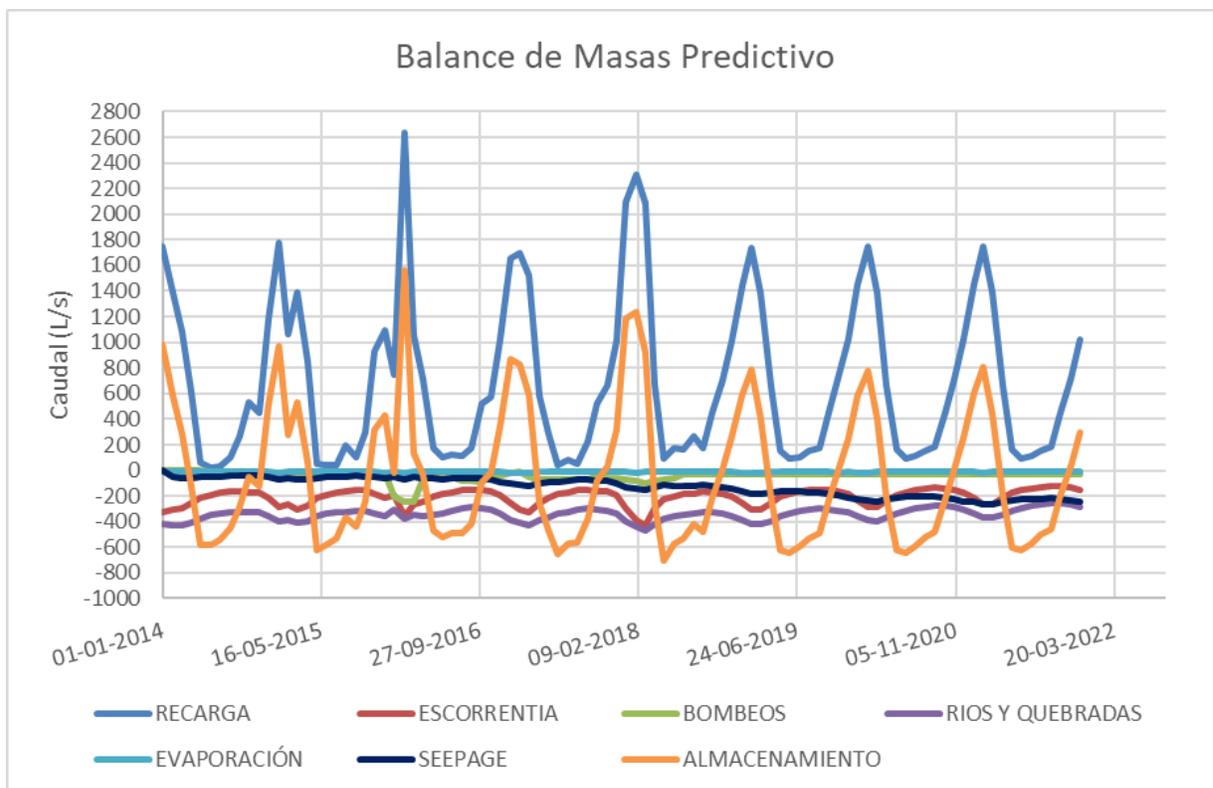


Figura 10-6 Balance de masas obtenido del modelo predictivo.

Se observa un aumento en los caudales de *seepage*, esto se debe a la modificación del plan de minado, ya que la condición *Ultimate* del rajo cambia a la topografía dada en el año 2021. El análisis de la presente memoria se realiza exclusivamente con el modelo transiente, que utiliza el plan de minado real del rajo, dado hasta el año 2018.

### 10.5. Calibración 2018

La última calibración realizada por Itasca se realizó durante el 2018 y contaba con la misma información meteorológica que la utilizada en la recalibración presente y la información estructural corresponde a la entregada por Fedorovich (2017).

Los porcentajes de recarga utilizadas en la calibración anterior para la zona de calizas y rajo difieren a la actual. En el modelo anterior los valores van desde un 90% de la precipitación para zonas más altas hasta 5% en zonas de menor altitud.

Los parámetros calibrados para las unidades hidrogeológicas del modelo anterior se muestran en la Tabla 10-4.

Tabla 10-4 Parámetros calibrados en modelo anterior.

Nombre	ID	Kx (m/d)	Ky (m/d)	Kz (m/d)	Ss	Sy
MBL	1	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-06	0,001
GD	2	0,0412	0,0412	0,0412	1,E-06	0,001
SK	3	0,17	0,17	0,17	5,E-06	0,001
MBC	4	0,004882	0,004882	0,004882	5,E-06	0,001
ENDO	5	0,015567	0,015567	0,015567	1,E-06	0,001
BX	6	0,05564	0,05564	0,05564	1,E-04	0,01
MZB	7	0,010035	0,010035	0,010035	5,E-06	0,001
MZH	8	0,0237853	0,0237853	0,0237853	5,E-06	0,001
MZM	9	0,0642651	0,0642651	0,0642651	5,E-06	0,001
MZQ	10	0,0036116	0,0036116	0,0036116	5,E-06	0,001
MBF	11	0,207	0,207	0,207	5,E-06	0,001
TOBA	12	0,12	0,12	0,012	5,E-05	0,01
SND	13	0,0010034	0,0010034	0,0010034	5,E-07	0,0001
SHL	14	0,0009681	0,0009681	0,0009681	5,E-07	0,0001
ALV	15	1	1	0,1	1,E-02	0,15
LMT	16	0,056458	0,056458	0,056458	5,E-06	0,001
F_REG	17	0,5	0,5	0,5	1,E-06	0,001
ZF	18	0,1	0,1	0,1	5,E-06	0,001
ZF_COND	19	0,385848	0,385848	0,385848	1,E-04	0,02
ZF_GUISE	20	0,0385849	0,0385849	0,0385849	5,E-06	0,001

El SRMS del modelo anterior es de 10,4% y el balance de masas hasta el período agosto 2018 obtenido se muestra en la Figura 10-7.

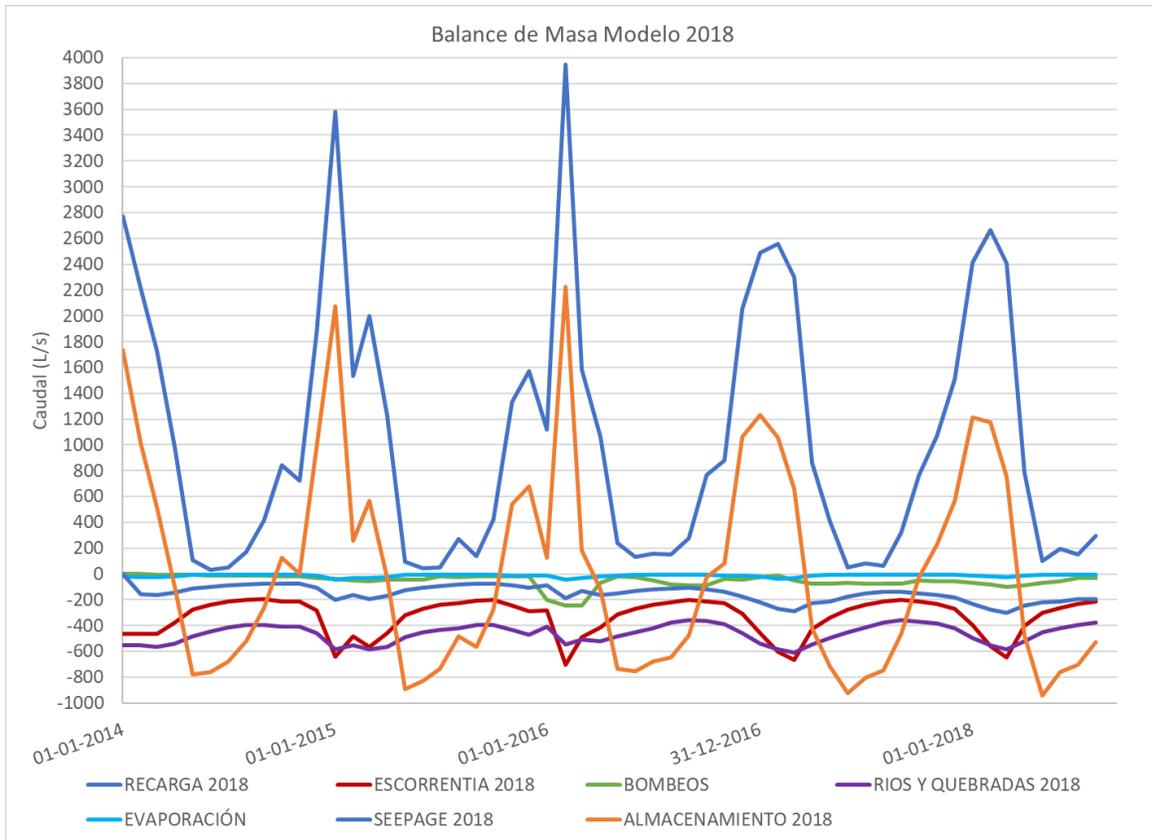
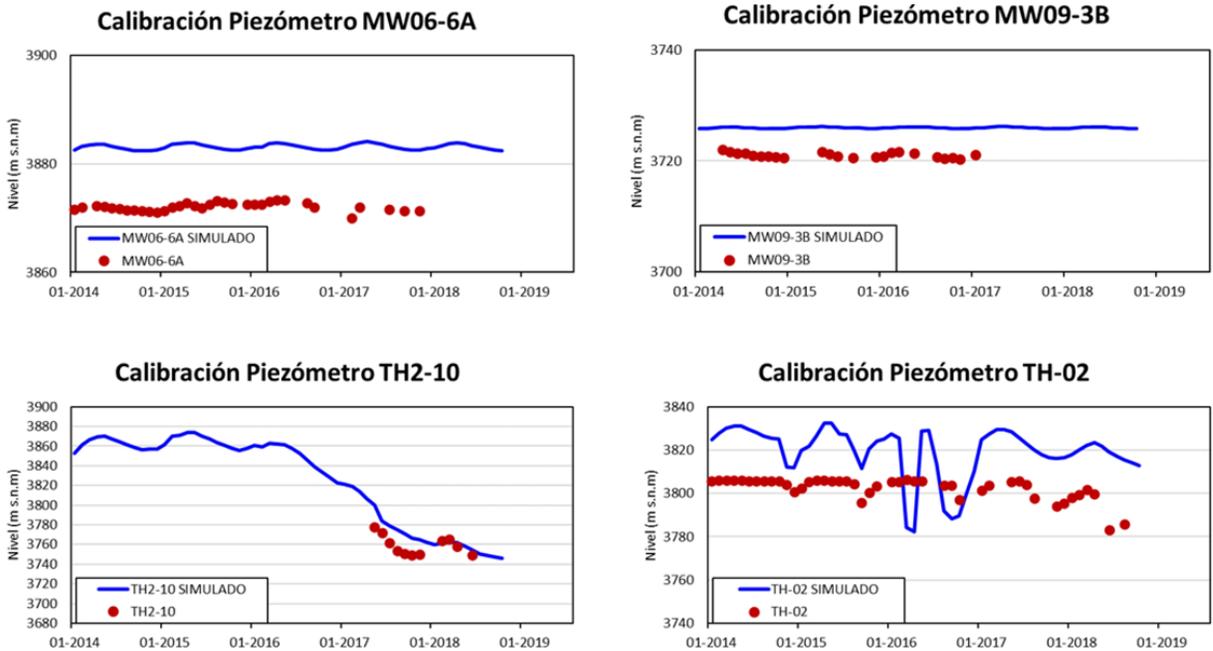


Figura 10-7 Balance de masas calibración transiente modelo anterior. Fuente: elaboración propia.

Algunos de los niveles en piezómetros obtenidos se muestran en la Figura 10-8.



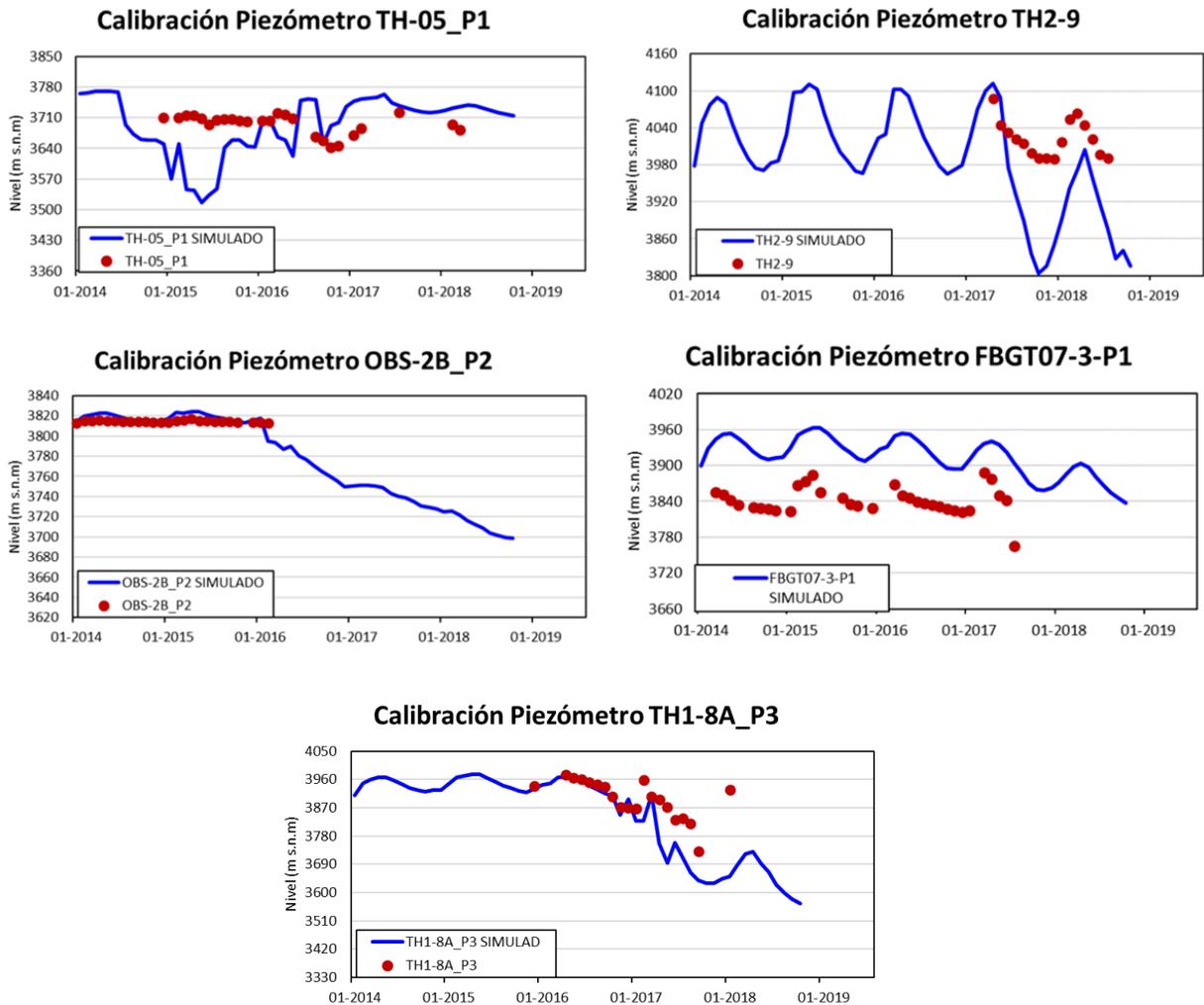


Figura 10-8 Gráficos de calibración de piezómetros obtenidos del modelo anterior.

## 10.6. Discusión de resultados

### 10.6.1 Modelo estacionario

En el modelo estacionario se obtienen los niveles iniciales que se utilizan como condición inicial para el modelo transiente. Para esto se debe contar con piezómetros con data disponible para la fecha de inicio de simulación, que en este caso es enero 2014, ya que es la fecha en que el proyecto no iniciaba operaciones. Se cuenta con 11 piezómetros de un total de 56, concentrados en la zona del rajo.

La Figura 10-1 muestra los resultados de la calibración estacionaria, donde en general los piezómetros presentan un buen ajuste, con excepción de un piezómetro que se encuentra bajo el nivel medido. Este se ubica en la zona del rajo, en la zona

de la quebrada Killari del dominio 3B. Al intentar aumentar los niveles en este dominio se ven altamente afectados todos los piezómetros del sector Wayra Alto y Bajo (al NE y SE del rajo), por lo que se decide dejar los parámetros definidos en 10.1.1 y calibrar mejor este piezómetro en el modelo transiente. El SRMS considerando este piezómetro resulta de 11% el cual está ligeramente por sobre lo recomendado por Barnett (2012), y al no considerar este piezómetro se reduce a un 8%, confirmando el impacto que genera en el indicador este piezómetro.

A modo general, todos los piezómetros entregan niveles simulados por sobre el nivel medido.

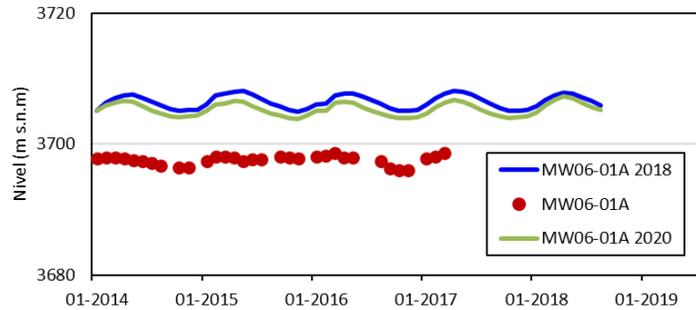
### **10.6.2 Modelo transiente**

En el modelo transiente se busca obtener una representación de niveles y balance de masa lo más cercano a lo definido en el modelo conceptual y a la información entregada por el cliente. El modelo anterior cuenta con información no acorde a la entregada según el modelo conceptual. En *MINEDW* los valores llegan a un 90% de precipitación en forma de recarga en las zonas del rajo con mayor altitud, lo cual no coincide con lo entregado en diferentes investigaciones realizadas anteriormente en la zona. Como se menciona en el Capítulo 6, el porcentaje de precipitación en la zona de calizas ronda valores entre 60%-40%, teniendo una recarga de tipo moderada (Itasca, 2015b). La utilización de porcentajes tan altos en el modelo anterior se debe a que los piezómetros ubicados en zonas más altas del rajo (zona Wayra Alta y Killari) han sido lo más dificultosos de calibrar, por lo que modificar este parámetro en el modelo genera una respuesta rápida en el ascenso o descenso de los niveles.

El nuevo modelo con incorporación de anisotropía mejora el SRMS en un 0.2% respecto al modelo 2018, acercándolo al valor recomendado por Barnett (2012), pero al hacer un análisis comparativo por piezómetro de los niveles simulados se observan resultados tanto de mejora en la tendencia como de pérdida de esta. A modo comparativo, se muestran algunos de los niveles obtenidos en la calibración 2018 y 2020 para cada sector. En ANEXO 8 se encuentra la comparación de todos los niveles.

- Río Bartolina

### Calibración Piezómetro MW06-01A



### Calibración Piezómetro MW06-8A

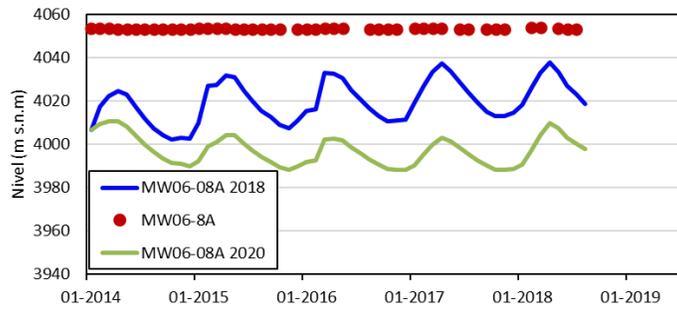
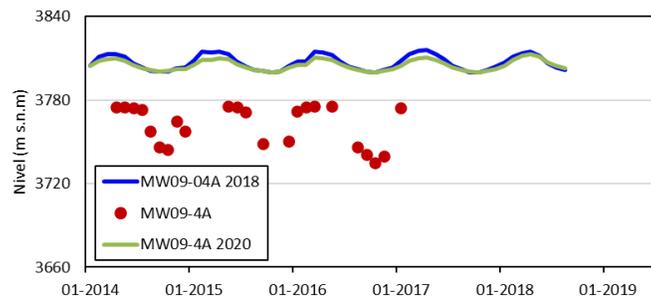


Figura 10-9 Niveles en río Bartolina.

Los piezómetros de este sector se encuentran en tramos del río Bartolina. Por lo general, los niveles se encuentran por sobre el nivel medido en terreno, a excepción del piezómetro MW06-8A de la Figura 10-9. Los niveles simulados por el modelo 2020 en esta zona se encuentran por debajo de los niveles simulados en modelo 2018. No se observan cambios drásticos entre el modelo 2018 y 2020.

- Río Amaru

### Calibración Piezómetro MW09-4A



### Calibración Piezómetro MW09-3B

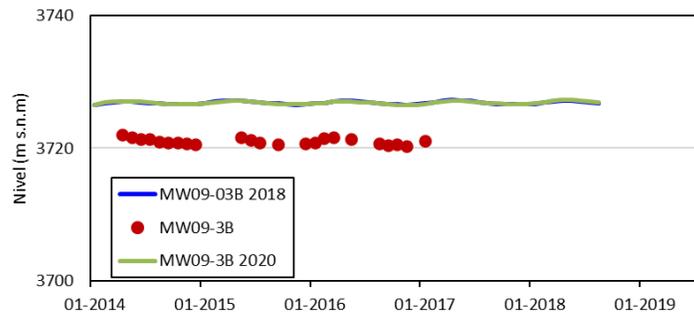


Figura 10-10 Niveles en río Amaru.

Para esta zona se cuenta con dos piezómetros mostrados en la Figura 10-10. Presentan un comportamiento estacional comparable al medido en terreno y siempre se encuentra por sobre el valor medido. No se observan diferencias significativas en los valores obtenidos para el modelo 2020 y 2018.

- Centro del rajo

### Calibración Piezómetro TH2-10

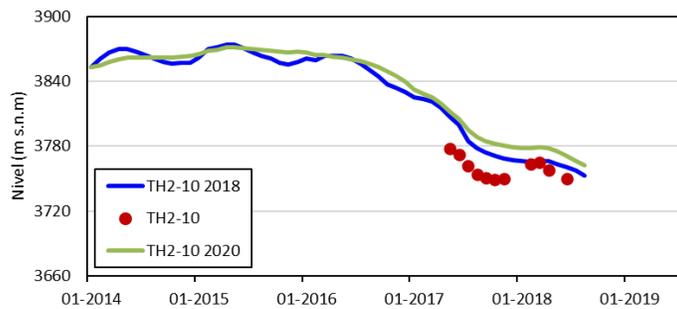


Figura 10-11 Nivel en centro del rajo.

El único piezómetro de la zona se muestra en la Figura 10-11. Se observa que el nivel simulado por el modelo 2018 se ajusta más a los valores medidos en terreno. El modelo 2020 si bien sigue ligeramente la tendencia del piezómetro, está por sobre el valor real medido.

- S y SO del rajo

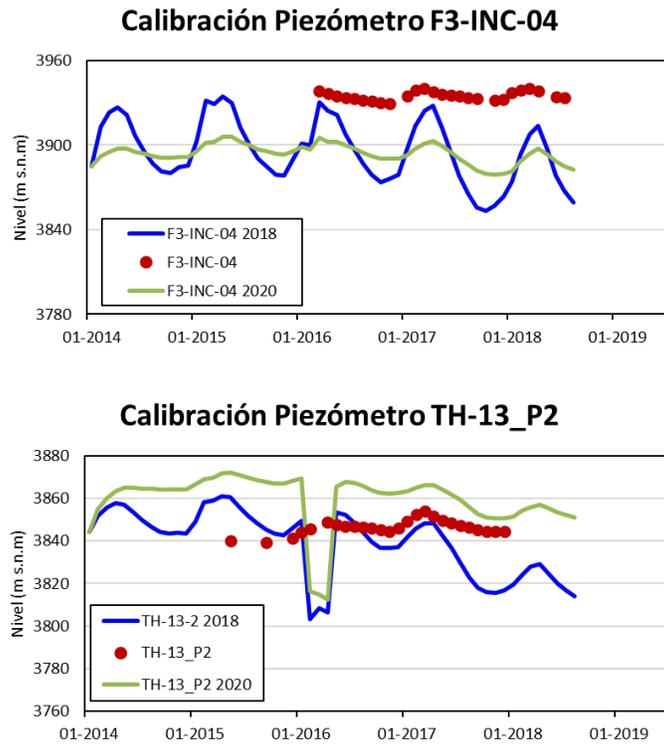
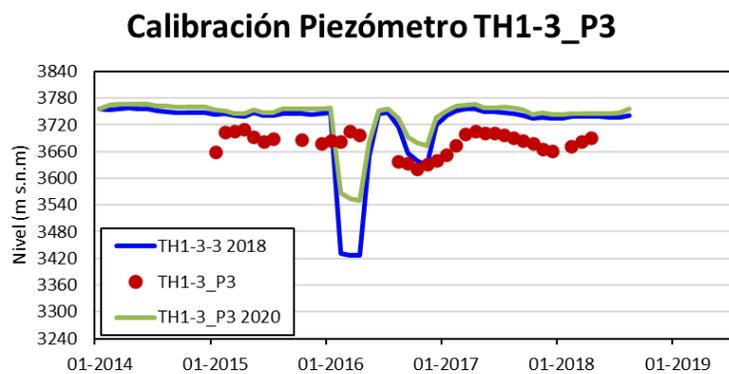


Figura 10-12 Niveles en S y SO del rajo.

En la zona S y SO del rajo se tiene en general que los niveles están por sobre el nivel medido, con excepciones como el piezómetro F3-INC-04. El modelo 2020 y 2018 no logra reproducir el comportamiento de la mayoría de los piezómetros en la zona, como el caso del piezómetro TH-13\_P2.

- Campamento (SE del rajo)



### Calibración Piezómetro TH-15\_P3

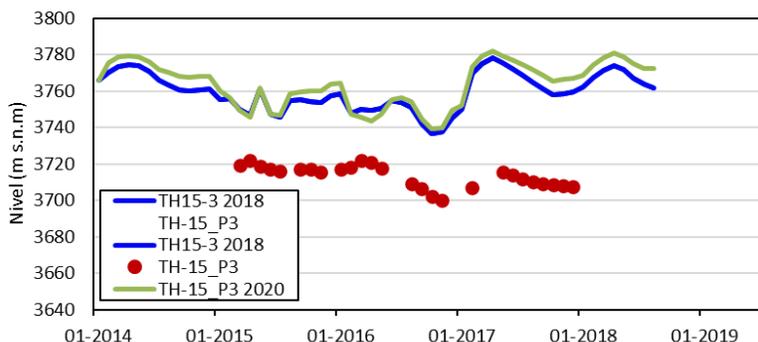
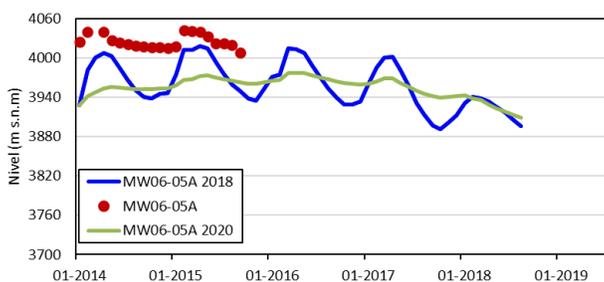


Figura 10-13 Niveles en zona Campamento.

En la zona del campamento los niveles simulados se encuentran generalmente por sobre el nivel medido en terreno, como se observa en TH-15\_P3 de la Figura 10-13. Se puede verificar en algunos piezómetros que los niveles de la simulación 2020 están ligeramente por sobre los simulados en 2018. Pero a pesar de lo anterior, se observan mejoras en la representación de la tendencia de varios piezómetros respecto al año 2018, como se observa en TH1-3\_P3, de la Figura 10-13, donde el descenso del modelo 2018 no resulta tan drástico, comparado al año 2020.

- Killari, NO del rajo

### Calibración Piezómetro MW06-05A



### Calibración Piezómetro TH2-9

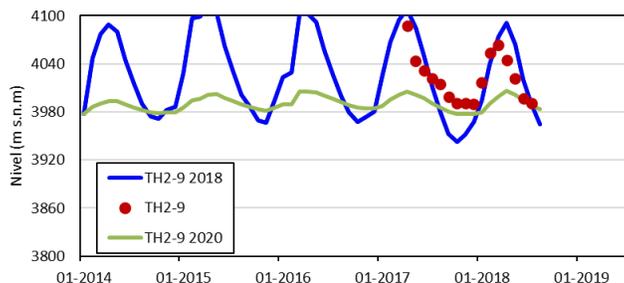


Figura 10-14 Niveles en Killari, al NO del rajo.

En esta zona los niveles simulados en el modelo 2020 se encuentran por debajo de los medidos en terreno, como se observa en ambos piezómetros en la Figura 10-14. El modelo 2020 reproduce el comportamiento oscilante del piezómetro real, pero no alcanza los *peaks* de estos, como se observa en el piezómetro TH2-9, donde el modelo 2018 reproduce mejor la tendencia.

- Wayra Alto (NE del rajo)

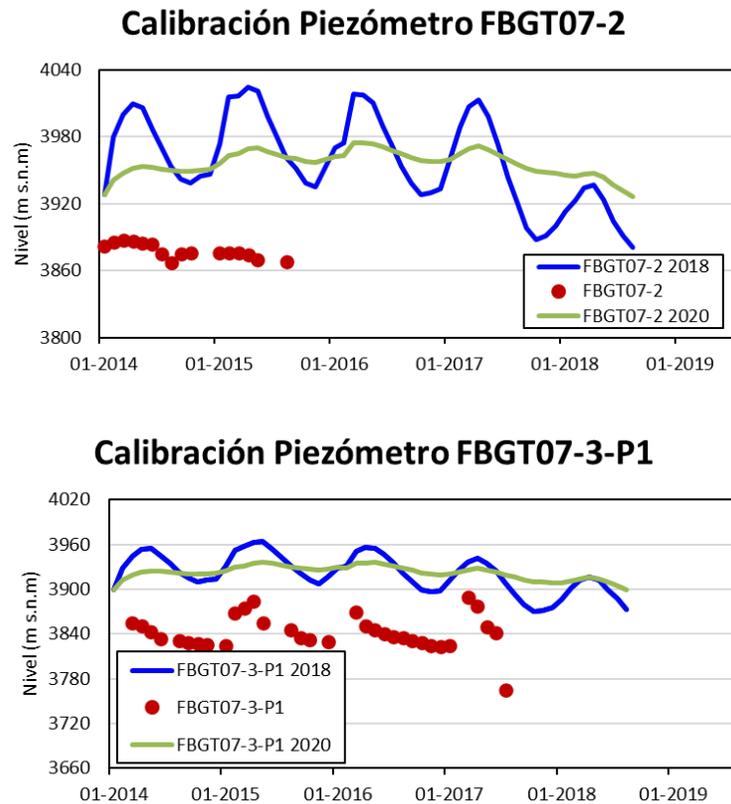


Figura 10-15 Niveles Wayra Alto.

En esta zona los niveles se encuentran por sobre los medidos en terreno, como se observa en los gráficos de la Figura 10-15. En general en esta zona los piezómetros reales se comportan con una marcada oscilación, por lo que el modelo 2018 se acomoda mejor. En la simulación 2020 se pierde la marcada oscilación de los niveles, pero se tienen niveles más bajos, como se observa en el piezómetro FBGT07-2.

- Wayra Bajo (SE del rajo)

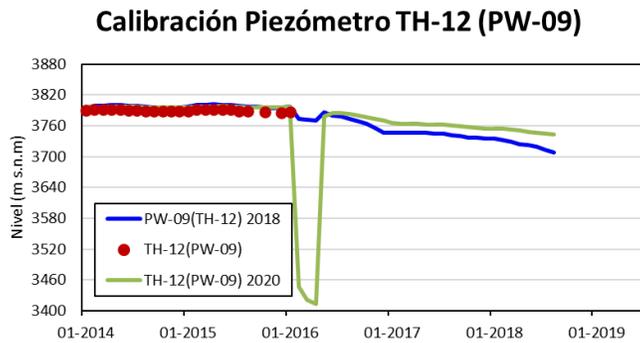
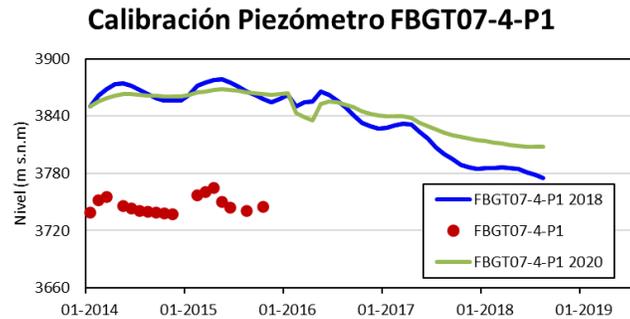
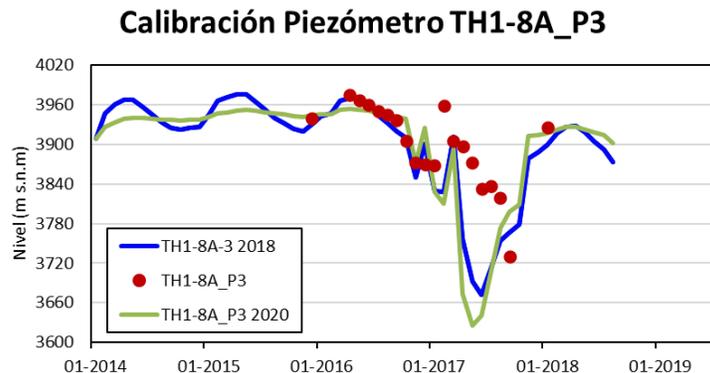


Figura 10-16 Niveles en Wayra Bajo.

Los niveles simulados en modelo 2018 y 2020 se mantienen generalmente por sobre el nivel medido. Con el modelo 2020 se observan bajas en los niveles máximos comparados al 2018, pero no se logra reproducir el comportamiento oscilatorio de los piezómetros. Un ejemplo se observa en el piezómetro TH-12(PW-09) de la Figura 10-16, donde se identifica un descenso importante el cual no representaría la posible tendencia del piezómetro, ya que justo en ese período se detienen los datos medidos. El descenso considerable podría tener su origen en la afectación que produce un pozo de bombeo ubicado en las cercanías y que coincide con el período de descenso en *MINEDW*.

- O del rajo



### Calibración Piezómetro TH1-12

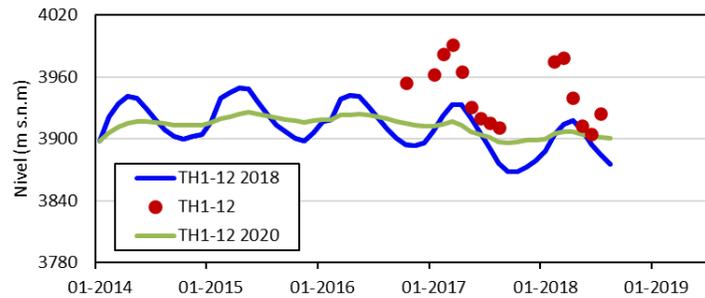
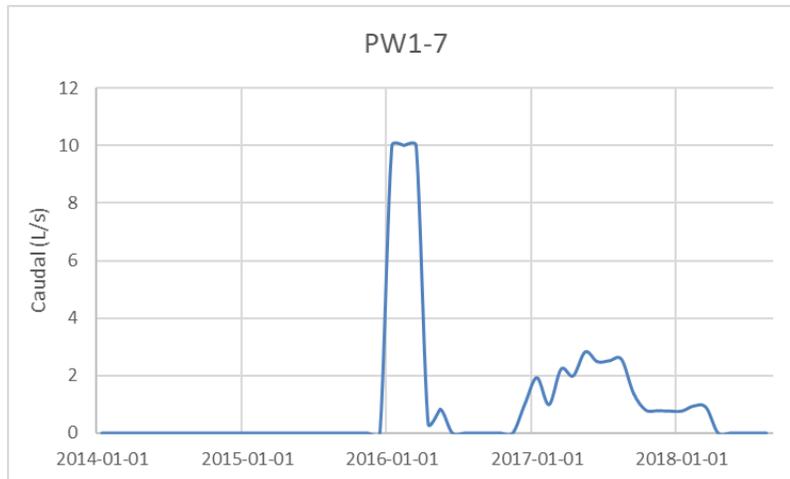


Figura 10-17 Niveles en zona O del rajo.

Los niveles simulados en esta zona se encuentran, generalmente, por debajo del nivel medido en terreno. El marcado comportamiento oscilatorio de todos los piezómetros en la zona en el modelo 2020 no es posible reproducirlo, como se observa en TH1-12. No se observan cambios importantes entre el modelo 2020 y 2018 en la tendencia de los piezómetros, como se observa en el piezómetro TH1-8A\_P3.

A modo general, los niveles obtenidos por el modelo 2020 no presentan variaciones considerables respecto al modelo 2018. En cuanto a la reproducción de la oscilación de los datos medidos de la zona Wayra Alto y en Killari (NO del rajo) no fue posible reproducirlo en el modelo 2020. El comportamiento oscilatorio que presenta la gran mayoría de las mediciones reales no fue posible reproducirlas tan marcadamente como el modelo 2018, posiblemente debido a la disminución de la conductividad hidráulica en las unidades hidrogeológicas del rajo. Al no tener esta respuesta oscilatoria en el modelo 2020, los *peaks* de medición no son tan altos, por lo que se tienen menores diferencias respecto al valor de terreno, a diferencia del modelo 2018.

Respecto a la zona S y SO, y también en zonas del Campamento, se observa un comportamiento heterogéneo en los niveles medidos reales, donde algunos presentan una marcada oscilación y otros se comportan de manera constante. También se tiene la presencia de los pozos de bombeo los cuales su efecto se ve reflejado en descensos importantes en algunos de los niveles simulados, pero no en el nivel medido. En la Figura 10-18 se ve un ejemplo de este efecto, donde el pozo de bombeo PW1-7 se ubica en las cercanías del piezómetro TH1-11\_P3, afectando el valor simulado en *MINEDW*. Esto sucede con varios piezómetros ubicados en la zona Sur y en el Campamento. Al no verse afectado el nivel medido en terreno se podría suponer que el modelo no está simulando en estas zonas la respuesta hidrodinámica real de los piezómetros.



### Calibración Piezómetro TH1-11\_P3

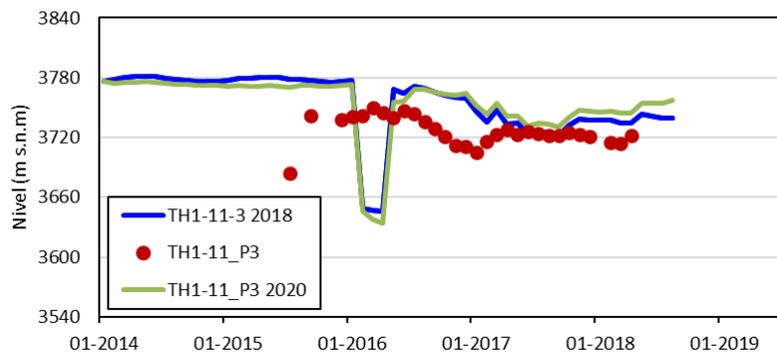


Figura 10-18 Pozo de bombeo PW1-7 ubicado en cercanías del piezómetro TH1-11\_P3.

En sectores como el río Bartolina y Amaru no se observan cambios considerables entre el modelo 2018 y 2020. La zona de Wayra Baja, al SE del rajo no presenta mayores cambios, sólo un leve aumento en los niveles y la pérdida en la oscilación de los niveles simulados en el modelo 2020. El comportamiento de los niveles medidos en terreno confirma la marcada heterogeneidad del lugar. El modelo 2020 es capaz de representar mejor esta característica en algunas zonas donde la respuesta de los niveles no presenta una variación importante, pero no en su totalidad.

Las equipotenciales obtenidas para ambos modelos se muestra en las Figuras 10-19 y 10-20. En ambos se observa que el flujo general en la cuenca va en dirección NO-SE. El flujo en los alrededores del rajo en el modelo 2020 y 2018 van en dirección S del rajo y hacia su fondo. El efecto de la anisotropía no muestra un impacto importante en cambios en gradiente de flujo en el modelo 2020.

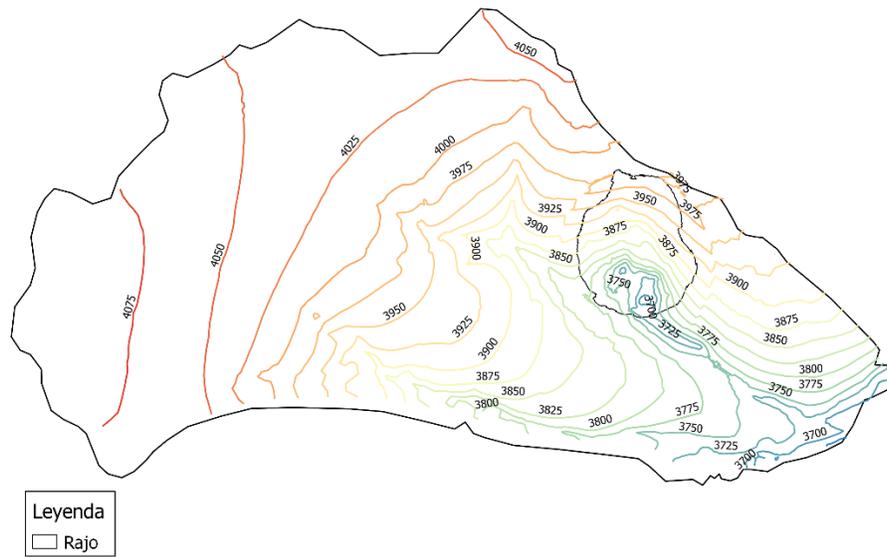


Figura 10-19 Equipotenciales modelo 2018, para agosto 2018.

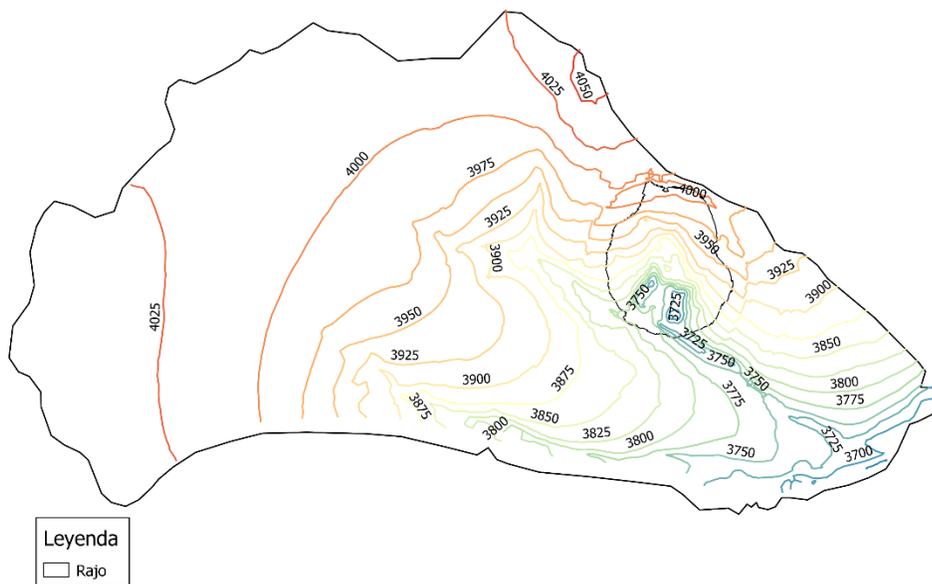


Figura 10-20 Equipotenciales modelo 2020, para agosto 2018.

Respecto al comportamiento del balance de masa, se observan diferencias considerables respecto a los caudales de recarga, almacenamiento y *seepage*. Para el valor de recarga se tiene un gráfico comparativo entre los valores obtenidos el 2018 y el actual en la Figura 10-21. Se observa que los valores mínimos y estacionalidad son similares pero el *peak* de todos los años simulados en el modelo 2018 son altos, alcanzando los casi 4000 l/s. Durante febrero 2015 se observan diferencias de más de 1000 l/s entre los dos modelos. Esto se debe a los elevados porcentajes de precipitación que actúa como recarga definido en el modelo anterior. Para el año 2020 la recarga promedio obtenida es de 705 l/s, la cual es un valor alto comparado al valor de recarga entregada por el informe Itasca (2015b) donde estiman un valor de recarga de 390 l/s, pero definido exclusivamente en la zona de relieves calcáreos del rajo, que es un área acotada, por lo que recarga en la cuenca completa de Bartolina debe ser mayor. Se utiliza este valor de referencia ya que no se cuenta con un valor conceptual para la cuenca exacta definida en el presente modelo. Teniendo en consideración esto, es que se puede mencionar que los valores entregados por *MINEDW* en el modelo 2020 tienen coherencia con la recarga que está teniendo la cuenca Bartolina en toda su extensión.

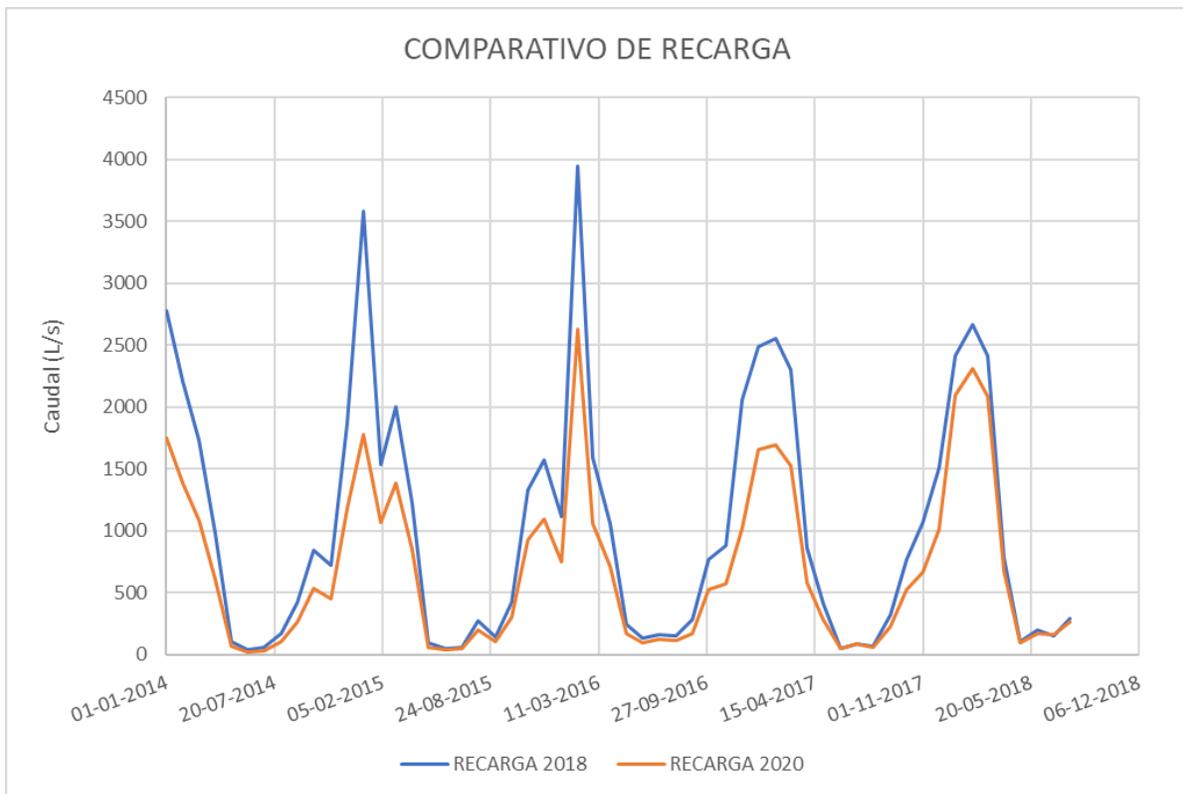


Figura 10-21 Gráfico comparación de caudal de recarga del modelo transiente en año 2018 y 2020.

Los caudales de *seepage* obtenidos en cada uno de los modelos se observan en el gráfico de la Figura 10-22. En ambas curvas se identifica una tendencia creciente en caudal de *seepage*, la cual tiene coherencia porque las fases de avance del minado profundizan en el nivel freático, aumentando el *seepage*. El caudal del año 2018 es considerablemente alto, superando los 100 l/s desde el 2016 en adelante. En cambio, para el modelo 2020 se tiene un caudal bajo los 10 l/s los primeros años, para comenzar a aumentar desde el 2016, llegando a un *peak* de 92 l/s en marzo 2018. Entre el modelo 2018 y 2020 se observan diferencias de hasta 150 l/s. De este valor no se tiene información documentada en el modelo conceptual, pero en base a comentarios recibidos por Itasca de parte de la empresa a cargo de Bartolina Andina, los caudales de *seepage* deberían ser bajos los 100 l/s, por lo que la modelación 2020 se acerca a este objetivo.

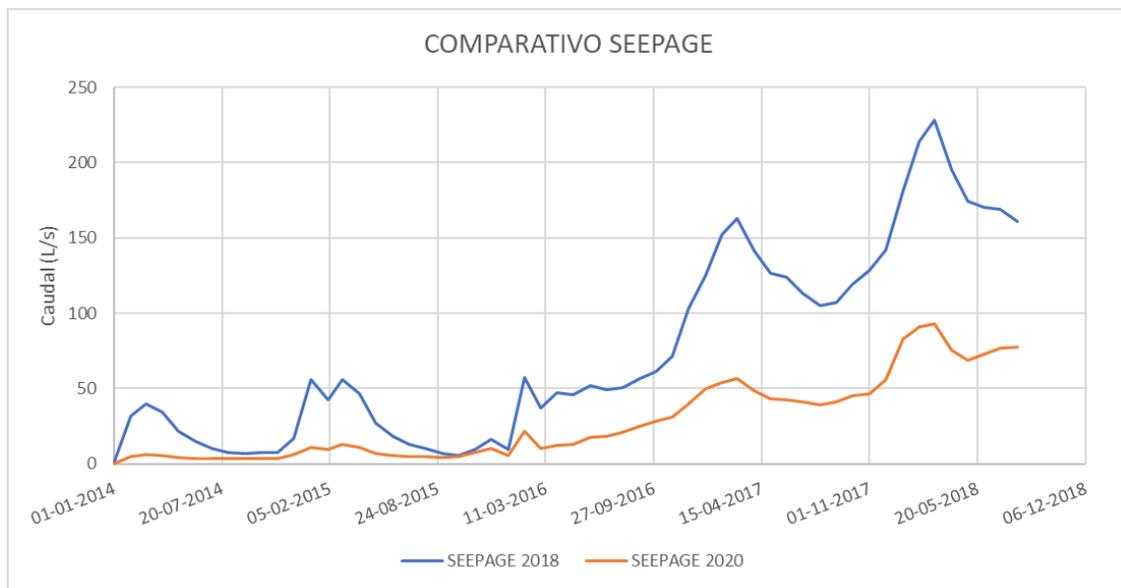


Figura 10-22 Gráfico comparación caudal de *seepage* en el rajo para modelación transiente en año 2018 y 2020.

Los caudales de la condición de borde *CHEAD*, mostrados en la Figura 10-23, corresponde a los ríos y quebradas que actúan en el modelo tanto a nivel de dren o como una carga constante, que en este caso es el río Antawara ubicado a la salida de la cuenca. Se verifica en ambas curvas un comportamiento estacional y diferencias mínimas. El caudal del modelo 2020 fluctúa entre los 400 y 600 l/s,

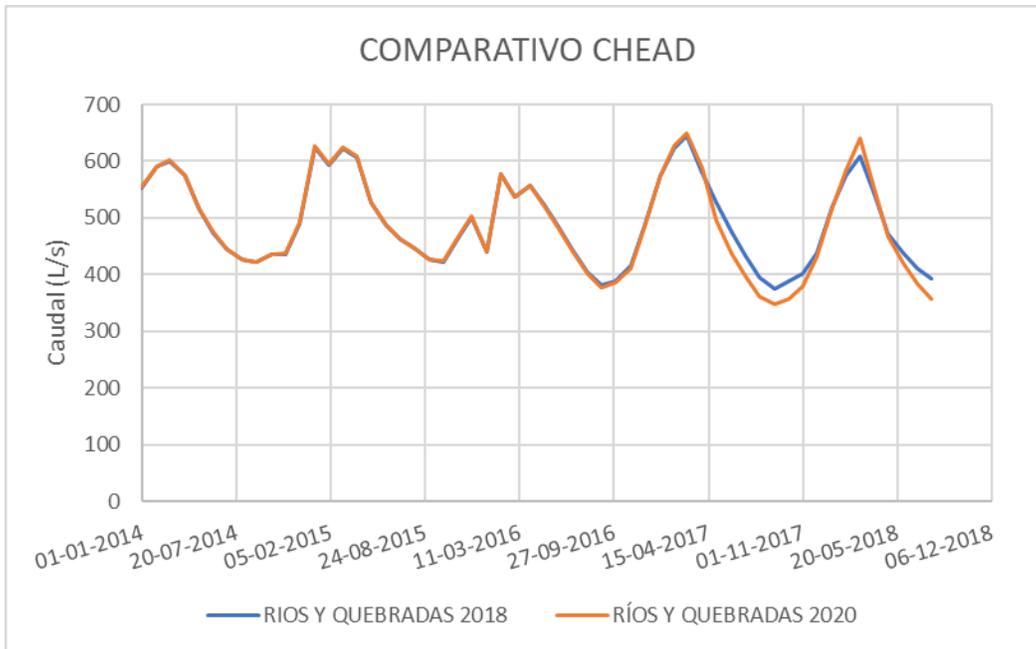


Figura 10-23 Gráfico comparación caudal de carga en ríos y quebradas para la modelación transiente en año 2018 y 2020.

Para un análisis más detallado respecto al comportamiento de los ríos, se analiza individualmente el caudal entregado por *MINEDW* para los ríos más importantes en el rajo: Bartolina, Antawara y Amaru. En la Figura 10-24 se muestra el gráfico resultante del caudal del río Bartolina simulado en *MINEDW*. Los caudales oscilan en valores entre 120 y 160 l/s aproximadamente. Estos rangos coinciden con los valores obtenidos en diversas campañas, resumidas en la Tabla 10-5.

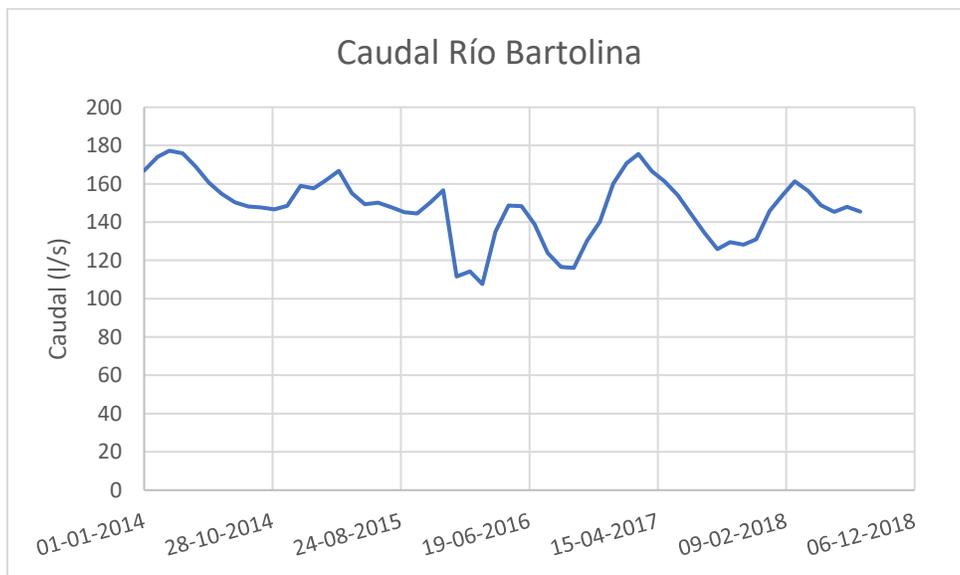


Figura 10-24 Caudal simulado en modelo transiente 2020 para río Bartolina.

En la Figura 10-25 se muestra el caudal del río Antawara simulado en *MINEDW*. Este río es el punto de salida de la cuenca y presenta valores entre 78 y 85 l/s. Estos valores comparados a los obtenidos en la Tabla 10-5 presentan rangos mucho menores a los aforados por Golder (2010). No se cuenta con datos actuales de caudales de aforo en este río para poder comparar y encontrar una correlación entre el inicio de operaciones de la mina con la bajada de caudal en el río.

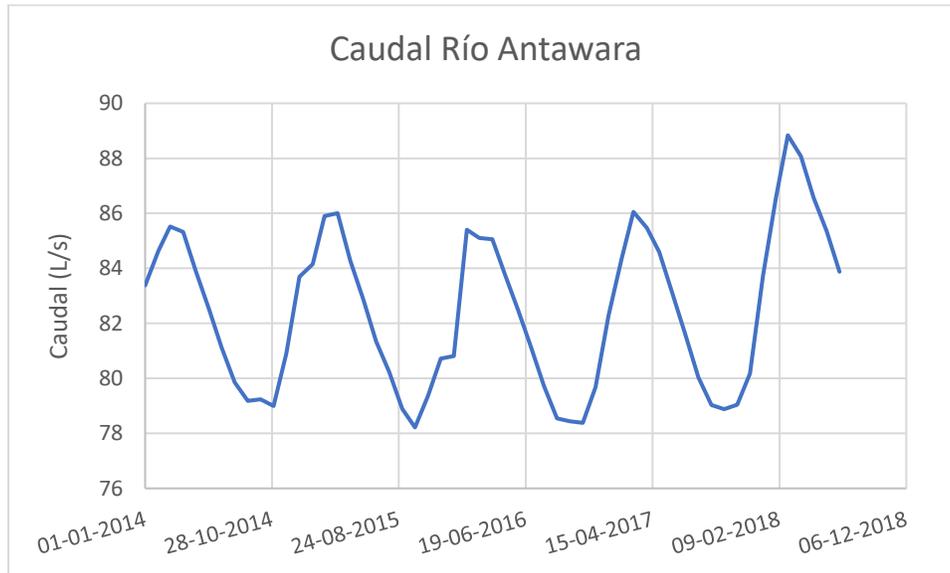


Figura 10-25 Caudal simulado en modelo transiente 2020 para río Antawara.

En la Figura 10-26 se muestra el caudal del río Amaru simulado en *MINEDW*. Este río se ubica al sur de la cuenca y en la modelación entrega valores entre 80 y 150 l/s. Este valor se encuentra en el rango medido por Golder (2010) en la Tabla 10-5, aunque bajo el valor promedio medido, que es de 300 l/s.

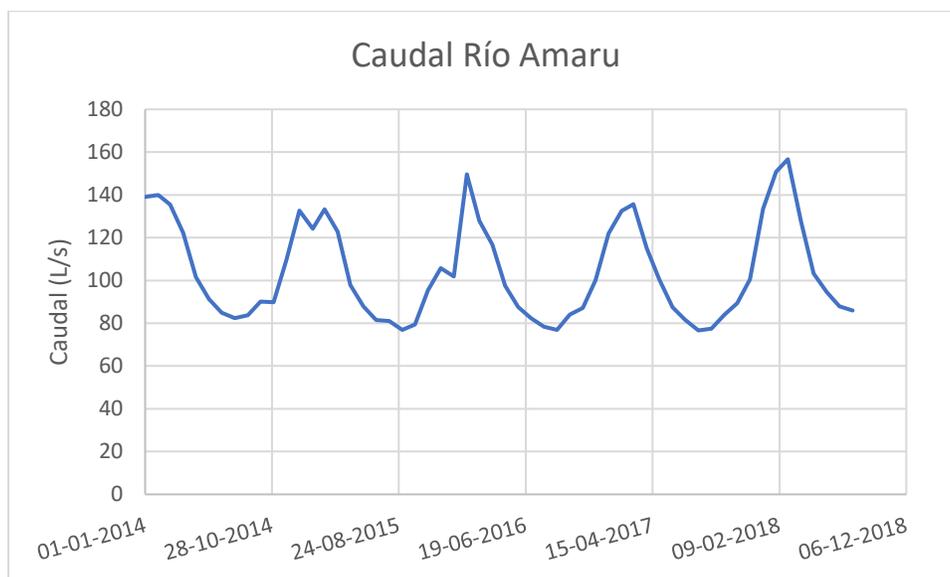


Figura 10-26 Caudal simulado en modelo transiente 2020 para río Amaru.

Tabla 10-5 Valores de aforos realizados en ríos de la cuenca.

Río	Q (L/s)	
	Golder 2010	Itasca 2015
	-	jun-15 a oct-15
<b>Bartolina</b>	120-134	61,2-244,3
<b>Amaru</b>	0-1146	0
<b>Antawara</b>	790-895	-

### 10.6.3 Escenario predictivo

Los resultados del modelo predictivo 2020 se comparan con el modelo predictivo 2018. Los caudales de ambos modelos son superiores a los obtenidos en sus respectivos modelos transientes, debido a que se agregan topografías planificadas por la empresa minera correspondientes a los años 2019, 2020 y 2021 enviadas por ellos mismos. Esto cambia la condición *Ultimate* del rajo, ya que ahora se cuenta como topografía final la del año 2021, provocando cambios en los caudales simulados del rajo.

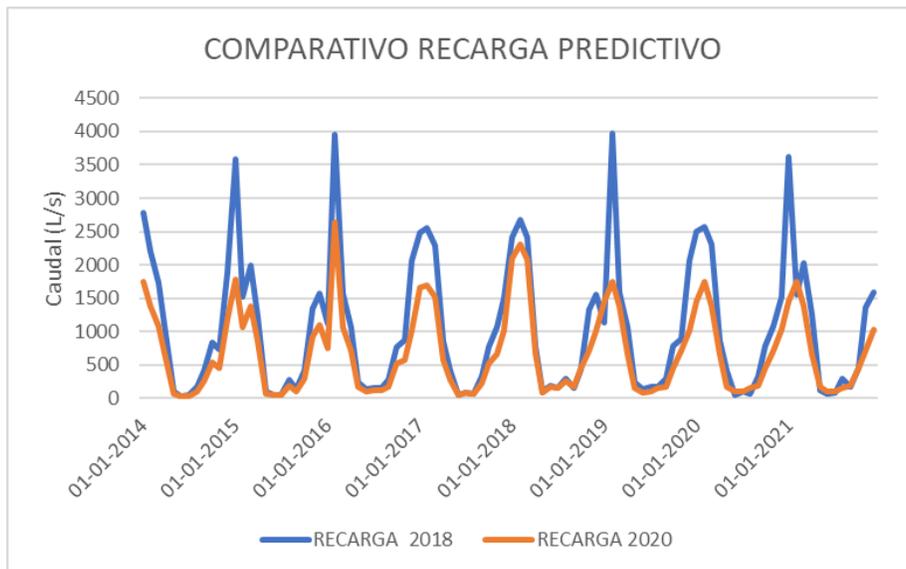


Figura 10-27 Comparativo de recarga para escenario predictivo.

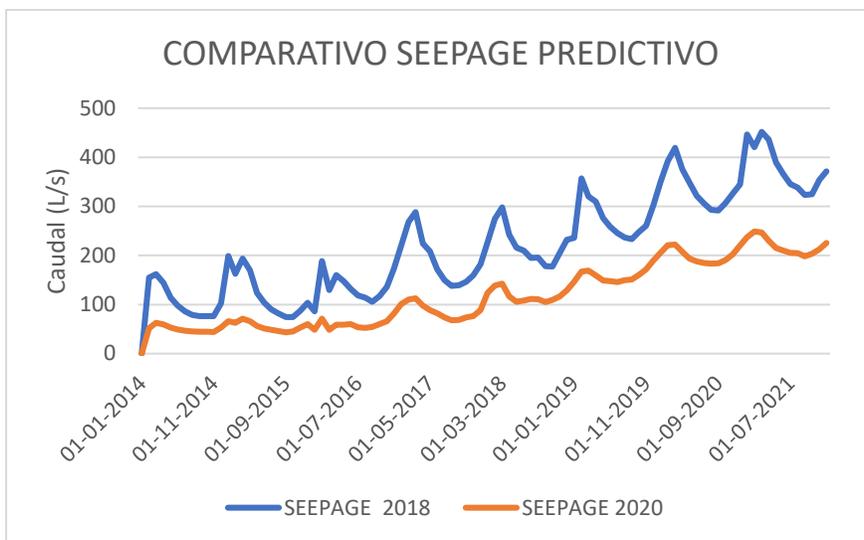


Figura 10-28 Comparativo de seepage para escenario predictivo.

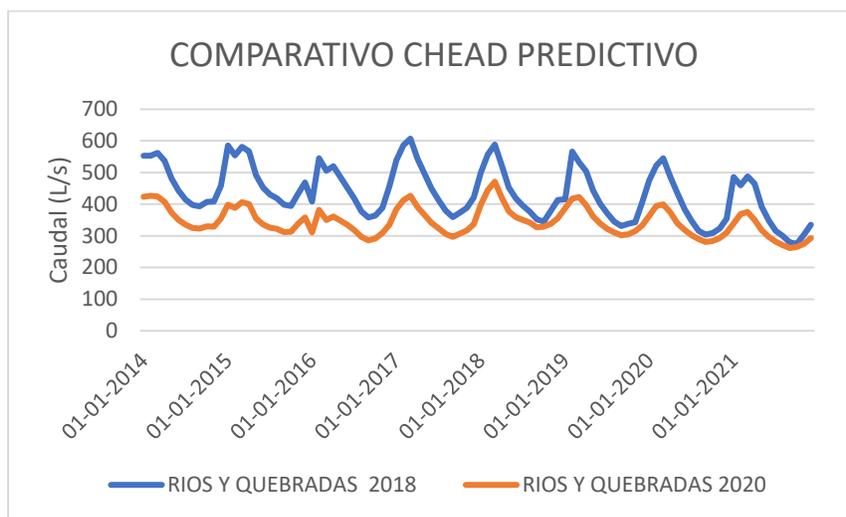


Figura 10-29 Comparativo de CHEAD para escenario predictivo.

Se observa que los caudales obtenidos para el modelo 2020 son menores a los del modelo 2018. Respecto al caudal de seepage mostrado en la Figura 10-28 se observan valores mayores a lo largo de los años, superando los 100 l/s desde mediados del año 2017. Aun así, el modelo 2020 presenta mejores resultados comparado al 2018.

#### 10.6.4 Impacto de anisotropía en el modelo

Para verificar el efecto de la aplicación de la anisotropía en el modelo, se corre un mismo modelo, pero sin los ángulos eulerianos en los dominios y considerando en las fallas que  $K_x = K_y = K_z$ . Se analizan los niveles y las componentes del balance hídrico.

Respecto a los niveles, se tiene que el SRMS es de 10,1%, mejorando en 0,1% respecto al modelo con anisotropía. En general, los niveles del modelo con isotropía y anisotropía no presentan diferencias en la tendencia del comportamiento de los piezómetros.

En cuanto a caudales, no se observan cambios considerables. Las componentes con variaciones se muestran en la Figura 10-30.

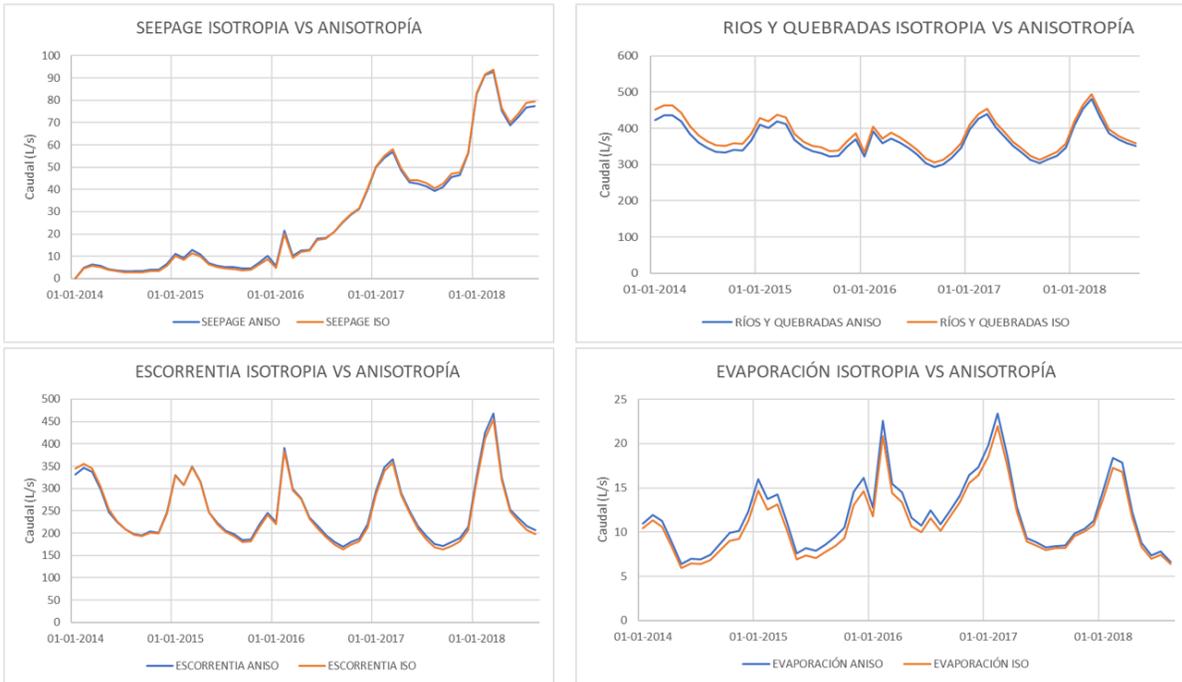


Figura 10-30 Componentes del balance que variaron en modelo isotrópico y anisotrópico.

Que el modelo con anisotropía e isotropía no tengan variaciones podría ser un indicador que la anisotropía no se está definiendo de la manera correcta. Esto se puede deber a diversas consideraciones realizadas en el modelo. La primera puede tener relación con la extensión de los dominios que se realizó en la zona del rajo. Debido a que no se cuenta con información para la cuenca completa, se decide guiarse a partir de un mapa regional del 2010 que coincide con la cuenca, pero corresponde a un mapa no actual y la interpretación de extensión del dominio es bastante intuitiva (se extienden hasta los límites con las fallas N-S que se mencionan en el mapa y cambios de formaciones geológicas), pero no es en base a un estudio hidrogeológico profundo.

El segundo problema podría radicar en que hay una cantidad importante de dominios en el modelo en que no se definieron los ángulos de anisotropía. Los dominios 5B, 1AE y 3C se consideran isotrópicos, ya que como se explica en profundidad en el Capítulo 8, se cuenta con información de tres set de fallas. Los

dominios 5C, 5D, 1BW y 3AE no cuenta con información de *dip* y *dip direction*. En la Figura 10-31 se muestra la ubicación de estos dominios.

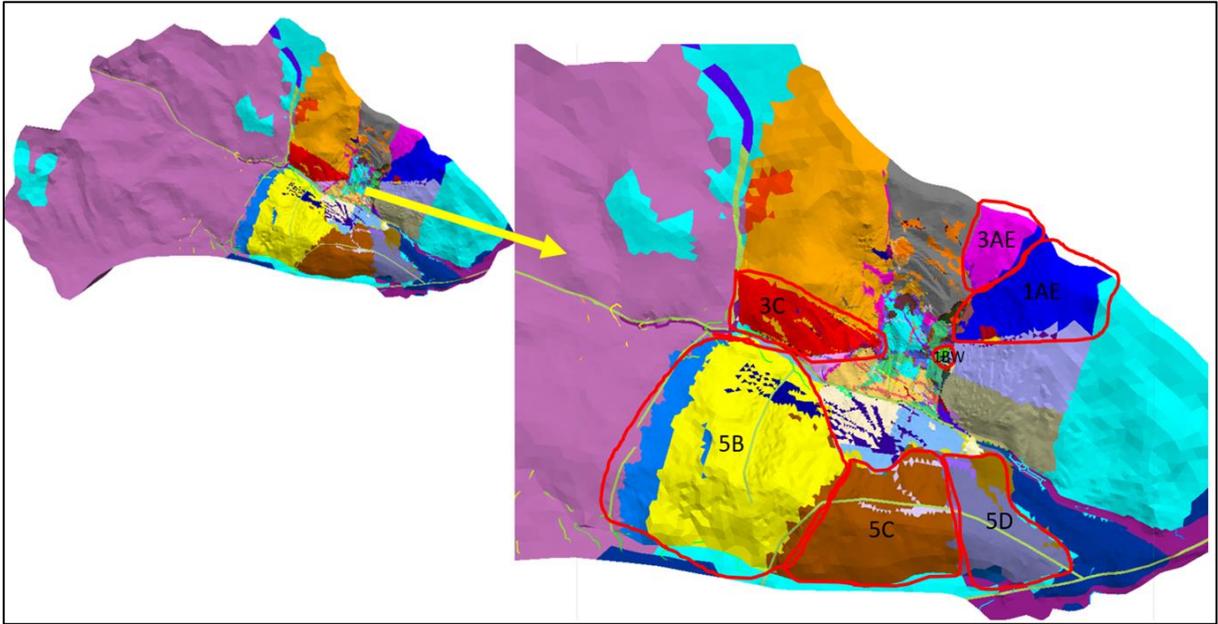
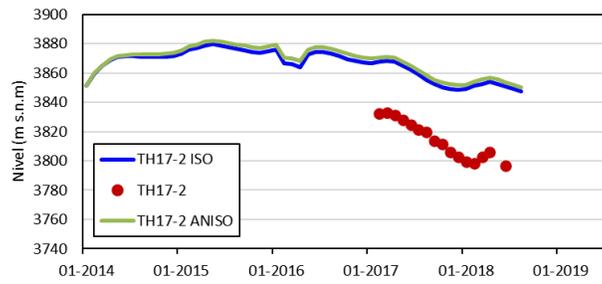


Figura 10-31 Ubicación de dominios isotrópicos del rajo en el modelo en *MINEDW*.

No se cuenta con información de piezómetros en los dominios 5C, 5D, 1BW y 3AE. Para el dominio 3C se cuenta con los piezómetros de la Figura 10-34. Para el dominio 1AE se cuenta con el piezómetro de la Figura 10-35. Para el dominio 5B se cuenta con el piezómetro de la Figura 10-34. En todos estos dominios se observa que no se reproduce claramente el comportamiento de los niveles medidos, lo que podría ser un indicador de que no estaría bien definir esos dominios como isotrópicos. Pero en los demás piezómetros de dominios con un solo set de datos, como el dominio 3B tampoco se reproduce tan claramente el comportamiento de los niveles, como se observa en el piezómetro de la Figura 10-35, ubicado en este dominio. Tampoco se observan diferencias entre las equipotenciales de la zona que indique un efecto en el flujo la incorporación de los ángulos. Por lo tanto, la definición de anisotropía realizada con el análisis enfocado exclusivamente utilizando los datos entregados por la geología estructural no son suficientes para mejorar los niveles simulados numéricamente en *MINEDW*.

**Calibración Piezómetro TH17-2**



**Calibración Piezómetro F3-INC-04**

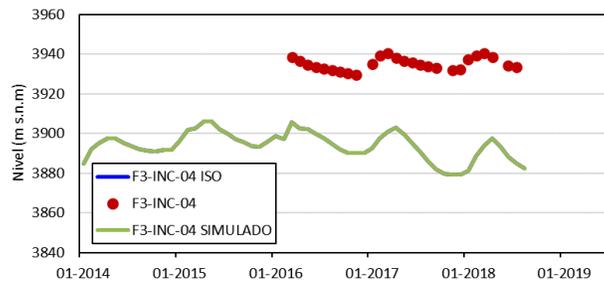


Figura 10-32 Piezómetros en dominio 3C.

**Calibración Piezómetro TH2-1**

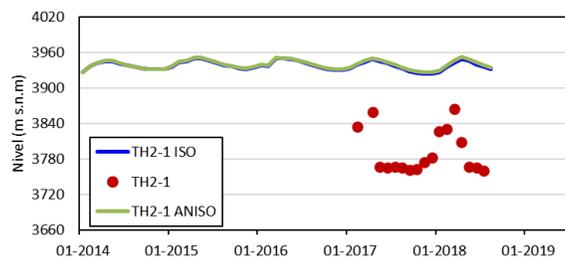


Figura 10-33 Piezómetro dominio 1AE.

**Calibración Piezómetro TH1-1\_P2**

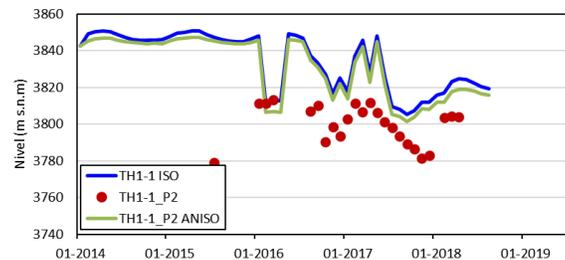


Figura 10-34 Piezómetro dominio 5B.

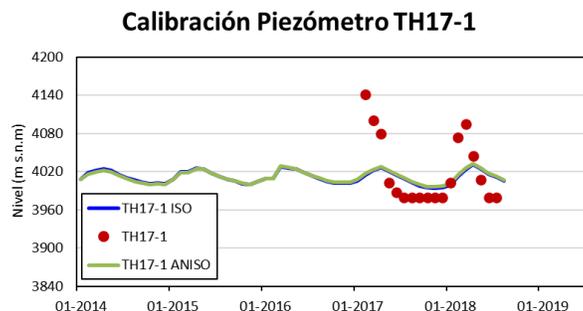


Figura 10-35 Piezómetro dominio 3B.

En las equipotenciales obtenidas para ambos modelos mostrados en la Figura 10-37 y 10-38 no se observan cambios importantes en el gradiente del flujo. Se puede verificar claramente en ambos que el flujo se dirige en dirección NO-SE y que en la zona del rajo el flujo se dirige en dirección S y fondo del rajo.

Otro aspecto a considerar es que para la definición de las propiedades de las fallas se cuenta con dos fuentes de información: ensayos hidráulicos en zonas cercanas a las fallas realizados el 2017 y comentarios realizados por Fedorovich. En el modelo realizado anteriormente por Itasca, las fallas se agruparon en 4: Fallas Conductoras, Fallas Menos Conductoras, Falla Impermeable y Falla Regional. La clasificación que realiza Fedorovich (2019) es en base al tipo de material que se encuentra en la zona de falla, y clasifica a cada una por separado según si es Cohesiva (menos permeable) y No Cohesiva (más permeable). Dentro del grupo de Fallas Menos Conductoras existen fallas que Fedorovich en informes anteriores y en el último ha definido como No Cohesivas. Otro ejemplo, la Falla Impermeable es definida por Fedorovich como una falla No Cohesiva. En el modelo 2020 algunas fallas cambian en un orden magnitud respecto al modelo 2018, debido a que ingresaban mucha agua al rajo.

Para comparar los valores del modelo 2018, la clasificación de Fedorovich (2019) y el modelo 2020 se cuenta con la Tabla 10-6. En el modelo 2020 se inicia la calibración considerando los valores de conductividad hidráulica y almacenamiento específico definidos por Itasca para su modelo 2018. La falta de un análisis hidrogeológico más profundo y completo respecto al comportamiento hidráulico de las fallas, podría estar afectando el efecto de la anisotropía en el modelo, no produciendo cambios respecto al modelo con isotropía.

Tabla 10-6 Comparación clasificación de fallas en MINEDW y Fedorovich.

Nombre Falla	MINEDW 2020			MINEDW 2018	Clasificación Fedorovich
	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)		
Falla ALEJANDRA	1,2E-06	1,2E-07	1,2E-06	Menos Conductoras (K = 1,2E-6 m/s)	C
Falla ISABELLA_2	1,2E-07	1,2E-08	1,2E-07		C
Falla ISABELLA_3	1,2E-06	1,2E-07	1,2E-06		C
Falla BARTOLINA	1,2E-06	1,2E-07	1,2E-06		C
Falla CHUYMANI	1,2E-06	1,2E-07	1,2E-06		NC
Falla JAVIERA	1,2E-06	1,2E-07	1,2E-06		NC
Falla NATALIA	1,2E-06	1,2E-07	1,2E-06		NC
Falla PAULA	1,2E-06	1,2E-07	1,2E-06		NC
Falla CONSTANZA	1,2E-06	1,2E-07	1,2E-06		NC
Falla CAMILA	1,2E-06	1,2E-07	1,2E-06		NC
Falla SONIA	1,2E-06	1,2E-07	1,2E-06		NC
Falla ANA	1,2E-06	1,2E-07	1,2E-06		NC
Falla LORETO	1,2E-06	1,2E-07	1,2E-06		C
Falla Regional	5,8E-06	5,8E-07	5,8E-06	Muy Conductoras (K = 5,8E-6 m/s)	-
Falla ANDREA	4,5E-06	4,5E-07	4,5E-06	Conductoras (K = 4,6E-6 m/s)	NC
Falla ISABELLA_1	4,5E-07	4,5E-08	4,5E-07		NC
Falla ALINA	4,5E-06	4,5E-07	4,5E-06		NC
Falla VIVIANA	4,5E-06	4,5E-07	4,5E-06		NC
Falla FRANCISCA	4,5E-07	4,5E-08	4,5E-07		NC
Falla CAROL	4,5E-07	4,5E-08	4,5E-07		NC
Falla LUCIA	4,5E-06	4,5E-07	4,5E-06		NC
Falla MARIA	4,5E-06	4,5E-07	4,5E-06		NC
Falla PAZ	4,5E-06	4,5E-07	4,5E-06		NC
Falla CATALINA	4,5E-06	4,5E-07	4,5E-06		NC
Falla PIA	4,5E-06	4,5E-07	4,5E-06		NC
Falla ISIDORA	4,5E-06	4,5E-07	4,5E-06		NC
Falla BERTA	4,5E-06	4,5E-07	4,5E-06		NC
Falla LORENA	4,5E-07	4,5E-08	4,5E-07	Impermeable (K = 4,6E-7 m/s)	NC
Falla LORENA SPLAY	4,5E-07	4,5E-08	4,5E-07	-	NC ?
Falla IRENE	4,5E-07	4,5E-08	4,5E-07	-	NC

Respecto al comportamiento de las fallas, se cuenta con piezómetros en el modelo en la falla BARTOLINA, localizados al SE del rajo y en la zona del Campamento. La falla Bartolina se ubica paralela al río del mismo nombre y al lado de la Falla Regional. En la Figura 10-36 se observan los niveles simulados del modelo anisotrópico e isotrópico. Se puede observar que el nivel anisótropo se comporta con descensos mayores, no simulando la tendencia de los datos medidos en terreno, por lo que los parámetros definidos para esta falla podrían no ser los adecuados. Esto, sumado a que en esta zona se encuentra una gran cantidad de pozos de bombeo, donde el efecto se ve en los descensos de los piezómetros simulados, pero no en los piezómetros medidos, aumenta el grado de incerteza del efecto de la anisotropía en el modelo y los valores de conductividad utilizada en las fallas.

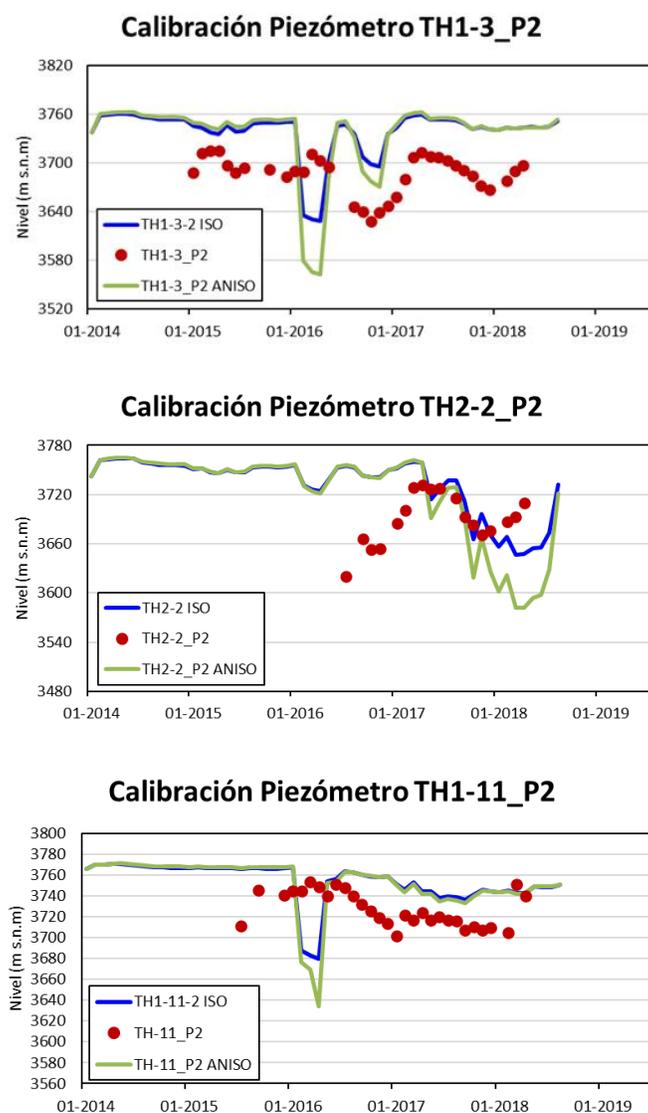


Figura 10-36 Comparación de niveles en modelo isotrópico y anisotrópico 2020.

Por último, la presencia de la Falla Regional que cruza toda la cuenca y coincide con el río Bartolina no está documentada por Fedorovich (2019). Esta falla se visualiza en el mapa regional de la zona definido por Golder (2010), pero en modelos geológicos estructurales actuales no se incorpora debido a que estos estudios se concentran en la zona del rajo exclusivamente. Debido a que no se cuenta con información hidrogeológica actual del comportamiento de esta falla, es que los parámetros definidos para esta, que es la segunda unidad más conductora después de los depósitos aluviales, está basada en la calibración realizada para el modelo 2018 por Itasca.

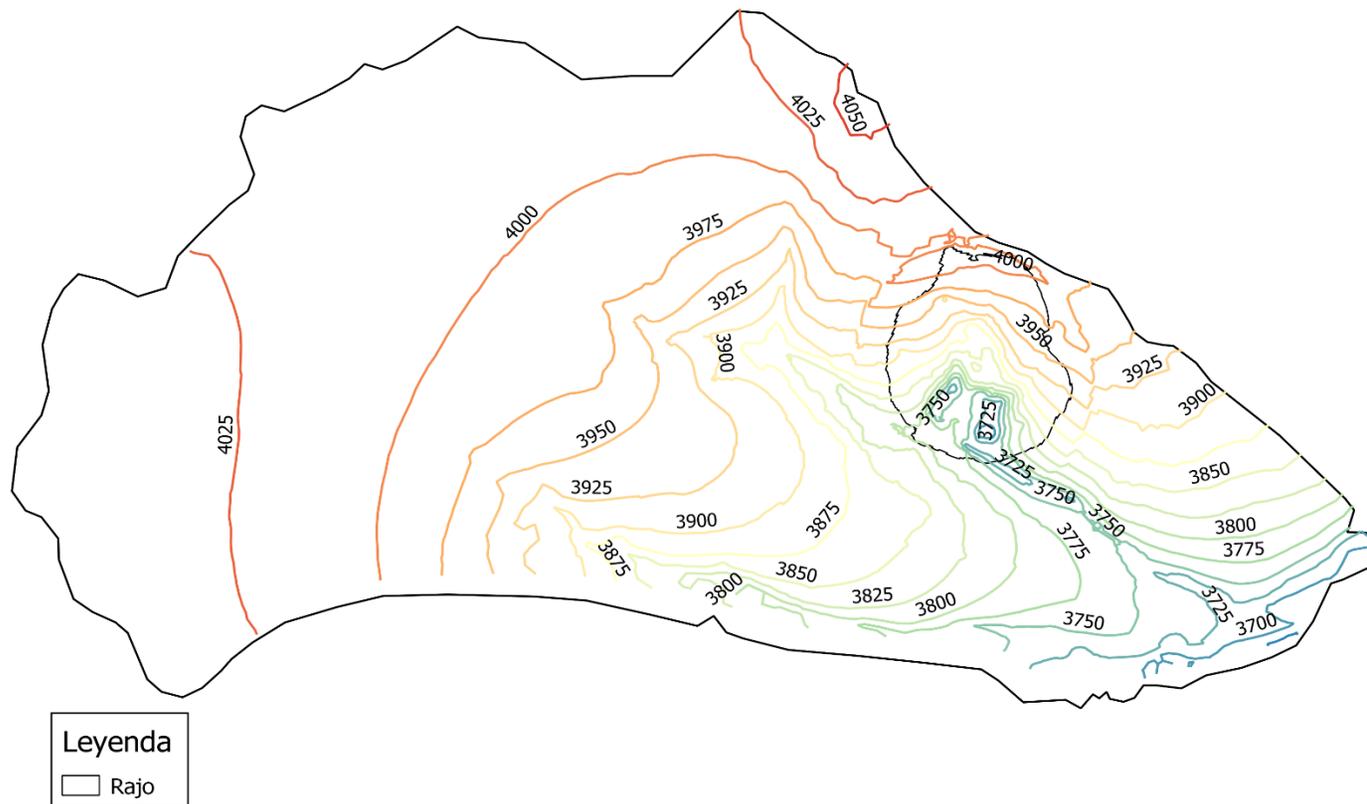


Figura 10-37 Piezometría con anisotropía obtenida para el período agosto 2018.

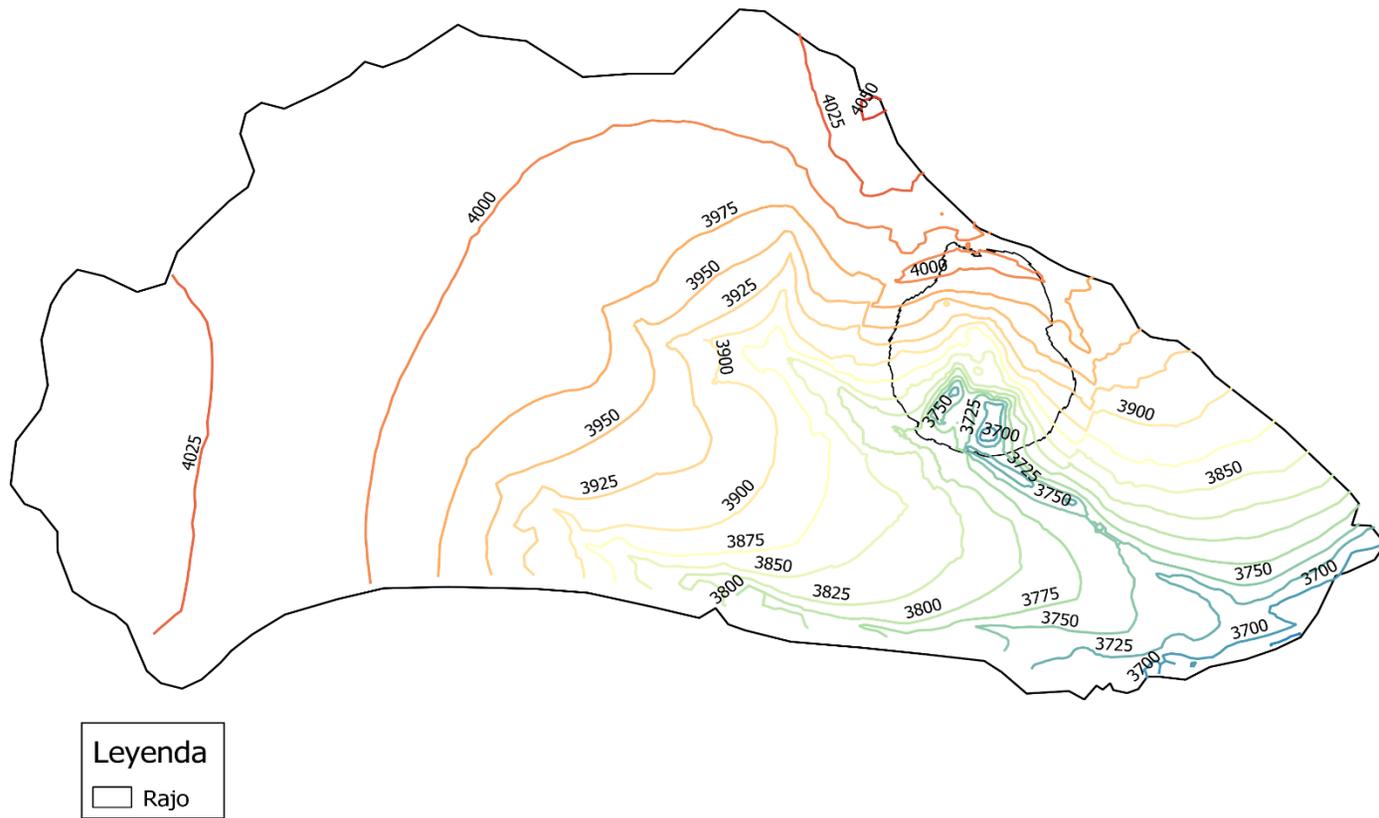


Figura 10-38 Piezometría con isotropía obtenida para el período agosto 2018.

### 10.6.5 Análisis de incertidumbre

Doherty et al (2010) describe que un modelo ideal es capaz de simular los procesos que modela de forma perfecta. Para lograr esto, el modelo debería ser tan complejo como los procesos naturales que simuló y además debería considerar toda la variabilidad espacial y temporal de las propiedades hidráulicas del sistema. Si toda esta información fuera conocida y el modelo fuera parametrizado acorde, el modelo predeciría con perfecta precisión la respuesta del sistema. Esto sería lo ideal, pero los modelos son definidos como una simplificación del mundo natural, y estas simplificaciones se desvían de este ideal. El potencial de incertidumbre predictivo del modelo se establece por la incapacidad del modelador de poder proporcionar detalles precisos de parametrización. Las observaciones de terreno que se utilizan para restringir el mundo de los posibles modelos tienen un error inherente asociado. Por lo tanto, todos los modelos contienen incertidumbre (Barnett et al, 2012).

Como todos los modelos tienen incertidumbre, ningún resultado debería considerarse como un único resultado, a menos que este resultado este acompañado de una estimación de incertidumbre esperada asociada. Doherty (2011) menciona que después de identificar todas las fuentes de incertidumbre, lo mejor que se puede hacer es:

- Reportar una incertidumbre representativa para una predicción
- Minimizar esa incertidumbre en la medida de lo posible según el tiempo, esfuerzo y datos de campo disponibles
- Proporcionar el cálculo de la incertidumbre representativa en un marco de tiempo coherente con la velocidad de la toma de decisiones

En los modelos las fuentes de incerteza tienen su origen en dos aspectos:

- Deficiencia en el conocimiento del mundo natural, incluyendo efectos de errores de medición
- No poder captar la complejidad del mundo natural (o lo que se sabe de él)

No es objetivo de la presente memoria calcular la incertidumbre representativa en el modelo, pero debido a la complejidad del sistema acuífero del rajo de estudio y ya que los resultados obtenidos al implementar la anisotropía no presentan cambios considerables respecto a un modelo isotrópico, se identifican algunas fuentes de incertidumbre en el modelo estudiado que podrían estar afectando en los resultados. Las fuentes son categorizadas en los siguientes tipos y se basan en la categorización definida en Middlemis et al (2019):

#### 1. Estructural/Conceptual

Los supuestos de estructura geológica y conceptualización hidrogeológica que se aplican para obtener una visión simplificada de una realidad hidrogeológica más compleja son fuente de incertidumbre en el modelo. Los

dominios estructurales definidos por Fedorovich (2019) se realizan en un área acotada al rajo y un par de metros en sus alrededores, dejando una extensión importante de la cuenca sin definición de ángulos Eulerianos. Se decide extender los dominios tomando como referencias un mapa geológico regional del área definido el 2010 por Golder. Se consideran fallas de bloque en dirección N-S y cambios en cabalgamientos como límites de extensión, pero siempre en base a este mapa. No se cuenta con registro del modelo regional actual de toda la cuenca y se combinan dos interpretaciones geológicas (Golder y Fedorovich), aumentando el grado de incertidumbre del problema.

Existen dominios donde no se obtienen datos de *dip* y *dip direction* o donde hay 3 set de orientación de planos de fallas. En esos casos se define que estos dominios presentan un comportamiento isotrópico. Asumir que estos dominios se comportan de esta forma es un supuesto basado únicamente en la información geológica estructural disponible y en la falta de un análisis hidrogeológico que confirme lo contrario. Este supuesto podría implicar la simplificación de un sistema más complejo y heterogéneo, afectando los resultados de niveles y gradientes en el área del rajo.

Por otra parte, la presencia de la unidad Falla Regional no está documentada en los informes de Fedorovich actuales y no se cuenta con un *wireframe* actual de esta falla. La Falla Regional es la segunda unidad hidrogeológica de mayor conductividad hidráulica, por lo que su importancia hidrogeológica en el modelo es alta.

## 2. Parametrización

Incertidumbre provocada por valores y suposiciones de propiedades hidrogeológicas aplicados para representar la realidad compleja en el espacio y el tiempo. Las fallas presentes en el modelo 2020 y 2018 están modeladas en base a los estudios geológicos estructurales realizados en el área del rajo, los cuales no cuentan con un enfoque hidrogeológico. La caracterización de los parámetros como conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento de las fallas utilizada en el modelo 2020 es en base a los datos de la última calibración realizada por Itasca. No existe un análisis hidrogeológico acabado sobre las características de estas fallas. Middlemis et al (2019) menciona que las fallas pueden incluirse en el modelo como características específicas sólo cuando exista evidencia explícita y consistente con el principio de parsimonia de la *Australian Groundwater Modelling Guideline*, usada como referencia en modelos de Itasca. Cuando existan evidencias no concluyentes respecto a las fallas, estas deberían considerarse como parte de un análisis de incertidumbre que involucre la parametrización de las características de la falla y la consideración de probabilidades (Middlemis et al, 2019).

La parametrización de los rangos de recarga define una incerteza en el modelo. La recarga definida en el modelo conceptual se obtiene a partir del

estudio kárstico en la zona del rajo. Los porcentajes de recarga se obtienen sólo para el área acotada en el rajo y alrededores cercanos, entregando un rango de valores en el que se varía el porcentaje en el modelo desconociendo si es el valor definido es el más acorde para la zona.

En el modelo no se cuenta con datos de evapotranspiración para el año 2014, por lo que se replicaron los del año tipo definido el 2015. Respecto a los datos de recarga, de las estaciones utilizadas una de ellas cuenta con datos desde el 2014 pero hasta el 2017, y las otras dos parten sus mediciones durante el 2015 hasta el 2018, por lo que se realiza un promedio de los factores mensuales de recarga para cada mes de la estación, afectando la representatividad de los datos en la zona.

### 3. Error de medición

Combinación de incertidumbre asociada a la medición de estados complejos del sistema (cota piezométrica, descargas), parámetros y variabilidad (espacial y temporal) con los inducidos por el aumento o disminución de escala (datos específicos del lugar, datos climáticos). Para la cuenca en estudio se cuenta con tres estaciones meteorológicas (Tania, Raúl y Ema), las cuales presentan una corta data, desde el año 2014. Los estudios realizados previamente utilizan estaciones alejadas del área de estudio pero que presentan una alta intermitencia de datos, por lo que las consultoras encargadas anteriormente de revisar estos datos realizaron diferentes metodologías de relleno de datos. Estas estaciones cuentan con rellenos de datos para varios años hidrológicos, por lo que esto, sumado a la lejanía de las estaciones, dificulta el entendimiento hidrológico de la zona. Esto agrega un nivel de incertidumbre a los parámetros del balance hídrico, como la definición de la recarga en el modelo en *MINEDW* a partir de los datos de precipitación.

### 4. Incertidumbres del escenario

Adivinar problemas futuros, dinámicas y cambios en las condiciones de los límites (por ejemplo, minería, variabilidad climática, cambio en el uso de la tierra y agua).

Barnett et al. (2012) plantea que el modelador debe encontrar un balance entre la simplicidad (parsimonia) y la complejidad. La zona en estudio presenta una heterogeneidad a escalas más locales, a nivel de rajo, por lo que se deben hacer esfuerzos para representar la variabilidad espacial de las propiedades hidrogeológicas que afectan las predicciones. La definición de 16 dominios estructurales implica en el modelo 2020 que las unidades hidrogeológicas aumentaron a 162, consiguiendo un modelo altamente parametrizado, pero complejizando la calibración.

Las fuentes de incertidumbres mencionadas podrían estar afectando los resultados del modelo, por lo que identificarlos da un puntapié inicial para enfocar futuros estudios y soluciones de estos.

### 10.6.6 Aprendizajes y recomendaciones

Uno de los principales aprendizajes obtenidos en el presente trabajo es que la complejización de un sistema no asegura una mejora en las predicciones del modelo. El sistema acuífero del proyecto es un sistema complejo y heterogéneo, por lo que se debe encontrar una forma de incorporar esa información al modelo. La definición de anisotropía en base a información geológica no resulta, para este caso en específico, en la más adecuada. La definición de los dominios estructurales en el modelo genera la creación de 161 UH, pudiendo representar la heterogeneidad del lugar, pero complejizando la modelación y calibración del modelo. Un análisis de sensibilidad para identificar cómo varía el modelo frente a cambios en las unidades no fue posible realizarlo, ya que al existir tantas UH los tiempos de modelación se alargan y los análisis se complejizan, por lo que se desconoce cuáles son las unidades más sensibles en el modelo. Resulta necesario disminuir la cantidad de unidades en el modelo, por ejemplo, agrupando de manera distinta los dominios estructurales. Considerando los valores de *dip* y *dip direction* similares que presentan algunos dominios, y guiándose por el mapa regional de la zona, se podrían tener tres macro dominios, mostrados en la Figura 10-39. Los dominios 3AW, 3B, 3C, 5A, 2, 1AW y 1BW forman un primer dominio, 3AE, 1AE, 1BE, 1C y 2E forman un segundo dominio y 5B, 5C, 5D y 4 forman un tercer dominio. Esta sectorización simplificaría el análisis, pero incluyendo los ángulos Eulerianos en las zonas definidas por los dominios y mantendría la variabilidad espacial de las propiedades hidrogeológicas en el rajo.

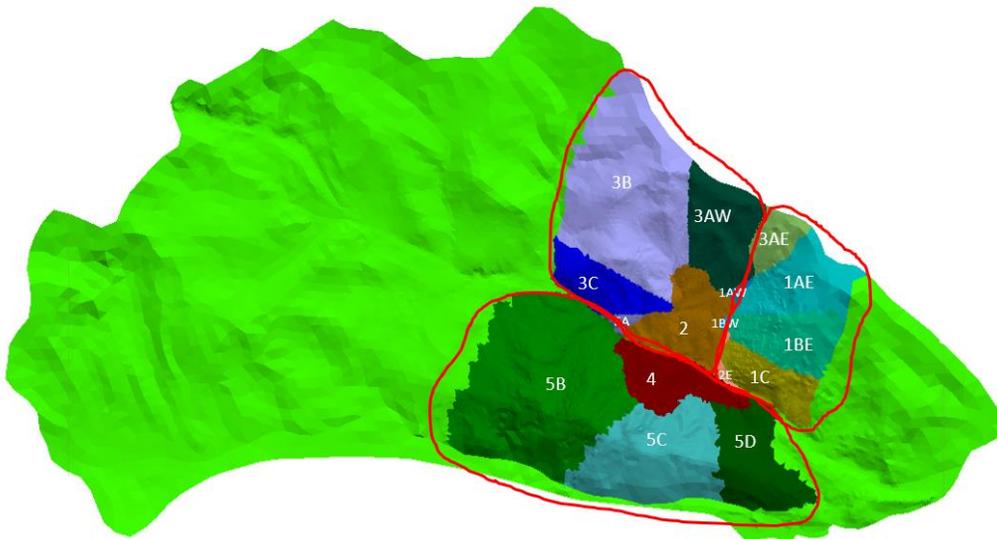


Figura 10-39 Distribución de posibles nuevos macros dominios para definir nuevas UH.

Un punto que el modelo no logra resolver del todo bien es la reproducción del comportamiento de los piezómetros y pozos de observación. Una recomendación que se podría realizar es analizar los ensayos de permeabilidades realizados al rajo por zonas. Estos ensayos se realizaron en diversos sectores del rajo y se analizaron para definir los rangos de cada UH presente en el rajo para escoger valores que sean coherentes con la realidad. Pero un ejercicio interesante sería definir estos rangos para cada unidad, pero separarlo por zonas. Por ejemplo, definir rangos de conductividad para la unidad MBL en las zonas altas del rajo y otras en las zonas bajas. Según el modelo conceptual, las zonas altas presentan mayores porcentajes de recarga y en las zonas bajas los piezómetros instalados presentan comportamientos variados, influenciado tanto por la geología de la zona, como por los bombeos. Definir rangos sectorizados para las unidades podría ayudar a que se represente mejor el comportamiento hidrodinámico de los piezómetros simulados tanto de las zonas altas como bajas.

Para estudios futuros, ayudaría a la conceptualización del modelo realizar un análisis enfocado en estudiar la caracterización de las fallas presentes en el modelo y la importancia hidrogeológica que tienen en el área del rajo y en la cuenca completa. Esto permitirá incluir las fallas que influyan más en el modelo, cumpliendo el principio de parsimonia y se definirá con mayor base los parámetros hidrogeológicos de estas fallas, pudiendo ayudar a mejorar la definición de anisotropía en la zona.

Respecto a mejoras futuras del balance hídrico, estudiar más a profundidad la importancia de la recarga en el área definida para el modelo podría entregar más claridades respecto a su influencia en el modelo, sobre todo en zonas alejadas del rajo, como la zona formada por granodioritas y el tranque de relaves. También obtener más información respecto a la variación de la recarga con la altura, para definir rangos de porcentaje más precisos en el modelo. Para la evapotranspiración, este valor se incluye al modelo utilizando la metodología de Hargreaves, ya que se cuenta con datos de radiación medidos por las estaciones de la cuenca. Este valor se define exclusivamente en el área del rajo, por lo que las demás zonas presentan una ETP nula. En los alrededores del rajo existen zonas de vegetación importantes, por lo que la utilización de otras metodologías de determinación de la ETP (por ejemplo, Penman-Monteith) resultarían más adecuadas para representar a la cuenca completa. Actualmente no se cuenta con la información necesaria para utilizar métodos más precisos, pero en trabajos futuros podría tenerse en consideración para mejoras.

### 10.6.7 Análisis general

Comparando el modelo 2018 y 2020, todos los parámetros del balance de masas definidos en el modelo numérico 2020 bajaron sus caudales, pero siguieron manteniendo el comportamiento estacional, lo cual representa la variación estacional que está teniendo la cuenca modelada. Comparar los valores obtenidos con información conceptual es una tarea compleja de realizar, ya que no se cuenta con valores de balance hídrico para la cuenca definida por Itasca y la utilizada en esta memoria. La información que se cuenta es para una extensión de la cuenca mucho mayor a la estudiada o a zonas de relieves calcáreos alrededor del rajo. Tampoco existe información actualizada respecto a aforos realizados en los ríos de la zona. De todas formas, existe información histórica que se puede comparar y la mayoría de los resultados obtenidos en esta recalibración se ajustan a estos valores conceptuales.

La calibración 2020 fue realizada de forma manual, siempre considerando los límites entregados en el modelo conceptual para los rangos de conductividades hidráulicas. Las unidades que más agua ingresaban al rajo corresponden a las monzonitas biotíticas finas y skarn del dominio 2 (MBF(2) y SK(2)). En estas unidades se opta por bajar en un orden la conductividad y aumentar el parámetro  $S_y$  en un orden. Lo mismo sucede para las fallas que más ingresan agua al rajo, una de ellas la falla ISABELLA\_2. Esta configuración generó una baja en niveles en todos los piezómetros de la cuenca, pero cambió la marcada estacionalidad de la calibración anterior. Debido a lo sensible del modelo y la cantidad de unidades (161) resulta complejo realizar análisis de sensibilidad debido al tiempo que demora simular cada corrida y modificar cada parámetro. Igualmente, al ser un modelo más detallado en cuanto a las unidades presentes, esto permite modificar localmente las unidades más “problemáticas” sin alterar drásticamente los niveles en la misma unidad, pero de diferente dominio.

En general, el modelo 2020 realiza mejoras importantes en las componentes del balance hídrico del rajo, pero no produce mejoras considerables en la reproducción de niveles de los piezómetros y pozos de observación en el rajo. Esto podría indicar que la anisotropía no está produciendo un cambio importante en el modelo.

Se analiza el efecto de la anisotropía comparando el mismo modelo obtenido 2020 con uno isótropo, definiendo  $K_x = K_y = K_z$  en las fallas y sin ángulos Eulerianos. Esto no provoca cambios importantes en los modelos, por lo que la definición de anisotropía en el modelo en base a la información geológica estructural podría no estar correcta. No se tiene un análisis del comportamiento hidrogeológico que poseen cada una de las fallas modeladas y tampoco se cuenta con información actualizada de conductividades hidráulicas de las unidades. Un estudio del rol que ejercen las fallas modeladas por Fedorovich analizadas hidrogeológicamente podrían ayudar a definir correctamente la anisotropía, enriqueciendo el modelo

conceptual del rajo y ayudar a comprender las direcciones que está teniendo realmente el flujo en las zonas altas y bajas del rajo.

Finalmente, respecto al modelo 2020 y 2018, el modelo 2020 presenta mejoras considerables en los parámetros del balance de masa, pero no así para los niveles simulados. Esto es un indicador que el ajuste de variables como la recarga podrían tener un efecto mayor en el modelo que la definición de la anisotropía según la información geológica estructural. La reproducción de las tendencias que poseen los piezómetros no es posible representarla en su totalidad, debido a lo heterogéneo del rajo. Un análisis de los comportamientos que presentan los piezómetros medidos, incluso en una misma zona, presentan respuestas hidrodinámicas diferentes. La anisotropía definida sólo considerando los planos de orientación de las fallas no resulta suficiente, por lo que estudiar hidrogeológicamente el efecto de cada falla en el modelo enriquecería conceptualmente el problema y podría mejorar aún más, la herramienta predictiva en un futuro.

La modelación del rajo Bartolina cuenta con diferentes aspectos sujetos a una alta incertidumbre debido a la falta de información con la que se cuenta, una de ellas, sobre la influencia que poseen las fallas en el transporte de flujo al rajo. Esto dificulta lograr mejoras en los modelos, pero con la información actual disponible se debe intentar representar el sistema lo mejor posible, que es lo que se realiza en el presente trabajo. La nueva recalibración 2020 en *MINEDW* permite representar, con algunas excepciones, la complejidad del sistema acuífero de la cuenca en estudio, obteniendo resultados comparables a la información disponible, mejorando respecto al modelo 2018.

## 11. CONCLUSIONES

Con el fin de lograr mejorar la planificación de las operaciones mineras y solucionar de manera adecuada los problemas de *dewatering* y despresurizado en un rajo es que se busca recalibrar el modelo numérico del rajo Bartolina Andina. La existencia de nueva información geológica del rajo no incluida en la calibración anterior permite mejorar y actualizar la información disponible del modelo conceptual, lo que ayuda a mejorar la herramienta predictiva por medio del modelo numérico. Para mejorar la representatividad estructural del rajo es que se definen dos grandes objetivos:

- i) Comprobar que el programa *MINEDW*, software de elementos finitos que utiliza la metodología de Medio Poroso Equivalente y que es capaz de incorporar anisotropía en sus modelos, puede representar un medio donde el flujo está dominado por estructuras.
- ii) Incorporar anisotropía en la conductividad hidráulica, definiendo los ángulos Eulerianos de las unidades hidrogeológicas.

Para el ejercicio de validación de *MINEDW* se comparan los caudales de salida de este programa con otro *software* desarrollado por Itasca que utiliza la metodología de Red de Fracturas Discretas, *Slope Model*. El error que entrega el programa *Slope Model* es de 0,6% y *MINEDW* es de 3,09%. Si bien es un ejercicio simple de validación, permite comprobar de una manera sencilla que definiendo los parámetros adecuados en *MINEDW*, este programa puede representar un medio fracturado tanto a nivel regional como local. Esto resulta importante para el ejercicio de recalibración, ya que, a pesar de la metodología de modelación utilizada, el programa cuenta con las herramientas para representar las estructuras y la anisotropía. Por lo que sólo queda lograr comprender mediante el modelo conceptual, el comportamiento del acuífero.

El rajo Bartolina Andina cuenta con un nuevo modelo geológico estructural, realizado el año 2019. En base a esta nueva información, se definen los ángulos Eulerianos y de esta forma, la anisotropía, mediante los planos de orientación que presentan los 16 dominios estructurales en el rajo y las fallas presentes.

Los resultados obtenidos con la nueva recalibración consiguen bajar el SRMS a un 10,2% y una disminución considerable en los caudales de recarga y *seepage* de la zona. Respecto al comportamiento de los piezómetros simulados, estos presentan niveles más bajos a la calibración del 2018, pero con una leve pérdida en el comportamiento estacional de las mediciones, esto debido probablemente a la disminución en el valor de conductividad hidráulica de las unidades que más ingresan agua al rajo, las unidades MBF(2), SK(2) y la falla ISABELLA\_1.

Para ver el efecto real de la anisotropía definida se compara el modelo 2020 con un modelo igual, pero sin los ángulos Eulerianos y con isotropía en las fallas. No se logran cambios importantes entre los dos modelos, lo que indica que posiblemente

la anisotropía definida en base a información estructural no es suficiente, y se necesita analizar hidrogeológicamente la influencia de las fallas definidas por Fedorovich en el modelo numérico.

Recomendaciones que surgen a partir de este trabajo son las siguientes:

1. La actualización de información en el balance hídrico, y sobre todo de la recarga en la cuenca completa, ayudará a un mejor entendimiento del comportamiento del acuífero. Un balance hídrico definido exclusivamente en la zona de la cuenca utilizada en el modelo numérico podría aumentar el nivel de entendimiento del acuífero.
2. Para saber si el comportamiento de los ríos que modela *MINEDW* se ajustan a la realidad, tener información de los aforos en los ríos Bartolina, Antawara y Amaru será un gran aporte. La información más actual con la que se cuenta corresponde a monitoreos en el río Bartolina, pero no hay mediciones actuales en los ríos Amaru y Antawara. Este último es de importancia en el modelo ya que se encuentra modelado como una condición de borde con un nivel estático en el modelo. Contar con esta información permitirá en trabajos futuros utilizarla como *target* de calibración.
3. La definición de las unidades hidrogeológicas utilizando la información de los dominios estructurales dificulta el proceso de análisis de sensibilidad de las unidades y enlentece su posterior análisis. Si bien ayuda en la calibración manual al identificar de manera rápida las zonas que están teniendo mayores problemas de caudal en el rajo, modificándolas sin alterar las conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento de las otras zonas, resulta poco eficiente para la modelación. Por lo que, en este caso, se podrían agrupar los dominios cercanos que presenten planos de orientación similares, disminuyendo la sectorización del sector y cumpliendo con el principio de parsimonia.
4. Un análisis hidrogeológico completo sobre la influencia que tienen las fallas en este modelo podría ayudar a disminuir la brecha de conocimiento que se tiene respecto a las direcciones de flujo en la zona del rajo. En este trabajo se definió una anisotropía en base a planos de orientación definidos geológicamente y valores de conductividad y coeficiente de almacenamiento obtenido de la calibración anterior, pero no se cuenta con información clara sobre el comportamiento hidrogeológico de estas fallas y su impacto en el flujo. Un estudio enfocado sólo a las fallas y el comportamiento del flujo enriquecerá la herramienta predictiva y podría ayudar a mejorar las tendencias de aquellos piezómetros donde no se logra representar la respuesta hidrodinámica esperada.

Finalmente, todas las actividades realizadas en la presente memoria ayudan a comprender el comportamiento que está teniendo un sistema tan complejo como es el acuífero Bartolina Andina. Con un buen entendimiento del modelo conceptual y actualizaciones a este, tiempo y aprovechamiento al máximo de las herramientas

de modelación disponibles, como las que entrega *MINEDW* es posible mejorar la calibración, ayudando a la mejora en futuras planificaciones del proyecto.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic press.

Berkowitz, B. (2002). Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review. *Advances in water resources*, 25(8-12), 861-884.

Cook, P. G. (2003). A guide to regional groundwater flow in fractured rock aquifers (p. 151). Henley Beach, South Australia: Seaview Press.

Diersch, H. JG (2014) *FEFLOW*: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. Springer-Verlag, Heidelberg. doi, 10, 978-3.

Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). Physical and chemical hydrogeology (Vol. 506). New York: Wiley.

ELAW, E. L. A. W. (2010). Guidebook for evaluating mining project El. Environmental Law Alliance Worldwide, Eugene, 110.

Fedorovich, John (2017). Actualización del Modelo de la Geología Estructural en el Depósito Bartolina , Mina Bartolina Andina, Perú.

Fedorovich, John (2019). 2019 Update of the Structural Geology Model at Bartolina deposit, Bartolina Andina Mine, Perú.

GOLDER ASSOCIATES (2010). “Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Minero Bartolina Andina: Línea Base de Hidrogeología-H4 y Línea Base de Meteorología e Hidrología-H5”.

Gong, J., & Rossen, W. R. (2016). Shape factor for dual-permeability fractured reservoir simulation: Effect of non-uniform flow in 2D fracture network. *Fuel*, 184, 81-88.

Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.

Itasca (2010). Slope Model: Description of Formulation with Verification and Example Problems Revision 2.

Itasca (2012). Slope Model: Validation Report – Draft.

Itasca (2015a) Modelo hidrogeológico conceptual Bartolina Andina. Informe IPSAC-7004001/2015-001.

Itasca Perú & Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA) (2015b) Trabajos de reconocimiento geológico e hidrogeológico en el área del Karst de Bartolina Andina.

Itasca (2016). *MINEDW 3.0 User Manual*.

Itasca (2017). Actualización del Modelo de Presión de Poros del Tajo Bartolina y Propuesta de Drenaje para el Periodo 2017 a 2019. Informe IPSAC-7004.009/2017-001.

Itasca (2018). Actualización del Modelo de Presión de Poros del Tajo Bartolina y Propuesta de Drenaje para el Periodo 2019 a 2021. Informe IPSAC 7004.012/2018-01.

McWhorter, D. B., Sunada, D. K., & Sunada, D. K. (1977). *Ground-water hydrology and hydraulics*. Water Resources Publication.

Middlemis, H., Walker, G., Peeters, L., Richardson, S., Hayes, P., & Moore, C. (2019). *Groundwater Modelling Uncertainty: implications for decision-making: summary of the Groundwater Modelling Uncertainty Workshop-Australasian Groundwater Conference 10th July 2017, University of NSW, Sydney, Australia*.

Pedemonte Aguilar, I. (2018). *Evaluation of open pit slope deformation using novel numerical modeling software slope model*.

Read, J., & Beale, G. (Eds.). (2013). *Guidelines for evaluating water in pit slope stability*. Csiro Publishing.

Romero Guzmán, M. A. *Caracterización de la heterogeneidad y anisotropía de un medio fracturado y sus implicaciones hidrogeológicas usando prospección geoelectrica e información RQD (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín)*.

Samani, Z. (2000). Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 126(4), 265-267.

Sánchez, J. (2014). *Conceptos fundamentales de hidrogeología*. Recuperado de [http://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos\\_Hidrogeol.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf).

Scanlon, B. R., Mace, R. E., Barrett, M. E., & Smith, B. (2003). Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. *Journal of hydrology*, 276(1-4), 137-158.

SEA, S. D. E. A. (2012). *Guía para el uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA*.

Singhal, B. B. S. (2008). Nature of hard rock aquifers: hydrogeological uncertainties and ambiguities. In *Groundwater Dynamics in Hard Rock Aquifers* (pp. 20-39). Springer, Dordrecht.

Singhal, B. B. S., & Gupta, R. P. (2010). *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Springer Science & Business Media.

SNC-Lavalin (2014). "Anexos de la modificatoria del EIA 2014 realizada por SNC-Lavalin referentes a Hidrología e Hidrogeología"

Strack, O. D. L. 1989. Groundwater Mechanics.

Watanabe, N., Hirano, N., & Tsuchiya, N. (2008). Determination of aperture structure and fluid flow in a rock fracture by high-resolution numerical modeling on the basis of a flow-through experiment under confining pressure. *Water Resources Research*, 44(6).

Wu, J., & Zeng, X. (2013). Review of the uncertainty analysis of groundwater numerical simulation. *Chinese Science Bulletin*, 58(25), 3044-3052

## 13. ANEXOS

### 13.1. ANEXO 1: Caudales obtenidos para ejercicio de validación *MINEDW*

Tiempo	Caudales simulados	
	MINEDW (m3/s)	Slope Model (m3/s)
1	2,50204E-05	2,43402E-05
2	2,5212E-05	2,43408E-05
3	2,52545E-05	2,43414E-05
4	2,52561E-05	2,43419E-05
5	2,52561E-05	2,43423E-05
6	2,52561E-05	2,43427E-05
7	2,52561E-05	2,43432E-05
8	2,52561E-05	2,43435E-05
9	2,52561E-05	2,43439E-05
10	2,52561E-05	2,43443E-05
11	2,52561E-05	2,43446E-05
12	2,52561E-05	2,43449E-05
13	2,52561E-05	2,43452E-05
14	2,52561E-05	2,43455E-05
15	2,52561E-05	2,43458E-05
16	2,52561E-05	2,43461E-05
17	2,52561E-05	2,43464E-05
18	2,52561E-05	2,43467E-05
19	2,52561E-05	2,43469E-05
20	2,52561E-05	2,43472E-05
21	2,52561E-05	2,43474E-05
22	2,52561E-05	2,43477E-05
23	2,52561E-05	2,43479E-05
24	2,52561E-05	2,43481E-05
25	2,52561E-05	2,43483E-05
26	2,52561E-05	2,43486E-05
27	2,52561E-05	2,43488E-05
28	2,52561E-05	2,43490,E-05
29	2,52561E-05	2,43492E-05
30	2,52561E-05	2,43494E-05
31	2,52561E-05	2,43495E-05
32	2,52561E-05	2,43497E-05
33	2,52561E-05	2,43499E-05
34	2,52561E-05	2,43501E-05
35	2,52561E-05	2,43503E-05
36	2,52561E-05	2,43504E-05
37	2,52561E-05	2,43506E-05
38	2,52561E-05	2,43507E-05
39	2,52561E-05	2,43509E-05
40	2,52561E-05	2,43511E-05

41	2,52561E-05	2,43512E-05
42	2,52561E-05	2,43514E-05
43	2,52561E-05	2,43515E-05
44	2,52561E-05	2,43516E-05
45	2,52561E-05	2,43518E-05
46	2,52561E-05	2,43519E-05
47	2,52561E-05	2,4352E-05
48	2,52561E-05	2,43522E-05
49	2,52561E-05	2,43523E-05
50	2,52561E-05	2,43524E-05
51	2,52561E-05	2,43525E-05
52	2,52561E-05	2,43527E-05
53	2,52561E-05	2,43528E-05
54	2,52561E-05	2,43529E-05
55	2,52561E-05	2,4353E-05
56	2,52561E-05	2,43531E-05
57	2,52561E-05	2,43532E-05
58	2,52561E-05	2,43533E-05
59	2,52561E-05	2,43534E-05
60	2,52561E-05	2,43535E-05
61	2,52561E-05	2,43536E-05
62	2,52561E-05	2,43537E-05
63	2,52561E-05	2,43538E-05
64	2,52561E-05	2,43539E-05
65	2,52561E-05	2,4354E-05
66	2,52561E-05	2,43541E-05
67	2,52561E-05	2,43541E-05
68	2,52561E-05	2,43542E-05
69	2,52561E-05	2,43543E-05
70	2,52561E-05	2,43544E-05
71	2,52561E-05	2,43545E-05
72	2,52561E-05	2,43545E-05
73	2,52561E-05	2,43546E-05
74	2,52561E-05	2,43547E-05
75	2,52561E-05	2,43548E-05
76	2,52561E-05	2,43548E-05
77	2,52561E-05	2,43549E-05
78	2,52561E-05	2,4355E-05
79	2,52561E-05	2,4355E-05
80	2,52561E-05	2,43551E-05
81	2,52561E-05	2,43552E-05
82	2,52561E-05	2,43552E-05
83	2,52561E-05	2,43553E-05
84	2,52561E-05	2,43553E-05
85	2,52561E-05	2,43554E-05
86	2,52561E-05	2,43555E-05

87	2,52561E-05	2,43555E-05
88	2,52561E-05	2,43556E-05
89	2,52561E-05	2,43556E-05
90	2,52561E-05	2,43557E-05
91	2,52561E-05	2,43557E-05
92	2,52561E-05	2,43558E-05
93	2,52561E-05	2,43558E-05
94	2,52561E-05	2,43559E-05
95	2,52561E-05	2,43559E-05
96	2,52561E-05	2,4356E-05
97	2,52561E-05	2,4356E-05
98	2,52561E-05	2,4356E-05
99	2,52561E-05	2,43561E-05
100	2,52561E-05	2,43561E-05

### 13.2. ANEXO 2: Radiación Solar Extraterrestre

Mes	cal(m2*d)											
Lat	En	Fb	Mz	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sep	Oc	Nov	Dic
0º	858	888	890	862	816	790	804	833	875	880	860	842
5º	809	855	882	878	851	832	842	857	874	855	814	789
10º	759	821	873	894	885	873	879	880	872	830	767	735
15º	701	777	854	898	908	904	905	891	858	793	712	673
18º	665,6	750	842	900,4	921,2	922	920	897,6	849	770,2	678,4	635,2
20º	642	732	834	902	930	934	930	902	843	755	656	610
25º	575	678	799	891	940	954	942	896	815	708	593	539
30º	508	624	764	880	950	972	955	891	788	658	528	469
35º	436	559	719	856	947	979	957	874	749	597	459	395
40º	364	495	673	833	944	985	958	858	710	536	390	323
45º	293	427	616	798	932	984	948	829	658	470	317	251
50º	222	360	560	764	920	983	938	800	607	404	246	180
55º	155	288	496	720	900	977	923	764	547	333	179	118
60º	88	215	432	676	880	970	908	728	487	262	111	56

### 13.3. ANEXO 3: Descripción fallas Fedorovich (2019)

Fault ID	Number of Fault Outcrops	Average Wireframe Dip	Average WF Dip Direction	Strike Length (m)	Dip Length (m)	Number of DDH Intercepts	Mean True Thickness (m)	Incohesive or Cohesive	Major or Inter-Ramp	Confidence Ranking
Falla BARTOLINA	7	80	34	3180	786	13	0,862	C	M	8
Falla LORENA	1	82	289	4305	826	7	4,37	I	M	7
Falla ISIDORA	2	72	71	1089	908	2	2,58	I	M	6
Falla ISABELLA_1	1	90	278	730	757	8	1,62	I	I	6
Falla ISABELLA_2	1	85	264	80	375	4	1,25	C	I	7
Falla ISABELLA_3	1	75	282	1570	1061	4	1,6	C	M	4
Falla CHUYCANI	1	90	105	4180	985	0	1	I	M	4
Falla PAZ	1	77	222	210	835	9	3,89	I	I	6
Falla FRANCISCA	3	70	30	714	770	6	1,17	I	M	8
Falla PIA	1	82,8	84	243	825	6	3,57	I	I	6
FLT_VIVIANA	1	85	170	291	702	6	1,04	I	I	6
Falla ALEJANDRA	1	75	233	658	775	15	2,83	C	I	8
Falla CAROL	5	80	244	405	920	18	1,6	I	I	7

Falla LORETO	1	40	281	405	125	20	1,5	C	I	8
Falla LUCIA	1	72	171	167	140	3	2,8	I	I	6
Falla BERTA	1	80	165	136	147	3	1,4	I	I	6
Falla MARIA	1	70	285	160	500	12	1,1	I	I	6
Falla CATALINA	1	86	222	220	870	3	1,16	I	I	7
Falla ANDREA	1	60	229	76	270	8	2,42	I	I	6
Falla ALINA	2	75	221	325	1192	1	2,3425	I	I	4
Falla ANA	1	60	200	350	430	11	1,9	I	I	6
Falla SONIA	1	78	26	138	464	3	1,4	I	I	5
Falla PAULA	1	85	277	217	303	7	1,35	I	I	6
Falla JAVIERA	1	79	281	145	244	4	2,205	I	I	5
Falla NATALIA	2	86	300	510	680	2	3,0475	I	I	6
Falla CAMILA	1	85	54	390	360	3	2,45	I	I	5
Falla CONSTANZA	2	90	310	240	230	2	0,9875	I	I	6
Falla LORENA Splay	0	74	=	523	550	1	1	I?	I	4

Falla IRENE	2	74	225	427	707	20	2	1	1	8
-------------	---	----	-----	-----	-----	----	---	---	---	---

### 13.4. ANEXO 4: Dominios y fallas representadas en *Stereonet*

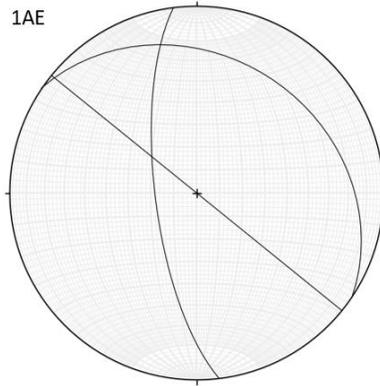


Figura 13-1 Dominio 1AE

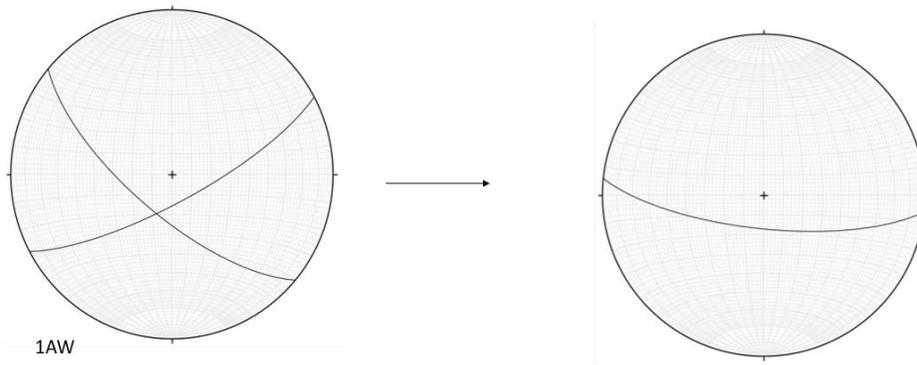


Figura 13-2 Dominio 1AW

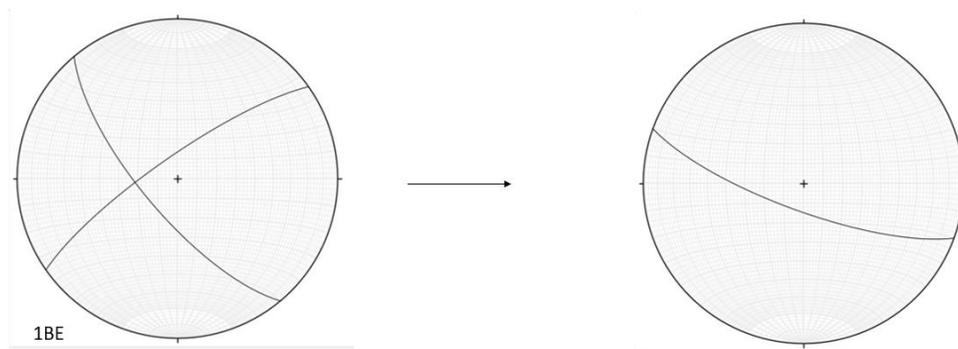
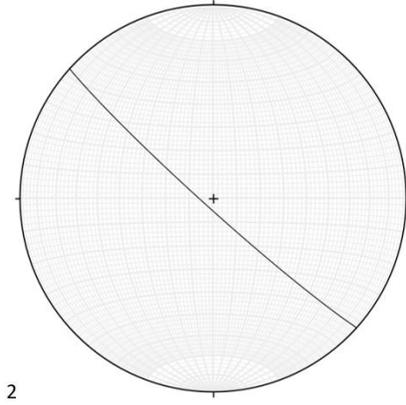
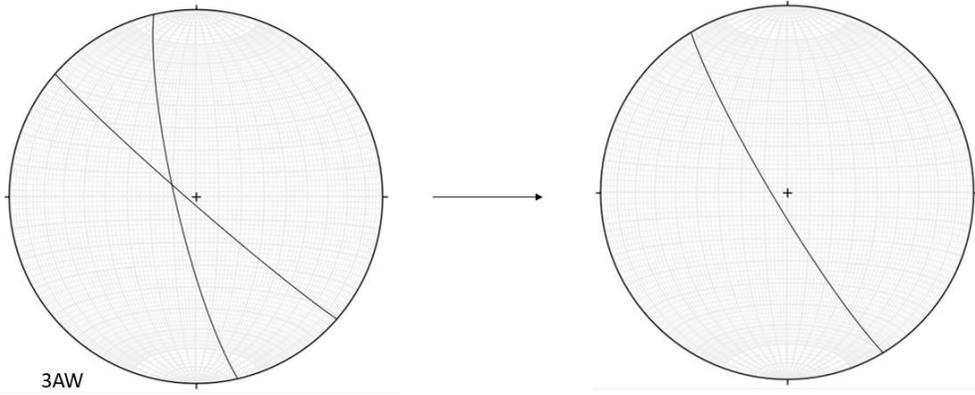


Figura 13-3 Dominio 1BE



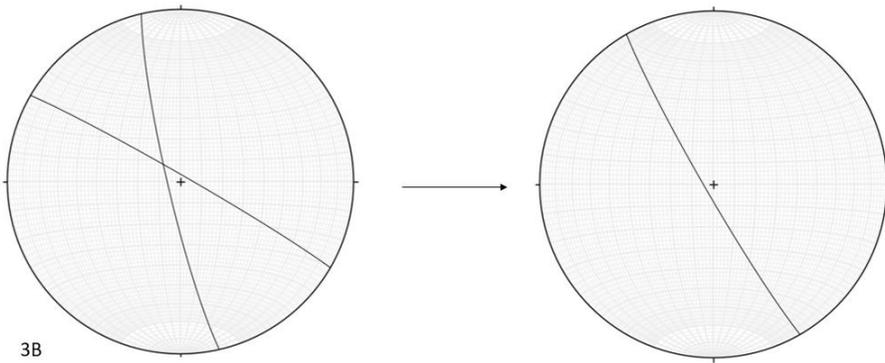
2

Figura 13-4 Dominio 2



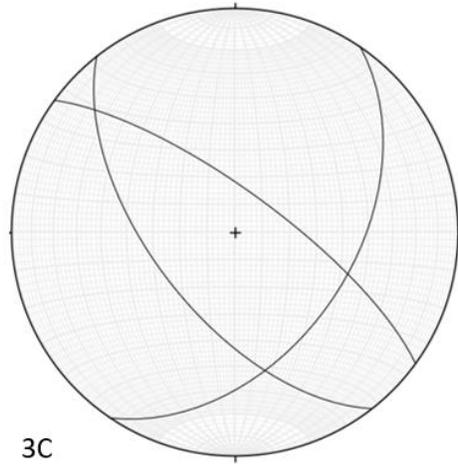
3AW

Figura 13-5 Dominio 3AW



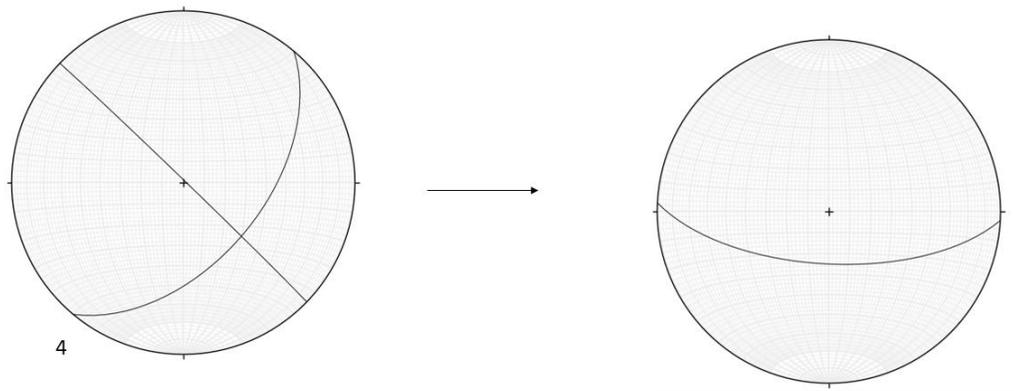
3B

Figura 13-6 Dominio 3B



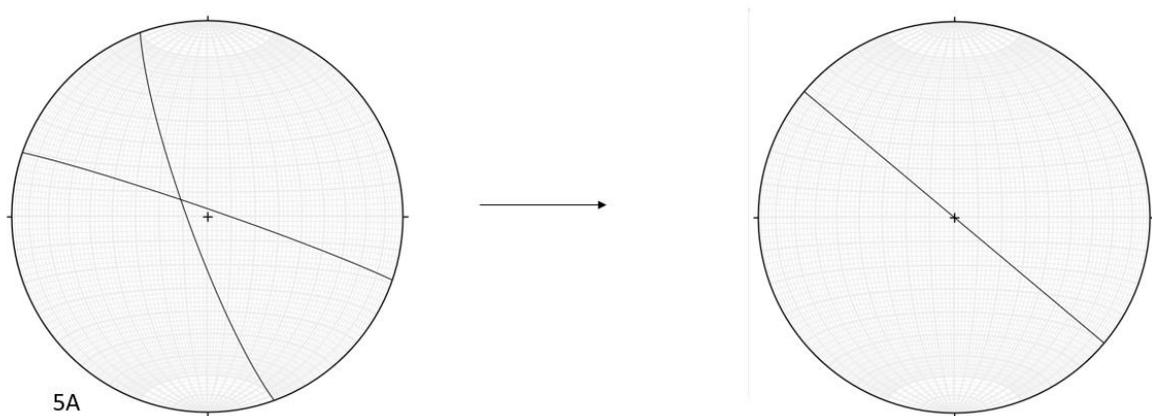
3C

Figura 13-7 Dominio 3C



4

Figura 13-8 Dominio 4



5A

Figura 13-9 Dominio 5A

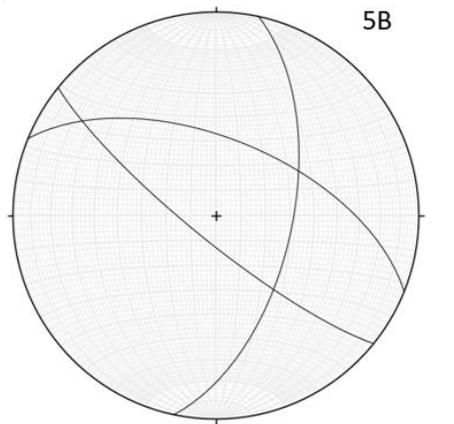


Figura 13-10 Dominio 5B

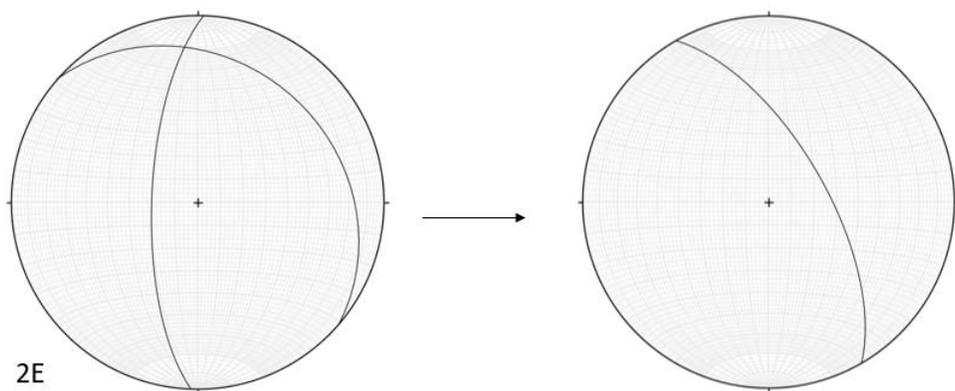


Figura 13-11 Dominio 2E.

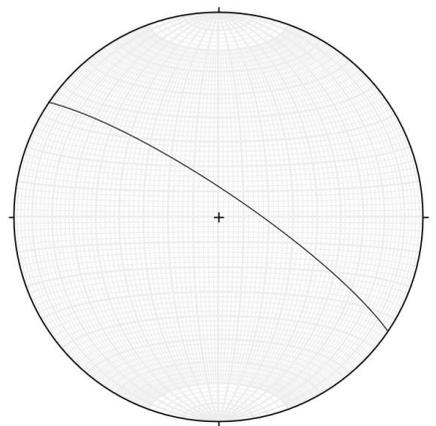


Figura 13-12 Bartolina

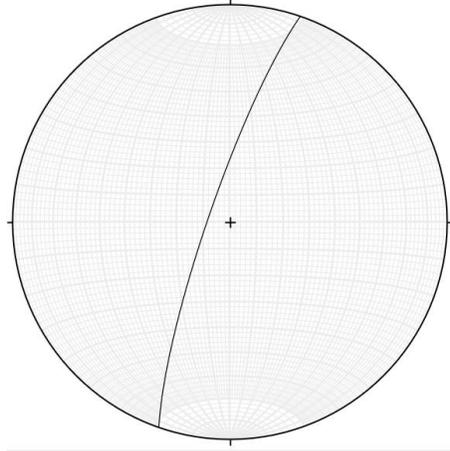


Figura 13-13 LORENA

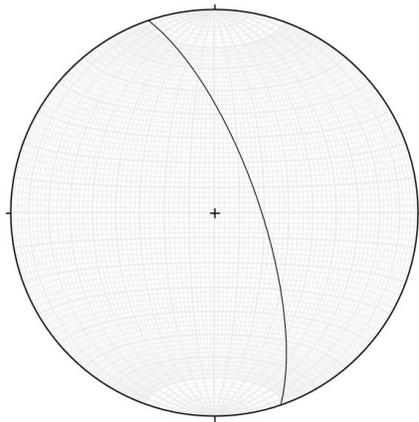


Figura 13-14 ISIDORA

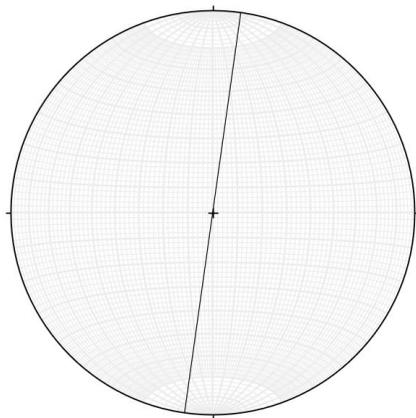


Figura 13-15 ISABELLA\_1

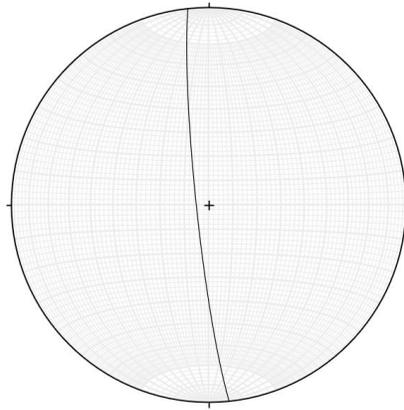


Figura 13-16 ISABELLA\_2

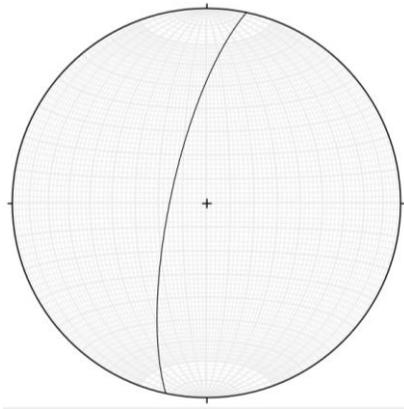


Figura 13-17 ISABELLA\_3

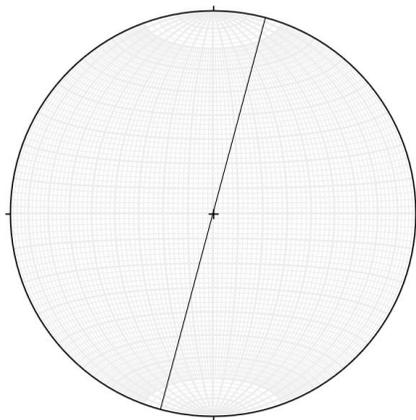


Figura 13-18 Chuymani

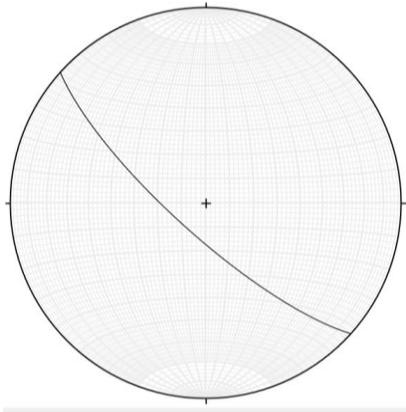


Figura 13-19 PAZ

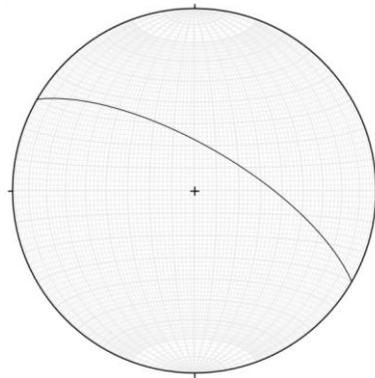


Figura 13-20 FRANCISCA

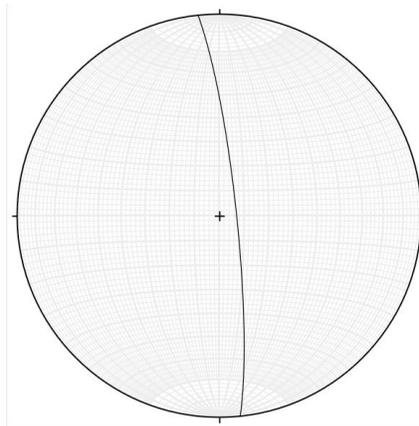


Figura 13-21 Rita

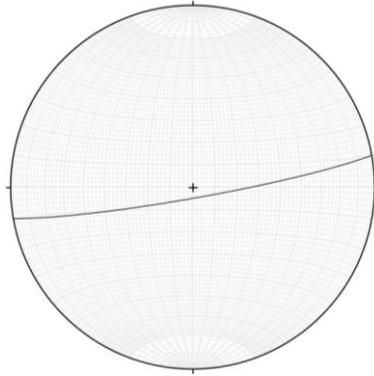


Figura 13-22 VIVIANA

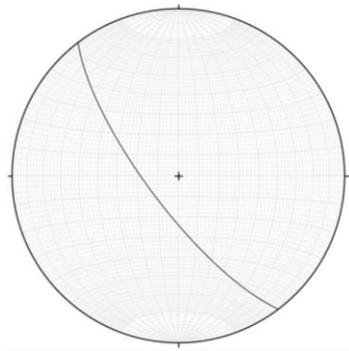


Figura 13-23 ALEJANDRA

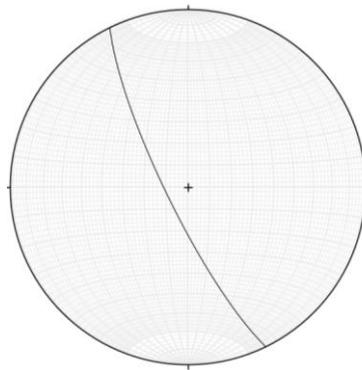


Figura 13-24 CAROL

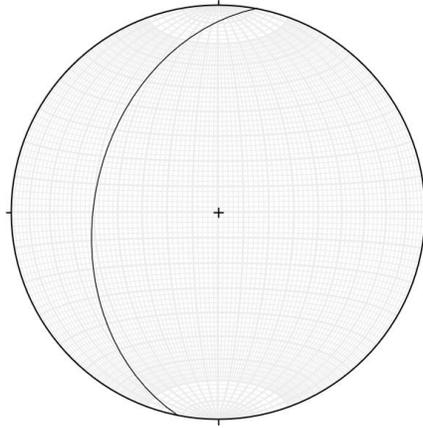


Figura 13-25 LORETO

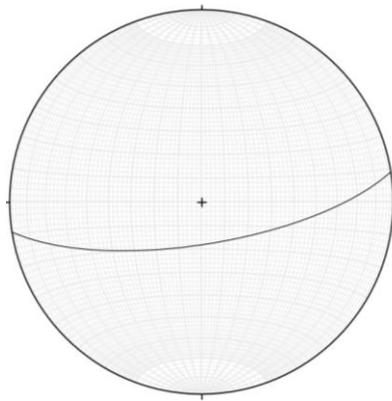


Figura 13-26 LUCIA

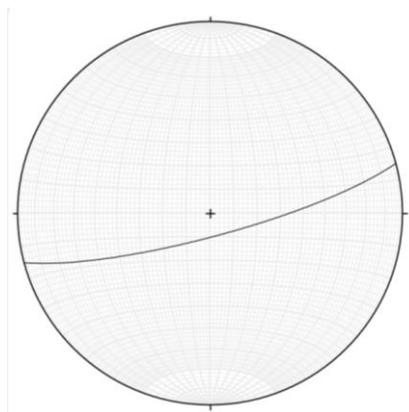


Figura 13-27 BERTA

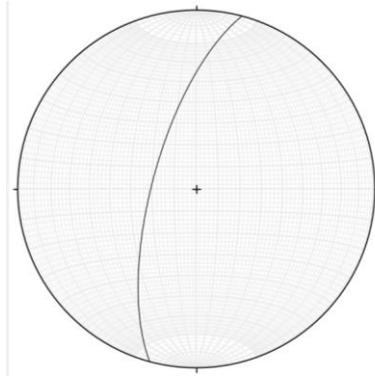


Figura 13-28 MARIA

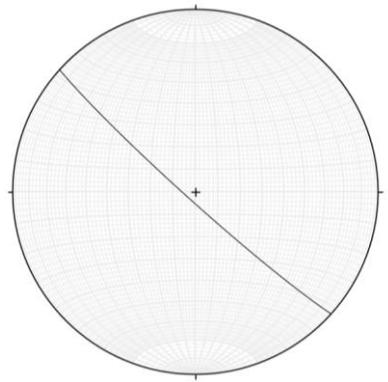


Figura 13-29 Perla

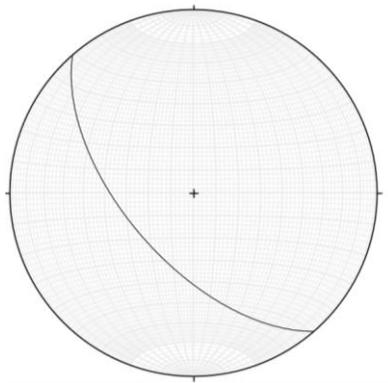


Figura 13-30 ANDREA

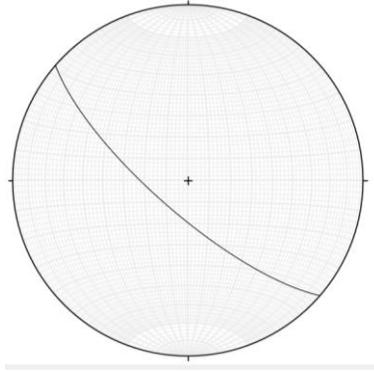


Figura 13-31 ALINA

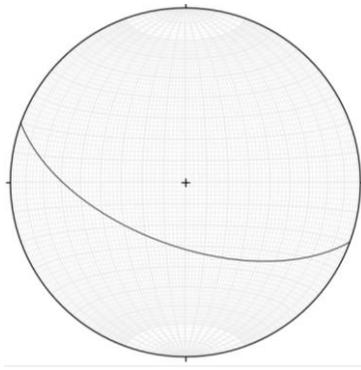


Figura 13-32 ANA

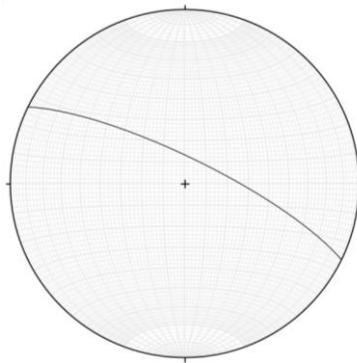


Figura 13-33 SONIA

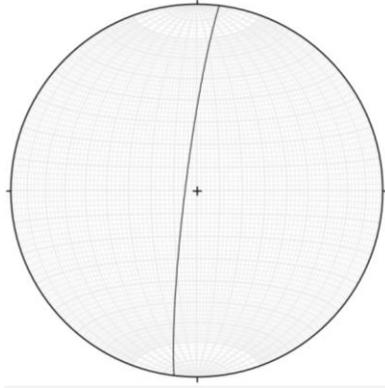


Figura 13-34 PAULA

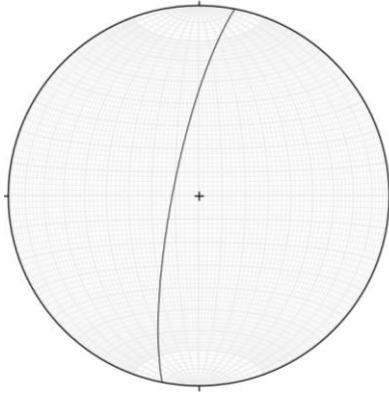


Figura 13-35 JAVIERA

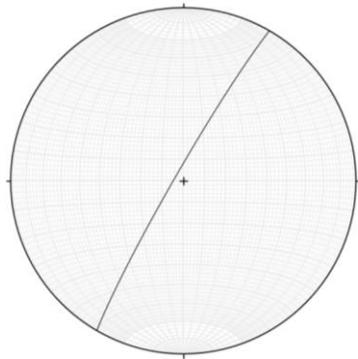


Figura 13-36 NATALIA

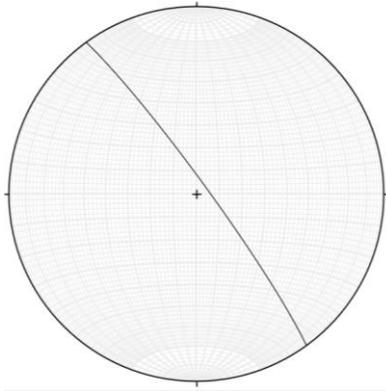


Figura 13-37 CAMILA

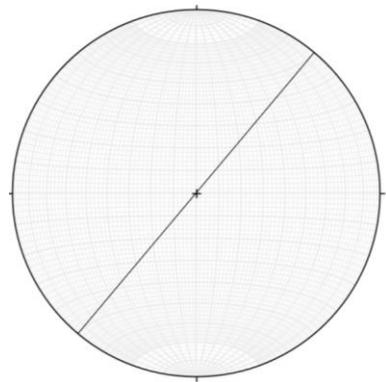


Figura 13-38 CONSTANZA

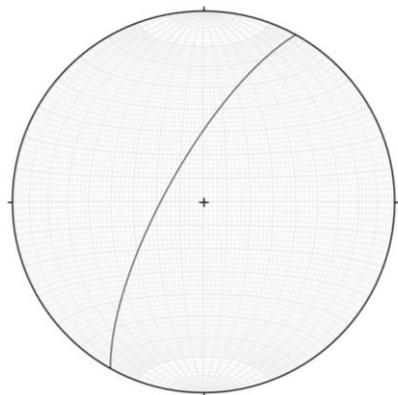


Figura 13-39 LORENA splay

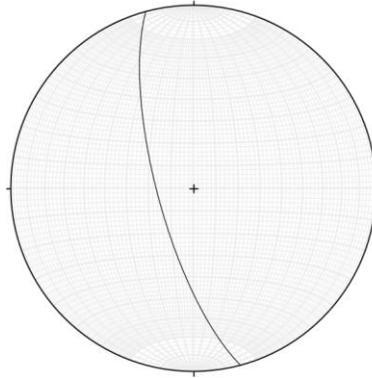


Figura 13-40 IRENE

### 13.5. ANEXO 5: Unidades hidrogeológicas Rajo Bartolina Andina 2020

Nombre	ID	Nombre	ID
MBL	1	MZM(1BE)	82
GD	2	MZM(1BW)	83
MZQ	3	MZM(1AW)	84
TOBA	4	MZM(1AE)	85
ALV	5	MZM(3AE)	86
F_REG	6	MZM(3AW)	87
MBL(3B)	7	MZM(2)	88
MBL(3C)	8	MZM(2E)	89
MBL(5A)	9	MZQ (3B)	90
MBL(5B)	10	MZQ (3C)	91
MBL(5C)	11	MZQ (5A)	92
MBL(5D)	12	MZQ(5B)	93
MBL(4)	13	MZQ(5C)	94
MBL(1C)	14	MZQ(5D)	95
MBL(1BE)	15	MZQ(4)	96
MBL(1BW)	16	MZQ(1C)	97
MBL(1AW)	17	MZQ(1BE)	98
MBL(1AE)	18	MZQ(1BW)	99
MBL(3AE)	19	MZQ(1AW)	100
MBL(3AW)	20	MZQ(1AE)	101
MBL(2)	21	MZQ(3AW)	102
MBL(2E)	22	MZQ(2)	103
GD (3B)	23	MZQ(2E)	104
GD(5B)	24	MBF (3B)	105
SK (3B)	25	MBF (3C)	106
SK (3C)	26	BARTOLINA_3	107

BARTOLINA_1	27	MBF(5B)	108
SK(4)	28	MBF(4)	109
SK(1BW)	29	MBF(2)	110
SK(1AW)	30	TOBA(5D)	111
SK(1AE)	31	TOBA(4)	112
SK(3AW)	32	SND(1AE)	113
SK(2)	33	SND(3AE)	114
MBC (3B)	34	SND(3AW)	115
MBC (3C)	35	SHL (3B)	116
MBC (5A)	36	SHL(1AE)	117
MBC(1BE)	37	SHL(3AE)	118
MBC(1BW)	38	SHL(3AW)	119
MBC(1AW)	39	ALV (3C)	120
MBC(3AW)	40	ALV(5B)	121
MBC(2)	41	ALV(5D)	122
ENDO (3B)	42	ALV(4)	123
ENDO (3C)	43	ALV(1C)	124
ENDO(1BE)	44	ALV(2E)	125
ENDO(1BW)	45	LMT (3B)	126
ENDO(1AW)	46	LMT (3C)	127
ENDO(1AE)	47	LMT (5A)	128
ENDO(3AW)	48	LMT(1BE)	129
ENDO(2)	49	LMT(1BW)	130
BX (3B)	50	LMT(3AW)	131
BX (3C)	51	LMT(2)	132
BX(1BE)	52	LORENA	133
BX(1BW)	53	ISIDORA	134
BX(3AW)	54	ISABELLA_1	135
BX(2)	55	ISABELLA_2	136
BX(2E)	56	ISABELLA_3A	137
MZB (3C)	57	ISABELLA_3B	138
BARTOLINA_2	58	CHUYMANI	139
MZB(5B)	59	PAZ	140
MZB(5C)	60	FRANCISCA	141
MZB(5D)	61	RITA	142
MZB(4)	62	VIVIANA	143
MZB(1C)	63	ALEJANDRA	144
MZB(1BE)	64	CAROL	145
MZB(1BW)	65	LORETO	146
MZB(1AW)	66	LUCIA	147
MZB(1AE)	67	BERTA	148
MZB(3AW)	68	MARIA	149
MZB(2)	69	PERLA	150

MZB(2E)	70	ANDREA	151
MZH (3B)	71	ALINA	152
MZH (3C)	72	ANA	153
MZH(1C)	73	SONIA	154
MZH(1BE)	74	PAULA	155
MZH(1BW)	75	JAVIERA	156
MZH(3AW)	76	NATALIA	157
MZH(2)	77	CAMILA	158
MZH(2E)	78	CONSTANZA	159
MZM (3B)	79	LORENA_SPLAY	160
MZM (3C)	80	IRENE	161
MZM(4)	81		

### 13.6. ANEXO 6: Parámetros calibrados modelo permanente

nombre	ID	Kx (m/d)	Ky (m/d)	Kz (m/d)	Ss	Sy	Angulo 1	Angulo 2	Angulo 3
MBL	1	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	0	0	0
GD	2	0,0412	0,0412	0,0412	1,E-06	0,001	0	0	0
MZQ	3	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	0	0	0
TOBA	4	0,1200	0,1200	0,0120	5,E-05	0,01	0	0	0
ALV	5	1,0000	1,0000	0,1000	1,E-02	0,15	0	0	0
F_REG	6	0,5000	0,5000	0,5000	1,E-06	0,001	-34	10	0
MBL(3B)	7	0,0017	0,0017	0,0017	5,E-07	0,001	-60	-4	0
MBL(3C)	8	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	0	0	0
MBL(5A)	9	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	-40	0	0
MBL(5B)	10	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	0	0	0
MBL(5C)	11	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	0	0	0
MBL(5D)	12	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	0	0	0
MBL(4)	13	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	-4	-25	0
MBL(1C)	14	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	-52	-16	0
MBL(1BE)	15	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	-20	-14	0
MBL(1BW)	16	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	0	0	0
MBL(1AW)	17	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	-6	-17	0
MBL(1AE)	18	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	0	0	0
MBL(3AE)	19	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	0	0	0
MBL(3AW)	20	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	-59	-6	0
MBL(2)	21	40,0000	40,0000	40,0000	5,E-07	0,001	-42	-4	0
MBL(2E)	22	0,0172	0,0172	0,0172	5,E-07	0,001	-60	25	0
GD (3B)	23	0,0412	0,0412	0,0412	1,E-06	0,001	-60	-4	0
GD(5B)	24	0,0412	0,0412	0,0412	1,E-06	0,001	0	0	0
SK (3B)	25	0,1700	0,1700	0,1700	5,E-06	0,001	-60	-4	0
SK (3C)	26	0,1700	0,1700	0,1700	5,E-06	0,001	0	0	0

BARTOLINA_1	27	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	0,001	-34	10	0
SK(4)	28	0,1700	0,1700	0,1700	5,E-06	0,001	-4	-25	0
SK(1BW)	29	0,1700	0,1700	0,1700	5,E-06	0,001	0	0	0
SK(1AW)	30	0,1700	0,1700	0,1700	5,E-06	0,001	-6	-17	0
SK(1AE)	31	0,1700	0,1700	0,1700	5,E-06	0,001	0	0	0
SK(3AW)	32	0,1700	0,1700	0,1700	5,E-06	0,001	-59	-6	0
SK(2)	33	30,0000	30,0000	30,0000	5,E-06	0,001	-42	-4	0
MBC (3B)	34	0,0049	0,0049	0,0049	5,E-06	0,001	-60	-4	0
MBC (3C)	35	0,0049	0,0049	0,0049	5,E-06	0,001	0	0	0
MBC (5A)	36	0,0049	0,0049	0,0049	5,E-06	0,001	-40	0	0
MBC(1BE)	37	0,0049	0,0049	0,0049	5,E-06	0,001	-20	-14	0
MBC(1BW)	38	0,0049	0,0049	0,0049	5,E-06	0,001	0	0	0
MBC(1AW)	39	0,0049	0,0049	0,0049	5,E-06	0,001	-6	-17	0
MBC(3AW)	40	0,0049	0,0049	0,0049	5,E-06	0,001	-59	-6	0
MBC(2)	41	0,4000	0,4000	0,4000	5,E-06	0,001	-42	-4	0
ENDO (3B)	42	0,0016	0,0016	0,0016	1,E-06	0,001	-60	-4	0
ENDO (3C)	43	0,0156	0,0156	0,0156	1,E-06	0,001	0	0	0
ENDO(1BE)	44	0,0156	0,0156	0,0156	1,E-06	0,001	-20	-14	0
ENDO(1BW)	45	0,0156	0,0156	0,0156	1,E-06	0,001	0	0	0
ENDO(1AW)	46	0,0156	0,0156	0,0156	1,E-06	0,001	-6	-17	0
ENDO(1AE)	47	0,0156	0,0156	0,0156	1,E-06	0,001	0	0	0
ENDO(3AW)	48	0,0156	0,0156	0,0156	1,E-06	0,001	-59	-6	0
ENDO(2)	49	0,1557	0,1557	0,1557	1,E-06	0,001	-42	-4	0
BX (3B)	50	0,0556	0,0556	0,0556	1,E-04	0,01	-60	-4	0
BX (3C)	51	0,0556	0,0556	0,0556	1,E-04	0,01	0	0	0
BX(1BE)	52	0,0556	0,0556	0,0556	1,E-04	0,01	-20	-14	0
BX(1BW)	53	0,0556	0,0556	0,0556	1,E-04	0,01	0	0	0
BX(3AW)	54	0,0556	0,0556	0,0556	1,E-04	0,01	-59	-6	0
BX(2)	55	0,5564	0,5564	0,5564	1,E-04	0,01	-42	-4	0
BX(2E)	56	0,0556	0,0556	0,0556	1,E-04	0,01	-60	25	0
MZB (3C)	57	0,0100	0,0100	0,0100	5,E-06	0,001	0	0	0
BARTOLINA_2	58	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	0,001	-34	10	0
MZB(5B)	59	0,0100	0,0100	0,0100	5,E-06	0,001	0	0	0
MZB(5C)	60	0,0100	0,0100	0,0100	5,E-06	0,001	0	0	0
MZB(5D)	61	0,0100	0,0100	0,0100	5,E-06	0,001	0	0	0
MZB(4)	62	0,0100	0,0100	0,0100	5,E-06	0,001	-4	-25	0
MZB(1C)	63	0,0100	0,0100	0,0100	5,E-06	0,001	-52	-16	0
MZB(1BE)	64	0,0100	0,0100	0,0100	5,E-06	0,001	-20	-14	0
MZB(1BW)	65	0,0100	0,0100	0,0100	5,E-06	0,001	0	0	0
MZB(1AW)	66	0,0100	0,0100	0,0100	5,E-06	0,001	-6	-17	0
MZB(1AE)	67	0,0100	0,0100	0,0100	5,E-06	0,001	0	0	0
MZB(3AW)	68	0,0100	0,0100	0,0100	5,E-06	0,001	-59	-6	0
MZB(2)	69	0,1004	0,1004	0,1004	5,E-06	0,001	-42	-4	0

MZB(2E)	70	0,0100	0,0100	0,0100	5,E-06	0,001	-60	25	0
MZH (3B)	71	0,0038	0,0038	0,0038	5,E-06	0,001	-60	-4	0
MZH (3C)	72	0,0238	0,0238	0,0238	5,E-06	0,001	0	0	0
MZH(1C)	73	0,0238	0,0238	0,0238	5,E-06	0,001	-52	-16	0
MZH(1BE)	74	0,0238	0,0238	0,0238	5,E-06	0,001	-20	-14	0
MZH(1BW)	75	0,0238	0,0238	0,0238	5,E-06	0,001	0	0	0
MZH(3AW)	76	0,0238	0,0238	0,0238	5,E-06	0,001	-59	-6	0
MZH(2)	77	0,2379	0,2379	0,2379	5,E-06	0,001	-42	-4	0
MZH(2E)	78	0,0238	0,0238	0,0238	5,E-06	0,001	-60	25	0
MZM (3B)	79	0,0112	0,0112	0,0112	5,E-06	0,001	-60	-4	0
MZM (3C)	80	0,0643	0,0643	0,0643	5,E-06	0,001	0	0	0
MZM(4)	81	0,0643	0,0643	0,0643	5,E-06	0,001	-4	-25	0
MZM(1BE)	82	0,0643	0,0643	0,0643	5,E-06	0,001	-20	-14	0
MZM(1BW)	83	0,0643	0,0643	0,0643	5,E-06	0,001	0	0	0
MZM(1AW)	84	0,0643	0,0643	0,0643	5,E-06	0,001	-6	-17	0
MZM(1AE)	85	0,0643	0,0643	0,0643	5,E-06	0,001	0	0	0
MZM(3AE)	86	0,0643	0,0643	0,0643	5,E-06	0,001	0	0	0
MZM(3AW)	87	0,0643	0,0643	0,0643	5,E-06	0,001	-59	-6	0
MZM(2)	88	0,0643	0,0643	0,0643	5,E-06	0,001	-42	-4	0
MZM(2E)	89	0,0643	0,0643	0,0643	5,E-06	0,001	-60	25	0
MZQ (3B)	90	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	-60	-4	0
MZQ (3C)	91	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	0	0	0
MZQ (5A)	92	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	-40	0	0
MZQ(5B)	93	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	0	0	0
MZQ(5C)	94	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	0	0	0
MZQ(5D)	95	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	0	0	0
MZQ(4)	96	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	-4	-25	0
MZQ(1C)	97	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	-52	-16	0
MZQ(1BE)	98	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	-20	-14	0
MZQ(1BW)	99	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	0	0	0
MZQ(1AW)	100	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	-6	-17	0
MZQ(1AE)	101	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	0	0	0
MZQ(3AW)	102	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	-59	-6	0
MZQ(2)	103	0,6000	0,6000	0,6000	5,E-06	0,001	-42	-4	0
MZQ(2E)	104	0,0036	0,0036	0,0036	5,E-06	0,001	-60	25	0
MBF (3B)	105	0,2070	0,2070	0,2070	5,E-06	0,001	-60	-4	0
MBF (3C)	106	0,2070	0,2070	0,2070	5,E-06	0,001	0	0	0
BARTOLINA_3	107	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	0,001	-34	10	0
MBF(5B)	108	0,2070	0,2070	0,2070	5,E-06	0,001	0	0	0
MBF(4)	109	0,2070	0,2070	0,2070	5,E-06	0,001	-4	-25	0
MBF(2)	110	1,2096	1,2096	1,2096	5,E-06	0,001	-42	-4	0
TOBA(5D)	111	0,1200	0,1200	0,0120	5,E-05	0,01	0	0	0
TOBA(4)	112	0,1200	0,1200	0,0120	5,E-05	0,01	-4	-25	0

SND(1AE)	113	0,0010	0,0010	0,0010	5,E-07	0,0001	0	0	0
SND(3AE)	114	0,0010	0,0010	0,0010	5,E-07	0,0001	0	0	0
SND(3AW)	115	0,0010	0,0010	0,0010	5,E-07	0,0001	-59	-6	0
SHL (3B)	116	0,0010	0,0010	0,0010	5,E-07	0,0001	-60	-4	0
SHL(1AE)	117	0,0010	0,0010	0,0010	5,E-07	0,0001	0	0	0
SHL(3AE)	118	0,0010	0,0010	0,0010	5,E-07	0,0001	0	0	0
SHL(3AW)	119	0,0010	0,0010	0,0010	5,E-07	0,0001	-59	-6	0
ALV (3C)	120	1,0000	1,0000	0,1000	1,E-02	0,15	0	0	0
ALV(5B)	121	1,0000	1,0000	0,1000	1,E-02	0,15	0	0	0
ALV(5D)	122	1,0000	1,0000	0,1000	1,E-02	0,15	0	0	0
ALV(4)	123	1,0000	1,0000	0,1000	1,E-02	0,15	-4	-25	0
ALV(1C)	124	1,0000	1,0000	0,1000	1,E-02	0,15	-52	-16	0
ALV(2E)	125	1,0000	1,0000	0,1000	1,E-02	0,15	-60	25	0
LMT (3B)	126	0,0565	0,0565	0,0565	5,E-06	0,001	-60	-4	0
LMT (3C)	127	0,0565	0,0565	0,0565	5,E-06	0,001	0	0	0
LMT (5A)	128	0,0565	0,0565	0,0565	5,E-06	0,001	-40	0	0
LMT(1BE)	129	0,0565	0,0565	0,0565	5,E-06	0,001	-20	-14	0
LMT(1BW)	130	0,0565	0,0565	0,0565	5,E-06	0,001	0	0	0
LMT(3AW)	131	0,0565	0,0565	0,0565	5,E-06	0,001	-59	-6	0
LMT(2)	132	0,5646	0,5646	0,5646	5,E-06	0,001	-42	-4	0
LORENA	133	0,0386	0,0386	0,0386	5,E-06	0,001	72	8	0
ISIDORA	134	0,3858	0,3858	0,3858	1,E-04	0,02	-71	18	0
ISABELLA_1	135	0,3858	0,3858	0,3858	1,E-04	0,02	-98	0	0
ISABELLA_2	136	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	0,001	-84	-5	0
ISABELLA_3A	137	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	1,001	-103	-15	0
ISABELLA_3B	138	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	2,001	-103	-15	0
CHUYMANI	139	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	3,001	-105	0	0
PAZ	140	0,3858	0,3858	0,3858	1,E-04	0,02	-42	-13	0
FRANCISCA	141	0,3858	0,3858	0,3858	1,E-04	0,02	-30	20	0
RITA	142	0,3858	0,3858	0,3858	1,E-04	0,02	-84	7	0
VIVIANA	143	0,3858	0,3858	0,3858	1,E-04	0,02	10	-5	0
ALEJANDRA	144	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	0,001	-53	-15	0
CAROL	145	0,3858	0,3858	0,3858	1,E-04	0,02	-64	-10	0
LORETO	146	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	0,001	-102	-50	0
LUCIA	147	0,3858	0,3858	0,3858	1,E-04	0,02	9	-18	0
BERTA	148	0,3858	0,3858	0,3858	1,E-04	0,02	15	-10	0
MARIA	149	0,3858	0,3858	0,3858	1,E-04	0,02	-105	-20	0
PERLA	150	0,3858	0,3858	0,3858	1,E-04	0,02	-42	-4	0
ANDREA	151	0,3858	0,3858	0,3858	1,E-04	0,02	-49	-30	0
ALINA	152	0,3858	0,3858	0,3858	1,E-04	0,02	-41	-15	0
ANA	153	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	0,001	-20	-30	0
SONIA	154	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	1,001	-26	12	0
PAULA	155	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	2,001	-97	-5	0

JAVIERA	156	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	3,001	-101	-11	0
NATALIA	157	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	4,001	-120	-4	0
CAMILA	158	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	5,001	-54	5	0
CONSTANZA	159	0,1000	0,1000	0,1000	5,E-06	6,001	-130	0	0
LORENA_SPLAY	160	0,0386	0,0386	0,0386	5,E-06	0,001	-120	-16	0
IRENE	161	0,3858	0,3858	0,3858	1,E-04	0,02	-76	-16	0

### 13.7. ANEXO 7: Parámetros calibrados modelo transiente

nombre	ID	Kx (m/d)	Ky (m/d)	Kz (m/d)	Ss	Sy	Angulo 1	Angulo 2	Angulo 3
MBL	1	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,001	0	0	0
GD	2	0,04120	0,04120	0,04120	1,E-06	0,001	0	0	0
MZQ	3	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,001	0	0	0
TOBA	4	0,12000	0,12000	0,01200	5,E-05	0,01	0	0	0
ALV	5	1,00000	1,00000	0,10000	1,E-02	0,15	0	0	0
F_REG	6	0,50000	0,05000	0,50000	1,E-06	0,01	-34	10	0
MBL(3B)	7	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,01	-60	-4	0
MBL(3C)	8	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,01	0	0	0
MBL(5A)	9	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,01	-40	0	0
MBL(5B)	10	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,001	0	0	0
MBL(5C)	11	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,001	0	0	0
MBL(5D)	12	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,001	0	0	0
MBL(4)	13	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,001	-4	-25	0
MBL(1C)	14	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,01	-52	-16	0
MBL(1BE)	15	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,01	-20	-14	0
MBL(1BW)	16	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,01	0	0	0
MBL(1AW)	17	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,01	-6	-17	0
MBL(1AE)	18	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,01	0	0	0
MBL(3AE)	19	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,001	0	0	0
MBL(3AW)	20	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,01	-59	-6	0
MBL(2)	21	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,01	-42	-4	0
MBL(2E)	22	0,01720	0,01720	0,01720	5,E-07	0,01	-60	25	0
GD (3B)	23	0,04120	0,04120	0,04120	1,E-06	0,001	-60	-4	0
GD(5B)	24	0,04120	0,04120	0,04120	1,E-06	0,001	0	0	0
SK (3B)	25	0,17000	0,17000	0,17000	5,E-06	0,01	-60	-4	0
SK (3C)	26	0,17000	0,17000	0,17000	5,E-06	0,01	0	0	0
BARTOLINA_1	27	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,01	-34	10	0
SK(4)	28	0,17000	0,17000	0,17000	5,E-06	0,01	-4	-25	0
SK(1BW)	29	0,17000	0,17000	0,17000	5,E-06	0,01	0	0	0
SK(1AW)	30	0,17000	0,17000	0,17000	5,E-06	0,01	-6	-17	0
SK(1AE)	31	0,17000	0,17000	0,17000	5,E-06	0,001	0	0	0
SK(3AW)	32	0,17000	0,17000	0,17000	5,E-06	0,01	-59	-6	0

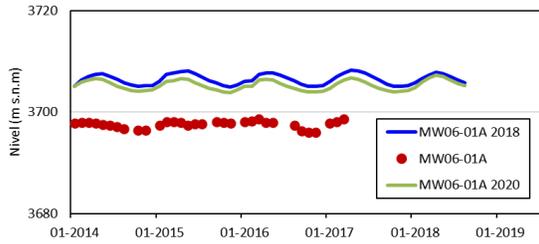
SK(2)	33	0,01700	0,01700	0,01700	5,E-06	0,01	-42	-4	0
MBC (3B)	34	0,00488	0,00488	0,00488	5,E-06	0,01	-60	-4	0
MBC (3C)	35	0,00488	0,00488	0,00488	5,E-06	0,001	0	0	0
MBC (5A)	36	0,00488	0,00488	0,00488	5,E-06	0,001	-40	0	0
MBC(1BE)	37	0,00488	0,00488	0,00488	5,E-06	0,001	-20	-14	0
MBC(1BW)	38	0,00488	0,00488	0,00488	5,E-06	0,01	0	0	0
MBC(1AW)	39	0,00488	0,00488	0,00488	5,E-06	0,001	-6	-17	0
MBC(3AW)	40	0,00488	0,00488	0,00488	5,E-06	0,001	-59	-6	0
MBC(2)	41	0,00488	0,00488	0,00488	5,E-06	0,01	-42	-4	0
ENDO (3B)	42	0,01557	0,01557	0,01557	1,E-06	0,01	-60	-4	0
ENDO (3C)	43	0,01557	0,01557	0,01557	1,E-06	0,001	0	0	0
ENDO(1BE)	44	0,01557	0,01557	0,01557	1,E-06	0,001	-20	-14	0
ENDO(1BW)	45	0,01557	0,01557	0,01557	1,E-06	0,001	0	0	0
ENDO(1AW)	46	0,01557	0,01557	0,01557	1,E-06	0,001	-6	-17	0
ENDO(1AE)	47	0,01557	0,01557	0,01557	1,E-06	0,001	0	0	0
ENDO(3AW)	48	0,01557	0,01557	0,01557	1,E-06	0,01	-59	-6	0
ENDO(2)	49	0,01557	0,01557	0,01557	1,E-06	0,01	-42	-4	0
BX (3B)	50	0,05564	0,05564	0,05564	1,E-04	0,01	-60	-4	0
BX (3C)	51	0,05564	0,05564	0,05564	1,E-04	0,1	0	0	0
BX(1BE)	52	0,05564	0,05564	0,05564	1,E-04	0,01	-20	-14	0
BX(1BW)	53	0,05564	0,05564	0,05564	1,E-04	0,1	0	0	0
BX(3AW)	54	0,05564	0,05564	0,05564	1,E-04	0,01	-59	-6	0
BX(2)	55	0,05564	0,05564	0,05564	1,E-04	0,1	-42	-4	0
BX(2E)	56	0,05564	0,05564	0,05564	1,E-04	0,01	-60	25	0
MZB (3C)	57	0,01004	0,01004	0,01004	5,E-06	0,001	0	0	0
BARTOLINA_2	58	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,01	-34	10	0
MZB(5B)	59	0,01004	0,01004	0,01004	5,E-06	0,001	0	0	0
MZB(5C)	60	0,01004	0,01004	0,01004	5,E-06	0,001	0	0	0
MZB(5D)	61	0,01004	0,01004	0,01004	5,E-06	0,001	0	0	0
MZB(4)	62	0,01004	0,01004	0,01004	5,E-06	0,001	-4	-25	0
MZB(1C)	63	0,01004	0,01004	0,01004	5,E-06	0,01	-52	-16	0
MZB(1BE)	64	0,01004	0,01004	0,01004	5,E-06	0,001	-20	-14	0
MZB(1BW)	65	0,01004	0,01004	0,01004	5,E-06	0,01	0	0	0
MZB(1AW)	66	0,01004	0,01004	0,01004	5,E-06	0,01	-6	-17	0
MZB(1AE)	67	0,01004	0,01004	0,01004	5,E-06	0,01	0	0	0
MZB(3AW)	68	0,01004	0,01004	0,01004	5,E-06	0,01	-59	-6	0
MZB(2)	69	0,01004	0,01004	0,01004	5,E-06	0,01	-42	-4	0
MZB(2E)	70	0,01004	0,01004	0,01004	5,E-06	0,01	-60	25	0
MZH (3B)	71	0,02379	0,02379	0,02379	5,E-06	0,01	-60	-4	0
MZH (3C)	72	0,02379	0,02379	0,02379	5,E-06	0,001	0	0	0
MZH(1C)	73	0,02379	0,02379	0,02379	5,E-06	0,01	-52	-16	0
MZH(1BE)	74	0,02379	0,02379	0,02379	5,E-06	0,01	-20	-14	0
MZH(1BW)	75	0,02379	0,02379	0,02379	5,E-06	0,01	0	0	0

MZH(3AW)	76	0,02379	0,02379	0,02379	5,E-06	0,01	-59	-6	0
MZH(2)	77	0,00238	0,00238	0,00238	5,E-06	0,01	-42	-4	0
MZH(2E)	78	0,02379	0,02379	0,02379	5,E-06	0,01	-60	25	0
MZM (3B)	79	0,06427	0,06427	0,06427	5,E-06	0,01	-60	-4	0
MZM (3C)	80	0,06427	0,06427	0,06427	5,E-06	0,01	0	0	0
MZM(4)	81	0,06427	0,06427	0,06427	5,E-06	0,001	-4	-25	0
MZM(1BE)	82	0,06427	0,06427	0,06427	5,E-06	0,01	-20	-14	0
MZM(1BW)	83	0,06427	0,06427	0,06427	5,E-06	0,001	0	0	0
MZM(1AW)	84	0,06427	0,06427	0,06427	5,E-06	0,01	-6	-17	0
MZM(1AE)	85	0,06427	0,06427	0,06427	5,E-06	0,001	0	0	0
MZM(3AE)	86	0,06427	0,06427	0,06427	5,E-06	0,001	0	0	0
MZM(3AW)	87	0,06427	0,06427	0,06427	5,E-06	0,01	-59	-6	0
MZM(2)	88	0,06427	0,06427	0,06427	5,E-06	0,01	-42	-4	0
MZM(2E)	89	0,06427	0,06427	0,06427	5,E-06	0,01	-60	25	0
MZQ (3B)	90	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,01	-60	-4	0
MZQ (3C)	91	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,001	0	0	0
MZQ (5A)	92	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,001	-40	0	0
MZQ(5B)	93	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,001	0	0	0
MZQ(5C)	94	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,001	0	0	0
MZQ(5D)	95	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,001	0	0	0
MZQ(4)	96	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,001	-4	-25	0
MZQ(1C)	97	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,001	-52	-16	0
MZQ(1BE)	98	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,01	-20	-14	0
MZQ(1BW)	99	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,01	0	0	0
MZQ(1AW)	100	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,001	-6	-17	0
MZQ(1AE)	101	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,001	0	0	0
MZQ(3AW)	102	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,001	-59	-6	0
MZQ(2)	103	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,01	-42	-4	0
MZQ(2E)	104	0,00361	0,00361	0,00361	5,E-06	0,001	-60	25	0
MBF (3B)	105	0,20700	0,20700	0,20700	5,E-06	0,001	-60	-4	0
MBF (3C)	106	0,20700	0,20700	0,20700	5,E-06	0,01	0	0	0
BARTOLINA_3	107	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,01	-34	10	0
MBF(5B)	108	0,20700	0,20700	0,20700	5,E-06	0,001	0	0	0
MBF(4)	109	0,20700	0,20700	0,20700	5,E-06	0,01	-4	-25	0
MBF(2)	110	0,02070	0,02070	0,02070	5,E-06	0,01	-42	-4	0
TOBA(5D)	111	0,12000	0,12000	0,01200	5,E-05	0,01	0	0	0
TOBA(4)	112	0,12000	0,12000	0,01200	5,E-05	0,01	-4	-25	0
SND(1AE)	113	0,00100	0,00100	0,00100	5,E-07	0,0001	0	0	0
SND(3AE)	114	0,00100	0,00100	0,00100	5,E-07	0,0001	0	0	0
SND(3AW)	115	0,00100	0,00100	0,00100	5,E-07	0,0001	-59	-6	0
SHL (3B)	116	0,00097	0,00097	0,00097	5,E-07	0,0001	-60	-4	0
SHL(1AE)	117	0,00097	0,00097	0,00097	5,E-07	0,0001	0	0	0
SHL(3AE)	118	0,00097	0,00097	0,00097	5,E-07	0,0001	0	0	0

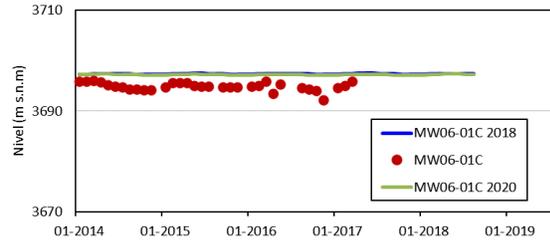
SHL(3AW)	119	0,00097	0,00097	0,00097	5,E-07	0,0001	-59	-6	0
ALV (3C)	120	1,00000	1,00000	0,10000	1,E-02	0,15	0	0	0
ALV(5B)	121	1,00000	1,00000	0,10000	1,E-02	0,15	0	0	0
ALV(5D)	122	1,00000	1,00000	0,10000	1,E-02	0,15	0	0	0
ALV(4)	123	1,00000	1,00000	0,10000	1,E-02	0,15	-4	-25	0
ALV(1C)	124	1,00000	1,00000	0,10000	1,E-02	0,15	-52	-16	0
ALV(2E)	125	1,00000	1,00000	0,10000	1,E-02	0,15	-60	25	0
LMT (3B)	126	0,05646	0,05646	0,05646	5,E-06	0,01	-60	-4	0
LMT (3C)	127	0,05646	0,05646	0,05646	5,E-06	0,001	0	0	0
LMT (5A)	128	0,05646	0,05646	0,05646	5,E-06	0,001	-40	0	0
LMT(1BE)	129	0,05646	0,05646	0,05646	5,E-06	0,01	-20	-14	0
LMT(1BW)	130	0,05646	0,05646	0,05646	5,E-06	0,001	0	0	0
LMT(3AW)	131	0,05646	0,05646	0,05646	5,E-06	0,001	-59	-6	0
LMT(2)	132	0,05646	0,05646	0,05646	5,E-06	0,001	-42	-4	0
LORENA	133	0,03858	0,00386	0,03858	5,E-06	0,01	72	8	0
ISIDORA	134	0,38585	0,03858	0,38585	1,E-04	0,02	-71	18	0
ISABELLA_1	135	0,03858	0,00386	0,03858	1,E-04	0,2	-98	0	0
ISABELLA_2	136	0,01000	0,00100	0,01000	5,E-06	0,01	-84	-5	0
ISABELLA_3A	137	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,01	-103	-15	0
ISABELLA_3B	138	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,001	-103	-15	0
CHUYMANI	139	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,001	-105	0	0
PAZ	140	0,38585	0,03858	0,38585	1,E-04	0,2	-42	-13	0
FRANCISCA	141	0,03858	0,00386	0,03858	1,E-04	0,2	-30	20	0
RITA	142	0,38585	0,03858	0,38585	1,E-04	0,02	-84	7	0
VIVIANA	143	0,38585	0,03858	0,38585	1,E-04	0,2	10	-5	0
ALEJANDRA	144	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,01	-53	-15	0
CAROL	145	0,03858	0,00386	0,03858	1,E-04	0,2	-64	-10	0
LORETO	146	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,01	-102	-50	0
LUCIA	147	0,38585	0,03858	0,38585	1,E-04	0,2	9	-18	0
BERTA	148	0,38585	0,03858	0,38585	1,E-04	0,2	15	-10	0
MARIA	149	0,38585	0,03858	0,38585	1,E-04	0,2	-105	-20	0
PERLA	150	0,38585	0,03858	0,38585	1,E-04	0,2	-42	-4	0
ANDREA	151	0,38585	0,03858	0,38585	1,E-04	0,2	-49	-30	0
ALINA	152	0,38585	0,03858	0,38585	1,E-04	0,02	-41	-15	0
ANA	153	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,01	-20	-30	0
SONIA	154	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,01	-26	12	0
PAULA	155	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,01	-97	-5	0
JAVIERA	156	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,01	-101	-11	0
NATALIA	157	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,001	-120	-4	0
CAMILA	158	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,01	-54	5	0
CONSTANZA	159	0,10000	0,01000	0,10000	5,E-06	0,01	-130	0	0
LORENA_SPLAY	160	0,03858	0,00386	0,03858	5,E-06	0,001	-120	-16	0
IRENE	161	0,03858	0,00386	0,03858	1,E-04	0,2	-76	-16	0

### 13.8. ANEXO 8: Comparación de piezómetros modelo 2020 y 2018 rajo Bartolina Andina

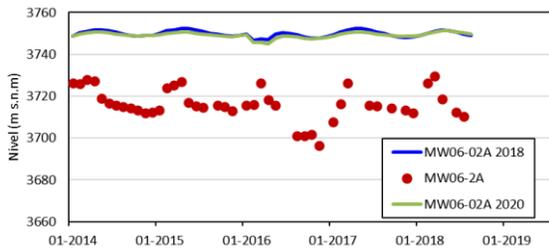
Calibración Piezómetro MW06-01A



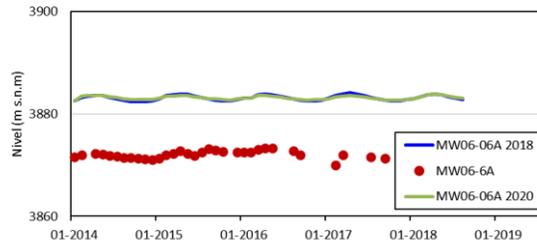
Calibración Piezómetro MW06-01C



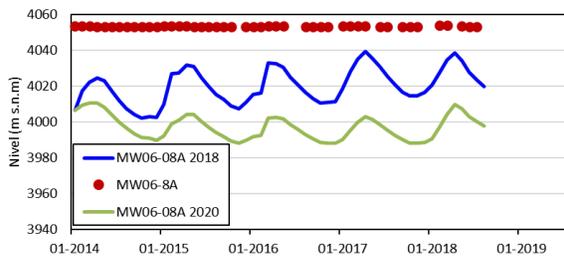
Calibración Piezómetro MW06-2A



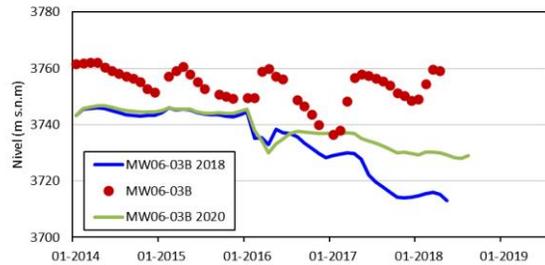
Calibración Piezómetro MW06-6A



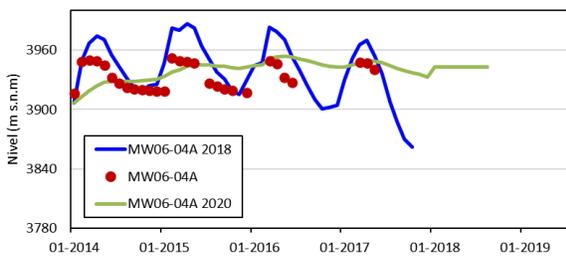
Calibración Piezómetro MW06-8A



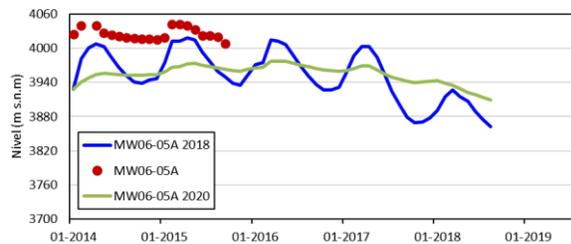
Calibración Piezómetro MW06-03B



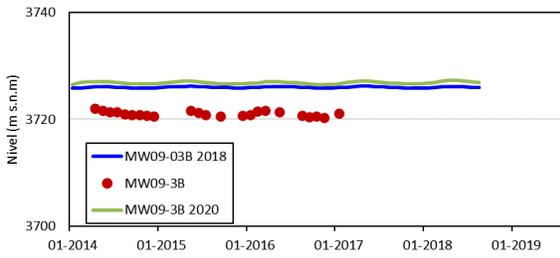
Calibración Piezómetro MW06-04A



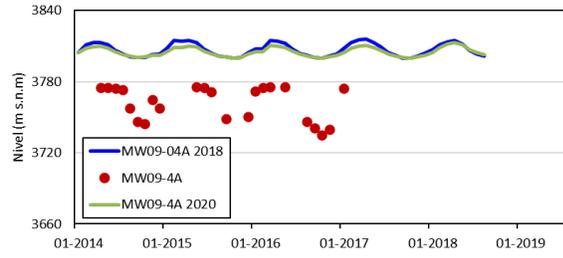
Calibración Piezómetro MW06-05A



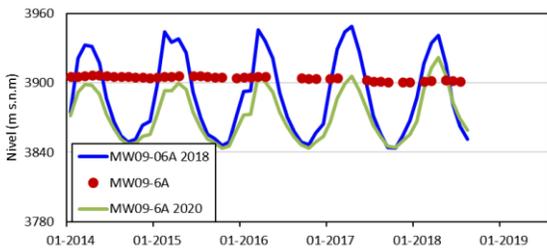
**Calibración Piezómetro MW09-3B**



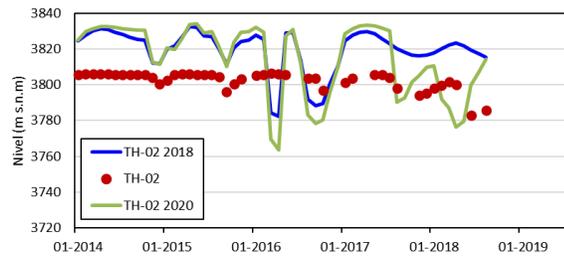
**Calibración Piezómetro MW09-4A**



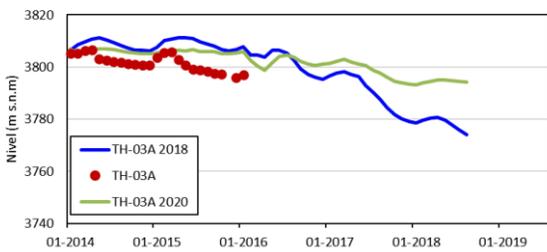
**Calibración Piezómetro MW09-6A**



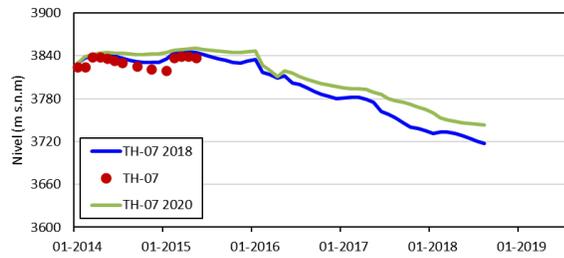
**Calibración Piezómetro TH-02**



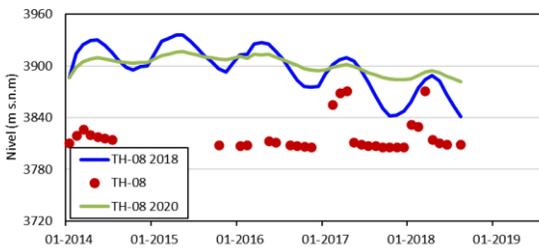
**Calibración Piezómetro TH-03A**



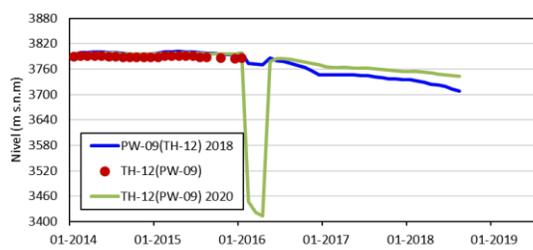
**Calibración Piezómetro TH-07**

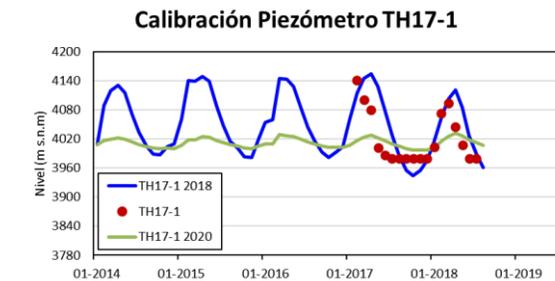
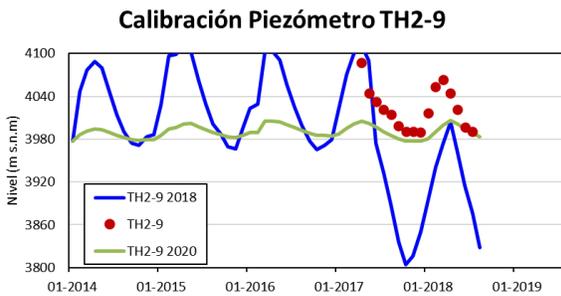
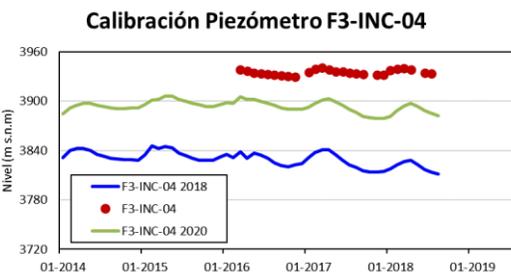
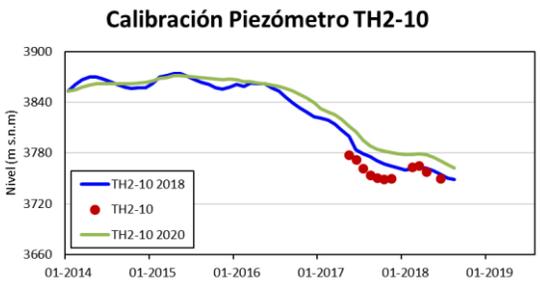
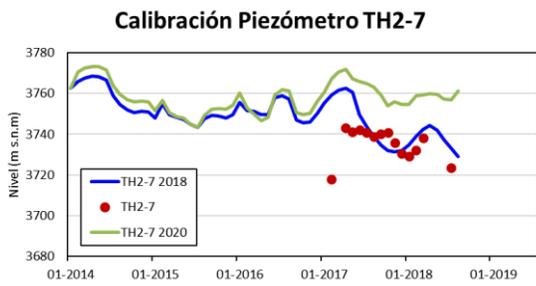
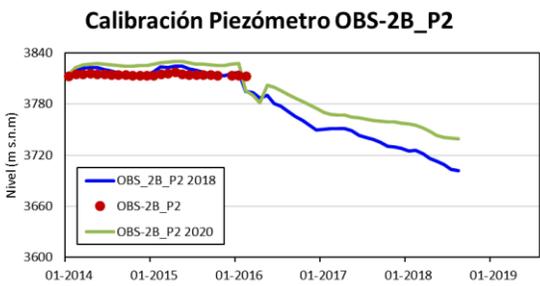
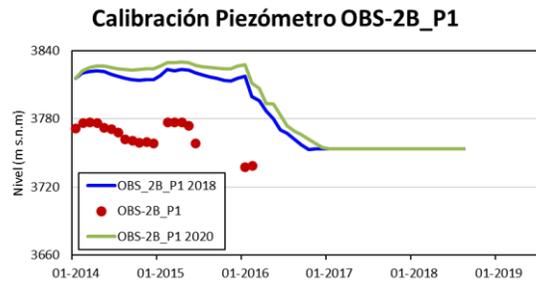
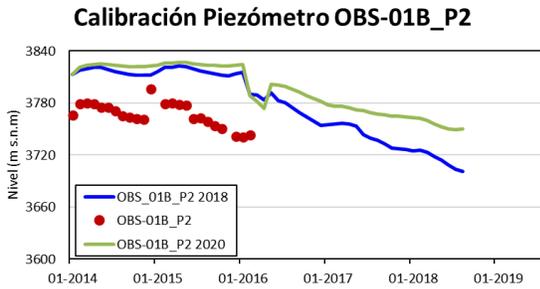
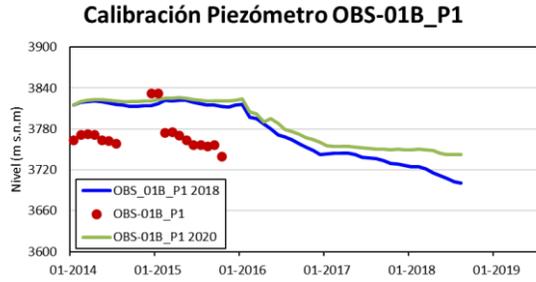
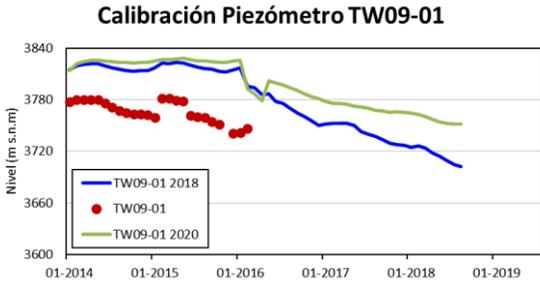


**Calibración Piezómetro TH-08**

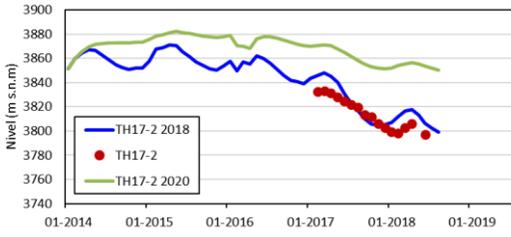


**Calibración Piezómetro TH-12 (PW-09)**

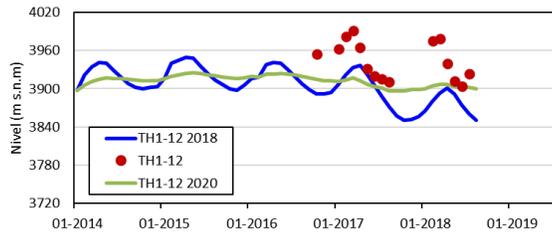




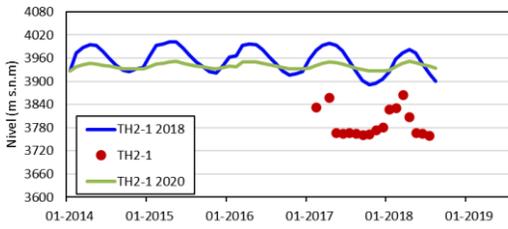
Calibración Piezómetro TH17-2



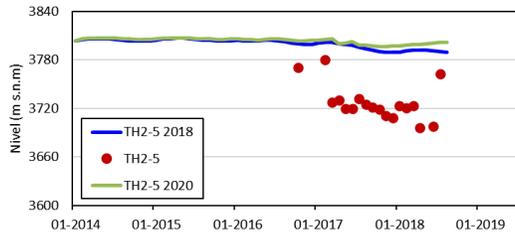
Calibración Piezómetro TH1-12



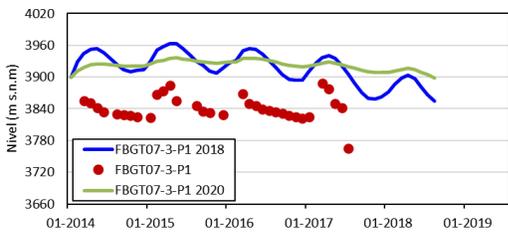
Calibración Piezómetro TH2-1



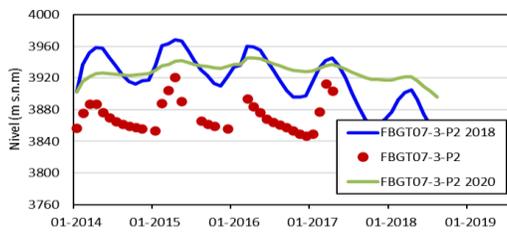
Calibración Piezómetro TH2-5



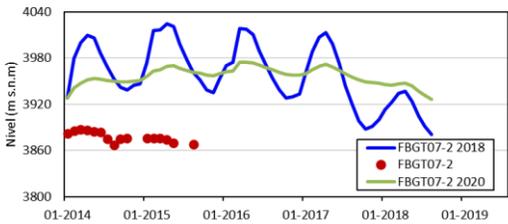
Calibración Piezómetro FBGT07-3-P1



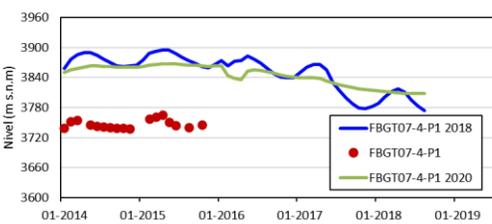
Calibración Piezómetro FBGT07-3-P2



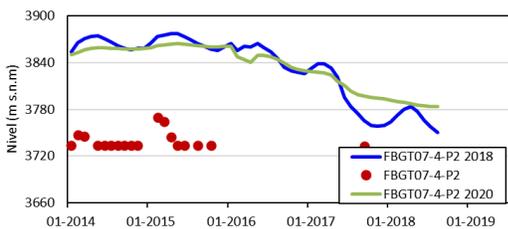
Calibración Piezómetro FBGT07-2



Calibración Piezómetro FBGT07-4-P1



Calibración Piezómetro FBGT07-4-P2



Calibración Piezómetro TH-01\_P3

