



Santiago, 15 de Septiembre de 2016
VPAC-2016-048

Superintendencia de Medio Ambiente

Dominique Hervé Espejo
Fiscal
Teatinos N° 280, piso 8
Santiago
PRESENTE

**Ref.: Resolución Exenta N°1/ROL D-009-2016 de fecha 07 de Marzo de 2016.
Resolución Exenta N° 616, de fecha 08 de Julio de 2016.
Resolución Exenta N° 722, de fecha 05 de Agosto de 2016.**

De mi consideración,

En relación al ordenado en las Resoluciones exentas de la referencia, a continuación entregamos las respuestas correspondientes a los siguientes requerimientos.

- 1. Resolución Exenta N°1/ROL D-009-2016. En relación a lo ordenado en el Resuelvo Tercero, letra a): *La corrección de la actualización del modelo hidrogeológico conforme fue evaluado, cumpliendo con los objetivos para los cuales dicha exigencia fue establecida. En particular, que considere en la modelación la evolución real del acuífero registrada en el plan de Monitoreo hidrogeológico para la totalidad de los pozos incorporados en dicho plan, y con una periodicidad anual conforme lo dispone el considerando 12.6 de la RCA 137/2011. Para realizar dicha corrección se deberá presentar a esta Superintendencia, con copia a SERNAGEOMIN y DGA Región de Antofagasta, un cronograma de trabajo que considera las acciones requerida para abordar las correcciones indicadas. Dicho Plan de trabajo deberá ser presentado en un plazo de 20 días hábiles desde la notificación de esta Resolución***

En atención a lo solicitado por la autoridad, y tal como fuese comprometido por Sierra Gorda SCM, según consta en su carta VPAC-2016-014 del 13 de abril de 2016, se acompaña en este acto la actualización del modelo hidrogeológico conceptual y numérico del Proyecto. Este documento, preparado por ARCDADIS Chile y codificado 4694-000-GH-INF-002, se ha elaborado en los términos solicitados. El reporte, en su versión final, se entrega en formato físico y digital, incluyendo los datos de entrada del modelo en su formato nativo en un DVD.

2. Resolución Exenta N°616. En relación a lo ordenado en el Resuelvo Segundo, numeral 2.2 *“Realizar nuevo muestreo de isotopos estables del agua, con la misma metodología y parámetros del análisis mencionado en el informe de monitoreo isotópico marzo 2016, código Arcadis N° 4677-000-GH-INF-00_B, que fue remitido por el titular con fecha 05 de Mayo de 2016, en carta VPAC-2016-017. Dicho monitoreo deberá tomar muestras a lo menos en los pozos contemplados en el Programa de Monitoreo Hidrogeológico establecido en el Considerando 8.3.2 de la Resolución de Calificación Ambiental N°137/2011 (Inclusive CB-12) y en los pozos y sondajes ubicados en el sector del Depósito de Relaves, identificados con la nomenclatura CN-10, CON-15, CON-16, CON-21, CON-23. KP-DH10-40 en el depósito de relaves y en la piscina de agua de mar. Para el caso del CB-7, CB-8 y CB-9 las muestras deberán ser tomadas en 2 profundidades. Además, el informe deberá precisar: Fecha de toma de muestra; Georreferenciación de puntos de toma de muestra; Fecha de recepción de muestras por el laboratorio; Fecha de análisis de muestras por el laboratorio; y, Fecha de emisión de informe de resultado de laboratorio, según corresponda. El muestro debe realizarlo con un plazo de 15 días corridos, contados desde la notificación de la presente resolución, y dentro de igual plazo se deberá informar la fecha estimada para la presentación de dichos resultados.”*

Conforme a lo solicitado y en cumplimiento a lo informado por Sierra Gorda SCM, a través de carta VPAC-2016-038 del 25 de Julio de 2016, se anexa a esta carta el informe de la Campaña de Monitoreo de Isótopos de Julio 2016, preparado por ARCADIS y codificado 4677-000-GH-INF-002, en su versión final. Para la elaboración de este estudio, se consideraron las mismas metodologías y parámetros del análisis desarrollado por ARCADIS Chile para Sierra Gorda SCM en los trabajos previamente presentados a la autoridad. El reporte, se entrega en formato físico y digital en CD-ROM.

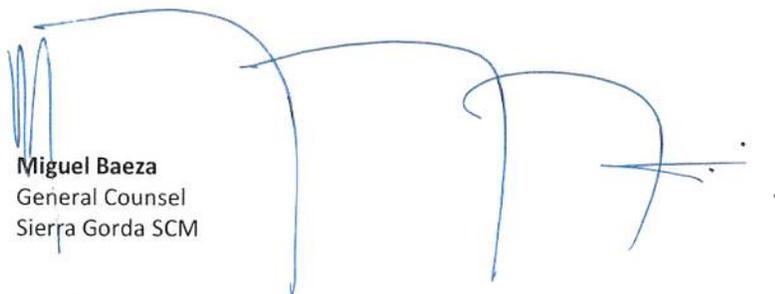
3. Resolución Exenta N°722. En relación a lo ordenado en el Resuelvo Segundo, numeral 2.1: *Ordenar realizar mediciones de calidad química y niveles en los pozos contemplados en el Programa de Monitoreo Hidrogeológico establecido en el Considerando 8.3.2 de la Resolución de Calificación Ambiental N°137/2011 (Inclusive CB-12) y en los pozos y sondajes ubicados en el sector del Depósito de Relaves, identificados con la nomenclatura CN-10, CON-15, CON-16, CON-21, CON-23. KP-DH10-40 con frecuencia mensual. Adicionalmente, realizar mediciones de calidad química del agua presente en la cubeta del Depósito de Relaves y en la Piscina de agua de mar (Piscina de proceso) con frecuencia mensual. Las mediciones de calidad química deberán considerar parámetros equivalentes a los medidos en el Programa de Monitoreo Hidrogeológico. Los informes que den cuenta de las mediciones y su análisis deberán ser remitidos en formato físico y digital, junto con una sistematización de los resultados en una planilla Excel, con una frecuencia mensual. Se hace presente que el reporte correspondiente a las mediciones realizadas en el mes de agosto deben ser entregadas el día 15 del mes siguiente. En caso que dicho plazo venciere en un día inhábil, la presentación se deberá hacer el día hábil siguiente a vencido el plazo.*

Se entrega, en su versión final, reporte codificado 4468-0100-GH-INF-005, desarrollado por ARCADIS Chile para Sierra Gorda SCM, donde se presentan los resultados de las mediciones de calidad química y niveles en los pozos establecidos por la autoridad para el mes de Agosto 2016, incluyendo los análisis de agua presente en la cubeta del Depósito de Relaves y agua de la Piscina de agua de mar. Es importante indicar que, para las mediciones de calidad química, se consideraron los parámetros medidos en el Programa de Monitoreo Hidrogeológico establecido en la Resolución de Calificación Ambiental N° 137/2011.

Asimismo, como parte de la sistematización de la información, se acompaña la base de datos en formato Excel, que consolida los resultados a la fecha registrados. En relación a este archivo, se ha mejorado el formato de agrupación de datos para facilitar su uso y análisis. Se adjuntan archivos en CD-ROM.

4. **Copia** de la información aquí presentada se entrega en formato físico y digital en 01 DVD y 01 CR_ROM que acompañan esta carta. El DVD contiene la información relativa al Punto 1 y el CD-ROM contiene los antecedentes de los Puntos 2 y 3.

Sin otro particular, y esperando una buena acogida de los antecedentes, saluda atentamente a Usted,



Miguel Baeza
General Counsel
Sierra Gorda SCM

C.c.:

- Gerencia Asuntos Corporativos y Sostenibilidad
- Gerencia Medio Ambiente – SG SCM

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

CÓDIGO Arcadis: N° 4694-0000-GH-INF-002_0

Modelo Conceptual y Modelos Numéricos Sierra Gorda

SEPTIEMBRE 2016

REV.		Ejecutor	Revisor	Aprobador	DESCRIPCIÓN
A	Nombre Firma	P. Ortega/ J. Uribe / C. Urrutia /J. Cortinez	L. Achurra / R. Herrera /L. Ramírez	A. Palacios	Coordinación Interna
	Fecha	01.08.2016	03.08.2016	03.08.2016	
B	Nombre Firma	P. Ortega/ J. Uribe / C. Urrutia /J. Cortinez	L. Achurra / R. Herrera /L. Ramírez	A. Palacios	Revisión y Aprobación Cliente
	Fecha	01.08.2016	03.08.2016	03.08.2016	
0	Nombre Firma	P. Ortega/ C. Urrutia /J. Cortinez	L. Achurra / F. Valdivieso / A. Palacios	C. Ortiz	Aprobado Cliente
	Fecha	01.09.2016	03.09.2016	07.09.2016	

CONTACTOS

ALEJANDRA PALACIOS
Jefa de Proyecto

T. +56223816229
e alejandra.palacios@arcadis.com

Arcadis.
Av. Antonio Varas 621
Providencia, CP 7500966
Santiago | Chile

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	9
2 CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO	10
3 ANTECEDENTES	11
3.1 Estudios anteriores	11
3.2 Nuevos antecedentes	12
4 MODELO CONCEPTUAL	13
4.1 Metodología	13
4.2 Geología	13
4.2.1 Geología de superficie	13
4.2.2 Estructuras	14
4.3 Unidades Hidrogeológicas	16
4.3.1 Descripción de las unidades hidrogeológicas	16
4.4 Niveles de Agua Subterránea	21
4.4.1 Evaluación de Niveles Estáticos	21
4.4.2 Mapa de Gradientes Hidráulicos (marzo, 2016)	23
4.4.3 Evolución de niveles	28
4.5 Hidroquímica	30
4.5.1 Parámetros físico-químicos	31
4.5.2 Hidroquímica de iones mayores	35
4.5.3 Isótopos estables de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$	38
4.6 Balance Hídrico	41
4.6.1 Entradas	41
4.6.2 Descargas	41
4.7 Síntesis del Modelo Conceptual	45
5 MODELO DE INFILTRACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE RELAVES	48
5.1 Enfoque y código de modelación	48
5.2 Construcción del modelo numérico	48
5.2.1 Crecimiento del depósito de relaves	48
5.2.2 Discretización temporal	55
5.2.3 Geometría y discretización espacial	55
5.2.4 Propiedades hidráulicas de los materiales	58
5.2.5 Condiciones de borde	61
5.2.6 Condiciones iniciales	66
5.2.7 Secciones de control	66
5.2.8 Anchos representativos	67
5.2.9 Resumen de supuestos	69
5.3 Resultados	70
5.3.1 Caudal de infiltración caso base	70
5.3.2 Simulaciones adicionales	77
5.4 Conclusiones modelo de infiltración	80
6 MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO 3D	83
6.1 Construcción del modelo 2016	85
6.1.1 Código de modelación	85
6.1.2 Dominio de modelación	85
6.1.3 Discretización espacial y temporal	86
6.1.4 Propiedades hidráulicas	88
6.1.5 Condiciones de borde y extracciones de aguas subterráneas	90

6.1.6 Condiciones iniciales.....	95
6.2 Calibración del modelo de flujo	95
6.2.1 Estrategia de calibración.....	95
6.2.2 Pozos de observación con información disponibles para el análisis	95
6.2.3 Patrón de calibración	98
6.2.4 Balance de masas.....	99
6.2.5 Análisis de residuales	102
6.2.6 Hidrogramas.....	104
6.2.7 Equipotenciales	115
7 CONCLUSIONES	116
8 REFERENCIAS	118
9 ANEXO A: HIDROLOGÍA.....	119
9.1 Precipitación	120
9.2 Evaporación	124
9.3 Disponibilidad hídrica	126
10 ANEXO B: HIDROGRAMAS DE LOS POZOS DE OBSERVACIÓN	128

TABLAS

Tabla 4-1: Rangos de conductividad hidráulica de unidades hidrogeológicas	19
Tabla 4-2: Ensayos hidráulicos y estimación de conductividad hidráulica	19
Tabla 4-3: Pozos utilizados para el análisis piezométrico.	25
Tabla 4-4: Sondajes que se ajustan a la piezometría y no son parte del análisis principal.	26
Tabla 4-5: Detalle de muestras analizadas.....	30
Tabla 4-6: Parámetros físico-químicos y razones isotópicas para muestras del 2016.....	40
Tabla 4-7: Catastro de Derechos de Agua en el área de estudio.....	43
Tabla 5-1: Crecimiento del depósito de relaves.....	49
Tabla 5-2: Periodos de simulación modelo 2D	55
Tabla 5-3: Características generales de ubicación y dimensiones de los perfiles	56
Tabla 5-4: Materiales considerados en los perfiles 2D	58
Tabla 5-5: Resumen parámetros curvas de succión.....	60
Tabla 5-6: Conductividad hidráulica saturada.....	61
Tabla 5-7: Condiciones de borde para acuífero.....	62
Tabla 5-8: Niveles Piezométricos Muro M4, piezómetro A1J5 y Pozo Casa Grande 4.....	64
Tabla 5-9: Anchos representativos (m)	69
Tabla 5-10: Infiltración en la base del depósito de relaves y recarga al acuífero	71
Tabla 5-11: Balance de Aguas Mensual para el depósito de relaves.....	73
Tabla 5-12: Comparación de tasa de infiltración estimada a partir del modelo 2D y del balance hídrico del depósito de relave	74
Tabla 6-1: Características generales del modelo de flujo existente (Arcadis, 2015).....	83
Tabla 6-2: Estadígrafos de calibración modelos actualización 2014 y 2015.	85

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Tabla 6-3: Fechas de información topográfica provista por Sierra Gorda y asignación de períodos de stress del modelo numérico	93
Tabla 6-4: Pozos con información de nivel no utilizados en la calibración	96
Tabla 6-5: Pozos de observación utilizados en los modelos numéricos.....	96
Tabla 6-6: Estadígrafos de calibración modelo 2016.....	102
Tabla 9-1: Cuencas aportantes al dominio hidrogeológico	119
Tabla 9-2: Estaciones meteorológicas utilizadas para la estimación de precipitaciones	121
Tabla 9-3: Precipitaciones en la cuenca Sierra Gorda para distintos escenarios de estimación.	123
Tabla 9-4: Estimación de precipitaciones en las cuencas aportantes ubicadas en el dominio hidrogeológico o aguas abajo.	124
Tabla 9-5: Evaporación de tanque media mensual (mm/mes)	124
Tabla 9-6: Evaporación potencial diaria (mm/d) con distintos factores de tanque.	125
Tabla 9-7: Disponibilidad hídrica en la cuenca Sierra Gorda para distintos escenarios de estimación.	126
Tabla 9-8: Disponibilidad hídrica en cuencas aportantes ubicadas en el dominio hidrogeológico o aguas abajo.	127

FIGURAS

Figura 4-1: Mapa de geología superficial y estructuras en el área de estudio.	15
Figura 4-2: Perfil E-W general del área de estudio	18
Figura 4-3. Nivel piezométrico en función de la coordenada Este del pozo. Se diferencian en profundidad del pozo y unidad hidrogeológica.....	23
Figura 4-4. Piezometría en la unidad hidrogeológica 1 (aluvial) en el sector de Pampa Lina con antecedentes de Marzo 2016.....	27
Figura 4-5: Piezometría en unidad hidrogeológica de rocas fracturadas con datos marzo 2016.	28
Figura 4-6: Evolución de niveles de Pampa Lina.....	29
Figura 4-7: Evolución de niveles zona Mina	30
Figura 4-8. Conductividad eléctrica de muestras con respecto a la coordenada Este.....	32
Figura 4-9. Vista en 3D mostrando ubicación de pozos (en negro) con perfiles de CE-pH-Temp. La línea roja muestra la ubicación de las secciones mostradas en la Figura 4-10 y Figura 4-11.	33
Figura 4-10. Perfil E-W con resultado de interpolación de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).....	34
Figura 4-11. Perfil E-W con resultado de interpolación de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).....	34
Figura 4-12: Diagrama de Piper.....	36
Figura 4-13: Mapa de diagramas de Stiff.....	37
Figura 4-14: Diagrama de Stiff. Pozos de monitoreo Deposito de relaves.....	38
Figura 4-15. Relación isotópica $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ para muestras de pozos y agua de procesos.....	39
Figura 4-16: Ubicación de pozos con derechos en el área de estudio	42
Figura 4-17: Caudales de extracción mensual en rajo Catabela	44
Figura 4-18: Modelo conceptual. Esquema en sección E-W	47

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Figura 5-1: Crecimiento proyectado para el depósito de relaves y perfiles representativos	50
Figura 5-2: Crecimiento proyectado para el depósito de relaves y perfiles representativos	51
Figura 5-3: Crecimiento proyectado para el depósito de relaves y perfiles representativos	52
Figura 5-4: Crecimiento proyectado para el depósito de relaves y perfiles representativos	53
Figura 5-5: Crecimiento proyectado para el depósito de relaves y perfiles representativos	54
Figura 5-6: Geometría Perfil 1 – Crecimiento hasta marzo 2016 (Exageración vertical 5X)	57
Figura 5-7: Geometría Perfil 2 – Crecimiento hasta marzo 2016 (Exageración vertical 5X)	57
Figura 5-8: Geometría Perfil 3 – Crecimiento hasta marzo 2016 (Exageración vertical 6X)	57
Figura 5-9: Discretización espacial Perfil 6 (Detalle zona muro)	58
Figura 5-10: Curvas de succión v/s contenido de humedad	60
Figura 5-11: Curvas de succión v/s conductividad hidráulica	61
Figura 5-12: Pozos de observación sector depósito de relaves	62
Figura 5-13: Ubicación Piezómetros y Pozo - Planta.....	63
Figura 5-14: Ubicación Piezómetros - Perfil.....	63
Figura 5-15: Niveles Piezométricos Muro M4, piezómetro A1J5 y Pozo Casa Grande 4	64
Figura 5-16: Cotas de laguna (msnm) para crecimiento del depósito	65
Figura 5-17: Condiciones de borde en perfil 3 – Crecimiento marzo 2016	65
Figura 5-18: Esquemas secciones de flujo (Caso a y b)	67
Figura 5-19: Áreas representativos de secciones de flujo Perfil 2 – Marzo 2016.....	68
Figura 5-20: Infiltración en la base del depósito de relaves y recarga al acuífero.....	71
Figura 5-21: Infiltración calculada (mensual y media) y modelada (SEEP/W)	75
Figura 5-22: Detalle de zonas con afloramientos.....	76
Figura 5-23: Perfiles resistividad Muro 4.....	77
Figura 5-24: Esquema, muro M4.....	78
Figura 5-25: Nivel Piezométrico, simulado y real.....	78
Figura 5-26: Nivel piezométrico, simulado y real	79
Figura 5-27: Nivel piezométrico, simulado y real	80
Figura 6-1: Comparación entre el dominio del modelo actualizado el 2015 (rojo) y el actual (azul)	86
Figura 6-2: Grilla del modelo numérico 2016	87
Figura 6-3: Vista 3D de la geometría del modelo.....	88
Figura 6-4: Propiedades hidráulicas Capa 1	89
Figura 6-5: Propiedades hidráulicas Capa 2	89
Figura 6-6: Propiedades hidráulicas Capa 3.....	90
Figura 6-7: Celdas tipo CHD empleadas para ingresar la recarga y descarga subterránea	91
Figura 6-8: Celdas de dren empleadas en el modelo 2016	92
Figura 6-9: Pozos de extracción considerados en el modelo numérico 2016	94
Figura 6-10: Caudal de extracción impuesto a cada pozo del modelo 2016	94

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Figura 6-11: Condición inicial de la simulación transiente	95
Figura 6-12: Pozos de observación considerados en el modelo numérico	98
Figura 6-13: Error de balance de masa	99
Figura 6-14: Componentes balance de masa para toda la simulación.....	100
Figura 6-15: Flujos subterráneos promedio para toda la simulación	101
Figura 6-16: Comparación niveles simulados vs observados (todos los tiempos y pozos).....	103
Figura 6-17: Hidrograma pozo SPM-2	104
Figura 6-18: Hidrograma pozo SPM-15	105
Figura 6-19: Hidrograma pozo Casing Acero.....	105
Figura 6-20: Hidrograma pozo QSCSG6-237	106
Figura 6-21: Hidrograma pozo Loreto 3	106
Figura 6-22: Hidrograma pozo CB-4	107
Figura 6-23: Hidrograma pozo QSG07-389	107
Figura 6-24: Hidrograma pozo QSG08-502	108
Figura 6-25: Hidrograma pozo QSG08-431	108
Figura 6-26: Hidrograma pozo QSG08-436	109
Figura 6-27: Hidrograma pozo QSG08-455	109
Figura 6-28: Hidrograma pozo QSG09-597	110
Figura 6-29: Hidrograma pozo CB-5	110
Figura 6-30: Hidrograma pozo QSG09-582	111
Figura 6-31: Hidrograma pozo QSG09-585	111
Figura 6-32: Hidrograma pozo KP-DH10-33.....	112
Figura 6-33: Hidrograma pozo QSG10-696	112
Figura 6-34: Hidrograma pozo QSG10-627	113
Figura 6-35: Hidrograma pozo CON-21	113
Figura 6-36: Hidrograma pozo CB-9	114
Figura 6-37: Curvas equipotenciales modeladas – marzo 2016 – capa 2.....	115
Figura 9-1: Ubicación de cuencas de estudio	120
Figura 9-2: Ubicación de estaciones pluviométricas.....	122
Figura 9-3: Gradiente de precipitación con respecto a la elevación.	123
Figura 9-4: Evaporación de tanque media mensual	125
Figura 10-1: Pozo de observación QSG09-611	128
Figura 10-2: Pozo de observación SPM-14	128
Figura 10-3: Pozo de observación SPM-17	129
Figura 10-4: Pozo de observación SPM-18	129
Figura 10-5: Pozo de observación CB-2.....	130
Figura 10-6: Pozo de observación CB-3.....	130

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Figura 10-7: Pozo de observación Loreto 4	131
Figura 10-8: Pozo de observación QSG09-587	131
Figura 10-9: Pozo de observación QSG09-592	132
Figura 10-10: Pozo de observación QSG09-602	132
Figura 10-11: Pozo de observación QSG09-605	133
Figura 10-12: Pozo de observación QSG09-608	133
Figura 10-13: Pozo de observación QSG08-402	134
Figura 10-14: Pozo de observación QSG08-405	134
Figura 10-15: Pozo de observación QSG08-410	135
Figura 10-16: Pozo de observación QSG08-418	135
Figura 10-17: Pozo de observación QSG08-421	136
Figura 10-18: Pozo de observación QSG08-422	136
Figura 10-19: Pozo de observación QSG08-423	137
Figura 10-20: Pozo de observación QSG08-426	137
Figura 10-21: Pozo de observación QSG08-493	138
Figura 10-22: Pozo de observación QSG08-498	138
Figura 10-23: Pozo de observación QSG09-593	139
Figura 10-24: Pozo de observación QSG07-352	139
Figura 10-25: Pozo de observación QSG08-439	140
Figura 10-26: Pozo de observación QSG09-601	140
Figura 10-27: Pozo de observación QSG10-675	141
Figura 10-28: Pozo de observación QSG10-686	141
Figura 10-29: Pozo de observación QSG10-774	142
Figura 10-30: Pozo de observación RDH-03	142
Figura 10-31: Pozo de observación CB-6	143
Figura 10-32: Pozo de observación QSG07-386	143
Figura 10-33: Pozo de observación QSG12-857	144
Figura 10-34: Pozo de observación RDH-05	144
Figura 10-35: Pozo de observación CB-10	145
Figura 10-36: Pozo de observación QSG09-584	145
Figura 10-37: Pozo de observación QSG09-580	146
Figura 10-38: Pozo de observación QSG08-530	146
Figura 10-39: Pozo de observación QSG09-586	147
Figura 10-40: Pozo de observación CB-10	147
Figura 10-41: Pozo de observación QSG12-857	148
Figura 10-42: Pozo de observación RDH-05	148
Figura 10-43: Pozo de observación CON-10	149

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Figura 10-44: Pozo de observación CON-15 149
Figura 10-45: Pozo de observación CON-16 150

1 INTRODUCCIÓN

El proyecto minero Sierra Gorda perteneciente a la empresa Sierra Gorda Sociedad Contractual Minera (SGSCM) se ubica en la comuna de Sierra Gorda, II Región de Antofagasta, y fue aprobado a través de la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N° 137/2011.

La RCA contempla un Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) de la componente hidrogeológica, a través del: “Monitoreo de las características físicas y químicas del sistema de aguas subterráneas en el sector de emplazamiento de la mina y alrededores”. Adicionalmente, la RCA establece que “...los antecedentes generados por el monitoreo de niveles permitirán la progresiva mejora de la calibración de las simulaciones del modelo hidrogeológico numérico a través de revisiones y actualizaciones anuales”.

La Superintendencia de Medio Ambiente (SMA), con fecha 7 de marzo de 2016, emitió la resolución Res N°1/ROL D-009-2016 a Sierra Gorda, donde se formulan cargos contra la empresa por desviaciones de su Resolución de Calificación Ambiental, incluyendo aspectos relacionados con las infiltraciones que han ocurrido desde el depósito de relaves.

Asimismo, la citada Res Ex N°1 Resuelvo III de la SMA solicita:

- *Actualizar el modelo numérico conforme fue evaluado, cumpliendo con los objetivos para los cuales dicha exigencia fue establecida, es decir representar la evolución real del acuífero registrada en el Plan de monitoreo con una periodicidad anual.*

A través del presente informe, Sierra Gorda SCM da cumplimiento a la actualización del modelo numérico, para lo cual se actualizó el modelo conceptual, se elaboró un modelo numérico de la zona no saturada y se procedió a actualizar el modelo numérico del acuífero existente.

Respecto al modelo hidrogeológico existente, éste fue originalmente elaborado por Schlumberger Water Services en el año 2010, como parte del Estudio de Impacto Ambiental del proyecto, el cual contemplaba un modelo conceptual y un modelo numérico del acuífero. Una vez aprobado el proyecto, se entregó la primera actualización del modelo hidrogeológico realizado por VAI Groundwater Solutions en el año 2014, donde además se realizó una actualización al modelo conceptual en base a la información de monitoreo y antecedentes de nuevos sondajes. En el año 2015, se entregó la segunda actualización al modelo numérico realizado por Arcadis. Este último informe incluyó una extensión de las series de tiempo de niveles en el modelo, sin una actualización del modelo hidrogeológico conceptual.

Para la presente actualización del modelo hidrogeológico (año 2016), los antecedentes utilizados corresponden a información histórica y nueva. Los nuevos antecedentes corresponden a: 1) una base de datos más robusta de datos de nivel e hidroquímica tomados en el marco del PSA (ver su análisis en informes entregados a la SMA de manera mensual), 2) Trabajos realizados en terreno en el marco del estudio realizado por Arcadis, llamado: “Optimización de la Red de Monitoreo” donde se recopilaron datos de isotopía, perfil de conductividad, temperatura, pH, filmaciones de pozos, purgas de bajo caudal, hidrometeorología, etc. Respecto a antecedentes históricos se revisaron y analizaron informes existentes, litología de sondajes, ensayos hidráulicos, entre otros.

Respecto a la actualización del modelo conceptual 2016, se debe destacar la incorporación de la conceptualización de la zona no saturada del sistema, debido a que es el lugar donde fluyen las infiltraciones que actualmente ocurren desde el depósito de relaves del proyecto Sierra Gorda. La zona no saturada debe ser modelada conceptual y numéricamente para cuantificar el caudal de infiltración e identificar su dirección de flujo. En términos generales (zonas saturada y no saturada) en el modelo conceptual, se redefinieron las unidades hidrogeológicas, se elaboraron nuevas curvas equipotenciales, se analizó la nueva información química en el contexto hidrogeológico del sistema y se actualizó el balance hídrico.

Respecto de la estrategia de modelación, se consideró modelar la zona no saturada en el sector del tranque (incluyendo el depósito de relaves) y la zona saturada o acuífero. El modelo numérico del sector no saturado fue construido con el objetivo de estimar el caudal de infiltraciones desde el depósito de relaves y analizar el flujo dentro de la capa no saturada y la eventual recarga al acuífero, valor que será incorporado como condición de borde al modelo saturado. Este modelo fue construido en la plataforma SEEP/W 2012, para su construcción se consideraron 3 perfiles cuyos trazados abarcaron el crecimiento del relave y de la laguna de aguas claras desde agosto de 2014 hasta marzo 2016.

El modelo numérico saturado corresponde a una actualización del modelo presentado en noviembre del 2015 a la autoridad ambiental, los principales cambios corresponden a la inclusión de nuevos pozos de observación, en sectores donde existía poca densidad de información, la extensión de las series de datos como bombeo y nivel, y la inclusión de la tercera capa al modelo en el sector del rajo y la recalibración de éste, a través del ajuste de los parámetros elásticos del acuífero.

El presente informe está estructurado de la siguiente manera:

- Caracterización general del área de estudio
- Antecedentes
- Modelo Conceptual
- Modelo de infiltración para el depósito de relaves (modelo 2D de la zona no saturada)
- Modelo hidrogeológico numérico (modelo 3D sector acuífero)
- Conclusiones

2 CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

El sector donde se emplaza el proyecto Sierra Gorda se ubica en una de las zonas más áridas del planeta, el desierto de Atacama. En el entorno cercano, las precipitaciones tienen una media cercana a 1 mm/a, lo que, sumado a la alta tasa de evaporación, implica una casi nula recarga local por infiltración de lluvias. Solo grandes eventos de precipitación, con periodos de retorno de decenas a cientos de años, generan recarga efectiva al sistema de aguas subterráneas. Por otra parte, la geología en el sector mismo de la mina e instalaciones (al oeste de Pampa Lina) se compone principalmente de rocas volcánicas e intrusivas del Cretácico al Paleoceno. Si bien estas rocas se encuentran localmente meteorizadas y/o fracturadas, en general tienen una muy baja permeabilidad, lo que implica que el agua subterránea se almacena esencialmente en fracturas, y depende de la conectividad de estas fracturas la existencia o ausencia de flujo subterráneo. La alta salinidad del agua subterránea en el sector (mayor a la del océano) y su química con alto contenido de iones, sugieren un alto tiempo de residencia (“edad”), lo que sumado a la nula recarga local implican que no existe una renovación del agua subterránea en el corto tiempo (a la escala de años de los proyectos mineros).

Del estudio de los antecedentes hidrogeológicos del sector se desprende un particular funcionamiento del sistema, con un flujo subterráneo muy reducido, en un medio de baja permeabilidad y distinto a la lógica de “acuífero granular” o medio poroso a la que se está acostumbrado. Esto además condiciona la forma de obtención, calidad y representatividad de la información registrada desde distintos pozos y sondajes. Lo anterior queda de manifiesto en la dificultad del sistema hídrico para renovar el agua de los pozos, que permita así la extracción de muestras confiables, el largo período de tiempo que se tarda en estabilizarse el nivel freático (del orden de años) luego de una perturbación (ej. desarrollo-purga). Asociado a lo último, además existen variaciones químicas dentro de un mismo pozo debido al estancamiento del agua dentro de las tuberías y/o sondajes abiertos. De todo lo anterior se concluye que el sistema, en el dominio occidental (excluyendo la zona de Pampa Lina) se comporta más bien como un “acuicludo”, donde el agua no se transmite o se transmite muy lentamente, y donde el volumen almacenado posiblemente tiene un período de residencia de miles de años.

Una vez internalizado y consensuado lo anterior, cualquier tipo de trabajo de caracterización hidrogeológica, monitoreo de niveles, obtención de muestras de agua, análisis hidrogeoquímicos y conceptualización hidrogeológica general deben obedecer a la condición de un sistema de muy baja permeabilidad, en un medio donde el agua se almacena en fracturas y/o discontinuidades. Evidencias directas de lo anterior corresponden a filmaciones dentro de sondajes abiertos (sin revestimiento) y que muestran macizos rocosos homogéneos, donde evidentemente no se transmite ni almacena agua, y que presentan discontinuidades discretas que almacenan y permiten localmente un flujo subterráneo.

Si bien es posible obtener información de niveles y muestras para análisis químicos dentro de los pozos, lo importante es comprender qué reflejan realmente estos antecedentes; ¿un nivel piezométrico de un sistema regional albergado en roca semi-estancado? o simplemente ¿el potencial hidráulico asociado a una fractura en particular? A partir de lo anterior surgen otras interrogantes como: ¿Es comparable el nivel entre distintos pozos para la elaboración de una piezometría y determinación de las principales direcciones de flujo? ¿Es comparable la química obtenida desde un pozo que atraviesa cierto set de estructuras, con la de otro que atraviesa discontinuidades de otra naturaleza y orientación? En el caso del área del proyecto Sierra Gorda y su entorno, el análisis detallado muestra inconsistencias entre el nivel de pozos o sondajes abiertos cercanos, lo que además indica que el nivel está condicionado a la profundidad del pozo, cantidad, naturaleza y disposición de fracturas interceptadas. Por lo tanto, a partir de la elaboración y presentación de curvas equipotenciales es posible establecer la existencia de gradientes hidráulicos, sin embargo, la poca conectividad entre estructuras, la baja permeabilidad y nula recarga implica que el agua subterránea, de forma generalizada, se mueve muy poco o incluso no se mueve.

Todo lo anterior entrega un contexto general relevante para la comprensión de la información técnica acá presentada, la forma en que deben ser interpretados los antecedentes obtenidos y las consideraciones que se deben tener a la hora de realizar trabajos de caracterización y monitoreo. Esto tiene además implicancias directas en la forma en que se construyen los modelos numéricos, que intentan simular un sistema de agua que se mueve a través de estructuras desconocidas, aproximándolo a un medio poroso.

3 ANTECEDENTES

3.1 Estudios anteriores

- SWS, 2010. Modelo numérico Mina Catabela

Modelación numérica de los flujos de agua subterránea de la mina Catabela en base al modelo conceptual desarrollado. Con el plan minero proyectado se evaluaron potenciales impactos de las operaciones mineras, cuyas actividades incluyen la extracción de mineral mediante la excavación de un rajo abierto.

- SWS, 2011. Caracterización Hidrogeológica Proyecto Sierra Gorda, Adenda 3 EIA.

Estudio preparado en soporte al EIA, con el fin de actualizar la caracterización hidrogeológica incorporando nueva información de pozos, niveles, litología y ensayos de Packer. A partir de estos nuevos datos se actualizó el análisis de niveles freáticos monitoreados y de parámetros hidráulicos del sistema de agua subterránea.

- SWS, 2013. Instalación de Pozos de Monitoreo Proyecto Sierra Gorda.

Estudio donde se reportan los antecedentes obtenidos de la construcción de los 12 pozos de monitoreo comprometidos en el EIA del proyecto Sierra Gorda.

- VAIGS, 2014. Actualización Modelo Hidrogeológico, Proyecto Sierra Gorda.

Actualización del modelo hidrogeológico conceptual y numérico del Proyecto Sierra Gorda, basada en los datos recopilados durante el seguimiento de niveles y calidad de agua hasta agosto de 2013, análisis de sondajes geotécnicos ubicados en el sector del rajo Catabela, y la instalación de pozos de observación en el entorno de la faena Sierra Gorda. Adicionalmente se actualiza el estudio de hidrología y el balance de agua, considerando informaciones meteorológicas recopilados desde 2010.

- VAIGS, 2015. Modelo Hidrogeológico Rajo Catabela.

Se presenta un modelo conceptual hidrogeológico para el entorno del rajo Catabela, basado en los resultados de la campaña de terreno que incorporó la perforación de nuevos sondajes, ensayos hidráulicos y registro de presiones, y la modelación numérica en 2D de 4 perfiles geotécnicos seleccionados para determinar y simular la distribución de presiones de poros al presente y futuro. De acuerdo a los resultados se elabora posteriormente un plan de despresurización y drenaje.

- Arcadis, 2015. Segunda actualización del modelo hidrogeológico numérico Sierra Gorda.

Corresponde a la actualización anual del modelo numérico de Sierra Gorda según compromiso establecido en RCA N° 137/2011. Se extienden las series temporales y se mantienen los restantes componentes del modelo hidrogeológico respecto de la anterior actualización (VAIGS, 2014), los cuales corresponden al modelo conceptual, dominio, discretización espacial y parámetros hidráulicos.

3.2 Nuevos antecedentes

Complementando los estudios desarrollados por otras compañías en la zona, Arcadis ha ejecutado el plan de seguimiento ambiental asociado a RCA 137/2011 de Sierra Gorda desde octubre de 2014 a la fecha, además de otros estudios específicos con el fin de mejorar el conocimiento hidrogeológico de la zona y dar respuesta a requerimientos de la autoridad ambiental. Dentro de éstos:

- Arcadis, 2014 a 2016. Informes trimestrales de monitoreo de agua subterránea.
 1. N°80028-1000-GH-INF 001_0 (enero 2015)
 2. N°80028-1000-GH-INF-002_0 (abril 2015)
 3. N°80028-1000-GH-INF-003_0 (julio 2015)
 4. N°4468-1000-GH-INF-004_0 (octubre 2015)
 5. N°4468-1000-GH-INF-005_0 (enero 2016)
 6. N°4468-1000-GH-INF-006_0 (abril 2016)
- Arcadis, marzo 2016. Información de Pozos de la Red de Monitoreo, N°4468-2000-GH-INF-003_0 (Preparado para SMA).
- Arcadis, febrero 2016. Respuesta a SMA Pozos Secos, N°4468-0000-GH-MMT-004_0 (Preparado para SMA).
- Arcadis, marzo 2016. Interpretación de análisis isotópicos, N°4468-0000-GH-MMT-003_0
- Arcadis, noviembre 2015. Segunda Actualización del Modelo Hidrogeológico Sierra Gorda, N°4468-3000-GH-INF-001_0.
- Arcadis, julio 2016. Revisión red de monitoreo hidrogeológica Sierra Gorda, N°4694-000-GH-INF-001_B.

4 MODELO CONCEPTUAL

4.1 Metodología

El modelo hidrogeológico conceptual presentado en este informe está basado en los antecedentes levantados desde la etapa de elaboración del EIA del proyecto Sierra Gorda (2010) hasta la actualidad, por lo que se han revisado informes levantados por distintas empresas, los cuales se resumen en el siguiente capítulo.

Se solicitó toda la información litológica de sondajes a Sierra Gorda con la cual se construyó un modelo geológico simplificado en tres dimensiones utilizando el software Leapfrog Hydro v.2.5.2. Con esta información y la revisión de antecedentes como el RQD y ensayos hidráulicos se definieron las unidades hidrogeológicas que caracterizan el funcionamiento de la zona.

De forma complementaria se revisaron todos los antecedentes de niveles disponibles, su registro histórico para la elaboración de curvas equipotenciales que pretenden describir, de modo general, el movimiento del agua subterránea y sus principales direcciones de flujo. Todo lo anterior ha sido complementado con una revisión de la información química e isotópica obtenida desde los pozos y sondajes abiertos del sector.

Así también, se realizó un análisis hidrogeoquímico utilizando la información histórica de calidad de agua que Sierra Gorda SCM ha recolectado, primero durante la elaboración de la Línea Base del proyecto, y luego durante el monitoreo asociado al plan de seguimiento ambiental. Además, en dos ocasiones (2015 y 2016) se realizaron análisis isotópicos en muestras de agua de todo el proyecto con la finalidad de determinar el origen de las aguas naturales e industriales. Toda esta información se procesó utilizando el software Aquachem v.2014.2 y se presenta en el capítulo 7.

En el capítulo 8 se presenta un balance hídrico del sistema hidrogeológico, considerando todas las entradas y salidas de agua del sistema. Para ello se realizó una revisión de la hidrometeorología de estaciones meteorológicas cercanas con el fin de obtener una estimación de la recarga de agua subterránea, además de las extracciones desde el sector de Pampa Lina, afloramientos de agua en el rajo Catabela y aguas infiltradas desde el depósito de relaves.

Dentro de un estudio de revisión de la red de monitoreo de Sierra Gorda SCM, desarrollado en paralelo a éste, se han ejecutado una serie de trabajos en distintos pozos, que incluyen la filmación interior de pozos y sondajes abiertos, perfiles de conductividad eléctrica, pH y temperatura, bombeos de bajo caudal para el estudio de la respuesta del nivel freático y obtención de muestras químicas e isotópicas a distintas profundidades. Con la finalidad de complementar algunos aspectos del modelo conceptual, se mencionan parte de los resultados obtenidos del estudio mencionado.

4.2 Geología

En la presente sección se describen las unidades geológicas que afloran en el área del modelo, como también, las estructuras relevantes. La finalidad de este capítulo consiste en presentar el marco geológico para la definición de las unidades hidrogeológicas.

4.2.1 Geología de superficie

En general, el área de estudio está compuesta por rocas volcánicas e intrusivas cubiertas por depósitos aluviales y coluviales no consolidados.

Las rocas más antiguas corresponden a andesitas y tobas pertenecientes a la Formación Quebrada Mala (Muñoz, 1989). Estas rocas afloran en diversos puntos del área de estudio (Figura 4-1) y

conforman la roca de caja que hospeda los pórfidos del proyecto Sierra Gorda. Estas rocas se asignan al periodo Cretácico Superior (Santoniano – Maastrichtiano).

Se diferencian dos eventos intrusivos de importancia. El primero, del periodo Cretácico corresponde a sienogranitos, monzogranitos, monzodioritas, dioritas, monzonitas y granitos, los cuales se encuentran aflorando, principalmente, en la porción oeste del área de estudio. El segundo evento corresponde a la intrusión de los pórfidos feldespáticos y granodioríticos, los cuales afloran en el rajo Catabela y al norte y oeste del área mina.

Los depósitos no consolidados cenozoicos se conforman principalmente por gravas, arenas y limos, de origen aluvial y coluvial cuyo espesor varía desde 6 a 26 m desde área mina hacia el oeste, y desde 50 a 160 m en Pampa Lina, donde los mayores espesores se encuentran hacia el oriente, asociados al depocentro de la cuenca (VAI, 2014).

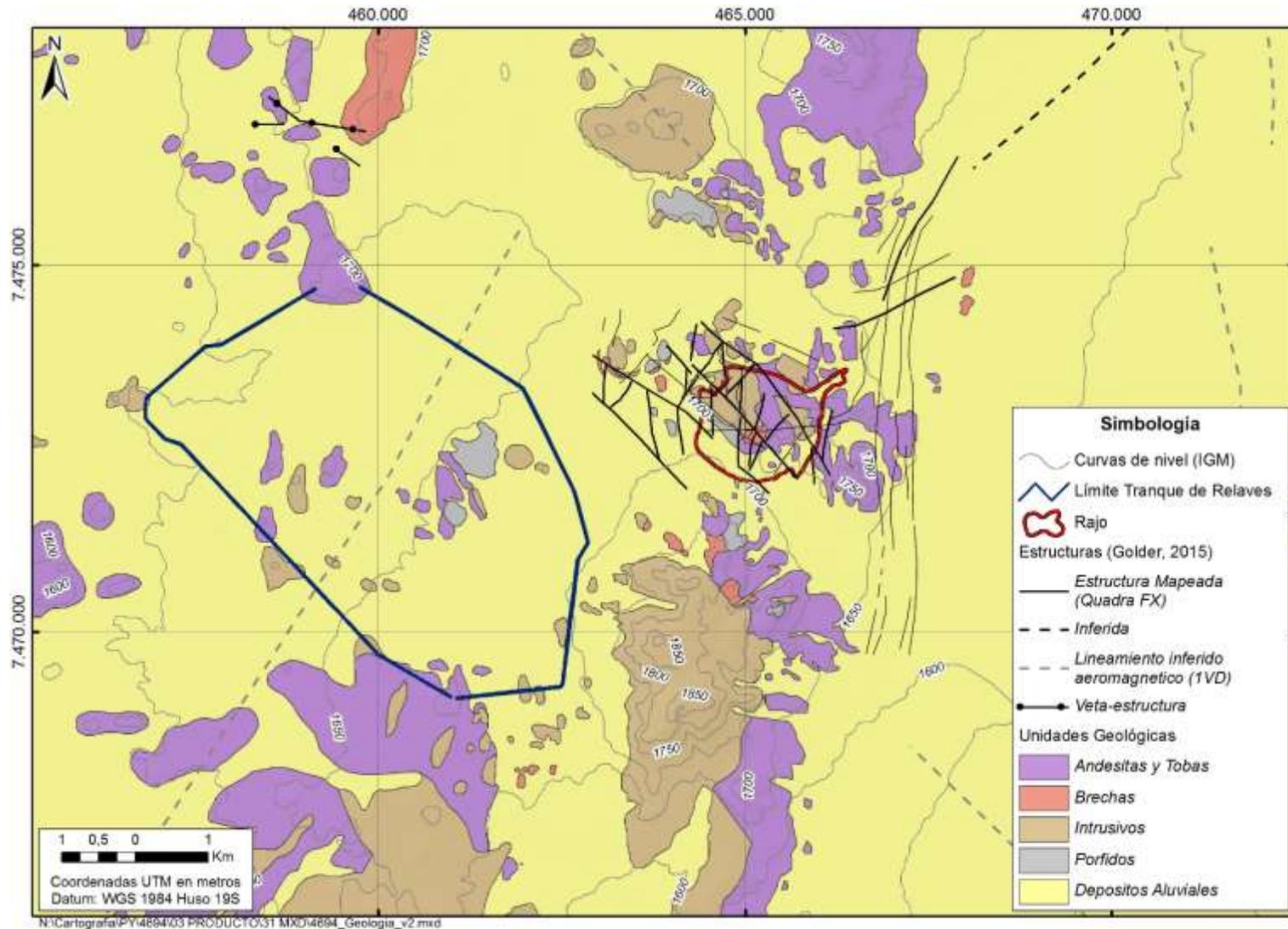
4.2.2 Estructuras

De acuerdo a la línea base del Proyecto Sierra Gorda, realizada por Golder (2010), se han separado para el presente modelo, dos sistemas de estructuras que se diferencian principalmente en su orientación. El primer sistema de fallas corresponde a un sistema conjugado de orientación noreste-suroeste y noroeste-sureste que se localizan de forma regional y local en el área de estudio. El segundo sistema de falla presenta orientación norte-sur y se extienden en la zona oriental.

El primer sistema de fallas mencionado, se evidencia de forma regional en el área de estudio (Figura 4-1) y son estructuras inferidas a partir del mapeo de superficie (Golder, 2010), y a lineamientos inferidos mediante métodos aeromagnéticos (Golder, 2015). Asociado a este sistema, se encuentran las fallas conjugadas de igual orientación en el rajo Catabela. Estas fallas fueron mapeadas por Quadra en sus distintas etapas de sondajes, y se relacionan con la mineralización del proyecto.

El segundo sistema de fallas, corresponde a uno de orientación norte-sur y que separa conceptualmente la zona de Pampa Lina al este, con la zona el dominio volcánico-intrusivo al oeste. La elongación norte-sur de los afloramientos de rocas y la geomorfología del salar de Pampa Lina se atribuyen a este sistema. Este sistema se ha caracterizado como fallas de rumbo con movimiento sinistral (Golder, 2010). Los modelos conceptuales anteriores (SWS, 2010 y VAI, 2014) han caracterizado este sistema como una barrera hidráulica.

Figura 4-1: Mapa de geología superficial y estructuras en el área de estudio.



*Mapa geológico generalizado.
 Fuente: Modificado de Línea Base SGO Spence (2015) y Golder (2012).

4.3 Unidades Hidrogeológicas

En el presente capítulo se describen las unidades hidrogeológicas que conforman la base del modelo hidrogeológico conceptual. Se describen desde el punto de vista geológico, estructural e hidráulico, mencionando la geometría y extensión de cada una, como también, la importancia dentro del flujo de agua subterránea.

4.3.1 Descripción de las unidades hidrogeológicas

Las unidades geológicas descritas previamente se han agrupado en tres unidades hidrogeológicas (UH) principales, que de hecho corresponden a depósitos aluviales, roca fracturada y basamentos impermeable y son consistentes con estudios anteriores (SWS, 2010 y VAI, 2014). Debido a que el flujo subterráneo en las unidades de roca está dominado por el grado de fracturamiento y la conexión hidráulica entre estas zonas fracturadas, no existen evidencias de que la litología primaria o bien la alteración hidrotermal sobreimpuesta, tengan un control evidente sobre el funcionamiento del sistema hidrogeológico.

La geología, reconocida en sondajes y en superficie, junto a los niveles de agua y ensayos hidráulicos realizados permite identificar dos dominios, lo que ya ha sido reconocido en otros trabajos (SWS, 2010; VAI, 2014). Un dominio hidrogeológico oriental, al este del rajo Catabela, donde los sedimentos aluviales en Pampa Lina hospedan un acuífero granular. El dominio hidrogeológico occidental comprende la zona del rajo Catabela, depósito de relaves y hacia el oeste, donde dominan rocas volcánicas e intrusivas, que conforman un sistema hidrogeológico de muy baja permeabilidad. A continuación, se describen de forma extendida las unidades antes mencionadas.

UH-1: Depósitos aluviales y coluviales

Corresponden a depósitos de consolidación media a baja, con granulometrías (según pozos existentes) que varían de gravas arenosas con lentes de limos y arcillas hasta arenas gravosas. En general la descripción estratigráfica de estas unidades es de mayor detalle en la zona del depósito de relaves, debido a la realización de sondajes geotécnicos en los primeros metros. Su espesor aumenta desde la zona del rajo Catabela hacia el este, desde 2 m hasta 170 m, zona donde se encontraría el depocentro de la cuenca de Pampa Lina. El dominio hidrogeológico occidental presenta espesores menores de esta unidad, los cuales no superan los 50 m y se encuentra naturalmente no saturada.

Los ensayos hidráulicos disponibles en pozos instalados en esta unidad en el sector de Pampa Lina (dominio hidrogeológico oriental), indican que las conductividades hidráulicas, calculadas a través de pruebas de bombeo, están en el rango entre 2×10^{-1} m/d (Pozo-6 o CMB-5) y 5 m/d (Loreto-4). Para el dominio occidental, donde se ubica el proyecto, existe sólo una estimación en un sondaje ubicado en el sector del depósito de relaves con un valor de 2×10^{-1} m/d.

UH-2: Roca fracturada

Bajo los depósitos aluviales y coluviales se encuentra una unidad de rocas ígneas compuesta por rocas volcánicas (andesitas y tobas), rocas intrusivas de grano medio a grueso (dioritas a granitos) y pórfidos (mineralizados y estériles). Existe información de ensayos hidráulicos (Ensayos de carga variable, de inyección y Lugeon) en sectores puntuales y dispersos en la zona, con valores de conductividad hidráulica en un alto rango entre 2×10^{-5} y $4,5 \times 10^{-1}$ m/d, con un promedio de $4,3 \times 10^{-2}$ m/d. A pesar de la heterogeneidad en los valores de permeabilidad estimados y que existen sectores sin mayores antecedentes, se ha considerado que esta zona más fracturada/meteorizada de las rocas se encuentra generalmente en los primeros 100 a 200 metros bajo los sedimentos o la superficie. Su espesor y geometría se ha asignado de acuerdo a: 1) Datos de conductividad hidráulica, 2) datos de zonas fracturadas en logeos litoestratigráficos y 3) niveles estáticos.

La unidad de roca fracturada corresponde a la de mayor relevancia hidrogeológica en el área de estudio, dado que aloja los recursos hídricos en el área del proyecto. Tiene una baja conductividad hidráulica que, en general, se han reconocido como macizos rocosos homogéneos y de baja permeabilidad. El bajo flujo de agua subterránea que ocurre por sus fracturas está condicionado por la conectividad hidráulica de éstas. La dificultad para transmitir el agua la definen como un acuícludo en la mayor parte del modelo, es decir posee agua, pero la transmite muy lentamente o no la transmite.

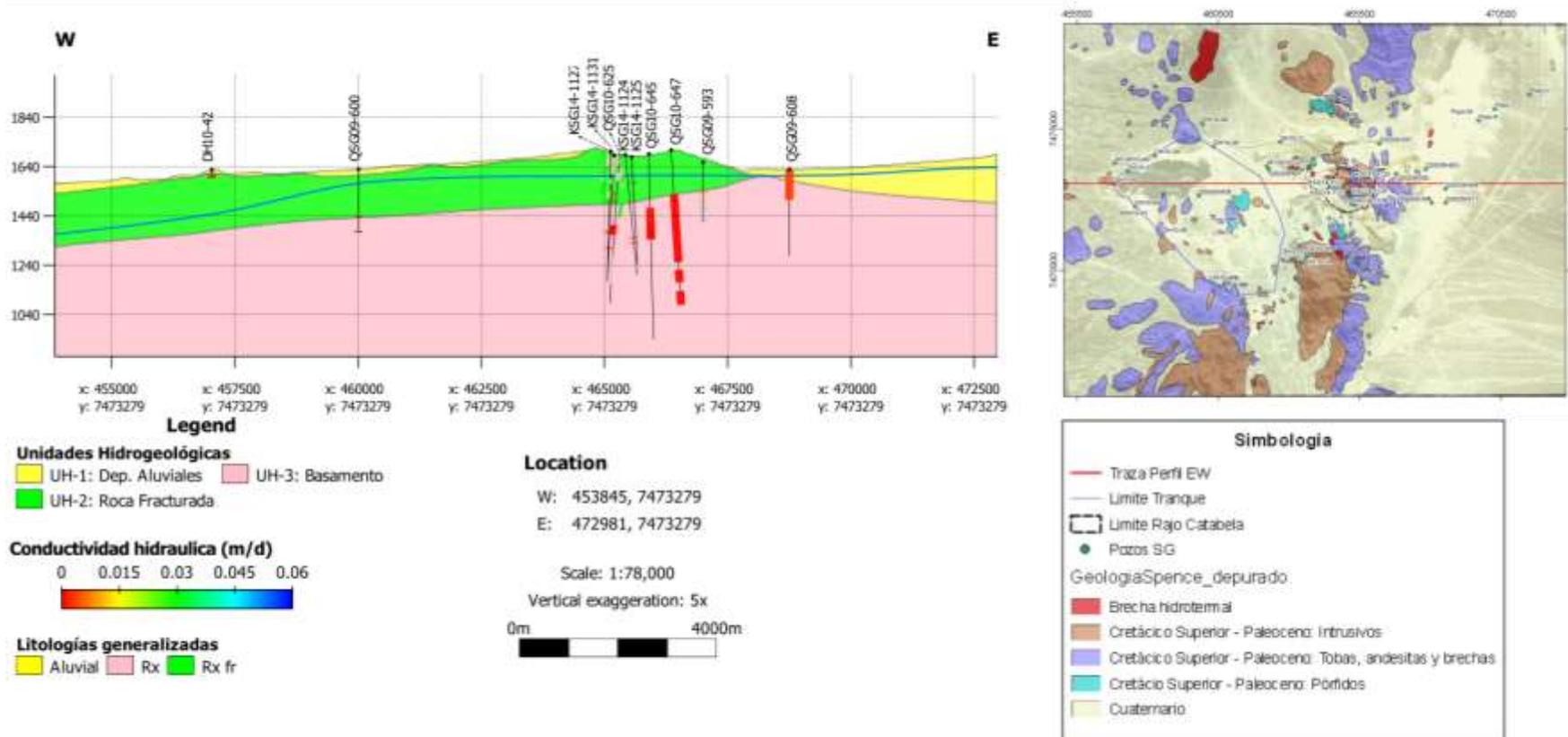
Su potencia varía entre 5 y 240 m y su mayor relevancia ocurre en el sector del rajo Catabela, donde se intersectan la mayor parte de estructuras, siempre con bajos valores de permeabilidad. El sector del depósito de relaves, de acuerdo a los niveles estáticos y ensayos de Lugeon (SWS, 2010), corresponde al de menor permeabilidad dentro de la unidad hidrogeológica UH-2 y se le ha reconocido como una zona donde el agua prácticamente no se mueve.

UH-3: Basamento impermeable

El basamento es litológicamente idéntico a la unidad hidrogeológica 2, sin embargo, se encuentra competente, fresco y sin fracturas, por lo que tiene una permeabilidad muy baja y una capacidad nula de transmitir agua. La conductividad hidráulica estimada varía aproximadamente entre $8,6 \times 10^{-7}$ y $8,6 \times 10^{-5}$ m/d, y se le ha atribuido un espesor de hasta 700 m de forma de representar la futura profundización del rajo Catabela en el modelo numérico.

En la Tabla 4-1 se muestra el rango de conductividad hidráulica de cada unidad hidrogeológica y su valor medio. En la Tabla 4-2 se incluyen todos los ensayos hidráulicos recopilados y las estimaciones de conductividad hidráulica.

Figura 4-2: Perfil E-W general del área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-1: Rangos de conductividad hidráulica de unidades hidrogeológicas

Unidad Hidrogeológica	Tipo depósito	K mín.	K máx.	K medio	Espesor
		m/d	m/d	m/d	m
UH-1	Sedimentos	2E-01	4,8	1,2	2 - 170
UH-2	Roca fracturada	2,3E-05	4,5E-01	4,2E-02	5 - 240
UH-3	Roca fresca	8,6E-07	8,6E-05	5E-05	445 - >700

Fuente: Modificado de VAI (2014) y SWS (2011).

Tabla 4-2: Ensayos hidráulicos y estimación de conductividad hidráulica

Pozo	desde	hasta	k	Tipo Prueba	UH	Fuente
Lugeon	m	m	m/d	Lugeon	Lugeon	Lugeon
Loreto 4	0	148,4	4,8	PB	UH-1	EIA (2008) SQM Pampa Hermosa
Pozo-7	0	55	3,38	PB	UH-1	EIA (2008) SQM Pampa Hermosa
Pozo-7	0	55	1,45	PB	UH-1	EIA (2008) SQM Pampa Hermosa
Pozo-9	0	63	0,97	PB	UH-1	EIA (2008) SQM Pampa Hermosa
Pozo-5	0	60	0,78	PB	UH-1	EIA (2008) SQM Pampa Hermosa
Loreto 4	0	148,4	7,40E-01	PB	UH-1	EIA (2008) SQM Pampa Hermosa
Pozo-3	0	50	0,63	PB	UH-1	EIA (2008) SQM Pampa Hermosa
Pozo-9	0	63	0,59	PB	UH-1	EIA (2008) SQM Pampa Hermosa
Pozo-6	0	50	0,34	PB	UH-1	EIA (2008) SQM Pampa Hermosa
Pozo-5	0	60	0,3	PB	UH-1	EIA (2008) SQM Pampa Hermosa
Pozo-3	0	50	0,29	PB	UH-1	EIA (2008) SQM Pampa Hermosa
Pozo-6	0	50	0,26	PB	UH-1	EIA (2008) SQM Pampa Hermosa
Pozo-2	0	60	1,6	PB	UH-1	Expediente DGA ND-0203-338
Pozo-1	0	120	0,28	PB	UH-1	Expediente DGA ND-0203-338
DH10-41	0	15,8	2,07E-01	Lugeon	UH-1	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-611	0	350	2,45E+00	CV**	UH-1	SWS (2011), Adenda 3
DH10-11	29,8	37,2	4,45E-01	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-28	7,9	11,1	4,58E-03	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-29	6,4	12,6	4,58E-02	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-36	12,2	18,4	2,46E-01	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-39	5,1	12	1,38E-01	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-42	6,8	17,6	2,51E-01	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-42	27,8	34,4	6,48E-04	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-42	20,1	27,1	2,89E-04	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-43	10,4	15,3	7,43E-02	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-43	15,3	26,7	1,56E-02	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-43	43,2	63,3	1,90E-03	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-43	84	102,9	4,32E-04	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-43	102,7	124,3	2,55E-04	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-43	124,3	140,3	3,84E-05	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-44	23,2	29,5	8,04E-02	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-46	15,6	20,3	3,93E-02	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-48B	20,3	24,7	2,07E-01	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-52	21,3	26,3	5,23E-02	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-9A	7,9	15,7	1,60E-01	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-33	5,9	8,4	1,81E-01	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Pozo	desde	hasta	k	Tipo Prueba	UH	Fuente
Lugeon	m	m	m/d	Lugeon	Lugeon	Lugeon
KP-DH10-33	16	26,7	1,77E-01	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-33	11,2	16	8,55E-02	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-33	43,1	57,2	3,20E-02	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-33	93,5	107,5	1,56E-02	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-33	25,41	41,9	5,62E-03	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-33	56,9	72,4	1,64E-03	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-33	108,8	124,2	9,50E-04	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-33	76,7	90,7	8,64E-04	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-33	129,2	136,4	1,12E-04	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-33	136,2	150,1	7,17E-05	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-40	39,7	45	1,30E-01	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-40	37,1	43,8	9,94E-02	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-40	16	31,9	1,60E-02	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-40	43,3	55,8	4,28E-03	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-40	58,6	74	3,20E-03	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-40	31	36,2	1,38E-03	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-40	75,3	90,7	2,72E-04	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-40	129,6	150,1	2,33E-05	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-588	0	350	2,05E-02	CV**	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-593	288	294	2,59E-01	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-593	240	246	8,64E-02	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-593	240	242	5,01E-02	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-593	186	192	4,32E-02	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-593	156	162	1,04E-02	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-593	120	126	7,69E-03	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-597	264	270	1,90E-02	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-597	0	264	6,05E-03	CV**	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-597	270	306	6,05E-03	Lugeon	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-600	192	198	3,11E-04	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-601	150	156	4,06E-02	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-601	288	294	2,76E-02	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-601	90	96	1,47E-02	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-601	294	300	1,47E-02	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-601	186	192	1,30E-02	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-601	252	258	1,30E-02	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-601	222	228	1,21E-02	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-601	336	342	1,21E-02	Inyección	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-605	0	352	4,44E-04	CV**	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-608	0	124	3,81E-03	CV**	UH-2	SWS (2011), Adenda 3
DH10-43	140,3	150,1	1,43E-05	Lugeon	UH-3	SWS (2011), Adenda 3
KP-DH10-40	90,7	109	2,16E-05	Lugeon	UH-3	SWS (2011), Adenda 3
QSG09-600	252	258	7,69E-05	Inyección	UH-3	SWS (2011), Adenda 3
KSG14-1127	363,12	368,12	1,08E-03	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
KSG14-1131	417,62	423,62	9,94E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
KSG14-1131	168,62	174,62	9,24E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
KSG14-1126	309,87	314,87	7,68E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
KSG14-1131	201,52	207,52	6,69E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Pozo	desde	hasta	k	Tipo Prueba	UH	Fuente
Lugeon	m	m	m/d	Lugeon	Lugeon	Lugeon
KSG14-1131	342,62	348,62	5,79E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
KSG14-1126	498,87	503,87	5,55E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
QSG10-635	396,7	404,2	4,32E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
QSG10-635	547,9	568,9	4,32E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
QSG10-635	640	710,5	4,32E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
QSG10-645	232,9	300,6	4,32E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
QSG10-645	298,6	368,6	4,32E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
QSG10-647	509,9	563,9	4,32E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
QSG10-647	600	660	4,32E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
KSG14-1124	403,02	408,02	2,48E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
KSG14-1125	123,42	128,42	2,01E-04	Lugeon	UH-2	VAI (2015), Modelo conceptual mina
QSG10-625	298	341	8,64E-05	Lugeon	UH-3	VAI (2015), Modelo conceptual mina
QSG10-647	191,1	477,8	8,64E-05	Lugeon	UH-3	VAI (2015), Modelo conceptual mina
QSG10-647	245,1	477,8	8,64E-05	Lugeon	UH-3	VAI (2015), Modelo conceptual mina
KSG14-1124	379,02	384,02	2,50E-05	Lugeon	UH-3	VAI (2015), Modelo conceptual mina
KSG14-1126	102,77	107,77	8,64E-07	Lugeon	UH-3	VAI (2015), Modelo conceptual mina

*PB= Prueba de bombeo

**CV = Carga variable

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Niveles de Agua Subterránea

4.4.1 Evaluación de Niveles Estáticos

En el presente apartado se analizan los niveles medidos en los pozos de la red de monitoreo de Sierra Gorda SCM y de esta manera, se presenta un mapa gradientes hidráulicos para cada dominio hidrogeológico de la zona de estudio. A partir de las curvas equipotenciales obtenidas se describen las potenciales direcciones de flujo subterráneo, considerando la baja permeabilidad de las rocas y dificultad para transmitir el agua.

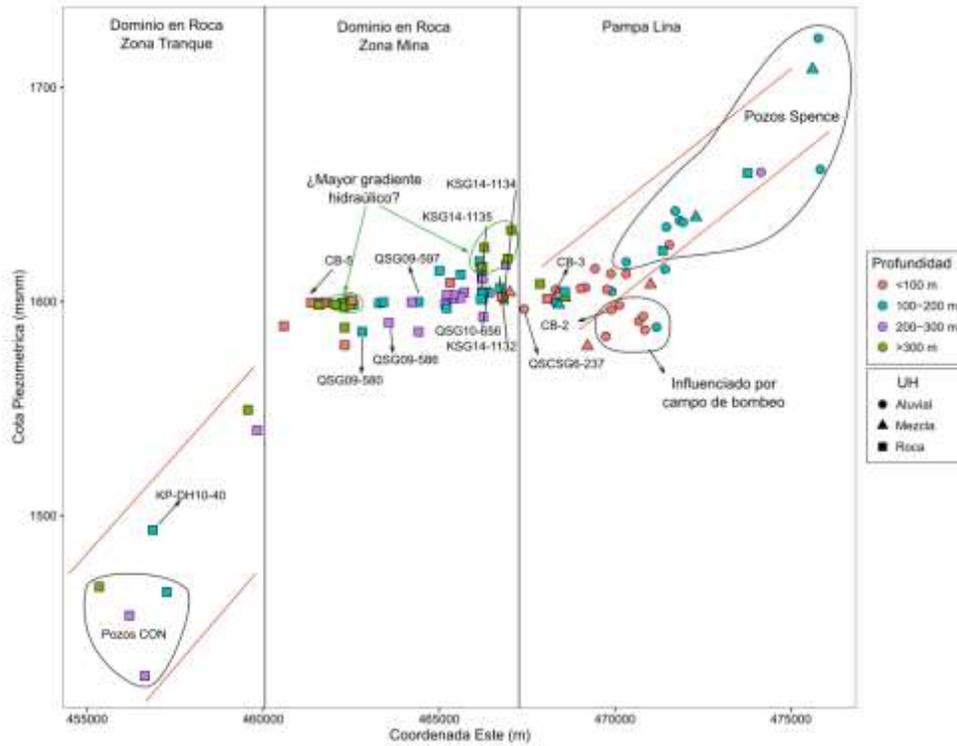
Un aspecto relevante corresponde a la información entregada por los piezómetros de cuerda vibrante en el sector del rajo y cerros del Este que lo separan de Pampa Lina. En estos piezómetros, que tienen sensores a distintas profundidades, se aprecian niveles piezométricos que varían hasta 30 m unos de otros, lo que sugiere la existencia de flujos verticales ascendentes y descendentes dependiendo del sector. Sin embargo, debido a que la mayor parte de puntos con información de nivel corresponden a sondajes abiertos o pozos con secciones ranuradas, en algunos casos con varias decenas de metros, el nivel piezométrico medido corresponde a una especie de promedio ponderado del nivel correspondiente a zonas de fracturas de distintas profundidades, lo que dificulta la comparación entre el nivel de pozos cercanos y la determinación real de gradientes hidráulicos. Lo anterior tiene una gran relevancia en la zona debido a que gran parte de los sondajes muestran una diferencia de tan solo 5 m en los alrededores del área mina e incluso considerando el borde Oeste y centro de Pampa Lina.

De forma de considerar este efecto en la interpretación del nivel y determinación de gradientes, se realizó un análisis donde se clasificaron los pozos según su profundidad y unidad de hidrogeológica que estarían representando. En el gráfico de la Figura 4-3 se presenta la relación entre la coordenada Este de cada pozo o sondaje, su nivel piezométrico indicando además el rango de profundidad del pozo o sondaje; menor a 100 m, entre 100 y 200 m, 200-300 m y mayor a 300 m de profundidad. Si bien del gráfico se desprenden tendencias sólo según la coordenada este y considerando que el flujo no tiene una componente exclusiva de orientación Este-Oeste, se entrega una visión general del comportamiento hidráulico en el entorno del proyecto.

Las principales apreciaciones de la Figura 4-3 se enumeran a continuación:

- Se pueden reconocer tres dominios bien definidos, con un comportamiento distinto del nivel piezométrico; sector Este (Pampa Lina), central (rajo y alrededores) y Oeste (depósito de relaves y suroeste).
- En el sector oriental, correspondiente a Pampa Lina, se aprecia un claro y mayor gradiente respecto a los otros dos dominios, con una componente Este-Oeste en el acuífero aluvial (además de la norte-sur que no es representada)
- El sector central, correspondiente a la zona mina y alrededores, tiene una superficie piezométrica muy plana en torno a los 1.600 msnm
- El tercer sector, oeste, se compone de los pozos ubicados cerca del depósito de relaves y aguas abajo, donde el nivel se encuentra evidentemente más bajo que en el resto del proyecto, sin una tendencia definida entre los pozos.
- El nivel piezométrico más elevado se encuentra en los cerros ubicados al este del rajo y que lo separan de Pampa Lina. El origen de estos niveles proviene de piezómetros de cuerda vibrante, con sensores puntuales, los cuales se ubican exclusivamente en este sector. Se puede observar que esta carga hidráulica representa un nivel profundo (>300 m), lo cual se podría relacionar al nivel de un conjunto de pozos con profundidades mayores a 300 m que se encuentran al Este del pozo CB-5 y que se muestran en la figura en un círculo verde.
- En los piezómetros de cuerda vibrante del este de la mina existe un gradiente vertical predominante en dirección ascendente.
- El mayor nivel de los piezómetros de cuerda vibrante y otros pozos cercanos habilitados en roca formaría una divisoria de aguas subterránea entre Pampa Lina por el este y el sector mina por el oeste. Basados en esto se propone que en ese sector no existe un flujo de este a oeste, sin embargo la información piezométrica de detalle es muy local y se desconoce la conectividad lateral de los distintos niveles en roca representados por los piezómetros de cuerda vibrante.

Figura 4-3. Nivel piezométrico en función de la coordenada Este del pozo. Se diferencian en profundidad del pozo y unidad hidrogeológica.



Fuente: elaboración propia.

4.4.2 Mapa de Gradientes Hidráulicos (marzo, 2016)

Para la realización del mapa de gradientes hidráulicos, se utilizó la información de nivel de 31 puntos, de los cuales 21 pozos poseen mediciones recientes (marzo, 2016). De estos 21 puntos solo 11 se encuentran habilitados como piezómetros hidrogeológicos, 3 corresponden a piezómetros de cuerda vibrante (cementados), y el resto corresponde a sondajes abiertos con objetivos iniciales distintos al monitoreo hidrogeológico. Cabe mencionar que sólo se utilizaron los sensores someros de los piezómetros cuerda vibrante. El detalle de los puntos utilizados se presenta en la Tabla 4-3. Por otra parte, la zona de Pampa Lina fue ajustada con pozos de Sierra Gorda y Minera Spence. Los niveles de los pozos de Minera Spence fueron tomados del EIA de Spence (2015). De forma adicional se utilizó de forma referencial mediciones de nivel de sondajes antiguos, los que hoy en día se encuentran derrumbados, colapsados o desaparecidos por el avance de la operación. En la Tabla 4-4 se presentan todos los sondajes antiguos no utilizados para calibrar la piezometría pero que se ajustan bien a ésta.

Respecto al flujo en el sector de Pampa Lina, a través de los depósitos aluviales y coluviales semi-consolidados (UH1), se aprecia una dirección predominante Noreste-Suroeste consistente con la recarga subterránea desde los sectores más altos de la cuenca de la Quebrada de los Arrieros. Entre esta zona y el área del rajo Catabela, junto a los cerros asociados a éste que están orientados nortesur, se ha descrito una zona de falla norte-sur que sería la responsable de un mayor potencial hidráulico generando que el flujo diverja hacia el norte y principalmente hacia el sur, sin pasar a la zona oeste. Además, se observa un cono de depresión que afecta principalmente al pozo CB-2 y en menor medida al pozo Loreto 4 y Casing Acero. El efecto de la extracción genera direcciones de flujo que convergen localmente en esta zona.

De la evaluación de niveles se desprende que el flujo a través de la unidad hidrogeológica de depósitos aluviales (UH-1) en el sector de Pampa Lina es posiblemente independiente del sistema albergado en las unidades de roca más profunda. Teniendo en consideración todo lo anterior, en la Figura 4-4 se presentan las curvas equipotenciales en el sector de Pampa Lina representando el flujo en la UH-1. De forma separada, en la Figura 4-5 se presentan las curvas equipotenciales que representan el gradiente hidráulico (no necesariamente flujo debido a la muy baja permeabilidad) en las unidades de roca inferiores. Al respecto y con la información disponible no es posible separar de forma generalizada una componente en roca somera de una más profunda, ya que los piezómetros con información se encuentran exclusivamente en el entorno del rajo y en sus inmediaciones (hacia el este). De esta manera, el mapa de gradientes presentado representa el agua alojada entre 100 y 200 m de roca fracturada. Se sugiere que esta zona representada corresponde principalmente a aportes de agua desde la roca meteorizada.

En la zona central de proyecto (área mina y alrededores) el gradiente es muy bajo como se observa en la Figura 4-3, donde la mayoría de los niveles medidos, cuyos pozos presentan hasta 300 m tienden a estar alrededor de la cota 1.600 msnm. Por otra parte, en la porción del área mina más cercana a Pampa Lina se observa una zona de mayor potencial hidráulico (evidenciado por piezómetros de cuerda vibrante).

El cono de depresión formado en el rajo tiene por lo menos 210 m de profundidad y genera gradientes locales hacia el centro del rajo. Los antecedentes disponibles sobre afloramientos de agua en el rajo indican una predominancia en las paredes del sector este (VAI, 2015). El flujo medio que se ha interceptado y evacuado a través de camiones aljibes es de 0,7 L/s, sin embargo, el caudal predominante ocurrió a inicios de 2014, en un rango entre 2 y 3,5 L/s, coincidiendo con elevaciones del fondo del rajo entre 1600 y 1450 msnm y disminuyeron significativamente (con valores dominantes menores a 0,5 L/s) una vez que el rajo se fue profundizando.

En la zona Oeste y Suroeste donde, entre otros, se encuentra ubicado el depósito de relaves, se tiene incertidumbre de la confiabilidad de los datos que entregan los pozos con denominación CON (10 al 21) y KP-DH10-40. Según los niveles disponibles el gradiente en esta zona aumenta considerablemente, dado que los niveles se encontrarían hasta 150 m más profundos que en la zona mina. De esta manera, se sugiere que este sector funciona independiente de la zona del rajo y posiblemente los niveles medidos corresponden a aguas almacenadas en la roca desde hace varios cientos (a miles) de años. El elevado gradiente hidráulico entre el sector de la mina y del depósito de relaves indicaría la transición a través de una zona de aún menor permeabilidad, dominada por cuerpos intrusivos, donde posiblemente no exista un flujo del agua subterránea.

Según el gradiente entregado por las curvas equipotenciales en todo el dominio Oeste de la zona de estudio, se observan dos salidas del agua subterránea, una por el norte (evidenciado por pozos CB-5 y QSG09-580) y otra por el sur del área estudiada (al Sur del pozo CB-9). Sin embargo, considerando las bajas permeabilidades y desconexión hidráulica antes mencionada, la única componente de flujo real (muy reducido) sería hacia el sector norte.

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Tabla 4-3: Pozos utilizados para el análisis piezométrico.

Pozo Id	Este UTM 84	Norte UTM 84	Cota msnm	Fecha med dd-mm-aa	Stick up m	Nivel mbnr*	Cota Piezométrica msnm	Zona	Observación
CB-2	469.895,82	7.476.665,98	1.629,06	04-03-2016	0,60	33,49	1.596,17	Pampa Lina	Pozo habilitado
CB-3	468.287,62	7.474.385,00	1.628,08	04-03-2016	0,80	28,16	1.600,71	Pampa Lina	Pozo habilitado
CB-4	466.755,85	7.473.826,00	1.645,23	06-03-2016	0,50	41,19	1.604,54	Mina	Pozo habilitado
CB-5	461.685,88	7.475.936,98	1.656,34	03-03-2016	1,07	58,24	1.599,17	Mina	Pozo habilitado
CB-6	462.399,93	7.473.360,95	1.660,09	08-03-2016	0,55	59,76	1.600,88	Mina	Pozo habilitado
CB-9	462.529,88	7.468.675,03	1.678,64	29-10-2014	0,90	79,83	1.599,71	Mina	Pozo habilitado
CB-10	466.233,73	7.471.809,04	1.690,06	06-03-2016	0,75	89,57	1.601,24	Mina	Pozo habilitado
CON-16	456.199,92	7.471.111,01	1.570,00	05-03-2016	0	165,23	1.453,36	Tranque	Sondaje abierto
CON-21	457.260,91	7.467.311,04	1.604,25	05-03-2016	0	139,88	1.464,37	Tranque	Sondaje abierto
QSCSG6-237	467.417,71	7.470.022,47	1.623,97	04-03-2016	0,51	28,04	1.596,44	Pampa Lina	Sondaje abierto
QSG08-431	465.228,47	7.474.029,94	1.670,46	06-03-2016	0,87	70,26	1.601,07	Mina	Sondaje abierto
QSG08-493	466.416,06	7.473.626,16	1.659,16	06-03-2016	0,33	55,34	1.604,15	Mina	Sondaje abierto
QSG09-580	462.816,00	7.477.625,79	1.685,57	03-03-2016	0	99,62	1.585,95	Mina	Sondaje abierto
QSG09-585	462.565,57	7.476.374,96	1.667,20	03-03-2016	0	68,53	1.598,67	Mina	Sondaje abierto
QSG09-587	468.066,79	7.471.876,32	1.630,14	04-03-2016	1,30	30,09	1.601,35	Mina	Sondaje abierto
QSG09-597	466.215,83	7.474.475,90	1.650,12	06-03-2016	0	45,57	1.604,55	Mina	Sondaje abierto
QSG09-608	468.568,85	7.472.874,50	1.630,72	04-03-2016	0,90	29,77	1.601,85	Mina	Sondaje abierto
QSG10-696	461.566,20	7.474.876,25	1.640,56	03-03-2016	0	41,00	1.599,56	Mina	Sondaje abierto
Casing Acero	468.316,83	7.475.022,99	1.628,00	04-03-2016	0,06	28,77	1.599,29	Pampa Lina	Sondaje abierto
Loreto 3	467.010,04	7.474.113,99	1.633,40	04-03-2016	0,24	29,37	1.604,27	Pampa Lina	Sondaje abierto
Loreto 4	468.405,13	7.475.795,38	1.628,00	04-03-2016	0,10	29,48	1.598,62	Pampa Lina	Sondaje abierto
KSG14-1132S	466.660,55	7.472.683,89	1.523,93	22-03-2016	n/a	n/a	1.606,42	Mina-Lina	Piezómetro cuerda vibrante
KSG14-1134A	466.756,52	7.474.405,69	1.562,83	22-03-2016	n/a	n/a	1.602,24	Mina-Lina	Piezómetro cuerda vibrante
QSG10-656A	466.169,75	7.472.985,88	1.599,51	22-03-2016	n/a	n/a	1.600,90	Mina	Piezómetro cuerda vibrante

*mbnr: metros bajo nivel de referencia o *stick up*

Fuente: Elaboración propia

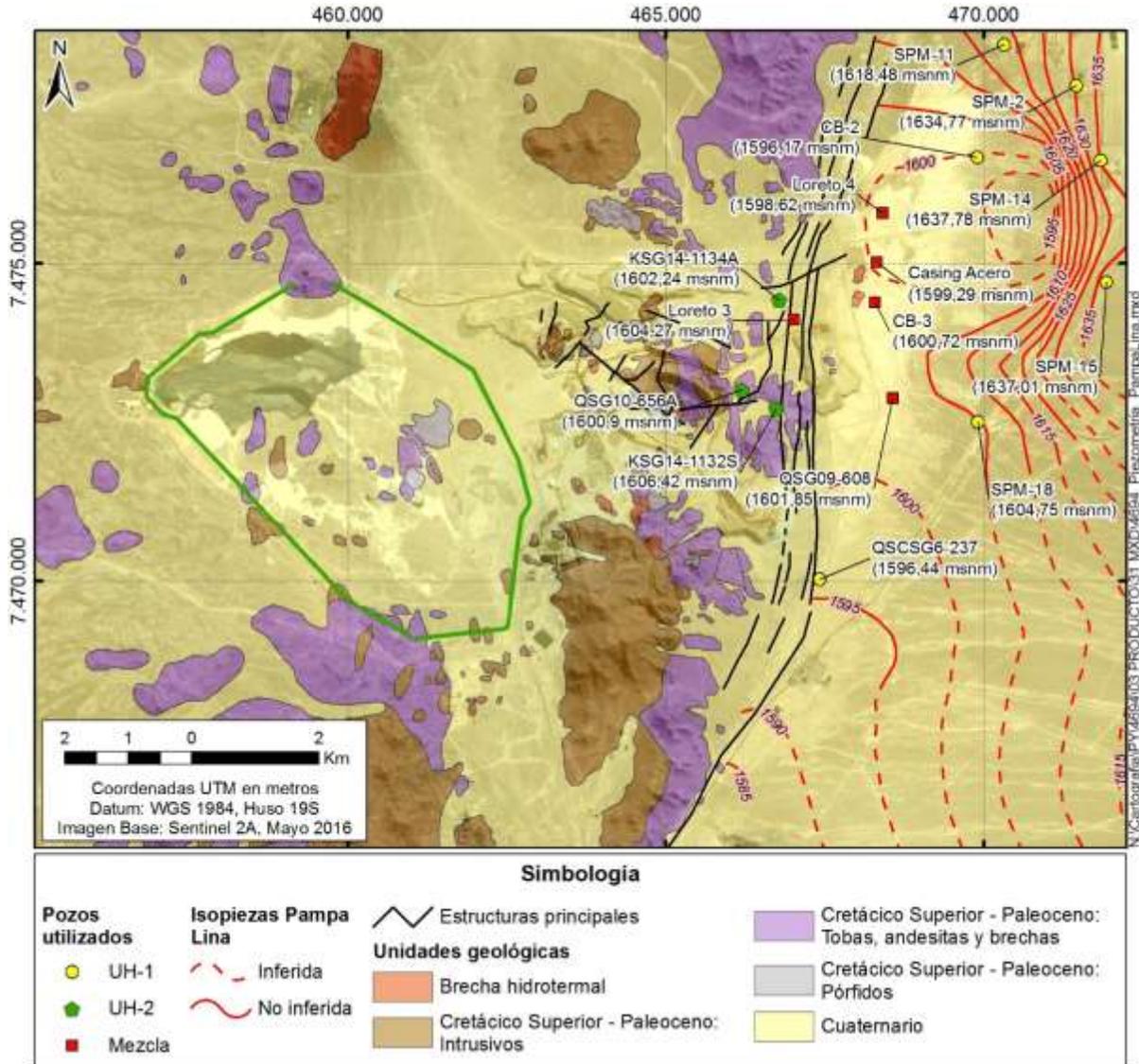
Tabla 4-4: Sondajes que se ajustan a la piezometría y no son parte del análisis principal.

Pozo	Este	Norte	Cota	Fecha med	Stick up	Nivel	Cota Piezométrica	Zona	Observación
	UTM 84	UTM 84	msnm	dd-mm-aa	m	mbnr*	msnm		
KP-DH10-33	462.239,04	7.473.667,02	1.653,71	08-03-2016	0,50	54,85	1.599,37	Mina	Se utilizó CB-6
QSG09-601	462.315,88	7.473.526,00	1.655,63	28-06-2012	1,45	59,51	1.597,57	Mina	Ajusta menos 3 m
QSG07-352	463.295,79	7.473.726,12	1.666,69	12-04-2013	0,46	67,97	1.599,18	Mina	Pozo inactivo
QSG08-405	465.416,73	7.473.827,32	1.671,02	11-11-2010	0,90	70,39	1.601,53	Mina	Pozo inactivo
QSG08-436	464.415,93	7.474.625,99	1.660,28	13-02-2012	0,45	60,93	1.599,80	Mina	Pozo inactivo
QSG08-455	464.215,78	7.473.826,13	1.677,69	22-11-2013	0	78,05	1.599,65	Mina	Pozo inactivo
QSG09-592	468.568,34	7.473.373,35	1.629,72	23-06-2013	0,50	25,67	1.604,55	Pampa Lina	Pozo inactivo
QSG10-686	461.816,04	7.474.375,99	1.643,67	14-12-2012	1,72	45,84	1.599,55	Mina	Pozo inactivo
QSG10-774	461.709,20	7.474.124,24	1.643,88	28-09-2014	1,10	45,65	1.599,33	Mina	Pozo inactivo
RDH-03	462.054,53	7.472.371,92	1.664,99	23-05-2014	0,70	67,03	1.598,66	Mina	Pozo inactivo

*mbnr: metros bajo nivel de referencia o *stick up*

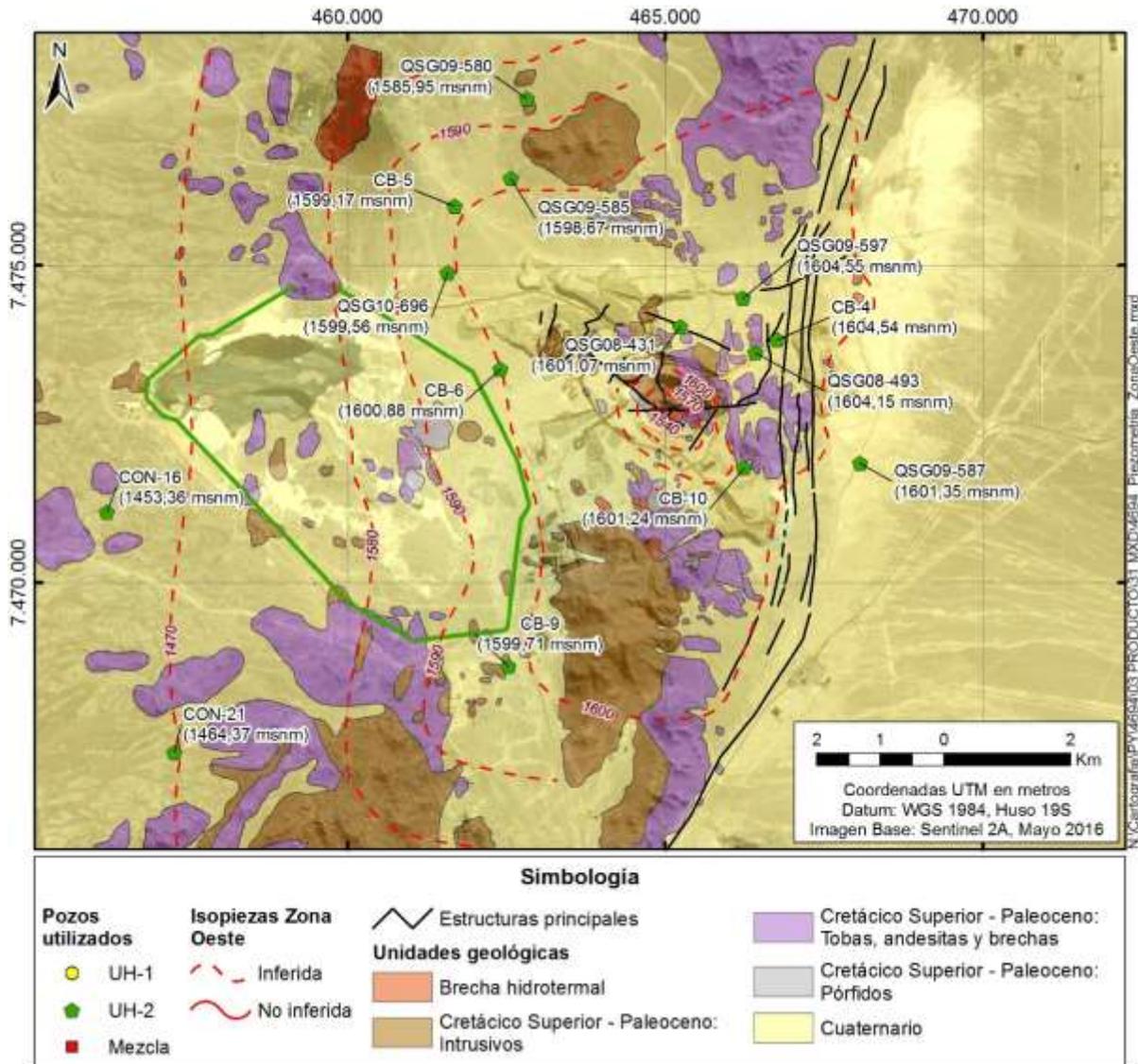
Fuente: Elaboración propia

Figura 4-4. Piezometría en la unidad hidrogeológica 1 (aluvial) en el sector de Pampa Lina con antecedentes de Marzo 2016.



Fuente: Mapa de Geología y estructuras tomado de Golder (2015).
Fuente: Piezometría Elaboración propia.

Figura 4-5: Piezometría en unidad hidrogeológica de rocas fracturadas con datos marzo 2016.



Fuente: Mapa de Geología y estructuras tomado de Golder (2015).
Fuente: Piezometría Elaboración propia.

4.4.3 Evolución de niveles

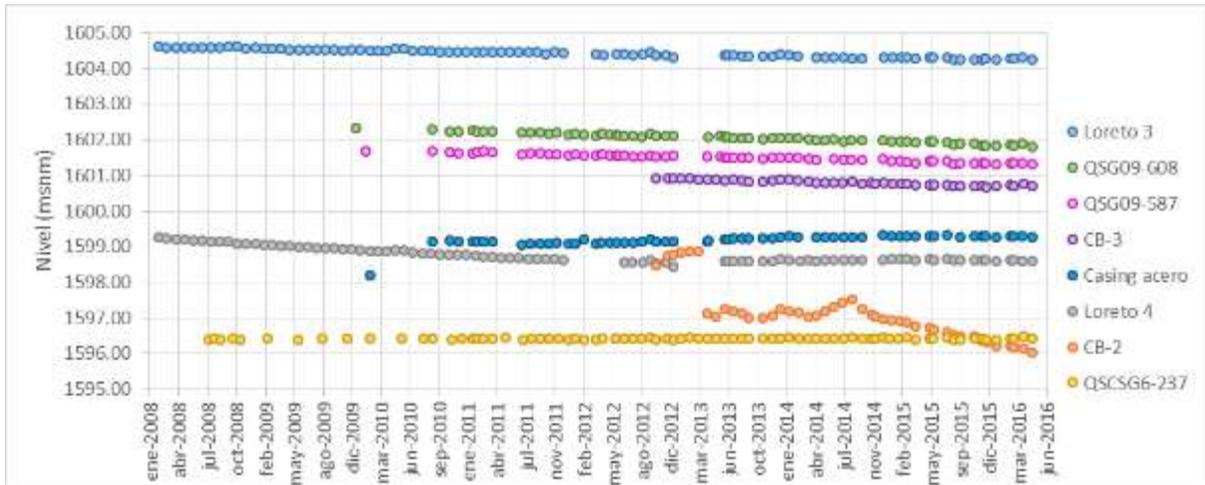
En términos generales, se puede decir que los niveles estáticos medidos en la gran mayoría de los pozos presentan tendencias estables en el tiempo. Lo anterior es concordante con una muy baja recarga del sistema, lo cual asociado a la muy baja permeabilidad del medio genera que los niveles se mantengan estables en el tiempo.

Sin embargo, existen dos zonas que vale la pena analizar la evolución que presentan los niveles de sus pozos. Estas zonas corresponden a Pampa Lina y el rajo Catabela. La primera zona es relevante debido a que existe un campo de bombeo, por lo cual se necesita dilucidar el efecto del cono de depresión en los pozos de monitoreo. De manera similar, la segunda zona presenta un cono de depresión debido a la profundización del rajo lo cual debería afectar en mayor o menor medida las tendencias de niveles de los pozos cercanos.

4.4.3.1 Zona de bombeo Pampa Lina

Los niveles estáticos en Pampa Lina muestran un descenso continuo que debe estar asociado a la explotación de agua de los pozos de Cerro Dominador (Figura 4-6). El pozo que tiene mayor influencia por parte de los bombeos corresponde al CB-2, cuyo nivel ha descendido alrededor de 2,5 m desde el inicio de su monitoreo. El resto de los pozos mostrados en la presente niveles históricos con un descenso moderado lo que es razonable de acuerdo al radio de influencia del campo de bombeo.

Figura 4-6: Evolución de niveles de Pampa Lina



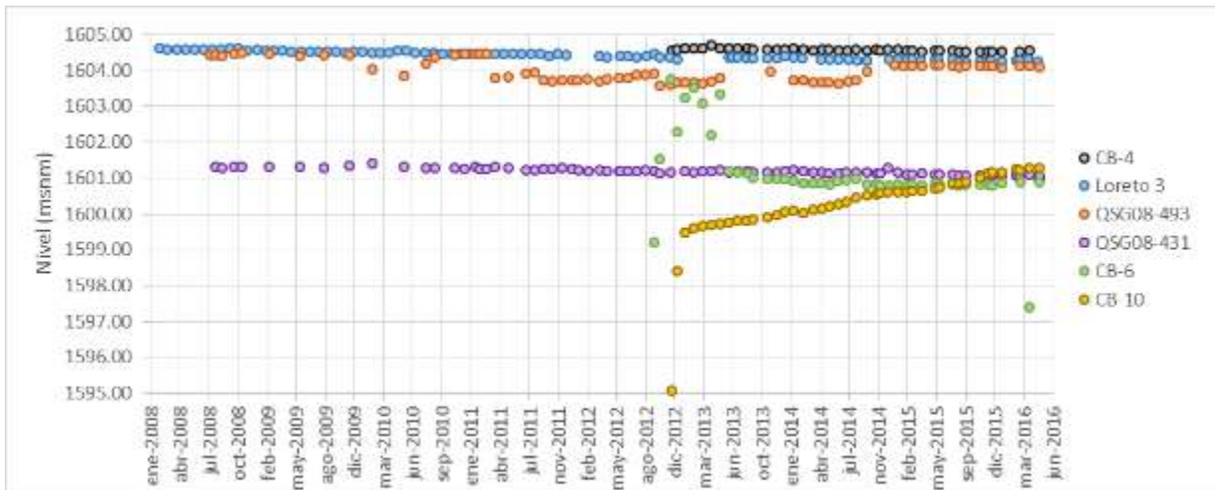
Fuente: Elaboración propia.

4.4.3.2 Zona del rajo Catabela

El gradiente hidráulico en esta zona es muy bajo evidenciado por niveles con cotas similares tanto en la zona oriental (QSG8-431), y la zona occidental (CB-6). Los niveles de los pozos CB-4 y QSG08-493 está en una cota aproximadamente 2,5 m más alta, y además se encuentran ubicados sobre la zona de falla norte-sur.

El flujo de agua en la zona mina (Figura 4-7) se da por las zonas de fracturas y meteorización. La baja conductividad hidráulica se observa en los pozos QSG8-431, QSG8-493 y CB-4 que se encuentran muy cerca del rajo, pero que sin embargo, no han evidenciado descenso por el cono de depresión que se ha generado por la profundización del rajo. El pozo CB-10 ha evidenciado un constante aumento de nivel desde su construcción. Este comportamiento se debería a la poca permeabilidad del medio. De esta manera este pozo se ha demorado en alcanzar su cota piezométrica real.

Figura 4-7: Evolución de niveles zona Mina



Fuente: Elaboración propia.

4.5 Hidroquímica

En el presente capítulo se caracteriza la química de las aguas subterráneas que componen el área de estudio. Considerando la estabilidad general de los parámetros físico-químicos en los distintos pozos y sondajes durante el registro histórico, se utilizó la información de las últimas muestras obtenidas en Junio de 2016. El detalle y parámetros físicoquímicos de cada una se incluye en la Tabla 4-5. En algunos pozos se obtuvieron muestras a distintas profundidades y se incorpora la información de ambas. Para el análisis y descripción hidroquímica es importante tener en consideración el tipo de pozo, su historia y representatividad de las muestras, aspectos que son abordados en detalle en el informe “Revisión red de monitoreo hidrogeológica Sierra Gorda” de Arcadis (2016a).

Además del agua subterránea, se presenta la química del agua de procesos (depósito de relaves y piscina de agua de mar) y se compara con las aguas detectadas en pozos de monitoreo de infiltraciones de la zona no saturada y pozos con profundidad insuficiente (CB-7 y CB-8). La información química es complementada con antecedentes de perfiles de conductividad eléctrica, temperatura y pH realizados en distintos pozos, además de la composición isotópica en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua.

Tabla 4-5: Detalle de muestras analizadas.

Pozo	Fecha	Este	Norte	Cota	Prof. muestra	Temp	pH	C.E.	TDS
	dd-mm-aa	m	m	msnm	m	°C		uS/cm	mg/l
CB-7	08/06/2016	456.949,23	7.473.584,10	1600,798	65	24,32	6,67	191200	95580
CB-8	08/06/2016	457.131,45	7.472.130,46	1607,749	20	23,47	6,96	170900	85430
KP-DH10-40	08/06/2016	456.863,72	7.473.780,20	1596,012	110	23,79	7,4	14660	7329
MSG-1	08/06/2016	456.906	7.472.969,00	-		12,26	8,33	79880	39940
CB-12	09/06/2016	465.406,32	7.466.599,06	1593,61	48	22,36	7,55	40820	20400
CON-10	09/06/2016	455.345,93	7.468.329,03	1572	130	24,36	6,7	73110	36540
CON-15	09/06/2016	456.638,91	7.472.210,00	1526	185	24,65	6,72	65580	32790
CON-16	09/06/2016	456.199,92	7.471.111,01	1570	180	23,93	6,85	67790	33860
CON-21	09/06/2016	457.260,91	7.467.311,04	1618	145	24,8	4,82	65710	30730
Pis	09/06/2016	462.938,00	7.469.180,00	-	-	21,47	8,13	49180	24590
CB-2	10/06/2016	469.895,82	7.476.665,98	1629,057	40	19,17	7,86	19890	99440
CB-3	10/06/2016	468.287,62	7.474.385,00	1628,078	40	19,07	7,99	38700	19350

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Pozo	Fecha	Este	Norte	Cota	Prof. muestra	Temp	pH	C.E.	TDS
	dd-mm-aa	m	m	msnm	m	°C		uS/cm	mg/l
CB-5	10/06/2016	461.685,88	7.475.936,98	1656,34	70	22,61	7,42	76840	38410
QSCSG6-237	10/06/2016	467.417,71	7.470.022,47	1623,97	40	22,34	7,92	34020	17010
QSG08-402	10/06/2016	465.615,78	7.474.997,43	1649,059	50	23,68	6,63	61200	30600
CB-4	11/06/2016	466.755,85	7.473.826,00	1645,229	50	23,77	7,09	69410	34700
CB-4	11/06/2016	466.755,85	7.473.826,00	1645,229	200	23,81	7,35	123800	61940
CB-9	11/06/2016	462.529,88	7.468.675,03	1678,64	150	24,06	7,23	80340	40170
QSG08-431	11/06/2016	465.228,47	7.474.029,94	1670,463	80	24,21	6,18	72990	36490
QSG08-493	11/06/2016	466.416,06	7.473.626,16	1659,16	75	24,49	5,37	90090	45050
CB-10	12/06/2016	466.233,73	7.471.809,04	1690,057	150	24,48	7,43	63030	31520
CB-10	12/06/2016	466.233,73	7.471.809,04	1690,057	250	24,59	7,11	77610	38800
CB-6	12/06/2016	462.399,93	7.473.360,95	1660,092	200	23,14	7,39	59060	29530
CB-6	12/06/2016	462.399,93	7.473.360,95	1660,092	250	23,8	7,38	56260	28120
CON-23	12/06/2016	458.249,9	7.470.012,02	1664	320	25,87	6,88	50100	25050
QSG08-402	21/06/2016	465.615,78	7.474.997,43	1649,059	87	22,28	6,5	60,61	30,31
QSG08-402	21/06/2016	465.615,78	7.474.997,43	1649,059	138	23,03	6,86	58,76	29,38
QSG09-580	21/06/2016	462.816,00	7.477.625,79	1685,569	120	24,34	6,8	65,68	32,85
CB-5	23/06/2016	461.685,88	7.475.936,98	1656,34	75	23,77	5,08	78,46	39,23
QSG09-608	24/06/2016	468.568,85	7.472.874,50	1630,721	100	18,28	8,15	51,47	25,73
QSG09-605	25/06/2016	467.867,16	7.473.572,64	1627,791	100	19,92	6,71	74,85	37,42
PDH-8	27/06/2016	464.645,6867	7.477843,25	1678	151	24,72	6,4	76,46	38,23

Fuente: Monitoreo Arcadis, 2016

4.5.1 Parámetros físico-químicos

La salinidad del agua subterránea, expresada como conductividad eléctrica (CE), va de los 20 mS/cm (CB-2) a 124 mS/cm (CB-4 a 200 m), como se muestra en la Figura 4-8 y el pH entre 4,8 (CON-21) a 8 (CB-3), con valores más ácidos (a excepción del CON-21) en los sondajes más cercanos al rajo Catabela (QSG08-431 y QSG08-493), posiblemente debido a la interacción de las aguas con minerales sulfurados (pirita y calcopirita) en las zonas de mayor mineralización. Las aguas de procesos quedan representadas por las muestras MSG-1, de las aguas claras del depósito de relaves y Pis, de las piscinas de agua de mar. Como se aprecia en el gráfico las muestras de los pozos CB-7 y CB-8 tienen una mayor CE que la muestra MSG-1, evidenciando una salinización a través del terreno hasta infiltrarse a los pozos, posiblemente por disolución de sales en los depósitos aluviales y caliche que conforman los primeros ~15 m del sector. Las aguas de menor CE se ubican en los depósitos aluviales y parte superior de las unidades de roca de Pampa Lina (CB-2, CB-3 y QSCSG6-237), valores que aumentan hacia el oeste donde se ubican todos los pozos y sondajes del sector mina y alrededores, donde el agua se encuentra en las unidades de roca (QSG08-402, QSG08-493, CB-10, CB-4, QSG08-431, CB-6, CB-5, CB-9, PDH-8, QSG09-605). En algunos pozos con más de una muestra se aprecia que la CE aumenta en profundidad, como se observa en las muestras obtenidas a 50 y 200 m de profundidad en el pozo CB-4. Hacia el suroeste, aguas abajo del depósito de relaves la salinidad es similar que en el sector mina, con valores de CE entre 62 y 82 mS/cm. El sondaje KP-DH10-40 muestra un anómalo valor de 15 mS/cm.

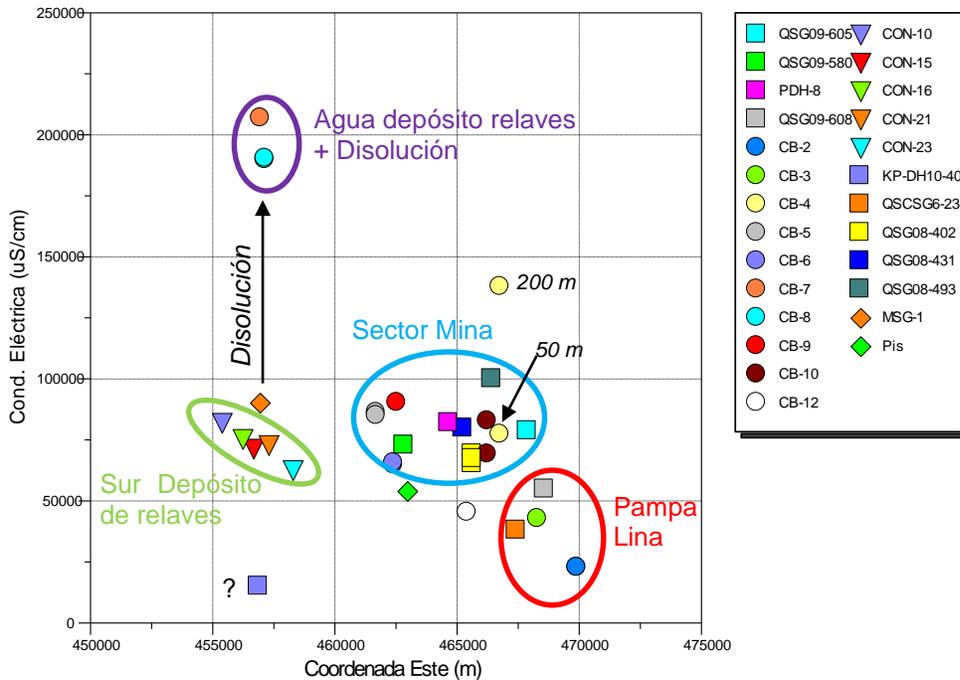
Se realizaron una serie de perfiles de conductividad eléctrica, temperatura y pH en distintos pozos y sondajes (Figura 4-9), antecedentes que son incluidos en Arcadis (2016a). De forma general el registro de CE muestra una tendencia ascendente en los primeros metros llegando a un valor que se mantiene estable en profundidad. En el sector de Pampa Lina esto se hace aún más evidente, mostrando valores estables en la unidad de depósitos aluviales, un aumento gradual de la CE y posteriormente estabilizándose en profundidad en las unidades de roca. El comportamiento creciente se interpreta producto de una zona de mezcla entre el agua de ambas unidades hidrogeológicas. La estabilización de la CE en las unidades de roca indicaría una homogeneización del agua aportada desde distintas fracturas, en un medio donde prevalece la baja permeabilidad.

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

A partir de estos valores se realizó una interpolación de los valores de CE y temperatura, dando como resultado la distribución en 3D que se muestran en la Figura 4-10 y Figura 4-11, respectivamente, a través de una sección este-oeste indicada en la Figura 4-9. De ambas figuras se aprecia que las menores temperaturas y CE (en colores azul y celeste) se encuentran en el sector de Pampa Lina asociado a la unidad de depósitos aluviales. Hacia el oeste, se aprecian valores más altos de CE y una anomalía de mayor temperatura (en colores rojos) en el sector de los cerros que separan a Pampa Lina de la zona de la mina, valores que descienden hacia el oeste.

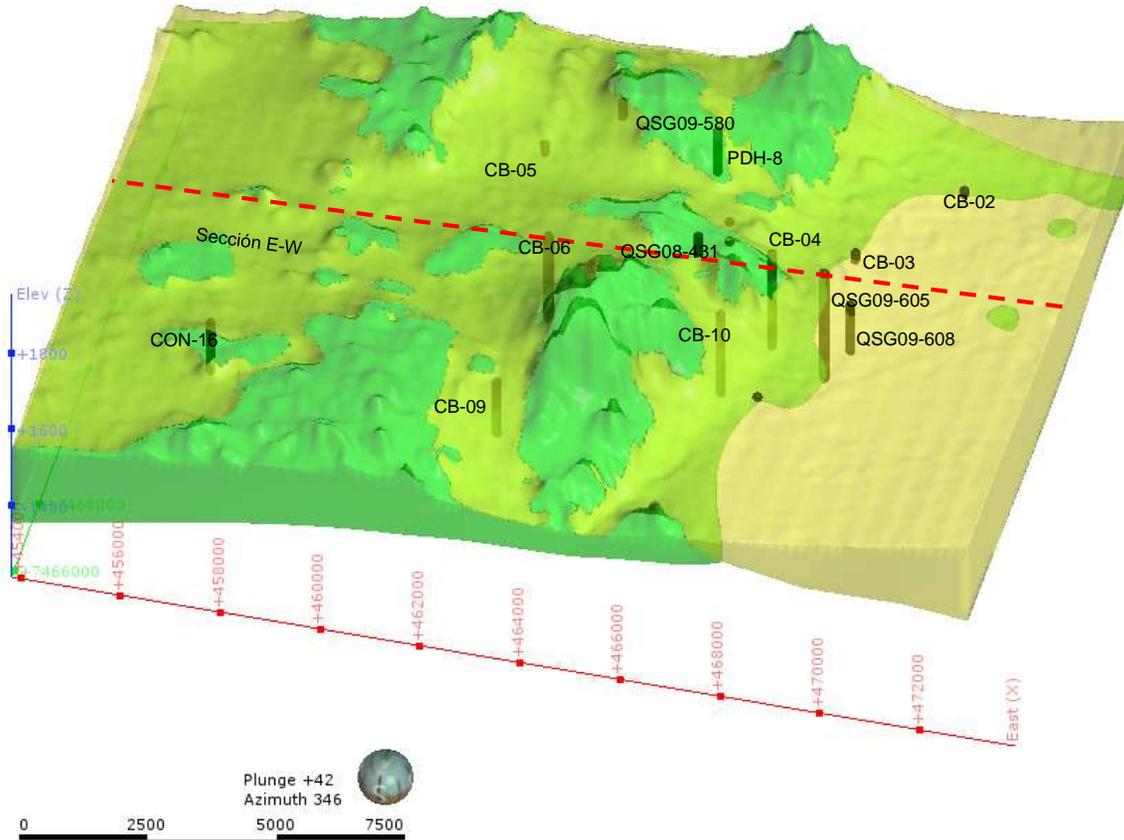
Las anomalías de CE y temperatura coinciden con el mayor potencial hidráulico y gradiente ascendente en estos cerros y que se interpreta producto de una zona de mayor permeabilidad, otorgada posiblemente por el sistema estructural de orientación norte-sur que se ha descrito en otros trabajos y que permitiría el ascenso de fluidos de mayor profundidad y salinidad hacia niveles más someros en las unidades de roca, efecto que ya ha sido descrito el sector de Spence (Leybourne y Cameron, 2006).

Figura 4-8. Conductividad eléctrica de muestras con respecto a la coordenada Este.



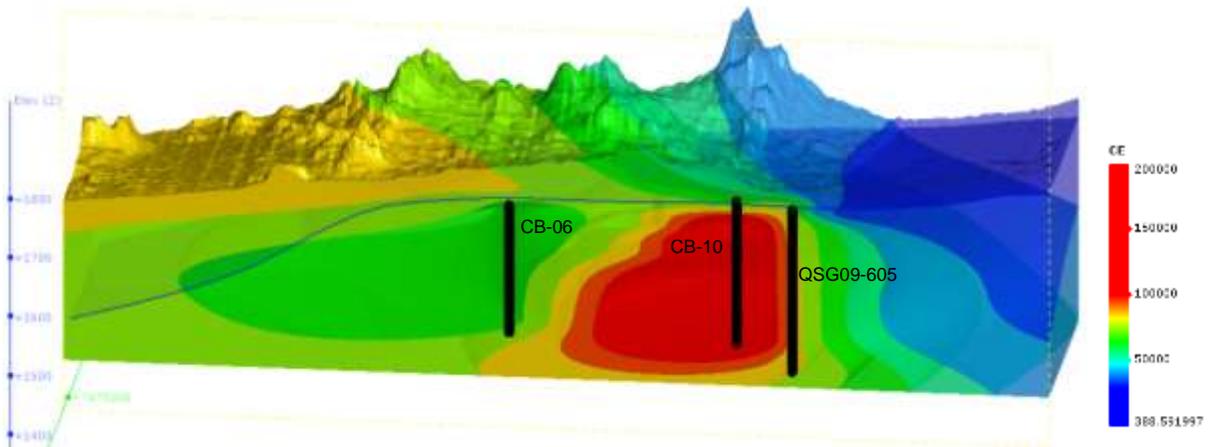
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-9. Vista en 3D mostrando ubicación de pozos (en negro) con perfiles de CE-pH-Temp. La línea roja muestra la ubicación de las secciones mostradas en la Figura 4-10 y Figura 4-11.



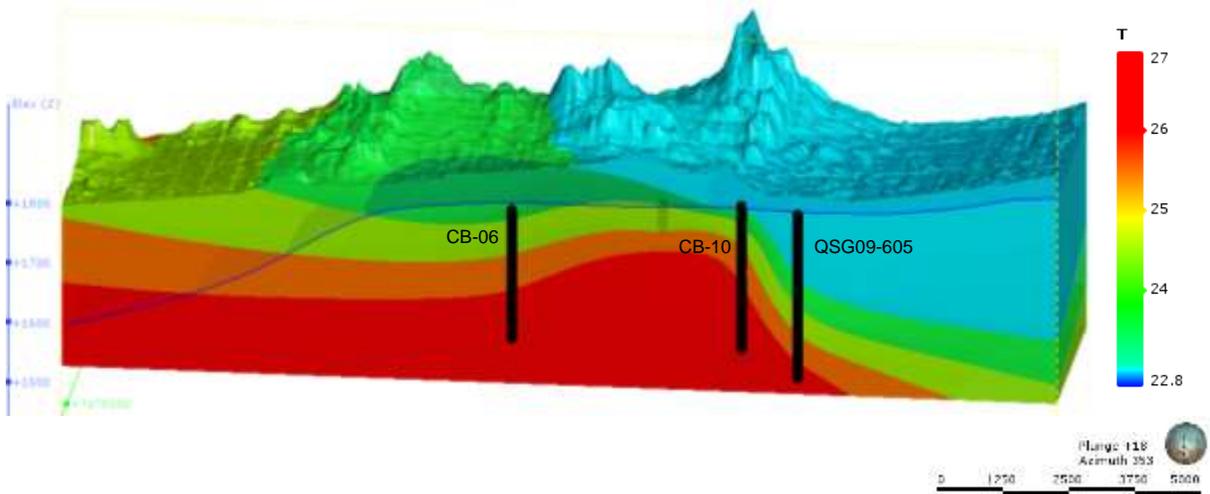
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-10. Perfil E-W con resultado de interpolación de conductividad eléctrica ($\mu S/cm$).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-11. Perfil E-W con resultado de interpolación de temperatura ($^{\circ}C$).



Fuente: Elaboración propia.

4.5.2 Hidroquímica de iones mayores

La composición dominante del agua es clorurada sódica (Cl-Na), tanto en los depósitos aluviales donde tiene menor salinidad (CB-2, CB-3 y QSCSG6-237) y en la unidad de roca (QSG08-608) de Pampa Lina, como en las unidades de roca del sector del rajo Catabela (QSG08-431 y QSG08-493) y aguas abajo de este (CB-5, CB-6, QSG08-402, QSG09-580, PDH-8), tal como se muestra en el diagrama de Piper de la Figura 4-12 y en el mapa con diagramas de Stiff de la Figura 4-13. Cercano a los cerros que dividen Pampa Lina del sector mina el pozo CB-10 y QSG09-605 muestran mayores concentraciones de Ca respecto a las muestras de los otros pozos del sector. Las muestras de los sondeos CON-15, CON-16 y CON-10, ubicadas aguas abajo del depósito de relaves, tienen una composición clorurada cálcica (Cl-Ca) a clorurada sódico-cálcica (Cl-Na-Ca), diferente al agua de los pozos más cercanos a la mina, lo que se atribuye a cierto grado de desconexión hidráulica entre ambas zonas.

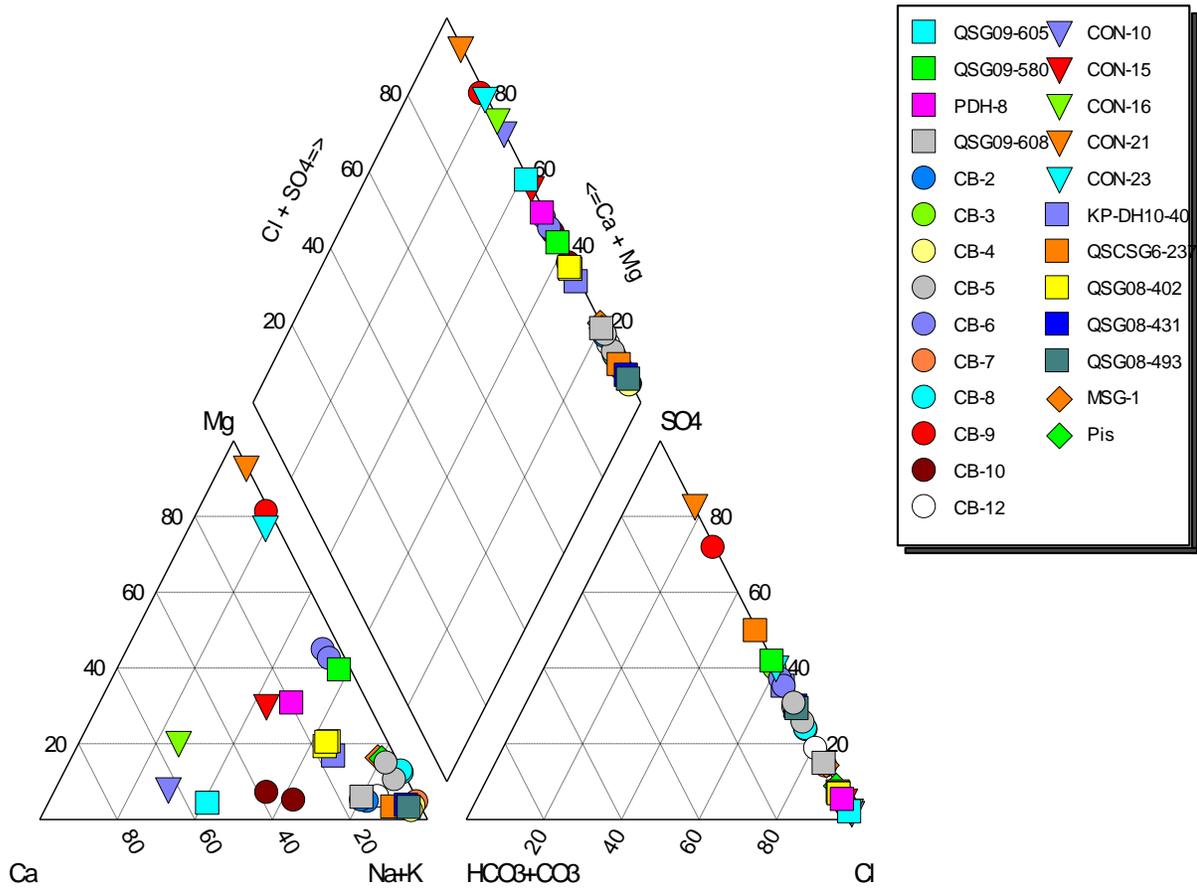
A pesar de su composición Cl-Na las aguas del sondeo QSG09-580 y el pozo CB-6 muestran evidentemente mayores concentraciones de sulfato y magnesio, respecto al agua de pozos cercanos. Si bien no se conoce la causa de estas concentraciones distintas al resto del agua, se cree que las estructuras de la zona, donde existen sistemas de fallas de orientación nor-noreste, conjugadas al sistema noroeste podrían otorgar algún grado de conexión entre estos pozos. A diferencia de todo el resto de las aguas, la composición del pozo CB-09 y sondeo CON-21 es sulfatada-magnésica (SO₄-Mg) y la del sondeo CON-23 clorurada a sulfatada-magnésica, como se aprecia en los diagramas de Stiff de la Figura 4-13.

La similitud en el agua de los pozos del sector mina (QSG08-431, QSG08-493, CB-4) con las del pozo CB-5, sugieren una conexión hidráulica preferente, consistente con la piezometría y el sistema estructural noroeste. La causa de la evidente mayor salinidad del agua del pozo CB-9 y CON-21, así como las diferencias en su composición química, se desconoce. En ambos pozos se han detectado comportamientos anómalos que podrían modificar la química del agua, debido a un nivel ascendente en el primero, y un animal muerto en el segundo, sin embargo el pozo CB-9 muestra una composición similar desde inicios de su monitoreo. No se descarta que la predominancia del sulfato se deba a factores geológicos, como la oxidación de sulfuros que fueron reconocidos durante la perforación.

La composición del agua del depósito de relaves y de los pozos CB-7, CB-8 es clorurada sódica, similar al agua natural del sector, tal como se parecía en la Figura 4-14. Sin embargo las aguas provenientes del depósito de relaves difieren en la salinidad (CE), en las concentraciones de algunos iones mayores, así como de elementos menores, respecto al agua natural del sector reflejada por los sondeos CON-15 y CON-16. De esto se desprende que la química es concluyente respecto a la identificación del agua proveniente del depósito de relaves y que esta no ha llegado al nivel de agua subterránea. Considerando las habilitaciones e inexistencia de sellos adecuados en el espacio anular de los pozos CB-8 y CB-7 el agua infiltrada desde el depósito de relaves debe estar entrando a los pozos a través del espacio anular.

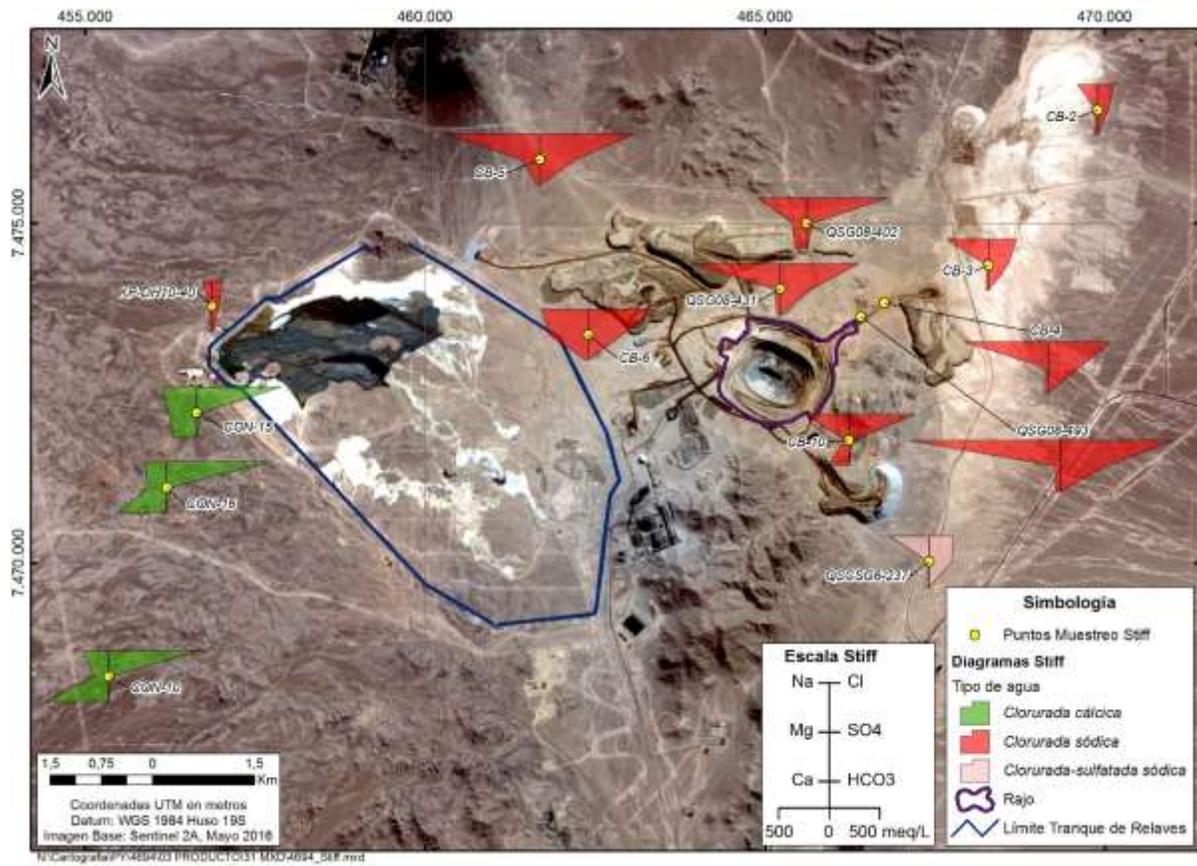
Los pozos que presentan agua infiltrada desde el depósito de relaves presentan una salinidad varios órdenes de magnitud mayor que las aguas del depósito mismo. Además, estas aguas se encuentran enriquecidas en cloruros, sodio y nitratos. Lo anterior se debe a que la infiltración de las aguas del depósito de relaves disuelve las sales y caliche presentes naturalmente en los depósitos aluviales de la zona. Este factor es relevante ya que esta disolución de sales produce una mayor permeabilidad en las gravas y arenas de forma local en esta zona.

Figura 4-12: Diagrama de Piper



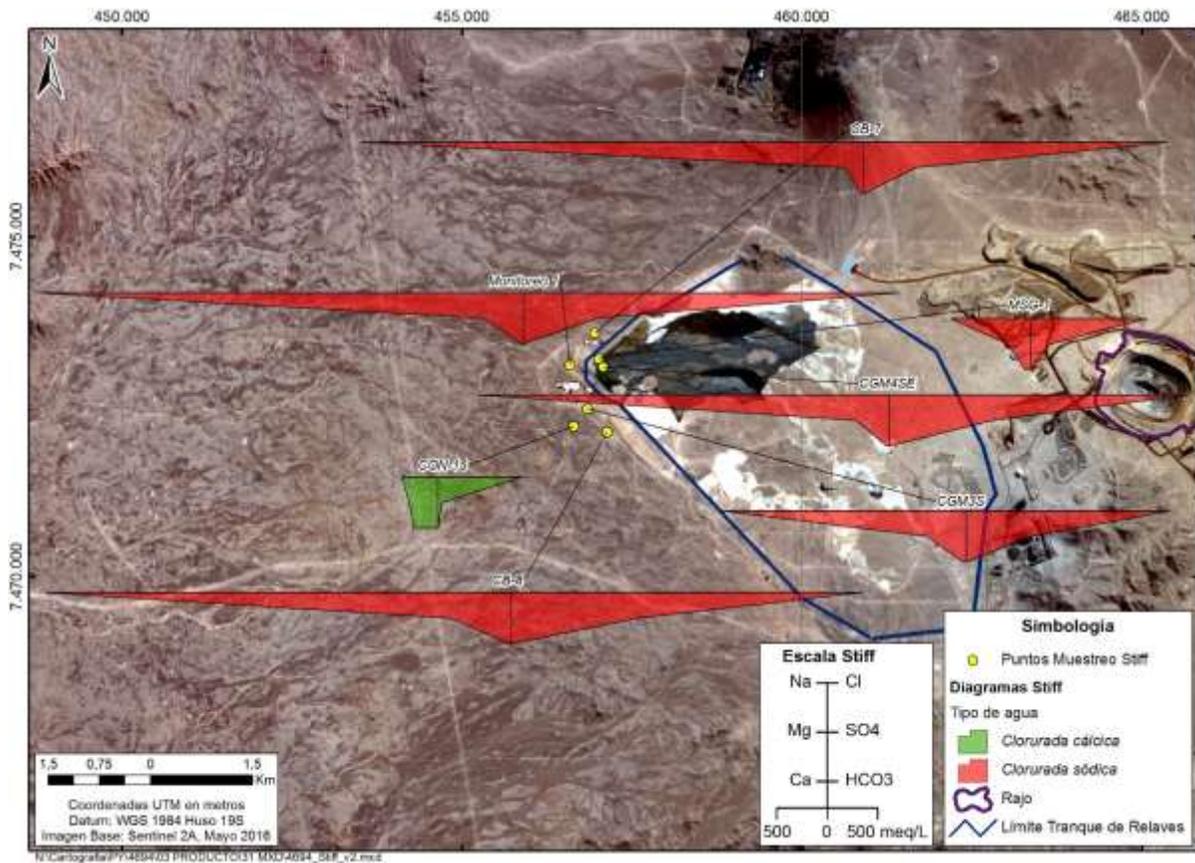
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-13: Mapa de diagramas de Stiff.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-14: Diagrama de Stiff. Pozos de monitoreo Deposito de relaves.



Fuente: Elaboración propia.

4.5.3 Isótopos estables de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$

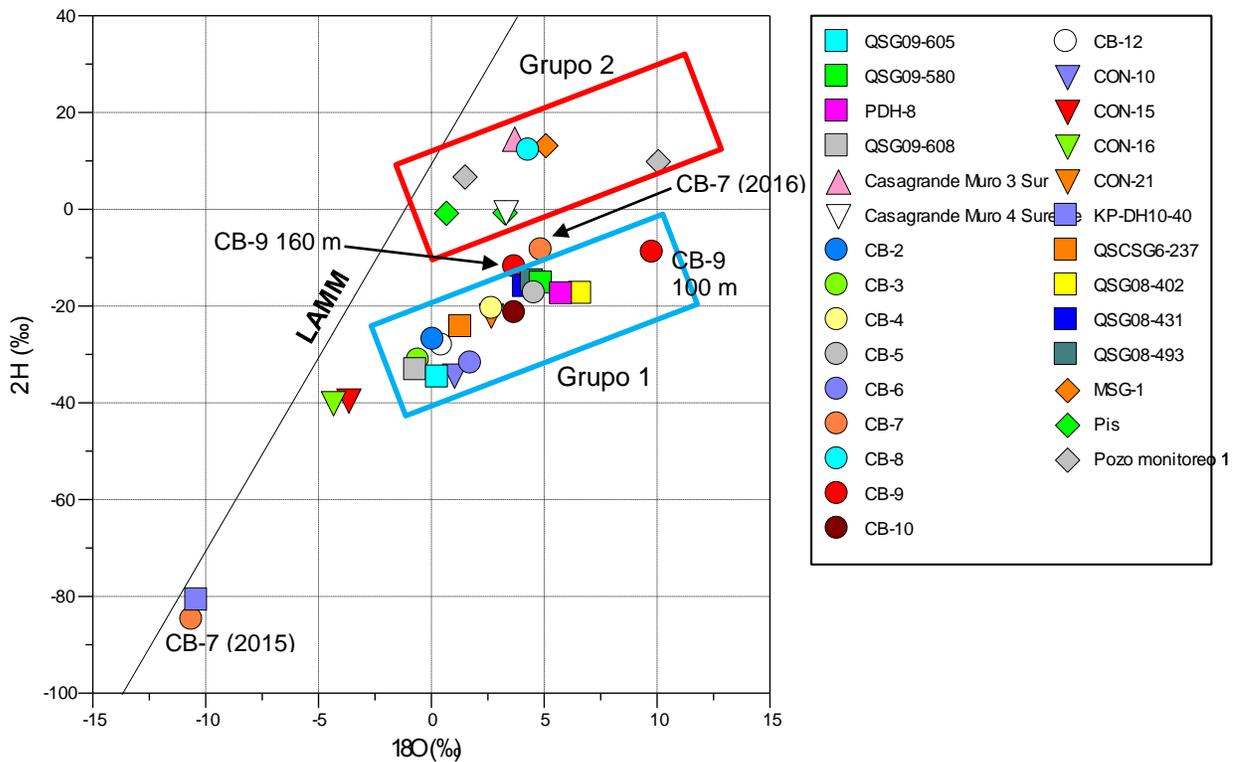
En la Tabla 4-6 se muestra el detalle de muestras obtenidas en distintos meses del 2016 y algunas del 2015 para análisis de isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, y en la Figura 4-15 se grafican en relación a la Línea de Aguas Meteoricas Mundial (LAMM: $\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+10$). De la figura se aprecia que la mayor parte de las muestras de pozos y sondajes se encuentran enriquecidas respecto a la LAMM y se agrupan de buena manera en torno a una línea de pendiente cercana a 3. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ varían entre -4,4 ‰ y 9,5 ‰ y los de $\delta^2\text{H}$ entre -39,9 ‰ y 14,7 ‰. A todas estas muestras se les ha denominado Grupo 1. Dentro del Grupo 1 las muestras de los depósitos aluviales y niveles superficiales de las unidades de roca del sector de Pampa Lina tienen una composición más ligera que las muestras ubicadas al poniente, en el sector mina y alrededores, donde el agua se encuentra en las unidades de roca. Con una composición isotópica más ligera que el Grupo 1 se encuentran las aguas del pozo CON-15 y CON-16, que se escapan a la tendencia general. Su composición más cercana a la LAMM podría estar reflejando el aporte de precipitaciones debido a la falta de sellos y tapas en los sondajes. La muestra del pozo KP10-DH40 tiene una composición evidentemente más empobrecida que el resto con $\delta^{18}\text{O}$ de -10,4 ‰ y $\delta^2\text{H}$ de -80,8 ‰, tal como se muestran en la y Figura 4-15.

En la misma Figura 4-15 se muestra otro grupo de muestras denominadas Grupo 2 y que se diferencian de las muestras del Grupo 1, principalmente, por su composición más enriquecida en $\delta^2\text{H}$. Dentro de estas, el agua del depósito de relaves tiene una composición en $\delta^{18}\text{O}$ de -5,02 ‰ y $\delta^2\text{H}$ de 13,4 ‰, mientras que la muestra de la piscina de agua de proceso (agua de mar), consistente con su origen, tiene una composición tanto en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ cercana a 0 ‰. Las muestras de los pozos de monitoreo de infiltraciones del depósito, ubicados en el muro (Casagrande Muro 3 Sur y Casagrande

Muro 4 Sureste), y en la zona no saturada aguas abajo del Muro 4 (Pozo monitoreo 1), tienen composiciones similares y levemente enriquecidas respecto al agua de proceso (agua de mar), consecuente con la evaporación y posiblemente debido a la disolución de minerales de la unidad aluvial. El agua del pozo CB-8 y de la muestra del 2016 del pozo CB-7 también se ubican dentro de este grupo reflejando el origen desde el depósito de relaves del agua al interior de los pozos. Respecto al pozo CB-7 una muestra de 2015 tenía una composición evidentemente más empobrecida que el resto y similar a la muestra del pozo KP-DH10-40, entregando dudas respecto al origen y representatividad del agua al interior de estos pozos.

Para el pozo CB-9, en marzo de 2016 se recogieron dos muestras, una cercana a los 100 m de profundidad y otra a los 160 m. La primera tiene una composición enriquecida en $\delta^{18}\text{O}$ respecto al resto de las aguas subterráneas, pero en la misma línea de tendencia, por lo que se incluye en las muestras del Grupo 1. Por el contrario, la muestra de los 160 m tiene una composición algo más enriquecida en $\delta^2\text{H}$ respecto al resto de las aguas de pozos, acercándose levemente a la composición de las aguas de proceso e infiltración (Grupo 2), sin embargo no es del todo concluyente respecto a su origen.

Figura 4-15. Relación isotópica $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ para muestras de pozos y agua de procesos.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-6: Parámetros físico-químicos y razones isotópicas para muestras del 2016.

Muestra	Fecha Muestreo	Temp	pH	Cond. Eléctrica	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) VSMOW		$\delta^2\text{H}$ (‰) VSMOW	
	Día	(°C)		mS/cm	Prom.	Desv.St	Prom.	Desv.St
CB-2	24/03/2016	21,26	8,05	20,27	0,08	0,07	-26,9	0,7
CB-3	24/03/2016	19,94	7,87	47,48	-0,57	0,15	-31,2	0,3
CB-4	24/03/2016	23,53	7,39	67,31	2,69	0,09	-20,5	0,3
CB-5	23/03/2016	22,49	7,56	73,28	4,08	0,09	-16,9	0,3
CBR-5 (duplicado CB-5)	23/03/2016	-	-	-	4,59	0,09	-16,5	0,4
CB-6	24/03/2016	24,44	7,43	58,48	1,74	0,03	-31,8	0,5
CB-7	23/03/2016	24,63	6,57	177,2	4,87	0,03	-8,4	0,3
CB-8	23/03/2016	23,53	7,06	163,9	4,31	0,14	12,2	0,4
CB-9 (100 mts)*	23/03/2016	25,21	7,16	78,75	9,80	0,20	-8,90	0,90
CB-9 (160 mts)*	23/03/2016	24,92	7,43	87,34	3,70	0,3	-11,9	1,1
CB-10	24/03/2016	24,81	7,40	62,12	3,69	0,1	-21,4	0,5
CB-12	23/03/2016	24,16	7,54	41,73	0,46	0,16	-28,1	0,7
CON-10	22/03/2016	24,41	6,59	74,57	0,97	0,15	-34,2	0,7
CON-15	23/03/2016	25,03	6,82	61,97	-3,71	0,15	-39,4	0,5
CON-16	23/03/2016	25,28	6,83	66,44	-4,39	0,23	-39,9	0,5
CON-21*	22/03/2016	25,31	4,92	68,63	2,60	0,80	-21,8	1,2
KP-DH10-40*	23/03/2016	25,12	7,43	13,19	-10,39	0,14	-80,8	0,4
QSCSG6-237	23/03/2016	21,89	8,01	34,05	1,31	0,07	-24,3	0,4
QS-23 (duplicado QSCSG6-237)*	23/03/2016	-	-	-	0,89	0	-29	0,9
QSG08-402	24/03/2016	22,63	6,84	61,93	6,95	0,05	-16,8	0,2
QSG08-431	24/03/2016	24,36	6,29	72,17	4,13	0,2	-16	0,5
QSG08-493	24/03/2016	24,44	5,34	82,43	4,48	0,13	-14,8	0,2
Pozo de monitoreo 1*	22/03/2016	24,91	6,24	184,6	8,65	0,35	6,9	1,3
P1D (duplicado Pozo de monitoreo 1)*	22/03/2016	-	-	-	9,48	0,30	10,1	1,5
Casagrande muro 3-sur	22/03/2016	28,33	7,58	161,5	3,64	0,12	14,73	0,37
Casagrande muro 4-sureste*	22/03/2016	25,35	7,30	172,4	3,26	0,14	-0,50	0,30
Laguna depósito de relaves*	22/03/2016	24,28	7,87	78,47	5,02	0,21	13,4	0,96
Piscina agua mar*	22/03/2016	27,11	7,54	49,50	0,62	0,19	-0,6	0,18
CB-9(150m)_0516	16/05/2016	26,8	7,26	76,84	5,58	0,05	-12,6	0,3
QSG08-402(138m)_0616	21/06/2016	22,61	7,42	58,76	6,62	0,08	-17,4	0,2
QSG09-580_0616	21/06/2016	23,03	6,86	65,68	4,88	0,03	-15,3	0,3
CB-5_0616	23/06/2016	24,34	6,80	78,46	4,57	0,13	-17,3	0,3
QSG09-608_0616	24/06/2016	23,77	5,08	51,47	-0,69	0,07	-33,2	0,3
QSG09-605_0616	25/06/2016	18,28	8,15	76,46	0,28	0,07	-34,7	0,3
PDH-8_0616	27/06/2016	24,72	6,40	74,85	5,77	0,11	-17,5	0,2

*Análisis con espectrómetro de masa de razón isotópica (IRMS)

Fuente: Elaboración propia.

4.6 Balance Hídrico

A continuación, se analizan las entradas y salidas del sistema hidrogeológico que abarca el área de modelación numérica, donde se establecen rangos de caudales para el balance hídrico. La incertidumbre asociada a la estimación de los distintos componentes del balance hídrico es alta, debido a factores como la falta de estaciones meteorológicas en la cuenca, que permitan definir un gradiente altitudinal de las precipitaciones, e incertidumbre de todos los métodos indirectos para la estimación de recarga, valores de permeabilidad representativos en las unidades de roca, información geológica de subsuperficie, entre otros. Es por ello que los resultados propuestos deben ser leídos como una aproximación conceptual y reevaluados en la medida que se genere nueva información.

4.6.1 Entradas

La zona en estudio no presenta escurrimientos permanentes, y tampoco se observa evidencia de quebradas o cauces con escurrimientos intermitentes en la zona del Proyecto. Esta condición se explica por las condiciones de extrema aridez de la zona, con precipitaciones medias anuales inferiores a 5 mm y sobre 95% del año con ausencia de eventos de precipitación. Los escasos eventos de precipitación no son capaces de producir recarga a los acuíferos, ya que al ser tan esporádicos y de baja magnitud, el agua disponible solo humedece las primeras capas de suelo no generando las condiciones necesarias de frente húmedo para que el agua sea capaz de llegar a zonas saturadas. Posterior al evento de precipitación, la humedad del suelo vuelve a la atmósfera por efectos de la evaporación.

Por lo tanto, la recarga al sistema se encuentra asociada exclusivamente a la recarga lateral proveniente desde el este, que sólo involucra la unidad aluvial en el sector de Pampa Lina. Las precipitaciones son prácticamente inexistentes por lo que se ha desestimado la recarga por infiltración directa. Por otra parte, como se mencionó en el capítulo de hidroquímica e isótopos, las infiltraciones desde el depósito de relaves no han llegado al nivel del agua (en roca) y se encuentran restringidas a la cubierta aluvial del sector, naturalmente no saturada, por lo que no se les considera en el balance.

A partir de la piezometría confeccionada en Pampa Lina y los rangos de conductividad hidráulica estimadas para la unidad de sedimentos aluviales, se ha estimado mediante la ecuación de Darcy una entrada de entre 0,5 y 10 L/s (dependiendo de la permeabilidad, gradiente y espesor saturado utilizado para la estimación). Esto es sólo una fracción de la recarga estimada para toda la cuenca aportante a Pampa Lina (25 – 60 L/s, ver Anexo A). En el estudio de impacto ambiental de Spence (“Minerales Primarios Minera Spence”, del año 2015, actualmente en evaluación ambiental), ubicado inmediatamente al NE de Pampa Lina, se ha estimado un rango de caudal subterráneo del mismo orden (0,3 – 8,5 L/s).

4.6.2 Descargas

De acuerdo a los antecedentes, la descarga de los recursos subterráneos se produce mediante tres mecanismos, que corresponden a extracciones desde pozos de bombeo en el sector de Pampa Lina, el agua que drena y es evacuada desde el rajo Catabela y los flujos de agua subterránea que salen lateralmente del área del modelo. Respecto a estos últimos, debido al gradiente hidráulico se han reconocido en Pampa Lina, hacia el norte y sur, y a través de la unidad de rocas en el sector nor-nororiental del rajo, con una gradiente hacia el norte. Debido a la profundidad del agua subterránea no existe descarga por evaporación.

4.6.2.1 Extracciones

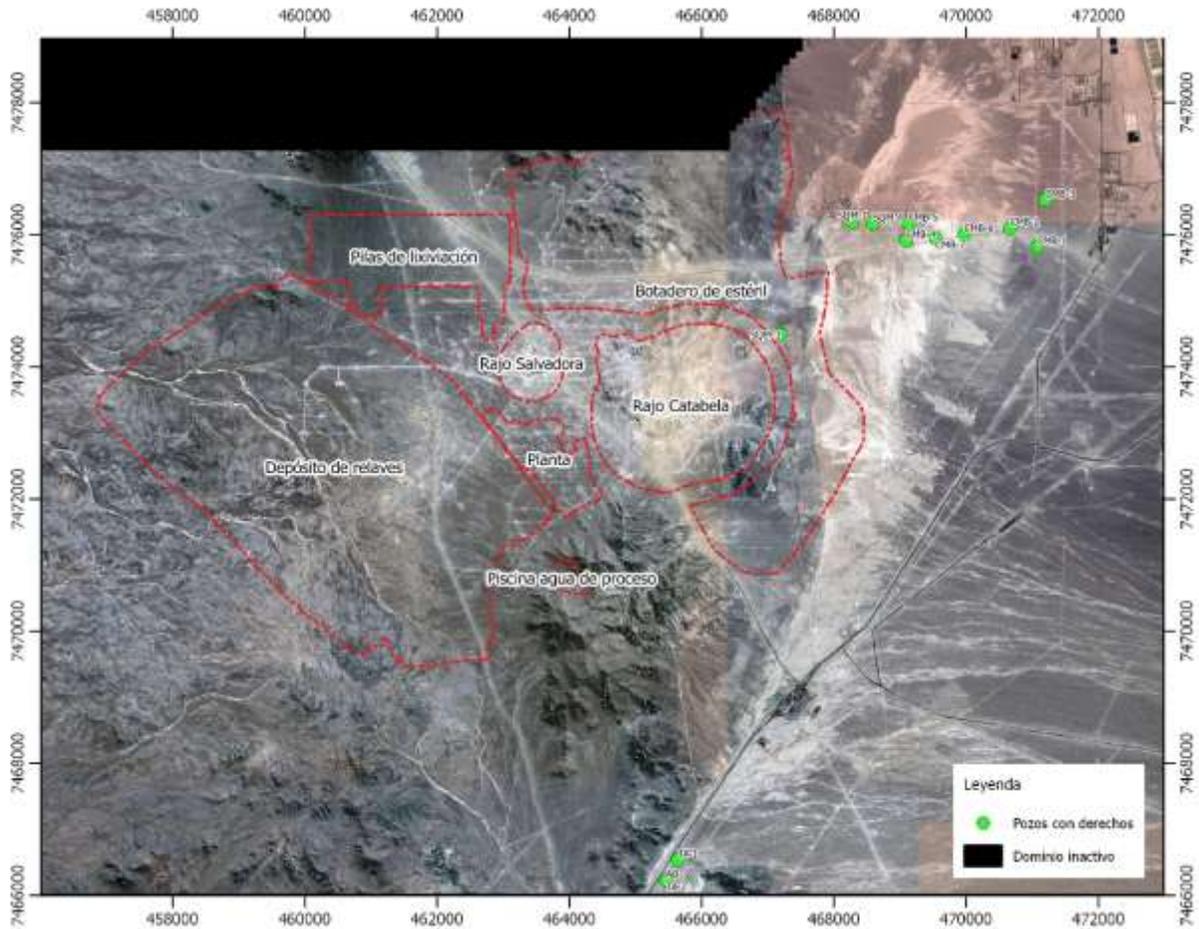
En el área de estudio existe un total de 40,9 L/s de derechos otorgados (todos ubicados en Pampa Lina), de los cuales 40,2 L/s pertenecen a Sierra Gorda y que anteriormente pertenecieron a Compañía Minera el Bronce (29,3 L/s) y Sociedad Química y Minera de Chile, SQM (10,9 L/s). Los 0,7 L/s restantes pertenecen a Transporte Antofagasta y están ubicados aguas abajo de las instalaciones de Sierra Gorda. En la Tabla 4-7 se detalla el catastro de captaciones que presentan derechos en el

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

área de estudio y la Figura 4-16 muestra la ubicación de las captaciones que presentan derechos de aguas subterráneas en el área de estudio.

En el Inventario Público de extracciones Efectivas (DGA) de la región de Antofagasta, se tiene que sólo Compañía Minera el Bronce extrae agua en el área de estudio a partir de cuatro pozos, con un total de extracción de 4,6 L/s de caudal medio mensual, para un periodo reportado entre enero de 2013 a septiembre de 2014 (Tabla 4-7). Para los pozos de Sierra Gorda SCM, antes de SQM, no se tienen extracciones durante el periodo reportado entre enero de 2008 y marzo de 2014. La empresa Transporte Antofagasta no realizó declaración de caudal de extracciones.

Figura 4-16: Ubicación de pozos con derechos en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-7: Catastro de Derechos de Agua en el área de estudio

ID_Pozo	Nombre Pozo	Nombre Solicitante	Código de Expediente	Coordenadas PSAD 56 19 S			Declaración DGA			Factor de uso (*)	Observaciones
				Norte	Este	Derechos	Promedio Caudal	Máximo	Periodo Declaración		
CMB-1	Pozo N°1	SIERRA GORDA S.C.M.	ND-0203-338	7.475.818,5	471.080,5	6	0,7	3,5	2013-2014	4,5	
CMB-2	Pozo N°2	SIERRA GORDA S.C.M.	ND-0203-338	7.476.102,6	470.688,8	4	3,3	4,3	2013-2014	3	
CMB-5	Pozo N°3	SIERRA GORDA S.C.M.	ND-0203-987	7.476.524,0	471.200,0	1,6	0	0	2013-2014	1,2	
CMB-6	Pozo N°5	SIERRA GORDA S.C.M.	ND-0203-987	7.475.912,0	469.089,0	4	0	0	2013-2014	3	
CMB-7	Pozo N°6	SIERRA GORDA S.C.M.	ND-0203-987	7.476.171,0	469.136,0	2,2	0	0	2013-2014	1,7	
CMB-3	Pozo N°7	SIERRA GORDA S.C.M.	ND-0203-966	7.476.004,6	469.975,0	7	0,5	3	2013-2014	5,3	
CMB-4	Pozo N°8	SIERRA GORDA S.C.M.	ND-0203-966	7.475.943,8	469.540,1	4,5	0,1	1,5	2013-2014	3,4	
SG-1	Loreto 4	SIERRA GORDA S.C.M.	ND-0203-800094	7.476.169,0	468.589,0	4,6	0	0	2008-2014	3,4	Antes SQM
SG-2	Loreto 1	SIERRA GORDA S.C.M.	ND-0203-800097	7.476.199,0	468.282,0	1,5	0	0	2008-2014	1,1	Antes SQM
SG-3	Loreto 3	SIERRA GORDA S.C.M.	ND-0203-800098	7.474.488,0	467.194,0	4,9	0	0	2008-2014	3,7	Antes SQM
TA-1		TRANSPORTES ANTOFAGASTA	ND-0203-800060	7.466.540,0	465.640,0	0,4				0,3	sin declaración
TA-2		TRANSPORTES ANTOFAGASTA	ND-0203-800062	7.466.230,0	465.465,0	0,3				0,2	sin declaración
		Total				40,9	4,6			30,7	

Fuente: DGA y Elaboración Propia.

(*) Caudal de derecho de aprovechamiento por 0,75

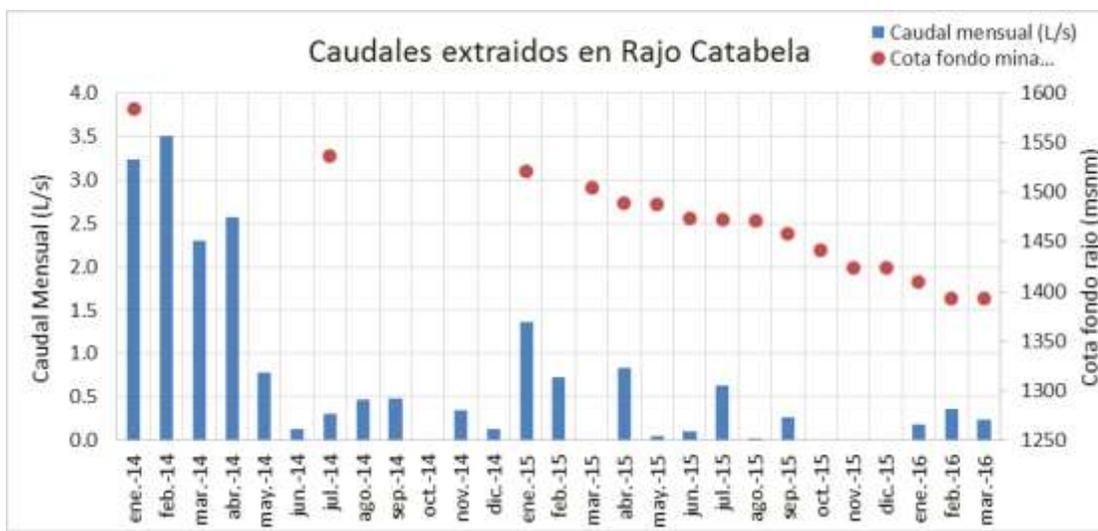
4.6.2.2 Afloramientos de agua en rajo Catabela

La etapa de *pre-stripping* del rajo Catabela empezó a fines de 2011 y dos años después se interceptó el nivel de agua subterránea a la cota de 1.600 msnm aproximadamente, encontrando agua en los pozos de tronadura. A enero de 2015, los principales afloramientos e infiltraciones de agua se encontraban en el sector este y sur-este del rajo con presencia de agua en la perforación de pozos de tronadura, además afloramientos y percolaciones de agua con un flujo menor a 0,1 L/s en la pared sur-este del banco 1600 y la pared noreste. Como medida se instaló una piscina en el sector sur-este para evacuar el agua mediante una motobomba a camiones aljibes, usándola para el riego de caminos (VAI, 2015). Las estimaciones del caudal que drena hacia el rajo provienen del volumen de agua trasladado por camiones aljibes y se muestra a nivel mensual en la Figura 4-17. Con datos disponibles desde enero de 2014 se aprecia en la Figura 4-17 que en un inicio (desde enero a abril del 2014), los caudales superaron los 2 L/s de caudal y posteriormente se han mantenido por debajo de 1 L/s, a excepción de enero del 2015, con un promedio de 0,4 L/s, tal como se observa en la Figura 4-17.

Los caudales mínimos y máximos de extracción del rajo Catabela son 0 y 3,5 L/s respectivamente, con una media de 0,71 L/s. Debido a que no ocurre recarga directa por precipitación en el sector, este volumen de agua extraída corresponde principalmente a almacenamiento.

Como se mencionó en el capítulo de la piezometría, en los cerros ubicados al este del rajo se aprecia un alto en la cota piezométrica lo que induce un flujo hacia el mismo rajo. No se tienen antecedentes suficientes para determinar la causa de la mayor altura del agua en este sector, sin embargo, se podría deber a remanentes de una recarga por precipitaciones almacenados en la roca desde períodos anteriores y algún aporte menor de origen más profundo, como queda evidenciado a través de gradientes verticales ascendentes en piezómetros de cuerda vibrante del sector y ya se ha sugerido en Spence (Leybourne y Cameron, 2006).

Figura 4-17: Caudales de extracción mensual en rajo Catabela



Fuente: Elaboración propia.

4.6.2.3 Flujos subterráneos

En Pampa Lina, una fracción del agua subterránea que ingresa lateralmente por el este (y una parte menor por el norte), es bombeada en los pozos de Pampa Lina. Este bombeo es variable en el tiempo y tiene asociado un cono de depresión local. El agua que no es bombeada en Pampa Lina sale hacia el sur-suroeste de forma subterránea del área del modelo numérico. En el sector del rajo las salidas subterráneas del área del modelo numérico corresponden al escaso flujo en roca fracturada, el cual se ha estimado en el rango 0,01 a 0,3 L/s.

4.7 Síntesis del Modelo Conceptual

El proyecto minero Sierra Gorda está emplazado sobre unidades de rocas volcánicas e intrusivas del Cretácico al Paleoceno, las cuales están cubiertas por depósitos aluvio-coluviales cenozoicos, que tienen su mayor espesor y relevancia en el sector de Pampa Lina. Existen un rasgo estructural de dirección principal norte-sur que separa el sector de Pampa Lina por el oriente (donde existe mayor desarrollo de la cubierta sedimentaria), del sector del proyecto propiamente tal en el oeste, donde se ubican el rajo Catabela, botaderos de estériles, depósito de relaves e instalaciones, y la cubierta sedimentaria es de reducido espesor y no se encuentra saturada. El funcionamiento hidrogeológico de la zona está condicionado por este rasgo estructural, que separa dos dominios hidrogeológicos y que con la información disponible a la fecha se interpretan como independientes.

Las precipitaciones en la zona son prácticamente inexistentes (menos de 1 mm/a en estación Sierra Gorda) por lo que la única entrada natural de aguas subterráneas corresponde al flujo subsuperficial proveniente del este y asociado a la cuenca definida por la quebrada de los Arrieros, que llega a alturas máximas de 4.235 msnm, donde las precipitaciones son mayores, así como la recarga. Se estima que la recarga en la cuenca es del orden de 25 a 60 L/s, sin embargo, sólo una parte de esta agua fluye subterráneamente hacia el sector de Pampa Lina, habiendo una proporción importante que fluiría hacia el suroeste, por fuera de la zona del modelo.

El área se ha conceptualizado en base a 3 unidades hidrogeológicas principales, de base a techo; el basamento rocoso, roca fracturada-meteorizada y depósitos aluviales superficiales. El flujo subterráneo en el sector de Pampa Lina ocurre principalmente a través de los depósitos aluviales, donde se ha reconocido la presencia de un acuífero libre (en el entorno de los pozos de los cuales se tiene información) con una conductividad hidráulica entre 0,1 y 5 m/d. El agua de este acuífero tiene una salinidad (TDS) menor a 20 g/L y composición principalmente clorurada sódica. En los pozos más orientales de Pampa Lina, esta composición varía a clorurada-sulfatada sódica. El flujo subterráneo proveniente del este es captado en parte por extracciones de terceros en el sector de Pampa Lina (~ 5 L/s informados a la DGA), donde se genera un cono de depresión local, además de una componente que fluye hacia el sur a través de los mismos depósitos. Los antecedentes piezométricos indican que existe una divisoria de aguas subterráneas en la unidad de roca entre Pampa Lina por el este y el sector mina por el oeste, que impediría un flujo lateral de este a oeste. Sin embargo la información piezométrica de detalle es muy local, no se conoce la situación hacia el norte así como la conectividad entre las fracturas en la roca que podrían inducir este flujo. En caso de existir esta componente se considera despreciable.

En el sector occidental, donde se ubica el proyecto, los depósitos aluviales se encuentran secos, siendo la unidad de roca fracturada la de mayor relevancia hidrogeológica. Ensayos hidráulicos de corta duración indican valores de conductividad hidráulica entre los 10^{-5} y 10^{-1} m/d.

En los cerros que dividen superficialmente el sector de Pampa Lina de la zona de la mina, existe un nivel piezométrico en la roca más elevado que en los alrededores, además de un gradiente vertical ascendente. Esto es consistente con anomalías de mayor temperatura (Figura 4-18) y conductividad

eléctrica en el sector, evidenciando aportes de agua desde mayor profundidad a los niveles de roca más someros. Este flujo ocurriría a través del sistema estructural principal norte-sur que otorga una mayor permeabilidad a la roca y que permite el ascenso de fluidos almacenados a mayor profundidad en la roca, posiblemente con un importante período de residencia medio y salinidad, hacia los niveles más someros en la roca (Figura 4-18). El mayor potencial hidráulico en estos cerros induce un flujo reducido de agua hacia el este (sector mina) y oeste (Pampa Lina) a través de la roca. Hacia el oeste de estos cerros se encuentra el rajo Catabela, donde desde el 2014 a la fecha han aflorado 0,7 L/s en promedio, sin embargo, el mayor flujo, cercano a 3 L/s, ocurrió a inicios del 2014 cuando el fondo de la mina se encontraba entre los 1600 y 1450 msnm. Posteriormente el agua no ha superado los 0,5 L/s. En general los niveles piezométricos en el sector del rajo son muy similares y con gradiente hidráulico casi inexistente, por ende, un flujo muy reducido (<0,5 L/s) con una dirección principal hacia el norte y noroeste de la zona de la mina.

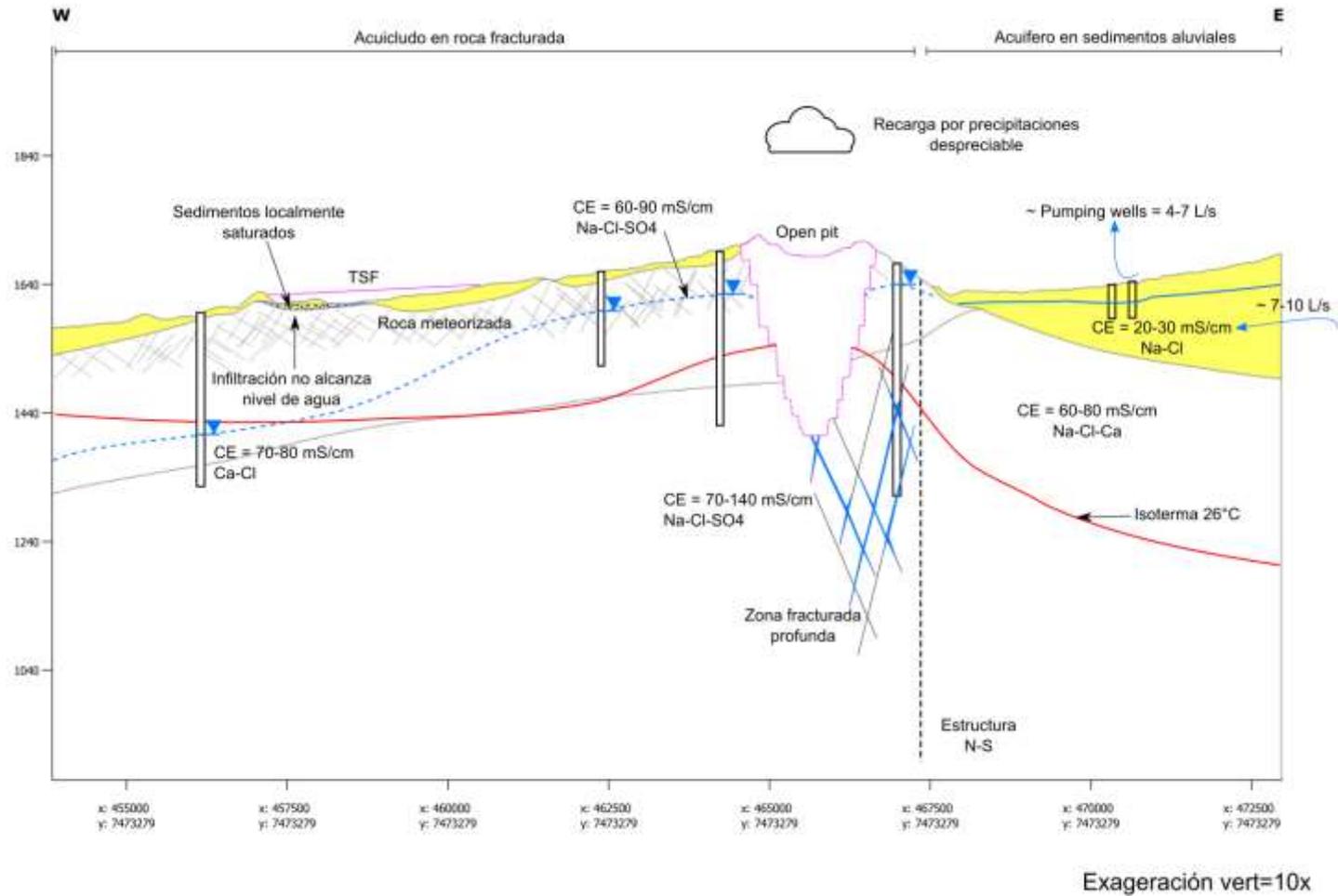
Hacia el oeste y suroeste de la mina y más cercano al depósito de relaves las curvas equipotenciales muestran un gradiente pronunciado en un medio aún de menor permeabilidad en la roca (ver zona oeste en Figura 4-18). La información química e isotópica sostiene, junto con el considerable menor nivel, un comportamiento aislado de este sector respecto a la zona de la mina. El mayor gradiente estaría dado por la menor permeabilidad de las rocas intrusivas que dominan el sector, sin embargo, esta baja permeabilidad sugiere que en esta zona el flujo sería aún más restringido o simplemente inexistente.

De todo lo anterior se desprende que, en el dominio hidrogeológico occidental, ubicado al oeste de los cerros que limitan el rajo Catabela de Pampa Lina, el agua se almacena en fracturas producto de antiguos eventos de recarga y por aportes de agua ascendente desde mayor profundidad a través de estructuras. Los caudales asociados a estos flujos son muy reducidos, reflejando la baja permeabilidad y dificultad de transmisión del agua subterránea, lo que conceptualmente se asemeja al funcionamiento de un acuícludo y no al de un acuífero. Lo anterior sumado a una recarga actual por precipitaciones prácticamente inexistente se refleja además en la alta salinidad del agua en la roca, con valores de TDS entre 20 y 100 g/L, muy por sobre la del acuífero aluvial en el sector de Pampa Lina y mayor al agua de mar. La composición del agua en la roca varía entre sectores cercanos, siendo del tipo clorurada sódica en los alrededores del rajo y clorurada cálcica aguas abajo del depósito de relaves, lo que es consistente con la desconexión hidráulica antes planteada.

En la Figura 4-18 se presenta un esquema de orientación E-W que abarca toda el área de estudio. En el esquema se muestran los principales factores y conceptualizaciones explicados en el modelo conceptual. Se destacan las ubicaciones del rajo Catabela y depósito de relaves. Es importante recalcar la variabilidad que se puede observar en las cotas piezométricas dependiendo de la profundidad de los sondajes y el sistema de fracturas que interceptan.

Con la información disponible se han hecho una serie de aproximaciones y simplificaciones a la geometría y disposición de las unidades geológicas en tres unidades hidrogeológicas de forma de construir un modelo numérico que simule el sistema hidrogeológico.

Figura 4-18: Modelo conceptual. Esquema en sección E-W



*Se muestra en amarillo la unidad hidrogeológica de depósitos aluviales.
Fuente: Elaboración propia.

5 MODELO DE INFILTRACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE RELAVES

5.1 Enfoque y código de modelación

Para estimar las infiltraciones que se han producido desde el depósito de relaves y la potencial recarga al acuífero subyacente se ha realizado una modelación numérica bidimensional, empleando el código SEEP/W 2012 (Geo-Slope, 2014), el cual permite simular el flujo en condiciones de saturación variable, incorporando geometrías complejas gracias a su formulación matemática de elementos finitos.

Para el desarrollo de la modelación se llevaron a cabo las siguientes sub-actividades:

- Definición del trazado y construcción de los perfiles bi-dimensionales que permiten representar el crecimiento del depósito de relaves de acuerdo a las batimetrías existentes.
- Caracterización de las propiedades hidráulicas de las distintas unidades de materiales del depósito y del suelo natural subyacente.
- Implementación de un modelo numérico de flujo sobre la plataforma Geo-Studio 2012, usando el código SEEP/W, para evaluar la infiltración en la base del depósito (infiltración al subsuelo) y la recarga que alcanzaría al acuífero.
- Simulación en régimen permanente para definir la condición inicial del sistema, previo a la entrada en operación del depósito de relaves.
- Simulación en régimen transiente que considera un total de 609 días.

A través del enfoque bi-dimensional de modelación se obtienen estimaciones de tasas de infiltración por metro lineal de ancho unitario ($m^3/d/m$), por lo que para obtener el caudal total de infiltración (m^3/d ó L/s) se definen anchos representativos de cada perfil.

5.2 Construcción del modelo numérico

5.2.1 Crecimiento del depósito de relaves

El diseño y ejecución del depósito de relaves comprende, para cada etapa de crecimiento, la delimitación y curvas de nivel del relave, así como la ubicación y extensión de la laguna de aguas claras. En este diseño se ha considerado la existencia de una geomembrana que impermeabiliza parte del fondo del depósito y de la laguna de aguas, cuya extensión se definió en base a condiciones hidrológicas normales (es decir, sin eventos extremos de precipitación). Además, se presenta el diseño de los muros que rodean el depósito, donde se considera para su construcción la utilización de relleno común proveniente de empréstitos y la impermeabilización mediante geomembrana del talud en contacto con el relave.

De acuerdo a la información proporcionada, la construcción del modelo numérico contempla 9 etapas de crecimiento: 5 a escala mensual durante el año 2014 (desde agosto hasta diciembre), 3 separadas cada 4 meses (abril, agosto y diciembre de 2015) y la última etapa muestra marzo de 2016.

A modo de referencia, la Tabla 5-1 detalla el crecimiento del depósito de relaves en términos de volumen de relaves almacenado y área cubierta por los mismos, además se indica el área de relaves impermeabilizada con geomembrana.

Tabla 5-1: Crecimiento del depósito de relaves

Año	Área relaves (ha)	Área Laguna (ha)	Área Geomembrana (ha)
ago-14	10,3	10,3	39,9
sep-14	31,0	25,5	39,9
oct-14	51,1	34,7	39,9
nov-14	72,1	54,2	39,9
dic-14	102,2	71,0	39,9
abr-15	215,8	79,2	39,9
ago-15	264,2	30,5	39,9
dic-15	318,5	20,2	39,9
mar-16	416,1	7,0	39,9

Fuente: Elaboración propia.

En base a la revisión de las batimetrías del depósito de relaves, que muestra el crecimiento del depósito (en vertical y lateral), el movimiento de la laguna de aguas claras dentro del depósito y los elementos de control de filtraciones (geomembrana) presentes en los muros, bajo los relaves y bajo la laguna, se ha considerado adecuado emplear un total de 3 perfiles para desarrollar la modelación de filtraciones. En la Figura 5-1 a la Figura 5-5 se presentan las 9 etapas de crecimiento proyectado del depósito de relaves y el trazado de los 3 perfiles utilizados en la modelación.

El perfil 1, representa el crecimiento longitudinal de la porción del depósito compuesta por relaves y parte de la laguna en especial en las primeras etapas del modelo, este perfil se encuentra con un quiebre, debido a que la primera porción del perfil se sitúa en dirección noroeste y considera el relave y la laguna apoyados en el muro 4, esta parte del perfil atraviesa este muro en forma perpendicular, a modo de seguir el drenaje superficial natural de la cuenca Posteriormente, el relave continua su depositación hacia el noreste, razón por la cual se genera el cambio en la orientación del perfil y el quiebre en éste.

El perfil 2, por otra parte, también considera un quiebre. La primera porción de este perfil se sitúa en dirección suroeste, debido a que considera atravesar el muro 3 en forma perpendicular, y seguir con el drenaje de la otra cuenca superficial presente en la zona del modelo, es por esto que el perfil 2 considera porción de la laguna que no es abarcada por el perfil 1. Posteriormente, se quiebra el perfil 2 y se cambia su dirección hacia el este, a modo de considerar el relave depositado en la parte central del modelo, y aquel relave que se extiende hacia el sureste.

Finalmente, el perfil 3 se construyó perpendicular al muro 2, debido a que el relave que se deposita en esa zona, no era considerado por ningunos de los perfiles anteriores descritos. Los relaves en esa zona, aparecen en las últimas etapas de modelación, adicionalmente para este período, el perfil 3 no atraviesa el sector de la laguna.

Figura 5-1: Crecimiento proyectado para el depósito de relaves y perfiles representativos

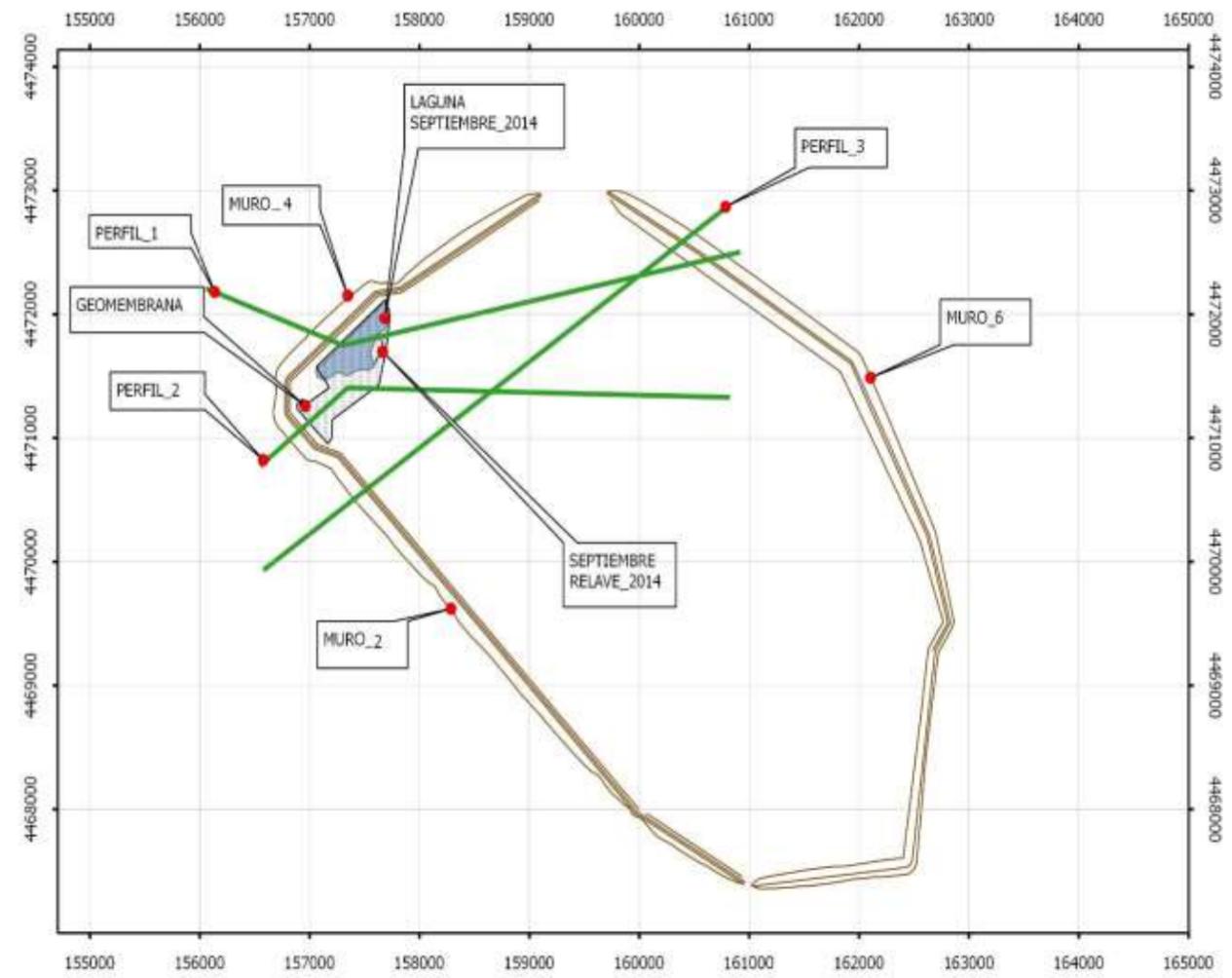
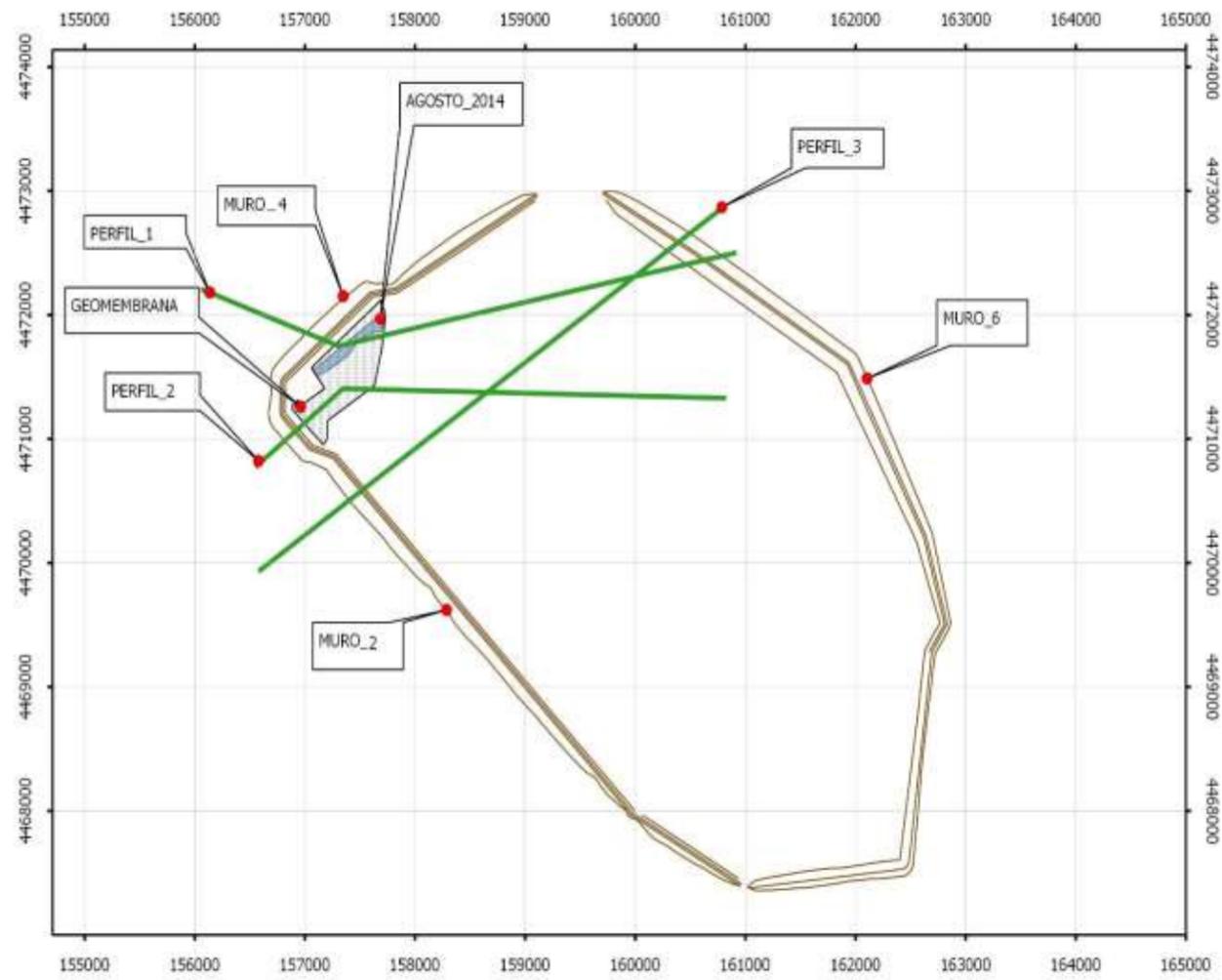


Figura 5-2: Crecimiento proyectado para el depósito de relaves y perfiles representativos

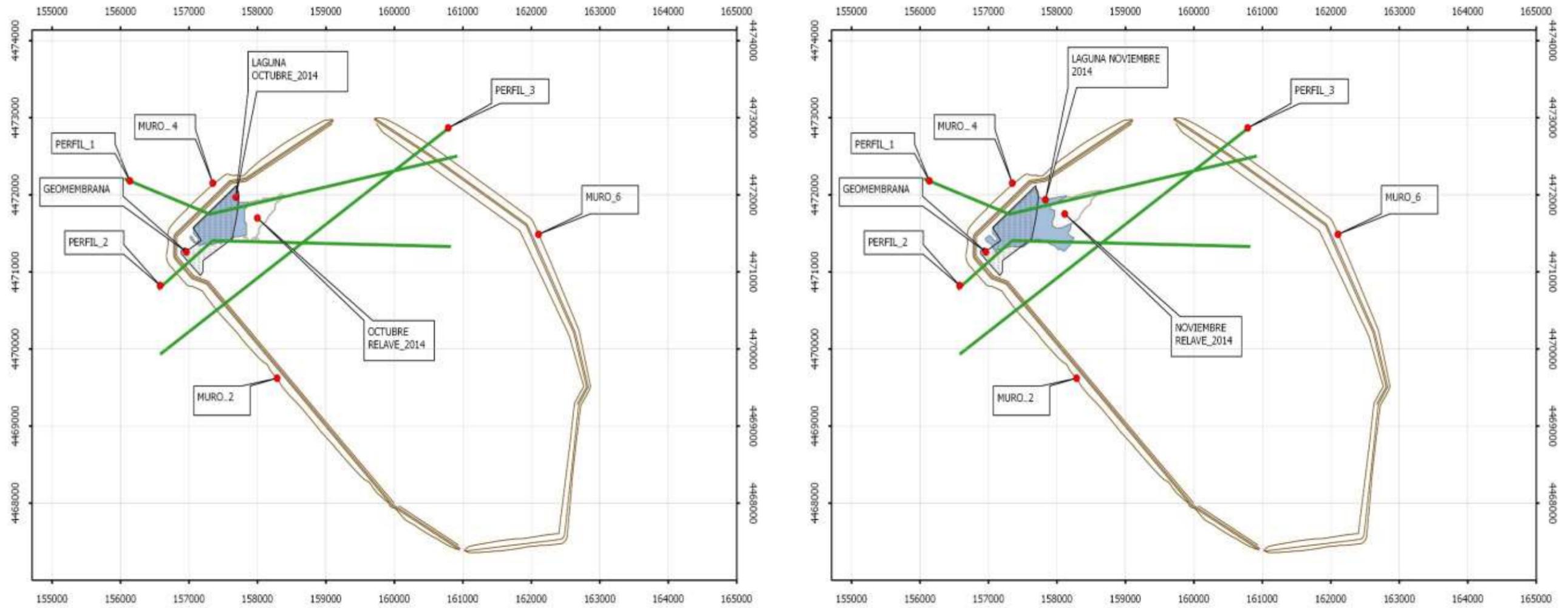


Figura 5-3: Crecimiento proyectado para el depósito de relaves y perfiles representativos

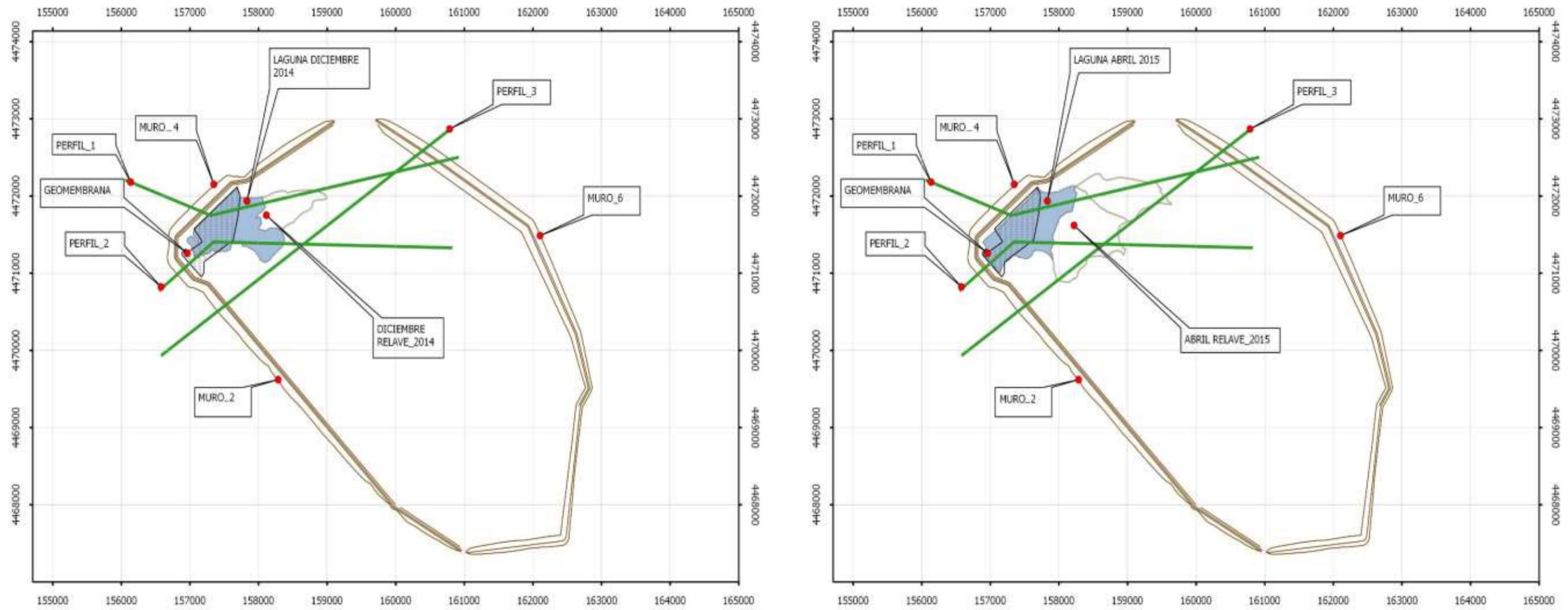


Figura 5-4: Crecimiento proyectado para el depósito de relaves y perfiles representativos

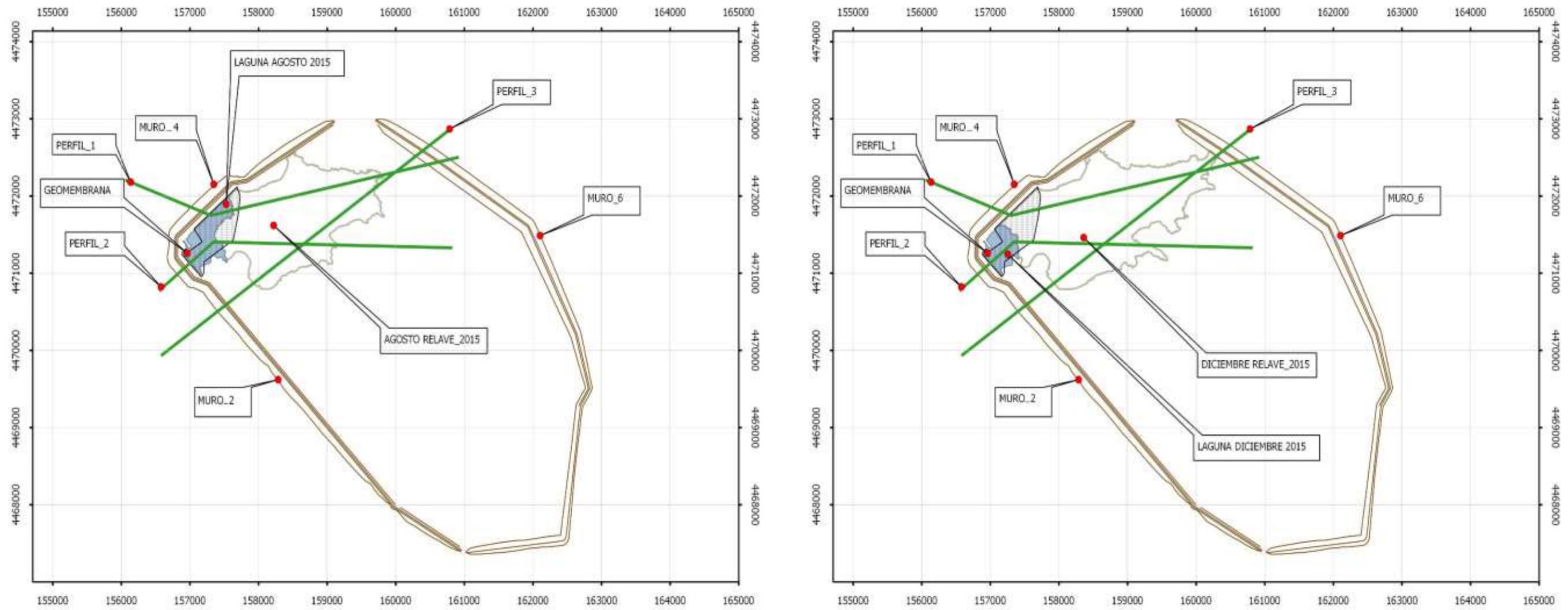
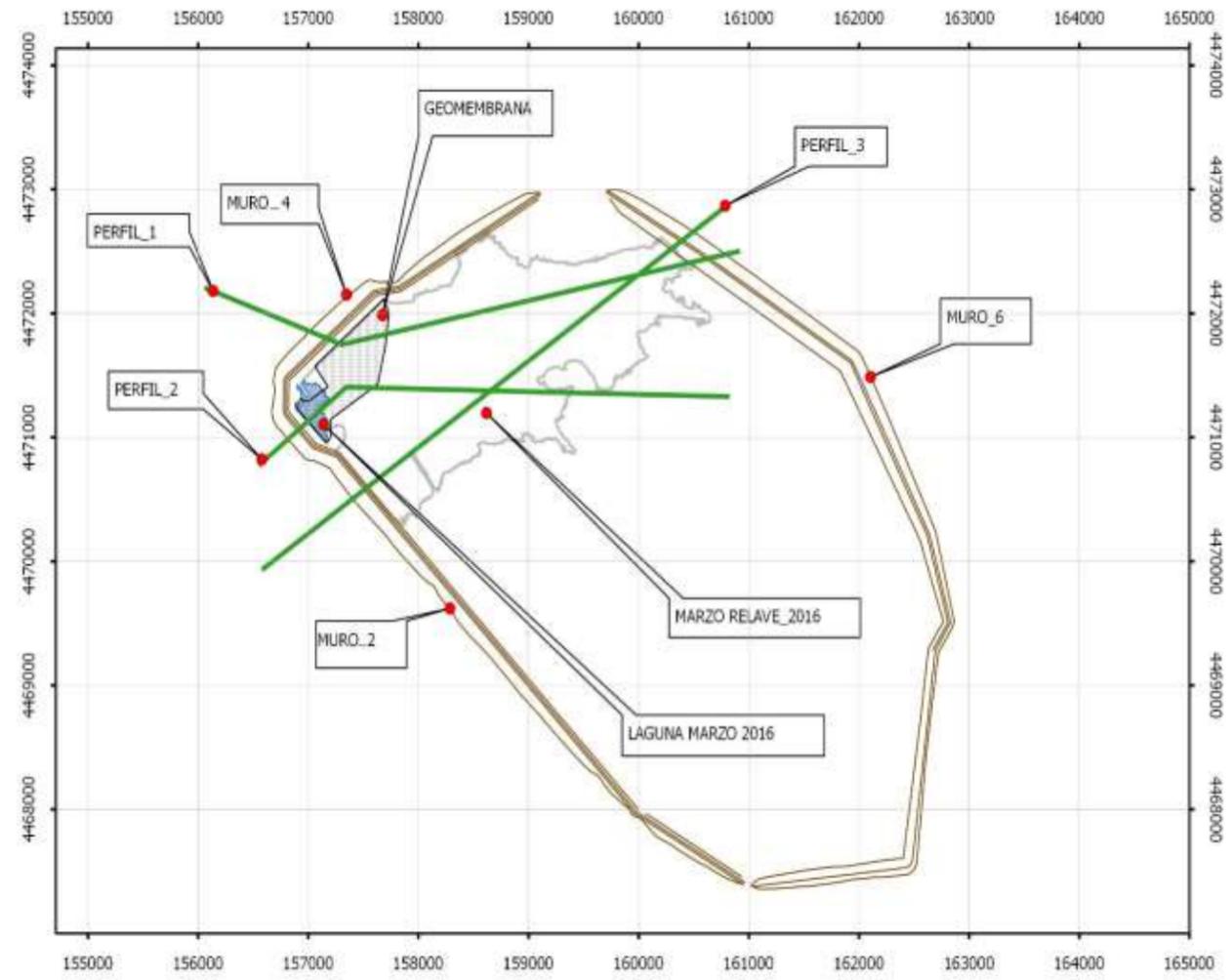


Figura 5-5: Crecimiento proyectado para el depósito de relaves y perfiles representativos



5.2.2 Discretización temporal

Para cada perfil se considera una simulación inicial en régimen permanente, representativo de la situación previa a la entrada en operación del depósito de relaves, posteriormente una en régimen transiente que abarca casi 2 años de operación. En Tabla 5-2 se presenta un resumen de los periodos de simulación. La simulación transiente tiene una escala mensual durante el año 2014, cuatrimestral en el año 2015 y finaliza en marzo de 2016.

Tabla 5-2: Periodos de simulación modelo 2D

Etapa	Año	Días Simulados
Condición Inicial	0	R.P.*
Operación	ago-14	31
	sep-14	30
	oct-14	31
	nov-14	30
	dic-14	31
	abr-15	120
	ago-15	123
	dic-15	122
	mar-16	91

*Régimen permanente
Fuente: Elaboración propia

Para efectos del cálculo, cada simulación se ha discretizado en pasos de tiempo variables que permitan asegurar la convergencia numérica del modelo. En algunos casos se utiliza una distribución lineal de pasos de tiempo, en otros casos con incremento exponencial y cuando fue necesario una discretización temporal adaptativa, la cual incorpora tiempos adicionales a los inicialmente definidos para poder cumplir los criterios de convergencia impuestos. De esta forma, se utilizaron pasos de tiempo con duración máxima de 0,5 días.

5.2.3 Geometría y discretización espacial

Los perfiles bi-dimensionales construidos comprenden el relave y, en algunos casos, la geomembrana y el muro del depósito sobre las unidades de suelo natural (suelo de fundación y acuífero).

La geometría del depósito de relaves se construyó empleando la topografía de la cubeta natural, las batimetrías del depósito, la disposición de la geomembrana y la información de diseño del muro, obtenidas de los planos de crecimiento.

La geometría de las unidades hidrogeológicas subyacentes y la distribución espacial de los materiales asociados, se construyó a partir de las capas del modelo hidrogeológico numérico tridimensional GWV, descrito en el presente informe. Los perfiles bi-dimensionales consideran 2 capas del modelo 3D de espesor variable, donde el fondo de la primera capa corresponde a lo simulado en el modelo conceptual y el fondo de la segunda se definió en modo tal que el nivel freático estuviese contenido en ésta.

En la Figura 5-6 a la Figura 5-8, se presenta la geometría de las capas hidrogeológicas incorporadas a los 3 perfiles construidos para estimar la infiltración, donde además se ha incluido en colores los materiales considerados en el perfil, que corresponden a diferentes zonas de permeabilidad del modelo 3D y a los materiales asociados al relave y los muros. Los cambios de zonas de permeabilidad del modelo 3D son representadas en el modelo 2D como líneas verticales dentro de

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

cada capa. Finalmente, se debe mencionar que, para efectos de una mejor visualización de los perfiles, éstos han sido recortados.

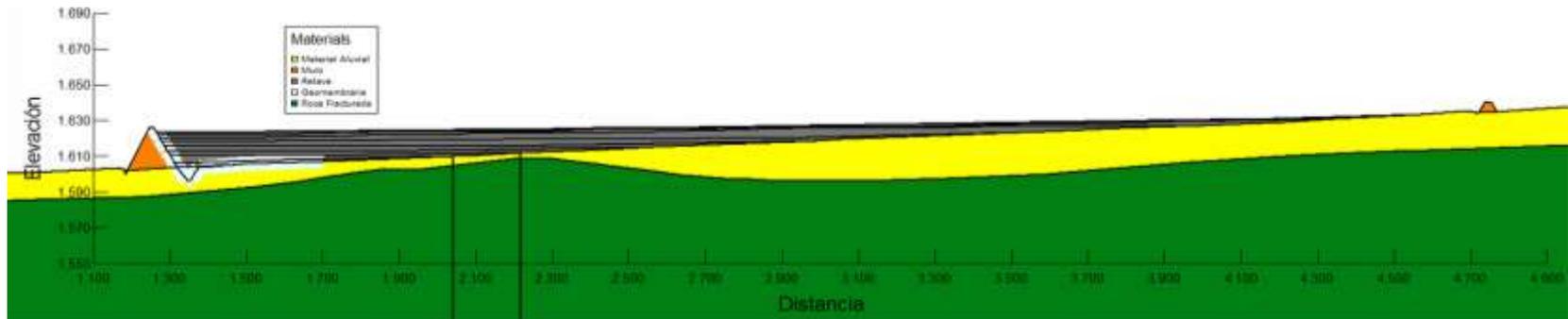
Las principales características de los perfiles, en términos de sus dimensiones y ubicación, son resumidos a continuación en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Características generales de ubicación y dimensiones de los perfiles

Perfil	Largo aprox. (m)	Vértice Aguas Abajo *		Quiebre*		Vértice Aguas Arriba*	
		Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)
Perfil 1	4980	156.075	4.472.201	157.303	4.471.748	160.898	4.472.498
Perfil 2	4450	156.565	4.470.786	157.344	4.471.404	160.804	4.471.328
Perfil 3	5060	156.595	4.469.941	-	-	160.749	4.472.835

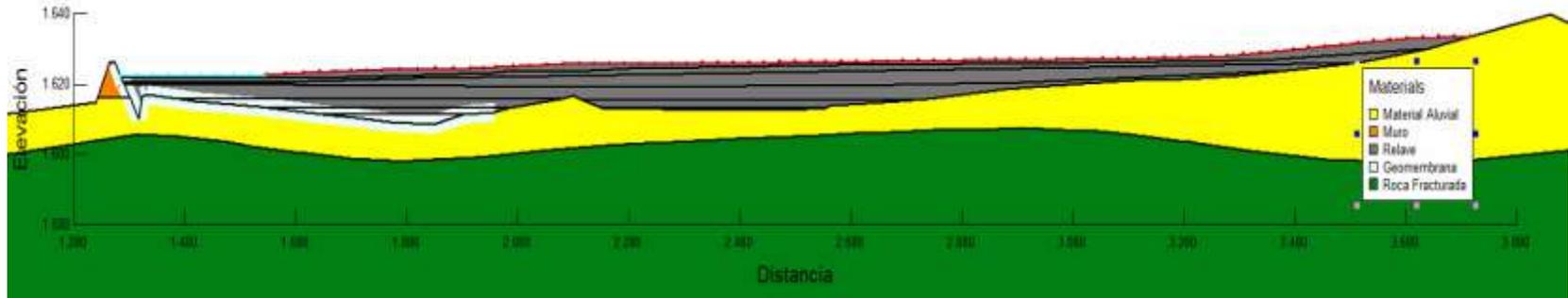
*Coordenadas en PTL
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-6: Geometría Perfil 1 – Crecimiento hasta marzo 2016 (Exageración vertical 5X)



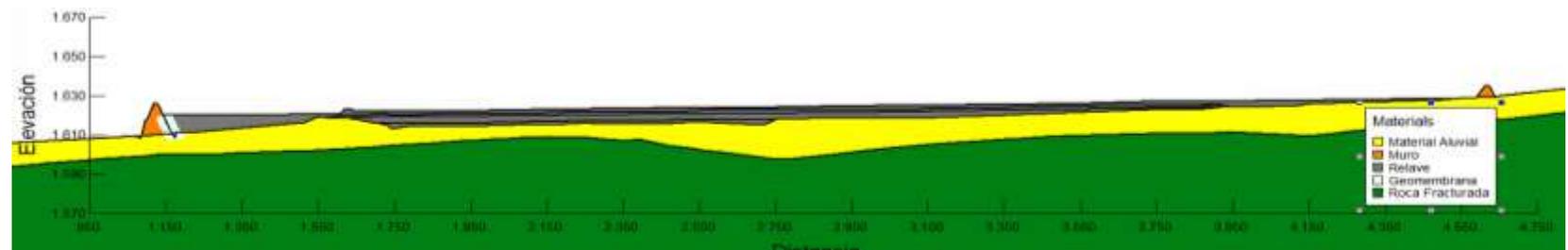
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-7: Geometría Perfil 2 – Crecimiento hasta marzo 2016 (Exageración vertical 5X)



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-8: Geometría Perfil 3 – Crecimiento hasta marzo 2016 (Exageración vertical 6X)

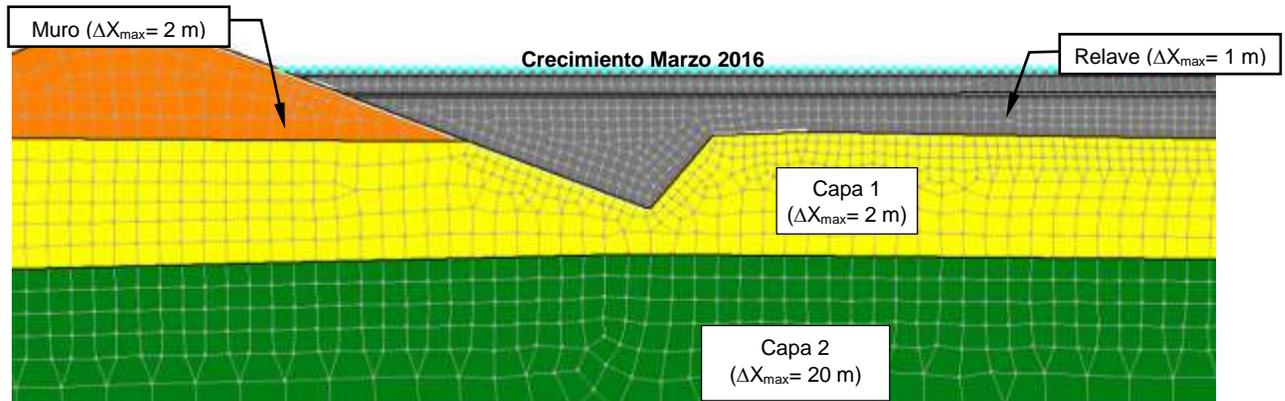


Fuente: Elaboración propia

La grilla se generó empleando una malla irregular formada por triángulos y cuadriláteros, cuyas dimensiones varían dependiendo del estrato de suelo. Para el relave, muros y capa aluvial se controló que el largo de los elementos no fuera superior a 2 m. Para la capa de roca los elementos no superaban los 20 m.

Como parte del diseño del crecimiento del depósito de relaves, se considera la instalación de una geomembrana sobre el suelo natural con el fin de reducir la infiltración proveniente de la laguna de aguas claras. Para representar la geomembrana se consideró utilizar un material de interface (o “interface material”) disponible en SEEP/W 2012, el cual es asignado a elementos de tipo línea, para los cuales es necesario especificar un espesor de la malla (GEO-SLOPE, 2015), en este caso se utilizó un espesor de 2,0 mm de acuerdo a las especificaciones de diseño del tranque.

Figura 5-9: Discretización espacial Perfil 6 (Detalle zona muro)



Fuente: Elaboración propia

5.2.4 Propiedades hidráulicas de los materiales

En la construcción de los perfiles bi-dimensionales se consideraron 5 materiales representativos de los diferentes componentes del depósito (relaves, muro y geomembrana) y del suelo natural (unidades hidrogeológicas). En la Tabla 5-4 se presenta un resumen de los materiales considerados en los perfiles, donde los materiales de suelo natural se denominan según la zona de permeabilidad correspondiente del modelo numérico 3D. Además, se indica la Unidad Hidrogeológica correspondiente. La distribución espacial de los materiales en cada perfil se observa en las figuras presentadas en el punto anterior (Figura 5-6 a la Figura 5-8).

Tabla 5-4: Materiales considerados en los perfiles 2D

Material	Unidad Hidrogeológica
Relave	N.A
Muro	N.A
Geomembrana	N.A
Zona 1 (Modelo 3D)	UH-1: Depósitos coluviales superiores
Zona 2 (Modelo 3D)	UH-2: Roca fracturada

N.A.: No Aplica. Materiales del depósito de relaves no son considerados explícitamente en el modelo 3D.

Fuente: Elaboración propia

Las propiedades hidráulicas de los materiales asociados al acuífero, del relave y del muro (construido con arena de relaves cicloneados), requeridas para una modelación variablemente saturada, corresponden a las curvas características de los materiales (succión v/s contenido de humedad y succión v/s conductividad hidráulica), las cuales incorporan dentro de su definición el contenido de humedad saturada (θ_s), el contenido de humedad residual (θ_r) y la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}). La definición de dichas curvas es posible a través de mediciones directas en laboratorio, estimaciones indirectas a partir de curvas granulométricas e información de literatura especializada, o utilizando curvas medidas en materiales de similares características.

El material representativo de la geomembrana fue simulado en SEEP/W 2012 considerando un tipo de propiedad denominada "interface material", para la cual sólo se requiere especificar una permeabilidad en la dirección normal y tangencial al flujo, sin requerir curvas de succión. La permeabilidad tanto normal como tangencial utilizada es de $1E-7$ m/d, la cual fue calibrada para ajustar las filtraciones provenientes de la laguna con el balance de aguas, donde el caudal de infiltración promedio es de 1,5 L/s.

Por otro lado, el material representativo del muro también fue calibrado en base a mediciones realizadas en terreno correspondiente al caudal de filtración a través de éste. Cuyo valor ascendía a $50 \text{ m}^3/\text{d}$ (Informe infiltraciones, KP, 2015)

A continuación, se describen los supuestos considerados para definir las curvas de succión y conductividad hidráulica asociadas los materiales del acuífero, muro y relave.

Curva de succión: (succión v/s contenido volumétrico de humedad)

- **Relave:** Debido a que no se cuenta con mediciones directas de la curva de succión para el relave que será depositado, se ha considerado emplear información existente, generada en base a la literatura y a la experiencia del consultor, para un relave de similares características granulométricas (relave integral), el cual considera diámetros representativos tanto arenas como limos. Dicha curva fue estimada empleando un gran número de muestras tomadas directamente desde un tranque activo a las cuales se les ajustó el modelo Van Genuchten-Mualem (Van Genuchten, 1980). Los parámetros estimados para dicho modelo son: α (KPa)=119,36 y $n=2,777$, con un contenido de humedad saturado (θ_s) de 45,1% y un contenido de humedad residual (θ_r) de 4%.
- **Muro:** Para el material del muro, que según diseño fue construido con relleno granular (informe de análisis de estabilidad estática y pseudoestática muro mp4 e informe técnico -revisión de antecedentes de construcción, KP, 2015), se considera una curva de succión representativa, definida de acuerdo al método estimativo de tamaño de partículas, asumiendo que la humedad de saturación es 30%, diámetro $D_{10}=0,1$ mm y $D_{60}=10$ mm.
- **Suelo natural subyacente:** Para la unidad de suelo aluvial, se considera la curva preestablecida para suelo tipo arena integrada en el software SEEP/W, se asume para este caso una humedad de saturación igual a 15%. Para el caso de roca, se considera una curva de succión representativa, definida con el modelo Van Genuchten-Mualem (Van Genuchten, 1980), de parámetros α (KPa)=0,02 y $n=1,818$, con un contenido de humedad saturado de 0,1% y un contenido de humedad residual (θ_r) de $8,64 \text{ E-}3$ %, estos parámetros fueron obtenidos de la literatura especializada (Wang and Narasimhan, 1985 y Carsel and Parrish, 1988)

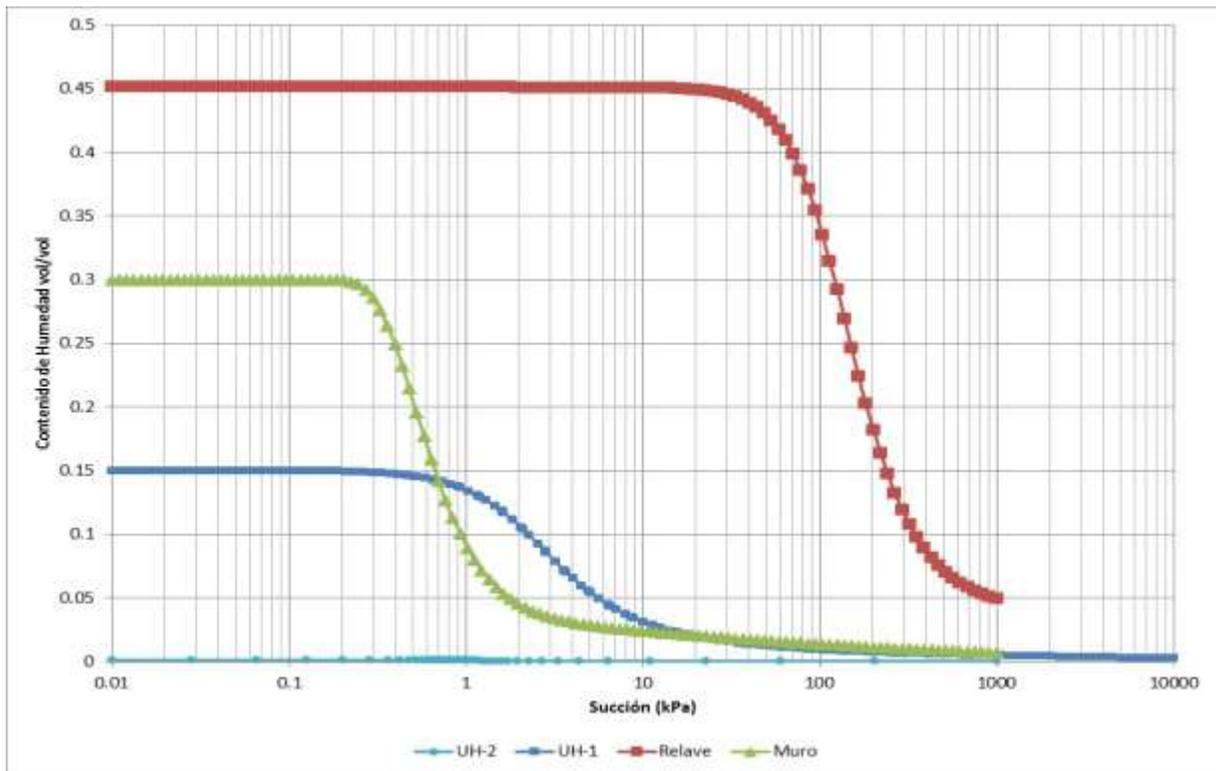
En la Tabla 5-5 se presenta un resumen de parámetros para cada curva y en la Figura 5-10 se presentan gráficamente las curvas de succión del relave, muro y las unidades hidrogeológicas.

Tabla 5-5: Resumen parámetros curvas de succión

Estrato	Parámetros de Ajuste - Curva de Succión					Método de Estimación
	θ_{res}	θ_{sat}	α (kPa)	n	m	
Relave	0,040	0,451	119,360	2,777	-	Van Genuchten
Muro	0,007	0,300	-	-	-	Tamaño de partículas
UH-1	0,002	0,150	-	-	-	Ecuación para arena
UH-2	8,64 E-5	0,1 %	0,020	1,818	0,450	Van Genuchten

Fuente: Elaboración propia

Figura 5-10: Curvas de succión v/s contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Función de conductividad: (succión v/s conductividad hidráulica)

Las curvas de succión v/s conductividad hidráulica de todos los materiales fueron construidas dentro de SEEP/W 2012, considerando las curvas de succión v/s humedad (Tabla 5-5) y las conductividades hidráulicas saturadas de cada material. En la estimación de las curvas se utilizó el método de Van Genuchten para los materiales de muro, relave y suelo UH-2 y el método de Fredlung & Xing para el suelo UH-1, sobre la base de las curvas de succión vs contenido de humedad (vol/vol).

En la Tabla 5-6 se presentan las conductividades hidráulicas horizontales saturadas (K_{sat}) definidas para cada material y la relación de anisotropía considerada para estimar las permeabilidades verticales (K_v). Para los materiales de suelo natural las conductividades hidráulicas son las definidas en el modelo 3D, donde sólo el material aluvial presenta anisotropía. Para el material de relave no se dispone de mediciones directas, por lo que se considera un valor de conductividad proveniente de la experiencia del consultor en el estudio de relaves de similares características granulométricas. Para el muro, que será construido con relleno granular, se definió la conductividad en base a literatura especializada.

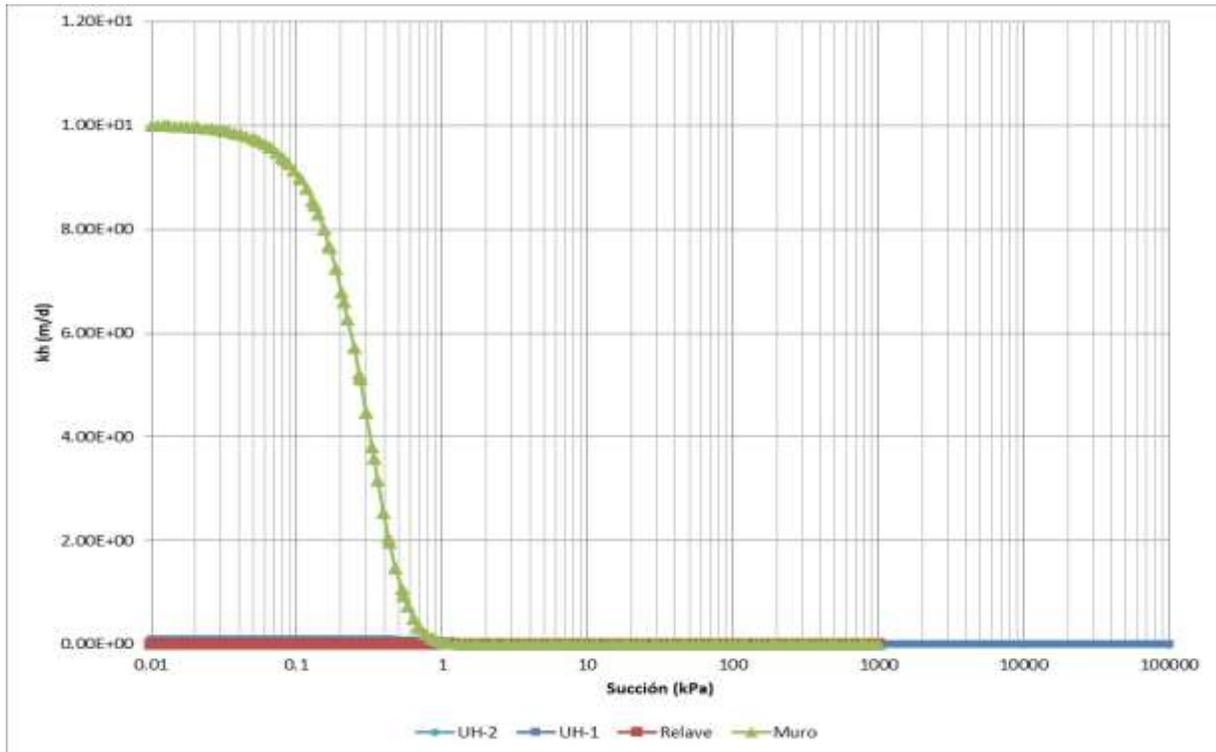
En la Figura 5-11 se presentan las curvas de succión v/s conductividad hidráulica consideradas en el modelo.

Tabla 5-6: Conductividad hidráulica saturada

Material	Ksat (m/d)	Kv/Kh
Relave	8,73E-03	1,0
Muro	10	1,0
Suelo aluvial (Modelo 3D)	0,1	0,1
Roca fracturada (Modelo 3D)	8 E-005	1,0

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-11: Curvas de succión v/s conductividad hidráulica



Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que todos los materiales son considerando medios porosos equivalentes, con lo que incluyen de manera implícita la existencia de posibles estructuras como fallas o fracturas en el caso del suelo natural, vías de flujo preferencial en los relaves, o roturas en la geomembrana. Por lo tanto, las propiedades hidráulicas de los materiales son constantes dentro de cada región.

5.2.5 Condiciones de borde

Las condiciones de borde consideradas en el modelo son las siguientes:

- **Flujo subterráneo natural:** En general, el agua subterránea en condiciones naturales (previa operación del depósito) se mueve en 1 dirección principal hacia SO, y en la zona del tranque se separa en 2 direcciones dirección NE-NO y NE-SO, para luego volver a juntarse en una quebrada, lo cual es representado en los perfiles mediante una condición de borde de nivel conocido, especificada en los límites de cada perfil.

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Debido a que no se cuenta con información de niveles medidos en ambos límites de cada perfil, las cotas de agua subterránea se han estimado considerando la piezometría obtenida de la información de pozos de observación de niveles ubicados dentro del dominio del modelo conceptual.

En la Figura 5-12 se presenta la ubicación de los pozos de observación existentes en el sector respecto de la disposición de los perfiles, además se presenta el mapa piezométrico, a partir de las cuales se observa la dirección del flujo natural subterráneo.

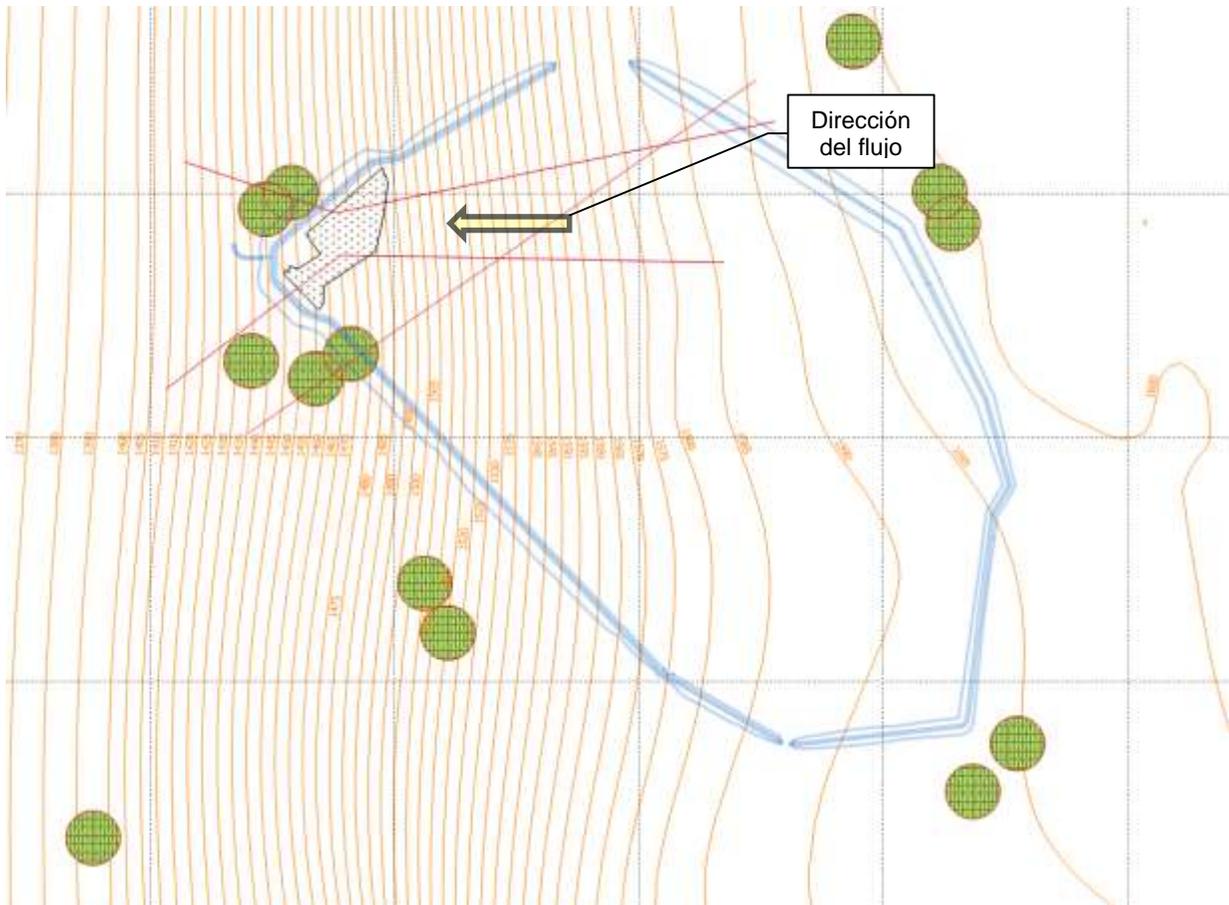
En la Tabla 5-7 se detallan las cotas del nivel de la napa estimadas para cada perfil. Las cotas empleadas de nivel de la napa son aplicadas en los extremos de los perfiles bi-dimensionales como valores constantes tanto para la simulación de régimen permanente como transiente.

Tabla 5-7: Condiciones de borde para acuífero

Perfil	Nivel napa (m.s.n.m.)		Largo Perfil (m)	Gradiente napa
	Borde Aguas Abajo	Borde Aguas Arriba		
Perfil 1	1.414,75	1.591,75	4.980	3,55 E-2
Perfil 2	1.409,50	1.585,75	4.450	3,96 E-2
Perfil 3	1.435,50	1.590,75	5.060	3,07 E-2

Fuente: Elaboración propia.

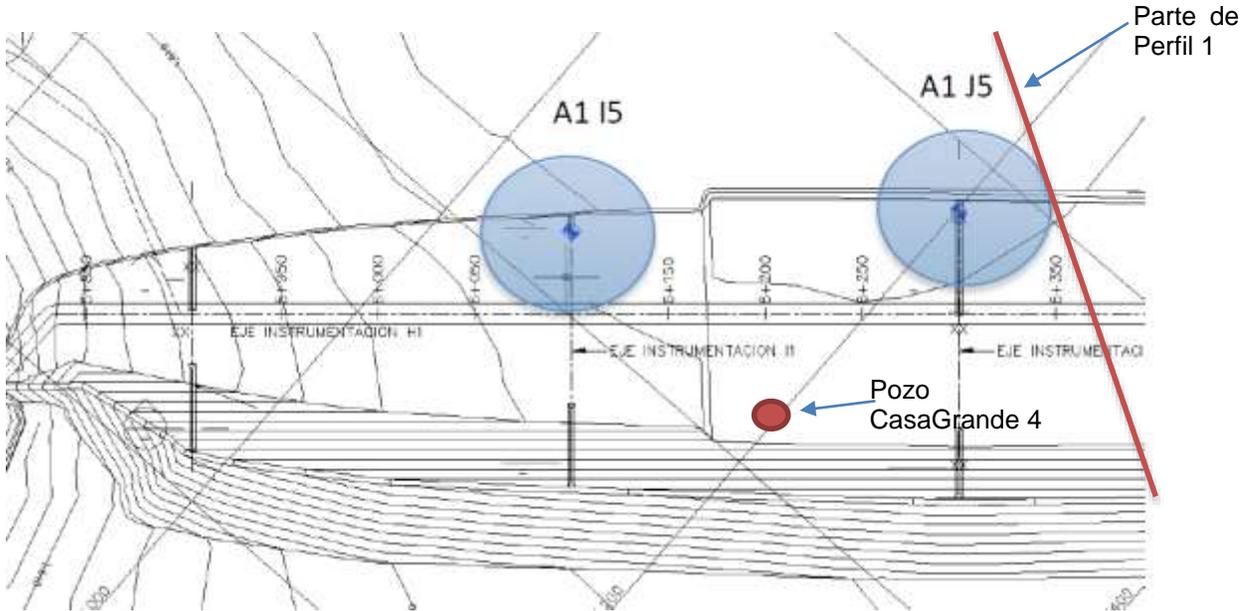
Figura 5-12: Pozos de observación sector depósito de relaves



Fuente: Elaboración propia

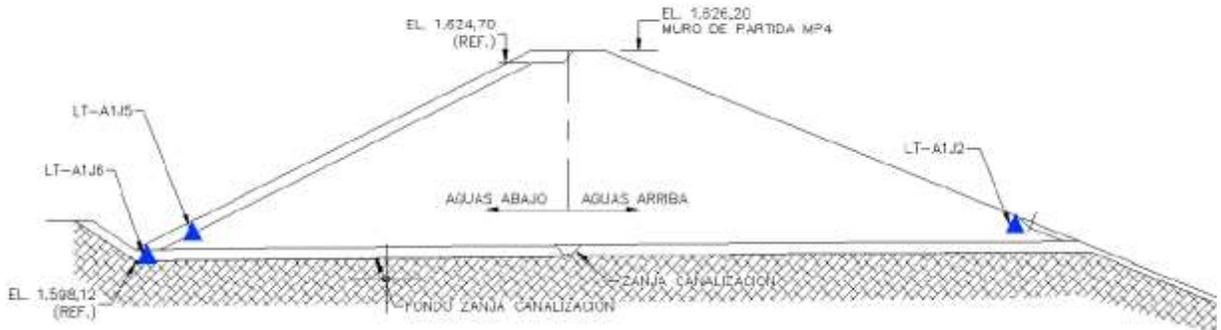
- Muros y geomembrana:** De acuerdo a los diseños de ingeniería, y a la información recibida, los muros no poseen sistema de drenes basales. En efecto, de acuerdo a las visitas a terreno (Abril 2015), se tiene que en el muro 4, la zanja que se encuentra aguas abajo de éste, comenzó a llenarse de agua a finales de 2014. Es por esto, que para la presente modelación se analizó el nivel del pozo ubicado en este muro llamado Casagrande 4 y los datos del piezómetro A1J5. (ver Figura 5-13),

Figura 5-13: Ubicación Piezómetros y Pozo - Planta



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-14: Ubicación Piezómetros - Perfil



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los datos de nivel del piezómetro A1J5, se analizaron dos fuentes de información. La primera fuente corresponde al informe "GEO-IN_RELAV" que registran valores de niveles piezométricos dentro del muro desde diciembre de 2014 hasta junio 2015. La segunda fuente son tres reportes que tienen codificación GEO-REPORT (Septiembre 2015, diciembre 2015 y marzo 2016) cuyos valores presentados para el piezómetro A1J5, presentan inconsistencia con respecto a la primera fuente. En particular el reporte de septiembre 2015 no presenta valor alguno del

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

piezómetro y los informes de diciembre de 2015 y marzo 2016, muestran que dicho piezómetro presenta alturas de escurrimiento menores a 2 m (comenzando su lectura en junio de 2015).

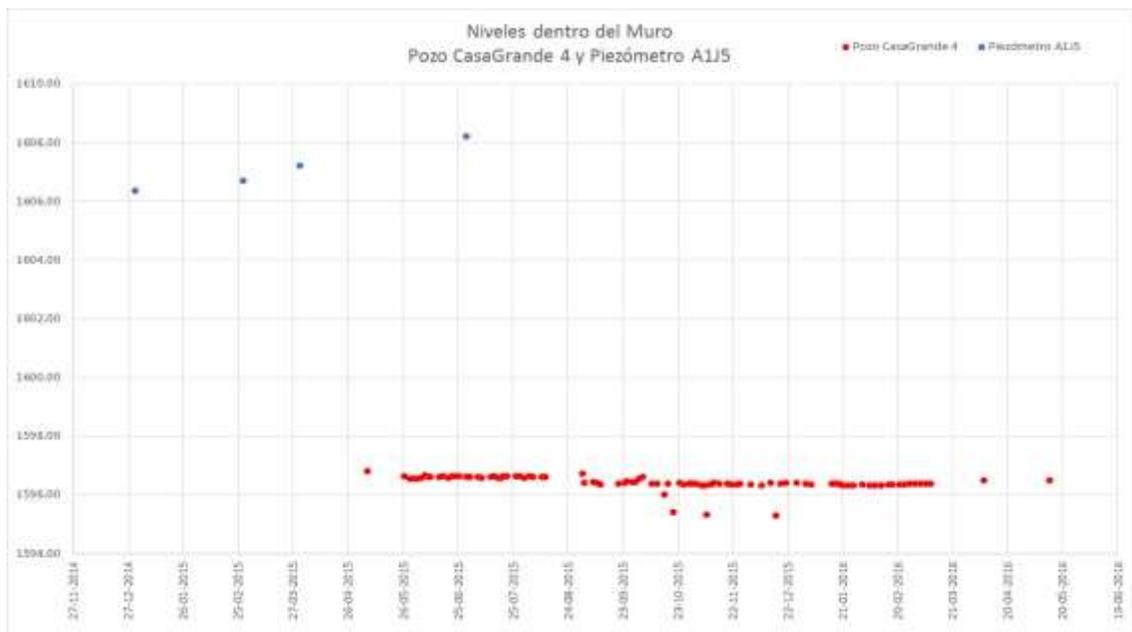
Por esta razón se utilizarán los valores asociados a los reportes GEO-IN-RELAV, que registraron datos desde diciembre del 2014 hasta junio 2015. A continuación, se muestra en el gráfico y en la tabla, la altura de escurrimiento en diferentes fechas, del piezómetro a analizar.

Tabla 5-8: Niveles Piezométricos Muro M4, piezómetro A1J5 y Pozo Casa Grande 4

Nombre	Cota instalación msnm	Dic-2014 msnm	Feb 2015 msnm	Mar 2015 msnm	Jun 2015 msnm
A1J5	1.602,003	1.603,35	1.606,7	1607,2	1608,2
CasaGrande 4	1.619,000	-	-	-	1596,6

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-15: Niveles Piezométricos Muro M4, piezómetro A1J5 y Pozo Casa Grande 4



Fuente: Elaboración propia.

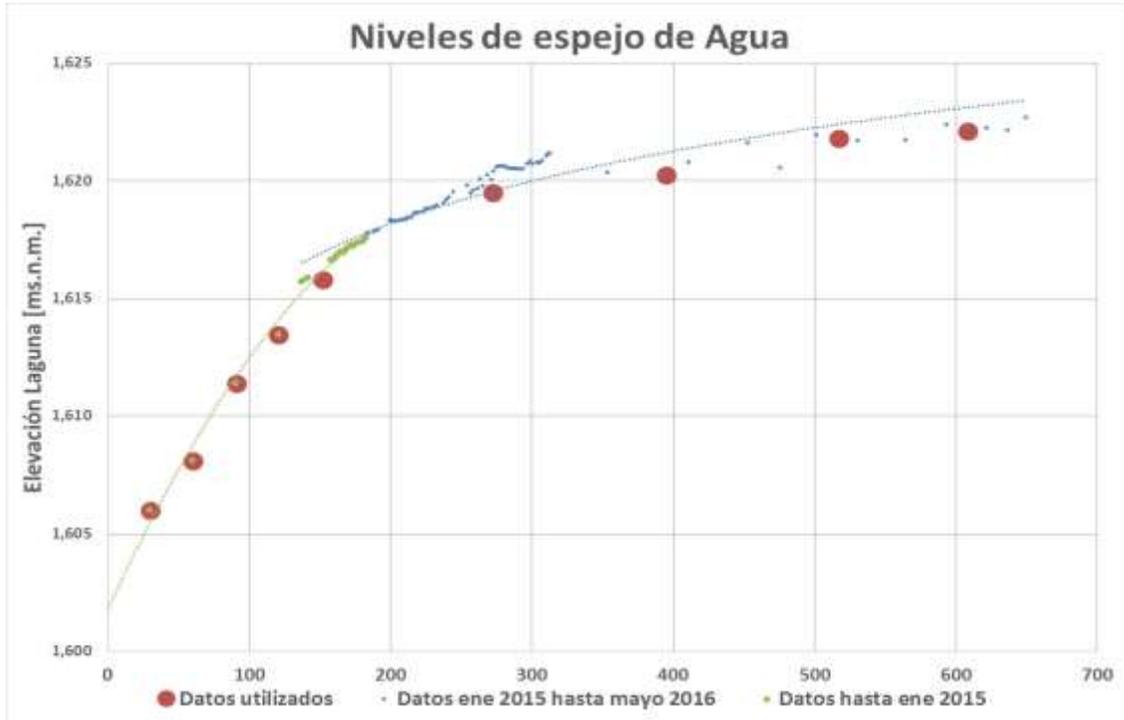
Finalmente, el perfil 1 se construyó en base a los planos entregados, considerando geomembrana en todo el talud del muro que está en contacto con el relave, y en forma adicional, se realizaron sensibilizaciones para reproducir en el modelo los datos de los piezómetros y consecuentemente emular la infiltración a través del muro que genera que la zanja aguas debajo de éste tenga agua. Estas simulaciones se basan en la hipótesis que la geomembrana se encuentra rota y/o su funcionamiento no es el óptimo).

Laguna: Los perfiles 1 y 2 consideran la presencia de la laguna de aguas claras la cual se representa mediante una condición de borde de altura de agua especificada, cuyas cotas en el tiempo se detallan en la Figura 5-16.

Las cotas de espejo de agua de la laguna, se obtuvieron a partir de la información recibida por parte de Minera Sierra Gorda, estos datos consideraban los diferentes niveles de agua sobre el

relave, a partir de enero de 2015 hasta mayo 2016, por lo tanto, para los meses de simulación en el año 2014 se consideró una extrapolación de los datos medidos en los primeros meses del año 2015, tal como se muestra a continuación.

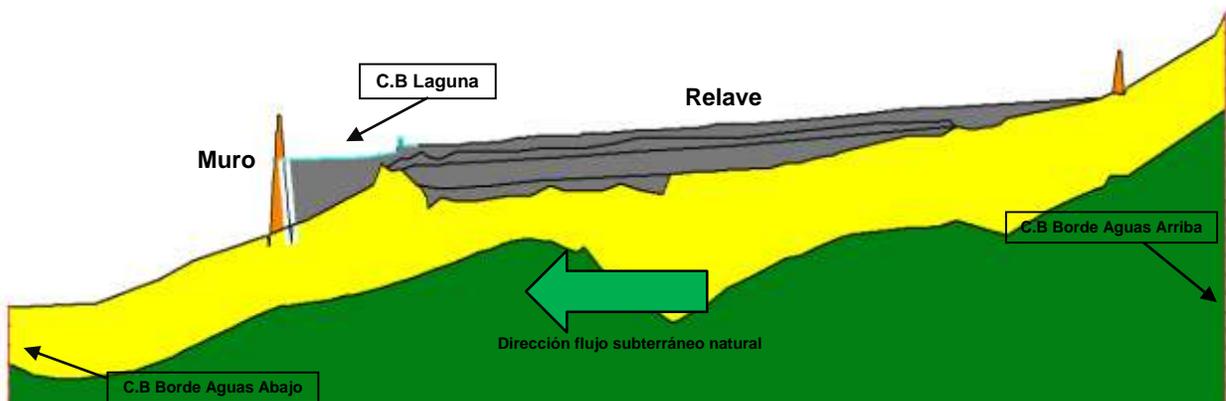
Figura 5-16: Cotas de laguna (msnm) para crecimiento del depósito



NOTA: Información proporcionada por Sierra Gorda y datos extrapolados
Fuente: Elaboración propia.

A modo de ejemplo, la Figura 5-17 muestra la ubicación de las condiciones de borde incorporadas a los perfiles. La línea de color celeste (sobre el relave) representa la condición de borde de altura especificada para la laguna, los de color rojo representan los bordes de altura conocida para representar los flujos subterráneos naturales de entrada y salida al perfil.

Figura 5-17: Condiciones de borde en perfil 3 – Crecimiento marzo 2016 (Exageración vertical 20 X)



Fuente: Elaboración propia.

5.2.6 Condiciones iniciales

La condición inicial del año 1 de las simulaciones transientes de todos los perfiles se definió a partir de una simulación de régimen permanente donde no se considera la existencia del depósito, en la cual se simula el movimiento del flujo subterráneo natural. Para las siguientes etapas de crecimiento se empleó como condición inicial el resultado de la etapa anterior.

5.2.7 Secciones de control

SEEP/W permite estimar el flujo pasante ($m^3/d/m$) dentro del dominio modelado y/o en los límites de éste, para lo cual es posible estimar el flujo individual en cada nodo o en un conjunto de nodos. También permite estimar el flujo pasante en secciones (*flux sections*), las que engloban todo el caudal pasante que registran los nodos ubicados inmediatamente aguas arriba de la sección. Para estimar las infiltraciones del depósito de relaves se ha definido utilizar secciones de flujo, las que permiten contabilizar:

- La **infiltración en la base del depósito**: corresponde a la infiltración hacia el subsuelo que ocurre en la interface entre el relave y el suelo natural (UH-1).
- La **recarga al acuífero**: representa la cantidad de agua que efectivamente llegaría a la napa, descontando el agua que es retenida en la zona no-saturada y que será paulatinamente incorporada y redistribuida dentro del sistema de flujo subterráneo.

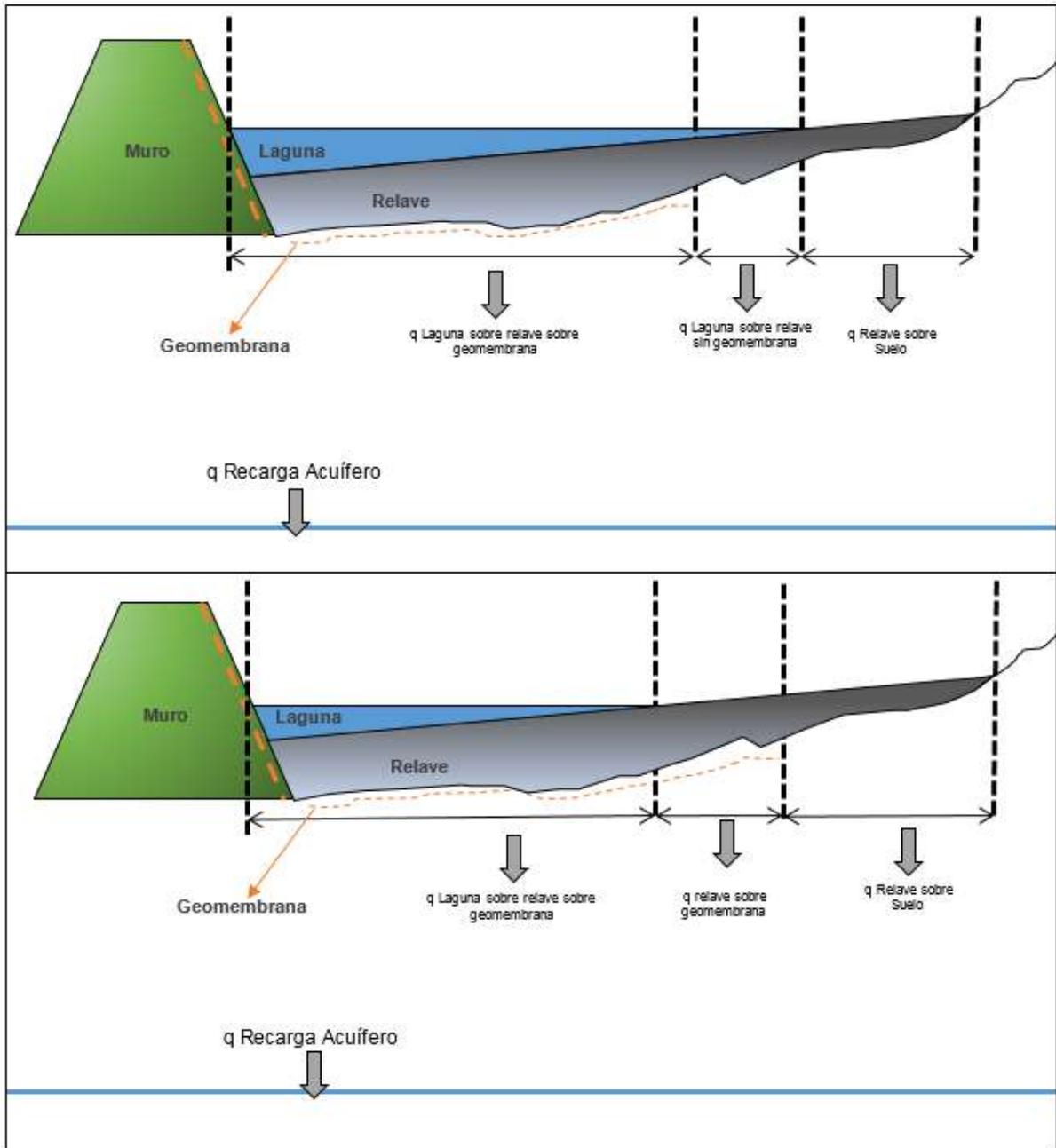
Para estimar la infiltración en la base del depósito se definen 4 posibles secciones de control, que dependen de la presencia de la laguna y geomembrana en cada perfil. Estas secciones de control crecen lateralmente en el tiempo conforme el depósito proyectado crece y según la presencia de laguna en cada perfil:

- Laguna sobre relave y geomembrana.
- Laguna sobre relave, sin geomembrana.
- Relave sobre geomembrana.
- Relave sobre suelo natural.

Para estimar la recarga al acuífero se define una sección de control ubicada justo sobre el nivel freático, la cual podría ser variable en el tiempo debido al ascenso de la napa producto de las infiltraciones. La Figura 5-18 presenta un esquema que muestra las secciones de control utilizadas para el caso con presencia de laguna, caso que ocurriría para los perfiles 1 y 2. En el perfil 1 la presencia de laguna en ocurre en todos los meses simulados del año 2014 y las primeras 2 etapas del año 2015. El perfil 2, presenta laguna a partir de octubre del año 2014, hasta el final de la modelación. El perfil 3 no contiene laguna y la geomembrana sólo incluye aquella que se apoya sobre el talud del muro.

En las secciones de flujo se determina la tasa de infiltración por unidad de ancho ($m^3/d/m$), la cual, para obtener el caudal de infiltración y de recarga al acuífero para cada perfil, es multiplicada por el ancho representativo de cada sección (ver sección siguiente para definición de ancho representativo). Finalmente, el caudal total de infiltración desde el depósito de relaves y la recarga al acuífero se determinan como la suma de caudales de los perfiles representativos para cada periodo simulado.

Figura 5-18: Esquemas secciones de flujo (Caso a y b)



Fuente: Elaboración propia.

5.2.8 Anchos representativos

La modelación numérica considera un total de 3 perfiles bi-dimensionales, a través de los cuales se obtienen tasas de infiltración por unidad de ancho ($m^3/d/m$), por lo que para obtener el caudal total de infiltración (m^3/d ó L/s) es necesario definir anchos representativos de cada perfil, para cada periodo de crecimiento proyectado.

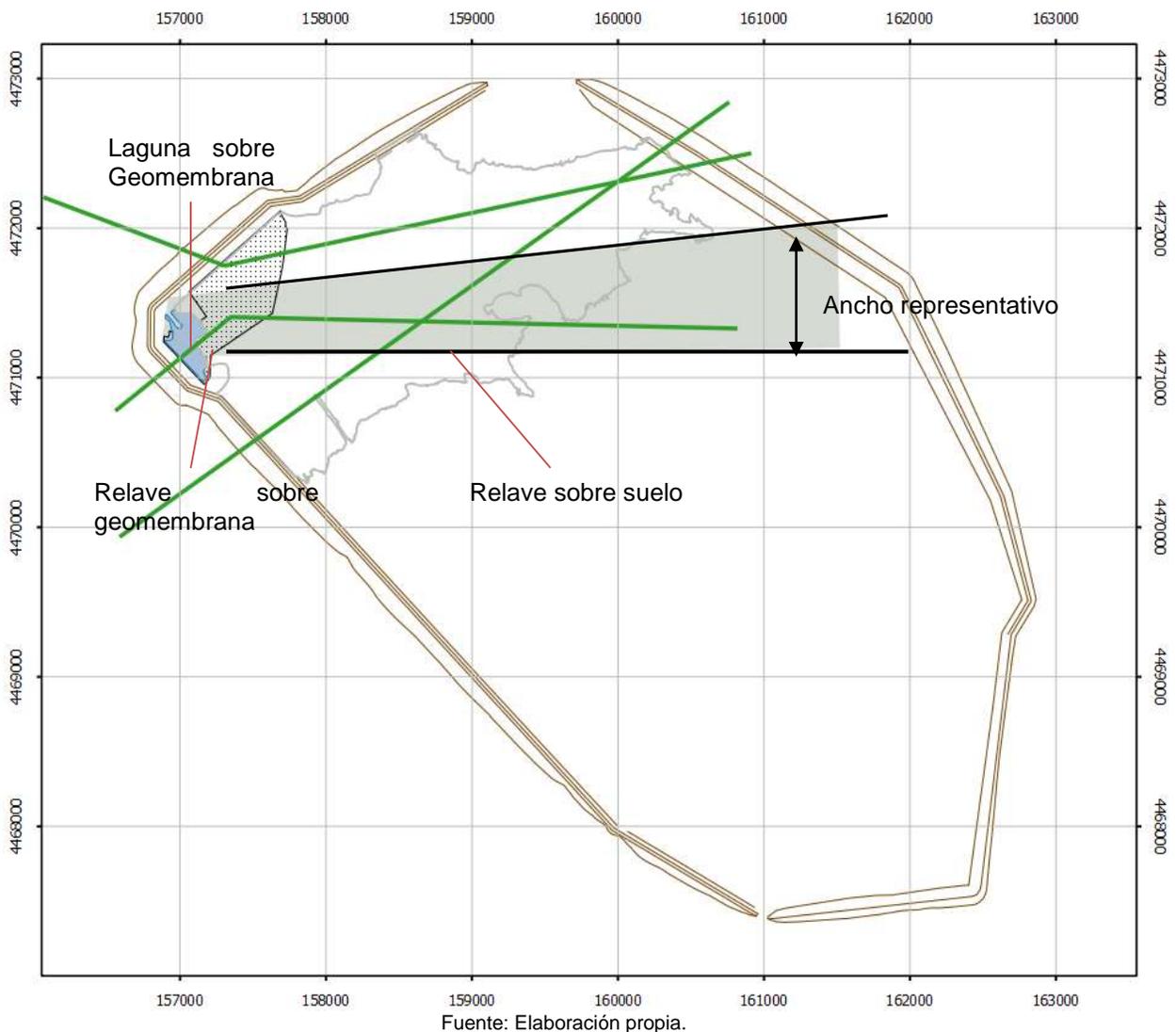
ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Para la estimación de la infiltración en la base del depósito de relaves se diferencian cuatro posibles tramos, correspondientes a las secciones de flujo descritas anteriormente, por lo que se estiman anchos representativos para cada tramo. Mientras para la estimación de la recarga al acuífero se considera un ancho representativo asociado al largo completo de la sección.

Los anchos representativos se calcularon dividiendo el área en planta del depósito, relave sobre suelo natural, relave sobre geomembrana, laguna sobre relave o laguna sobre geomembrana, asociada a cada perfil, por la longitud del perfil o tramo correspondiente. Es decir, cada ancho representativo se determina como A / L . En la Figura 5-19 se presenta un esquema de las áreas correspondientes a cada tramo de perfil, utilizadas para definir los anchos representativos para la estimación de filtraciones en la base del depósito.

Es necesario especificar que, si bien el perfil 3 se intersecta con ambos perfiles, el cálculo de las infiltraciones asociadas a éste, considera sólo una parte del perfil, a modo que no existan flujos que pudiesen contabilizarse 2 veces. El perfil, fue construido con la longitud especificada debido a que los bordes de éste deben estar fuera de la zona de relaves a modo que las condiciones impuestas de nivel de agua no se vean influenciadas por el proyecto.

Figura 5-19: Áreas representativas de secciones de flujo Perfil 2 – Marzo 2016



En la Tabla 5-9 se presentan los anchos representativos de los perfiles para los tramos de laguna y relave, necesarios para la estimación de las filtraciones en la base del depósito, y para el perfil completo, para la estimación de la recarga al acuífero.

Tabla 5-9: Anchos representativos (m)

Perfil	Etapas	Laguna sobre relaves y geomembrana *	Laguna sobre relaves, sin geomembrana *	Relaves sobre geomembrana *	Relaves sobre suelo natural*	Tranque completo**
Perfil 1	ago-14	768	0	N.A.	N.A.	768
	sep-14	450	885	N.A.	221	398
	oct-14	383	435	N.A.	321	361
	nov-14	383	528	N.A.	239	326
	dic-14	383	381	N.A.	403	393
	abr-15	383	406	N.A.	537	486
	ago-15	283	N.A.	577	525	495
	dic-15	N.A.	N.A.	343	566	532
	abr-16	N.A.	N.A.	380	602	572
Perfil 2	ago-14	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	sep-14	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	oct-14	436	N.A.	N.A.	N.A.	436
	nov-14	290	329	N.A.	N.A.	310
	dic-14	269	340	N.A.	N.A.	308
	abr-15	330	336	N.A.	712	457
	ago-15	366	N.A.	415	572	510
	dic-15	450	N.A.	399	590	548
	abr-16	510	N.A.	334	663	582
Perfil 3	ago-14	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	sep-14	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	oct-14	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	nov-14	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	dic-14	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	abr-15	N.A.	N.A.	N.A.	156	156
	ago-15	N.A.	N.A.	N.A.	413	413
	dic-15	N.A.	N.A.	N.A.	555	555
	abr-16	N.A.	N.A.	624	872	870

N.A.: No aplica

*: Se usa para calcular la infiltración en la base del depósito

**.: Se usa para calcular la recarga al acuífero

Fuente: Elaboración propia.

5.2.9 Resumen de supuestos

La estimación de filtraciones en la base del depósito y de recarga al acuífero se realiza a través de una modelación variablemente saturada con el código SEEP/W 2012, donde se simulan de manera conjunta el depósito de relaves y el acuífero subyacente. En la simulación se han incorporado distintos supuestos que se consideran fundamentales para la estimación, dentro de los cuales se destacan:

- El análisis se realiza en base a una modelación de régimen transiente, para 9 etapas de crecimiento proyectado.
- La condición inicial para el primer año de crecimiento se define a través de un modelo operado en régimen permanente, representativo de las condiciones de flujo subterráneo

natural, previo al inicio del crecimiento del depósito. Para las etapas posteriores la condición inicial queda definida por los resultados de la etapa anterior.

- No se modela la evaporación desde los relaves, la laguna cuenta con los valores de evaporación implícitos, a partir de los datos medidos de la cota de espejo de agua en terreno.
- Todos los materiales se simulan bajo el supuesto de homogeneidad, considerando medios porosos equivalentes, los que incluyen de manera implícita de existencia de posibles estructuras como fallas o fracturas. Con esto, las propiedades hidráulicas son constantes dentro de cada región.
- Para estimar la curva de succión v/s contenido de humedad de las unidades de suelo natural se considera una curva de succión característica (incorporada en el software) para suelos mayormente arenas, con una humedad inicial de 15 %. Para el caso del suelo catalogado como roca fracturada, se utilizó la metodología de Van Genuchten cuyos coeficientes se obtuvieron a partir de la literatura especializada, y fueron los siguientes: α (KPa)=0,02 y $n=1,818$, humedad saturada de 0,1% y humedad residual (θ_r) de 8,64 E-3 %.
- La curva de succión para el relave se calculó a partir del modelo Van Genuchten. Los parámetros estimados para dicho modelo son: α (KPa)=119,36 y $n=2,777$, humedad saturada (θ_s) de 45,1% y humedad residual (θ_r) de 4%.
- La curva de succión para el muro se de acuerdo al método estimativo de tamaño de partículas, asumiendo que la humedad de saturación es 30%, diámetro $D_{10}=0,1$ mm y $D_{60}=10$ mm.
- Para definir las propiedades hidráulicas del relave se utiliza información de un relave integral estudiado por GeoHidrología. Con una conductividad hidráulica saturada (Kh) de 8,73E-3 m/d y anisotropía $K_v/K_h = 0,1$.
- Las permeabilidades asociadas a los suelos (aluvial y roca fracturada), se consideraron de acuerdo a los valores obtenidos en el modelo conceptual, y la calibración del modelo numérico 3D.
- La permeabilidad inicial del muro se obtuvo del informe de análisis de estabilidad de KP (2015), que se basa en las especificaciones técnicas sobre las cuales fue construido el muro.
- Se considera que el relave es depositado completamente saturado, lo que representa el caso más conservador ya que entrega infiltraciones máximas.
- Se incluye el efecto de una geomembrana de 2,0 mm de espesor, ubicada en toda la zona que será cubierta por laguna en las diferentes etapas del crecimiento, de permeabilidad 1E-7 m/d. Esta característica es típica de material geosintético comercial.
- Las curvas de succión v/s conductividad hidráulica de cada material son construidas en SEEP/W, considerando la curva de succión v/s contenido de humedad, el método de estimación correspondiente y la conductividad hidráulica saturada.

5.3 Resultados

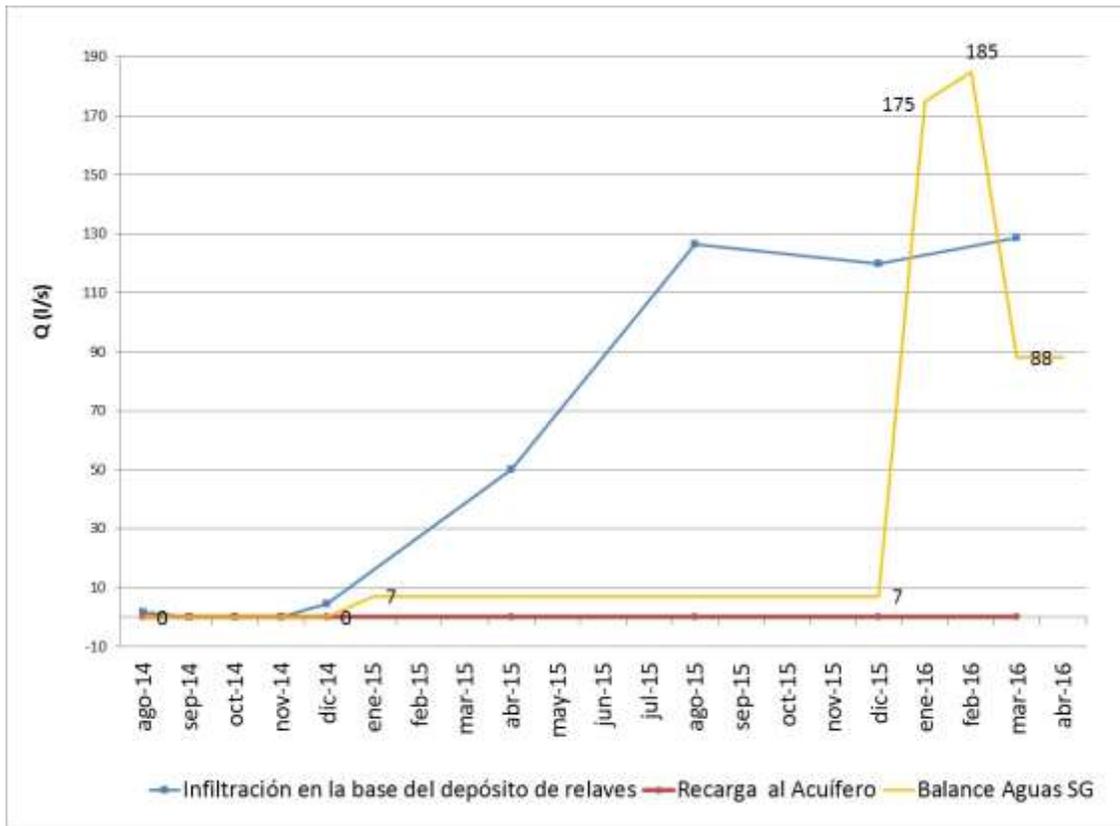
A continuación, se presentan los resultados de la estimación de infiltraciones en la base del depósito de relaves y la recarga al acuífero, para el período de crecimiento desde agosto de 2014 hasta marzo 2016. Sólo se presentan los resultados en términos de caudal ya que la evolución los niveles son evaluados con el modelo 3D.

La estimación de infiltraciones se realiza considerando los resultados de los 3 perfiles representativos de las diferentes zonas del depósito a lo largo de su.

5.3.1 Caudal de infiltración caso base

En la Figura 5-20 se presentan los resultados de la estimación del caudal de infiltración en la base del depósito de relaves y la recarga al acuífero. En Tabla 5-10 se presenta el detalle de los resultados por perfil y el total para el depósito.

Figura 5-20: Infiltración en la base del depósito de relaves y recarga al acuífero



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-10: Infiltración en la base del depósito de relaves y recarga al acuífero

Año	Infiltración en la base del depósito (L/s)				Recarga al acuífero (L/s)			
	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	TOTAL	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	TOTAL
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ago-14	1,72	0,00	0,000	1,72	0,0	0,0	0,0	0,0
sep-14	0,01	0,00	0,000	0,01	0,0	0,0	0,0	0,0
oct-14	0,01	0,00	0,000	0,02	0,0	0,0	0,0	0,0
nov-14	0,03	0,00	0,000	0,03	0,0	0,0	0,0	0,0
dic-14	4,46	0,01	0,000	4,47	0,0	0,0	0,0	0,0
abr-15	35,37	14,88	0,000	50,25	0,0	0,0	0,0	0,0
ago-15	66,83	59,81	0,000	126,63	0,0	0,0	0,0	0,0
dic-15	59,24	60,53	0,001	119,78	0,0	0,0	0,0	0,0
abr-16	59,41	69,35	0,003	128,76	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente: Elaboración propia.

La infiltración en la base del depósito estimada para el periodo de operación presenta un constante aumento por efecto del crecimiento del depósito de relaves, llegando a un caudal máximo de 128,8 L/s en abril de 2016. A partir de abril de 2015, la infiltración presenta un aumento evidente. Luego, la tasa de infiltración tiende a disminuir, debido que, a pesar de que las capas de relave siguen engrosando el material de depósito sobre el suelo, a partir de esta fecha la laguna comienza a reducir su área y vuelve a quedar contenida en su totalidad sobre la geomembrana.

En particular, en los perfiles 1 y 2 la infiltración en el año 2014 es casi nula, debido a que la laguna se encuentra casi en su totalidad sobre la geomembrana y el relave no presenta un crecimiento excesivo. Posteriormente, se observa un alza notable en la infiltración, debido a la ubicación de la laguna sobre suelo sin geomembrana, lo presencia de este volumen importante de agua dentro del relave más la humedad propia del relave genera un flujo constante y creciente hacia el material aluvial. Si bien se observa una leve disminución en diciembre de 2015, ésta se debe a que a partir de ese año el perfil 1 no alcanza a abarcar a la laguna, por lo que la infiltración decrece, para luego mantenerse constante en abril de 2016. Sin embargo, según lo que muestran los valores, la infiltración total del depósito es creciente.

El perfil 3, prácticamente no presenta infiltraciones, debido a que su trazado no intersecta con la laguna y la humedad del relave depositado en éste no es suficiente para producir un flujo hacia el suelo que se considere relevante.

Con relación a la recarga al acuífero se observa que no existe flujo hacia la napa, situación esperable debido a que el acuífero se encuentra ubicado en la capa de roca fracturada, medio de permeabilidad muy baja, por lo que el agua proveniente de la humedad de los relaves y de la laguna de aguas claras no es capaz de ingresar a éste.

Para validar los datos de infiltración estimados con la modelación 2D, se comparó con el balance de aguas que realizó SG SCM en el informe: "Balance de Aguas, Depósito Relaves, Abril 2016". En dicho informe se presentó el balance para a nivel anual del año 2015 y a nivel mensual de enero, febrero, marzo y abril del año 2016. En general el balance tiene como ecuación lo siguiente:

$$Q_{entrada} = Q_{agua recuperada} + Q_{agua evaporada} + Q_{agua retenida} + Q_{agua infiltrada}$$

Donde:

- El agua que entra al sistema corresponde al 40% de las toneladas totales de relave, por lo que, con el valor de toneladas de relave seco se obtiene la cantidad de agua entrante
- Agua recuperada corresponde a un dato operacional, otorgado en el informe de balance de Aguas el cual fue confeccionado por operaciones de SG. En este caso el valor anual del 2015 (presentado en dicho informe) fue la suma de diciembre de 2015 (dato operacional de planilla otorgado por SG) más la sumatoria en partes iguales desde enero a noviembre de 2015.
- Evaporación se calcula a partir de tasa de evaporación de 9,22 l/s/m² y la superficie del espejo de agua.
- Volumen de agua retenida en los sólidos se calcula utilizando la ecuación propuesta en el documento de balance de Sierra Gorda y se estima en base al volumen de sólidos depositados (V_s) y a la relación de vacíos (e) según la expresión $V_s \cdot e$. Los valores de "e" y "densidad" se obtuvieron de valores de laboratorio (1,07 y 2,77, respectivamente),

La infiltración, es la variable desconocida, la cual es calculada a partir de la diferencia de los parámetros descritos anteriormente.

Luego, aplicando la ecuación antes descrita, y la metodología, Arcadis generó el balance a nivel mensual del depósito de relaves para el año 2015, mientras que los datos del año 2016 se tomaron directamente del informe de SG SCM. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5-11.

Tabla 5-11: Balance de Aguas Mensual para el depósito de relaves

Año/Mes	Relave	Sólidos	Agua Entrada			Agua Recup.			Agua Evap.				Agua Retenida Calculada		Infiltración
	TMS/mes	% /mes	m³/mes	m³/d	L/s	m3/mes	m3/d	L/s	m2, espejo agua	m³/día	Tasa (L/d m2)	L/s	m3/mes	L/s	L/s
01-ene-15	2.494.146	59,7	1.683.653	54.311	629	468.989	15.129	175	124.890	1.149	9,2	13	963443	372	69
01-feb-15	1.708.940,00	59,7	1.153.606	41.200	477	468.989	16.750	194	124.890	1.149	9,2	13	660132	273	0
01-mar-15	2.239.137,00	59,7	1.511.511	50.384	583	468.989	15.129	175	124.890	1.149	9,2	13	864937	334	61
01-abr-15	2.271.037,00	59,7	1.533.045	52.864	612	468.989	15.633	181	124.890	1.149	9,2	13	877260	338	79
01-may-15	2.662.136,00	59,7	1.797.053	59.902	693	468.989	15.129	175	124.890	1.149	9,2	13	1028334	397	108
01-jun-15	2.727.528,00	59,7	1.841.196	63.490	735	468.989	15.633	181	124.890	1.149	9,2	13	1053594	406	134
01-ju.-15	2.711.748,77	59,7	1.830.544	63.122	731	468.989	15.129	175	124.890	1.149	9,2	13	1047499	391	151
29-ago-15	2.086.854,98	59,7	1.408.715	48.576	562	468.989	15.129	175	124.890	1.149	9,2	13	806114	301	73
16-sep-15	2.541.883,04	59,7	1.715.877	59.168	685	468.989	15.633	181	124.890	1.149	9,2	13	981883	379	112
28-oct-15	2.984.364,00	59,7	2.014.571	64.986	752	468.989	15.129	175	124.890	1.149	9,2	13	1152805	430	133
20-nov-15	2.977.580,00	59,7	2.009.991	67.000	775	468.989	15.633	181	124.890	1.149	9,2	13	1150184	444	137
16-dic-15	2.762.329,00	60,34	1.815.611	58.568	678	366.842	14.674	170	201.300	1.852	9,2	21	1067037	398	88
14-ene-16	3.104.067,00	61,2	1.967.938	63.482	735	227.387	8.746	101	97.100	895	9,2	10	1199044	448	175
17-feb-16	2.876.147,00	60,1	1.909.455	65.843	762	272.296	10.473	121	115.000	1.060	9,2	12	1111003	443	185
17-mar-16	3.185.952,00	59,6	2.159.605	69.665	806	657.685	21.216	246	123.700	1.141	9,2	13	1230675	459	88
14-abr-16	2.712.454,00	60	1.808.303	60.277	698	461.136	17.079	198	70.100	646	9,2	7	1047771	404	88

Para los meses del año 2016 Fuente: Balance de Aguas, Tranque Relaves, Año 2016 y Base de Datos, Operaciones Sierra Gorda
 Para año 2015 Fuente: Elaboración propia.

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

De la tabla anterior, se tiene que el agua de entrada al sistema, a partir del relave, es en promedio 682 l/s, siendo el mayor valor igual a 806 l/s en abril del año 2016, y el menor valor igual a 477 l/s en febrero del año 2015.

Los valores de agua recuperada oscilan entre 101 L/s (enero 2016) y 246 L/s (marzo 2016), teniendo una media igual a 175 L/s. Con relación, al agua evaporado, sus valores son más constantes, presentando su mínimo en abril del 2016 con un valor igual a 7 L/s, y un máximo en diciembre de 2015, con un valor igual a 21 L/s, con esto su promedio asciende a 13 L/s.

El valor teórico del agua retenida en los sólidos de relave, tiene un promedio igual a 389 L/s, y un valor mínimo igual a 273 L/s (febrero 2015) y un máximo de 459 L/s (marzo 2016).

Con estos antecedentes, se obtuvo una infiltración promedio igual a 105 L/s, con valores por sobre los 150 L/s en los meses de julio 2015, enero y febrero 2016.

Posteriormente, se requiere comparar los valores obtenidos de la infiltración calculados por medio del balance de aguas, con los valores obtenidos a partir de la modelación numérica 2D. Para el caso de la modelación numérica 2D se tiene datos en 4 etapas:

- Ene-2015 - Abr-2015
- May-2015 - Ago-2015
- Sep-2015 - Dic-2015
- Ene 2016 - Mar-2016

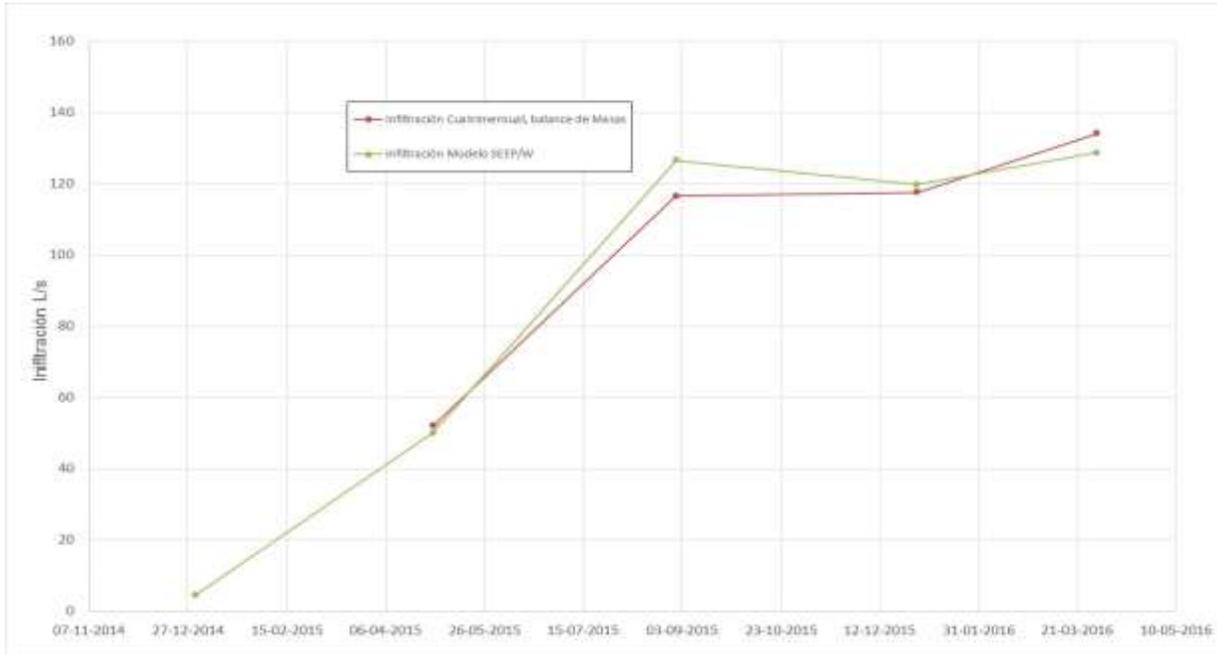
Por lo que, los valores obtenidos de infiltración en el balance de aguas, fueron promediados en el mismo rango de tiempo. Luego, de este cálculo se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 5-12: Comparación de tasa de infiltración estimada a partir del modelo 2D y del balance hídrico del depósito de relave

Fecha	Infiltración Modelo 2D	Infiltración Balance
	L/s	L/s
Ene-2015 - Abr-2015	50,25	52
May-2015 - Ago-2015	126,63	117
Sep-2015 - Dic-2015	119,78	118
Ene 2016 - Mar-2016	128,76	134

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-21: Infiltración calculada (mensual y media) y modelada (SEEP/W)

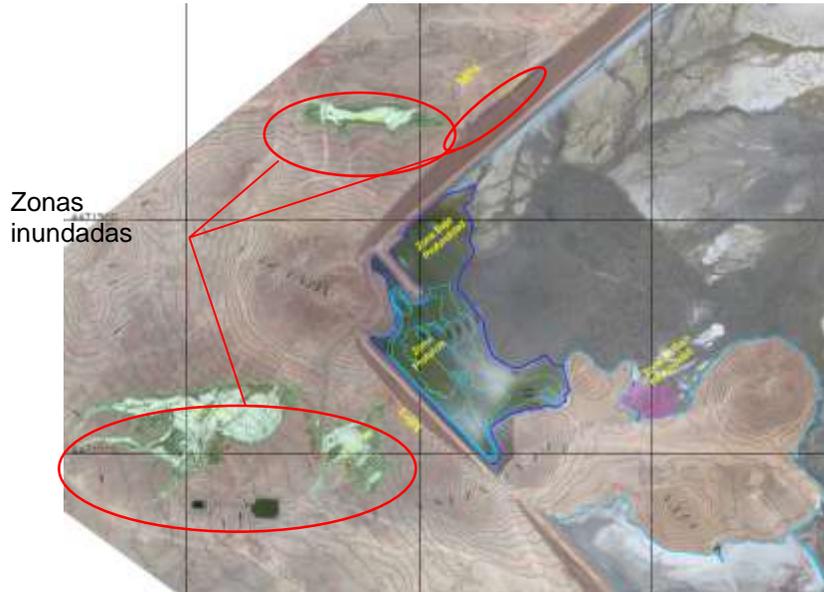


Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al gráfico, los valores de infiltración estimado a partir del modelo 2D son muy similares a los datos obtenidos en el balance de aguas de Sierra Gorda, tanto en tendencia como en magnitud. Estos resultados junto con la estimación del comportamiento de la cota piezométrica, presentada en la sección siguiente (Figura 5-25 a Figura 5-27), permiten validar el funcionamiento del modelo.

Posteriormente, se analizaron los resultados y el comportamiento del modelo con la situación actual de afloramientos en la zona, y bajo la conceptualización de la modelación era esperable que se produjese un flujo horizontal a través de la primera capa de suelo (material aluvial), generando afloramientos aguas abajo del muro (Ver Figura 5-22).

Figura 5-22: Detalle de zonas con afloramientos

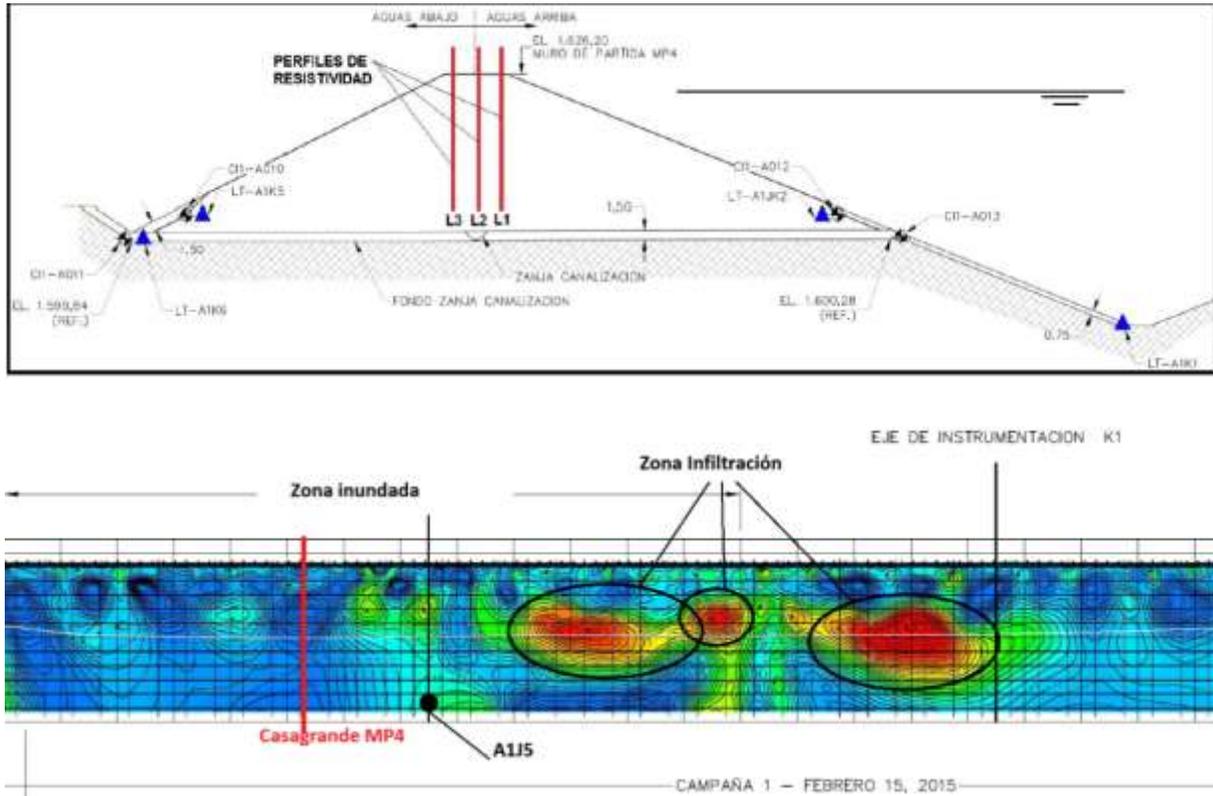


Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados de la modelación realizada, la infiltración que se produce hacia la primera capa de suelo alcanza a saturar el material, sin embargo, no es suficiente para generar un flujo horizontal y así generar los afloramientos esperados aguas abajo del muro, a principios del 2015 (fecha donde se observan los primeros afloramientos en la zanja).

Adicionalmente, de acuerdo a las conclusiones del estudio de geofísica (Figura 5-23) realizado por Knight Piésold Consulting en el "Informe de Tomografía de resistividad ", (marzo 2015), existe infiltraciones a través del muro, en complemento se tienen registros piezométricos dentro de éste que indican un ascenso de nivel (6 metros en junio 2015). Por otro lado, el pozo de observación casagrande 4, no presenta variaciones significativas de nivel (Figura 5-15), y los niveles no reflejan existencia de que el muro esté saturado, adicionalmente, en el estudio de geofísica, se puede observar que el pozo no se encuentra en la zona saturada.

Figura 5-23: Perfiles resistividad Muro 4



Fuente: Elaboración propia.

Estas infiltraciones, generan el anegamiento de la zanja inmediatamente aguas abajo del muro, hecho que tampoco se ve reflejado en esta modelación.

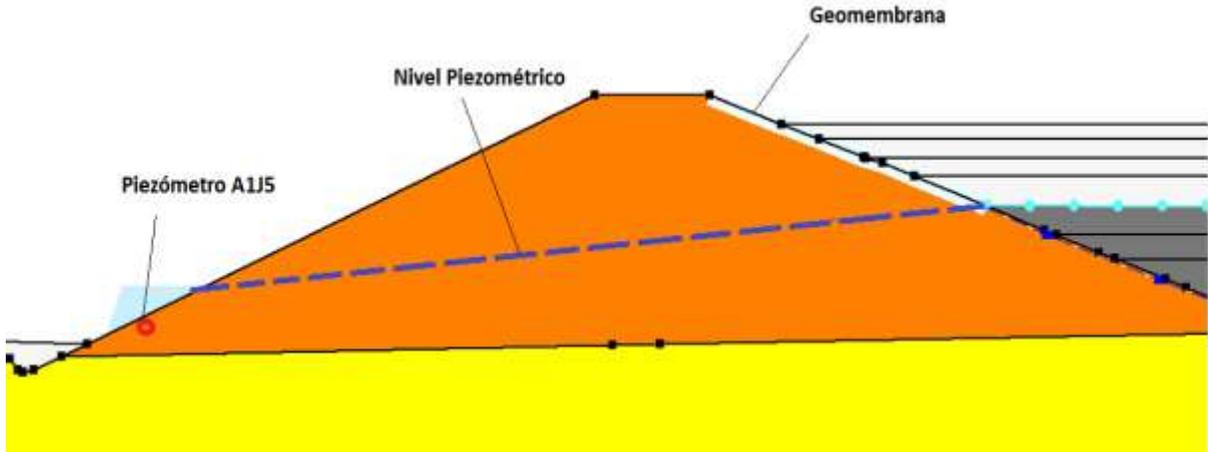
Es por esto que se procedió a realizar simulaciones adicionales, a modo de representar el escenario real. En particular la infiltración a través del muro, el anegamiento de la zanja y el aumento de las cotas piezométricas en el muro (detalladas en la sección 5.1.6), sin considerar las cotas del pozo de Casagrande, debido a que se encontraba en una zona no saturada del muro).

Para poder representar lo descrito anteriormente las simulaciones deben tener modificadas las condiciones iniciales en el muro, en especial lo que respecta a contenido de humedad inicial y eliminar del talud parte de la geomembrana (o su totalidad).

5.3.2 Simulaciones adicionales

Se realizó en primer lugar una prueba eliminando por completo la geomembrana en la zona en la cual el relave está en contacto con el muro. Con esto, se simulan la rotura de la geomembrana en todo el talud del muro. Se analizan las alturas de escurrimiento en el punto donde se sitúa el piezómetro A15J, como muestra la siguiente figura:

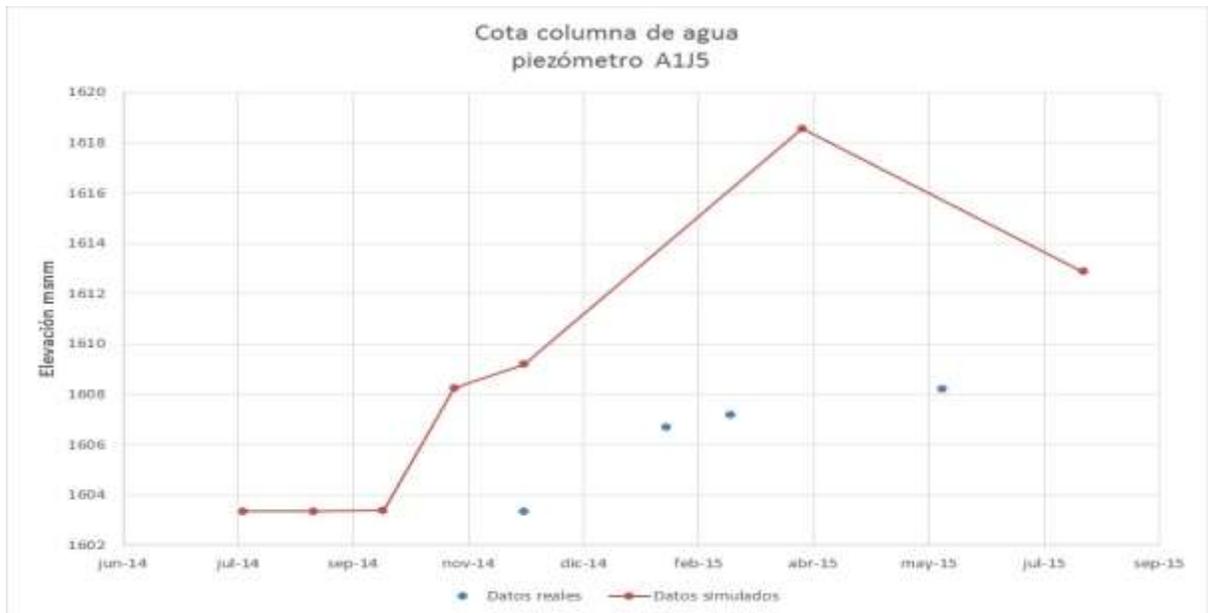
Figura 5-24: Esquema, muro M4



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de la altura de escurrimiento en el punto indicado en la figura anterior, se grafica en conjunto con los valores reales medidos, obteniéndose así, la siguiente gráfica:

Figura 5-25: Nivel Piezométrico, simulado y real

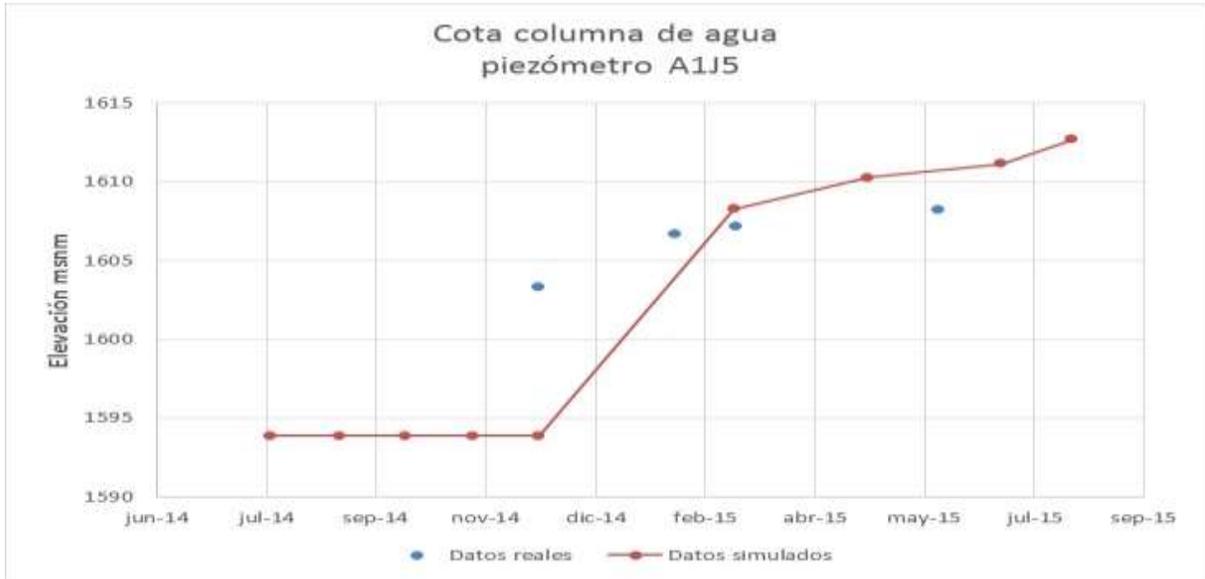


Fuente: Elaboración propia

Los datos muestran, que la simulación realizada, sobreestima los niveles de escurrimiento dentro del muro, por lo que se ajustó la presión de poros inicial en el material, lo que genera como consecuencia un cambio en el volumen inicial de agua dentro del muro. El valor original de presión de poros se había seleccionado de manera tal que la permeabilidad fuese consistente con los datos analizados en el informe de estabilidad de KP (2015). Por lo tanto, se cambiaron las condiciones iniciales del muro, asumiendo que el material para la construcción de éste, se encontraba absolutamente seco, luego la presión de poros inicial disminuye hasta -100 kPa.

Con esta nueva simulación, se procedió a medir niveles dentro del muro en el punto indicado en la Figura 5-24. De esta modelación los resultados obtenidos fueron los siguientes:

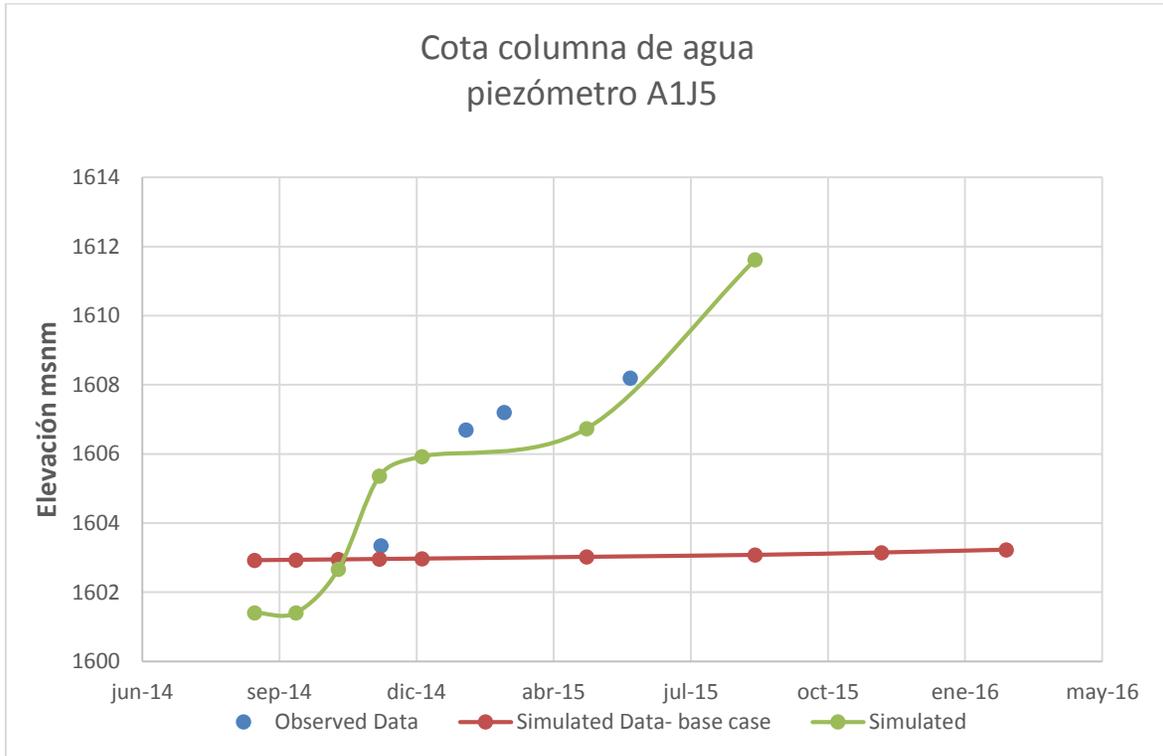
Figura 5-26: Nivel piezométrico, simulado y real



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos, muestran que, si bien existe una disminución en los niveles de escurrimiento, puede deberse a que el muro se demora en saturarse, posterior a la saturación, se observa que los niveles suben en forma precipitada y sobrepasa los valores reales, por lo que se decidió, realizar una última simulación con las condiciones iniciales originales, pero asumiendo que la geomembrana presenta su rotura sólo en los primeros metros, con esto supuesto los resultados fueron:

Figura 5-27: Nivel piezométrico, simulado y real



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, estos resultados muestran una aproximación a los datos medidos por el piezómetro, con excepción del primer punto saturado (diciembre 2014) el cual se encuentra sobreestimado, sin embargo, se considera adecuada la simulación.

5.4 Conclusiones modelo de infiltración

Se ha desarrollado una modelación para estimar la infiltración que se produce desde el depósito de relaves de Minera Sierra Gorda producto del drenaje gravitacional del contenido de humedad con el que serán depositados los relaves. Adicionalmente, se requiere analizar el flujo horizontal en la primera capa de suelo (de material aluvial) que se produce a raíz de la infiltración, y que genera afloramientos, aguas abajo al muro (Figura 5-22).

Para esto se estimó la infiltración en la base del depósito y también la eventual recarga que alcanzaría el acuífero. Conceptualmente se ha diferenciado entre ambos flujos debido a la existencia de una importante zona no saturada, la cual retendrá parte de la infiltración del depósito. Dicha estimación de recarga (antrópica) al acuífero es necesaria para desarrollar las simulaciones con el modelo hidrogeológico numérico 3D (MODFLOW), orientadas a evaluar el impacto del proyecto en lo que respecta a la componente hidrogeológica. Por otra parte, la infiltración, y la retención de humedad por parte de la zona no saturada es esencial en este proyecto producto de las infiltraciones ocasionadas por la presencia del tanque.

La estimación desarrollada se basa una modelación numérica de régimen transiente a través de 3 perfiles bi-dimensionales, desarrollados con el código SEEP/W 2012, que cubren la totalidad del depósito. La modelación 609 días de operación, para los cuales se consideran los crecimientos definidos a nivel mensual, para el primer semestre de operación y a nivel cuatrimestral para el resto

del período. Dichos perfiles consideran tanto la representación de los elementos asociados al depósito de relaves: la laguna de aguas claras, el muro del depósito, los relaves y la geomembrana; como los de suelo de fundación y acuífero subyacente.

Las propiedades hidráulicas de los materiales asociados al acuífero, del relave y del muro (construido con materiales estériles), requeridas para una modelación variablemente saturada, corresponden a las curvas características de los materiales (succión v/s contenido de humedad y succión v/s conductividad hidráulica), las cuales incorporan dentro de su definición el contenido de humedad saturada (θ_s), el contenido de humedad residual (θ_r) y la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}).

El material representativo de la geomembrana fue simulado en SEEP/W 2012 considerando un tipo de propiedad denominada "interface material"

Por otro lado, el material representativo del muro también fue a partir de ecuaciones características, que utilizan una metodología en base a los tamaños de partículas. (Informe infiltraciones, KP, 2015).

Las conductividades hidráulicas de saturación para ambos tipos de suelos fueron definidas en base a la calibración del modelo 3D conceptual y numérico. Sus valores son típicos para un tipo de suelo aluvial (1 m/d) y para una roca fracturada (8 e-5). Para el relave, la conductividad de saturación se asumió igual a 8,73 E-3, que, si bien es un valor más permeable que el típico utilizado para relaves, se decidió en base a que los relaves tenían muy poco tiempo de asentamiento, y las capas de relaves depositadas no superaban los 20 m, de lo que resulta un relave muy húmedo con una alta permeabilidad.

Finalmente, la conductividad hidráulica inicial para el muro, se obtuvo a partir del informe confeccionado por KP, que se basa en las especificaciones técnicas de construcción de éste. Su valor corresponde a 1 E-5 m/d.

Con estos supuestos, se procedió a realizar la primera modelación, de lo que se obtuvo como resultado que la recarga al acuífero es nula, lo que era esperable debido a que el acuífero se encuentra confinado en la capa de roca fractura, suelo cuya característica de permeabilidad es muy baja, por lo que el flujo proveniente de la humedad de los relaves y de la laguna de aguas claras no es capaz de ingresar éste.

Por otro lado, los resultados de la estimación de infiltración en la base del depósito muestran un incremento del caudal durante todo el periodo de operación, alcanzando un máximo de 128 l/s al final del periodo (marzo 2016). A partir de abril de 2015, la infiltración presenta un aumento evidente. Luego, la tasa de infiltración tiende a disminuir, debido que la laguna comienza a reducir su área y vuelve a quedar contenida en su totalidad sobre la geomembrana.

De los resultados obtenidos era esperable que se produjese un flujo horizontal a través de la primera capa de suelo (material aluvial), generando afloramientos aguas abajo del muro. Sin embargo, la infiltración producida no es suficiente para generar un flujo horizontal y por ende no se ven reflejados los afloramientos aguas abajo del muro.

Es por esto que se concluye que existe una posible filtración a través del muro, ocasionada por una rotura de la geomembrana o bien por una construcción deficiente de éstos, o una combinación de ambas. Hecho que se respalda, por los niveles medidos en los piezómetros dentro de los muros.

Con estos resultados, se decide generar nuevas simulaciones, modificando las condiciones iniciales del material de los muros, y eliminando en parte (o en su totalidad) la geomembrana)

Una primera simulación, se basó en eliminar por completo la geomembrana del talud de muro que se encontraba en contacto con el relave, de estos resultados se obtiene una sobreestimación de los niveles dentro del muro, y por ende una infiltración mayor a la esperada a través de éste. (Figura 5-25). En la segunda simulación, se disminuyó la humedad inicial del material que conforma el muro y

se mantuvo el talud de éste sin la geomembrana, los resultados fueron más cercanos a los niveles piezométricos, sin embargo, se observa que el muro no se satura en los meses esperados (finales del año 2014), y posterior a su saturación la infiltración sobre pasa los valores medidos. Finalmente, la simulación más cercana a la realidad fue aquella en la que el muro se encuentra con una humedad de acuerdo a lo definido en la primera simulación y una “rotura” de geomembrana solo en los primeros metros del talud.

Con estos resultados, se obtiene una disminución en la infiltración directamente hacia el material aluvial en la zona del depósito de relaves, pero un flujo constante a través del muro, lo que genera un afloramiento inmediatamente aguas abajo de éste y posiblemente una saturación de la capa aluvial en ese sector, lo que se ve reflejado en los afloramientos en zonas alejadas de los muros que se encuentran en la línea de drenaje de las cuencas naturales.

6 MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO 3D

Basado en el modelo conceptual hidrogeológico descrito previamente, se implementó un nuevo modelo numérico de flujo de aguas subterráneas, el cual corresponde a la tercera actualización (o actualización 2016) del modelo numérico de Sierra Gorda. La implementación y calibración transiente de dicho modelo es descrita aquí.

Uno de los principales objetivos planteados para el modelo numérico era representar el ascenso de niveles de ciertos pozos, lo cual se asociaba con la operación del depósito de relaves y su impacto general sobre los niveles del acuífero en roca subyacente.

El análisis conceptual y más relevantemente el de infiltraciones desde el depósito, mostró que dicho efecto en la práctica no existe, y el agua que pierde el depósito de relaves no alcanza al acuífero en roca en la forma de una recarga distribuida, si no que como un efecto puntual en los pozos.

En efecto, las infiltraciones generadas por el depósito han fluido solamente a través de los sedimentos someros primero verticalmente hasta la base de esta unidad y luego hacia los pozos ubicados al oeste/sur-oeste de los muros 3 y 4, e ingresando a éstos a través de la porción del ranurado/filtro de gravas que se encuentra dentro de la unidad de sedimentos (caliche). El modelo de infiltraciones mostró que la recarga al acuífero en roca, producto de las infiltraciones generadas por el depósito, es básicamente nula.

Considerando esto, se establece que el modelo de aguas subterráneas (flujo saturado) que se ha actualizado no permitirá reflejar el ascenso de nivel de los pozos en cuestión. No obstante lo anterior, y debido a que el desarrollo del modelo de infiltraciones se hizo en paralelo al modelo 3D, se debe mencionar que el dominio de este último fue ampliado respecto del modelo existente para incluir la dimensión total de depósito de relaves que fue evaluado en el EIA de Sierra Gorda, alejando el borde oeste del modelo aún más, tal como se describe posteriormente.

Previo a la descripción de la implementación del actual modelo, la Tabla 6-1 presenta una breve descripción del modelo existente, el cual corresponde a la segunda actualización hecha por Arcadis (2015), donde principalmente se incluyeron más datos al modelo que VAI Groundwater Solutions actualizó el 2014.

Tabla 6-1: Características generales del modelo de flujo existente (Arcadis, 2015)

Característica	Descripción
Plataforma	MODFLOW-2000 sobre Groundwater Vistas 6
Dominio	Superficie total = 221 km ² (68 x 71 km). Superficie zona activa = 202,44 km ²
Discretización espacial en planta	Celdas uniformes de 100 x 100 m. Grilla de 130 filas y 170 columnas. Total de celdas 44.200, de las cuales 40.488 están activas.
Discretización espacial en vertical	2 capas
Discretización temporal	Mensual: 97 períodos de <i>stress</i> (Jun-2007 a Jul-2015)
Propiedades hidráulicas	24 zonas de permeabilidad 2 zonas de almacenamiento
Pozos de extracción	5 en total
Pozos de observación	56 pozos de observación.

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Característica	Descripción
Recarga superficial	No considera recarga por precipitación
Recarga subterránea	Representadas con condiciones de borde de pozo (paquete MNW)
Descarga subterránea	Representada con condiciones de borde tipo dren (paquete DRN)

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 6-2 se comparan los principales estadígrafos de residuales de nivel del modelo actualizado por VAI (actualización 2014) y la actualización de Arcadis (actualización 2015). Se destaca que, si bien hubo un aumento en el valor del RMS normalizado entre una actualización y otra, este aún cumple con la recomendación de SEA (2012).

Tabla 6-2: Estadígrafos de calibración modelos actualización 2014 y 2015.

Estadígrafo	Actualización 2014	Actualización 2015	Unidad
ME (error medio)	-0,35	-1,41	m
MAE (error medio absoluto)	0,85	2,33	m
RMS (error cuadrático medio)	5,65	4,53	m
Residual Min.	-	-18,47	m
Residual Max.	-	16,46	m
Nº Observaciones	1.209	2.377	-
Rango de datos observados	-	106,77	m
MAE – normalizado*	-	2,2	%
RMS – normalizado*	2,6	4,2	%

*: El valor normalizado corresponde al valor en metros dividido por el rango de datos. Este último corresponde a la diferencia entre el mayor y menor dato medido ingresado al modelo.

Fuente: Elaboración propia.

6.1 Construcción del modelo 2016

6.1.1 Código de modelación

A diferencia de sus antecesores el flujo en este caso fue modelado empleando MODFLOW-USG (Panday y otros, 2013) en vez de MODFLOW-2000 (Harbaugh y otros, 2000), manteniendo la interfaz gráfica Groundwater Vistas 6.

MODFLOW-USG (*UnStructured Grids*) corresponde a la versión más reciente y avanzada de los códigos de la familia MODFLOW del USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos). Incluye una importante cantidad de mejoras respecto de sus predecesores dentro de las cuales se destacan: la posibilidad de usar cualquier tipo de grilla (no sólo celdas cuadradas), permite el refinamiento focalizado (reduciendo el número total de celdas de un modelo), provee esquemas numéricos robustos para el manejo de la re-humectación de celdas secas, hecho siempre problemático desde el punto de vista de la convergencia numérica de la solución de flujo y también para efectos de la calibración con métodos asistidos como PEST (*Model-Independent Parameter Estimation* de Doherty, 2016).

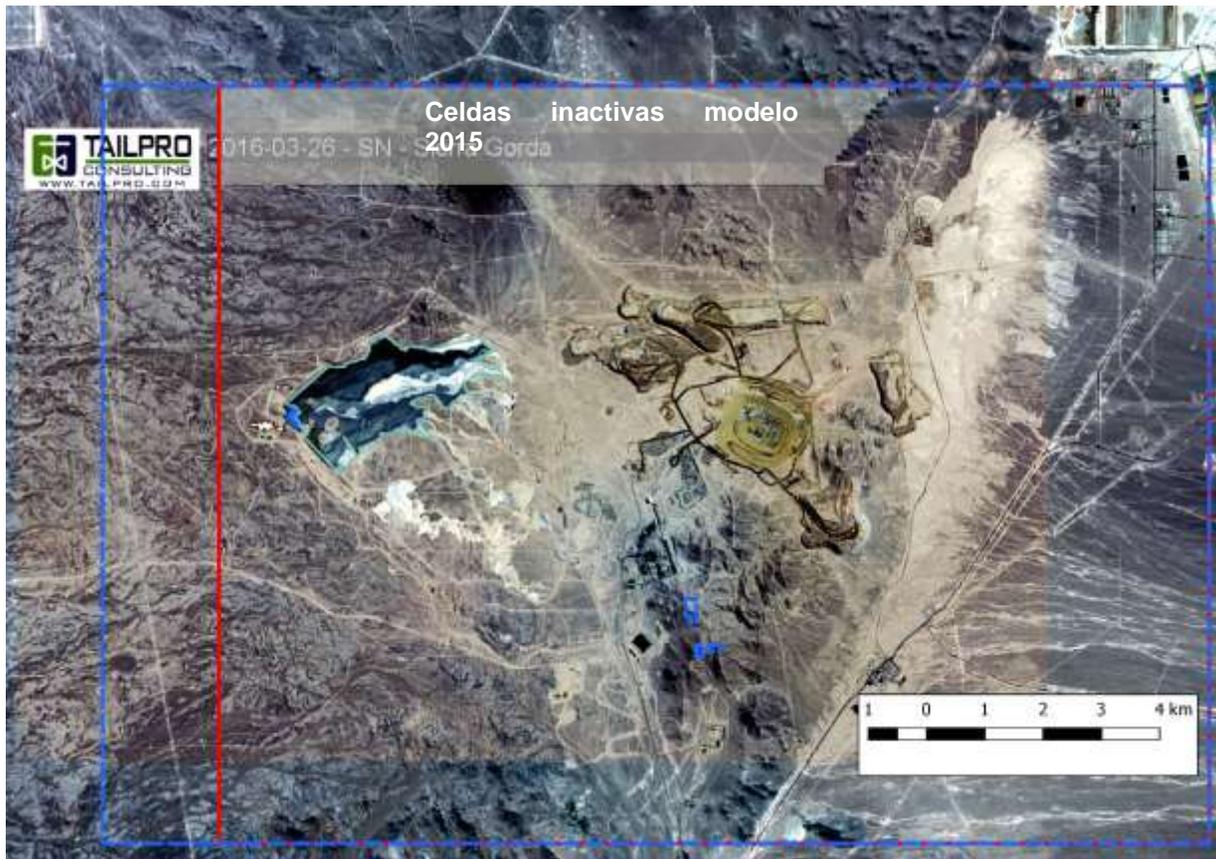
6.1.2 Dominio de modelación

Los límites del modelo numérico sólo fueron modificados en su dimensión oeste, ampliándola 2 km en esta dirección. En estas condiciones la extensión del dominio del modelo queda definida por los siguientes límites en coordenadas UTM PSAD56.

- Límite Norte: 7.479.000 m.
- Límite Sur: 7.466.000 m.
- Límite Este: 473.000 m.
- Límite Oeste: 454.000 m.

La superficie contenida en estos límites corresponde a 247 km², en vez de los 221 km² del modelo actualizado el 2015. La Figura 6-1 presenta la comparación entre el dominio actual (línea azul segmentada) y el anterior (línea roja).

Figura 6-1: Comparación entre el dominio del modelo actualizado el 2015 (rojo) y el actual (azul)



Fuente: Elaboración propia.
Imagen satelital: Mar-26 2016

Cabe mencionar que el modelo 2015 consideraba en la zona norte un conjunto de celdas inactivas que para el presente modelo han sido eliminadas, permitiendo el flujo por todas las caras del modelo.

6.1.3 Discretización espacial y temporal

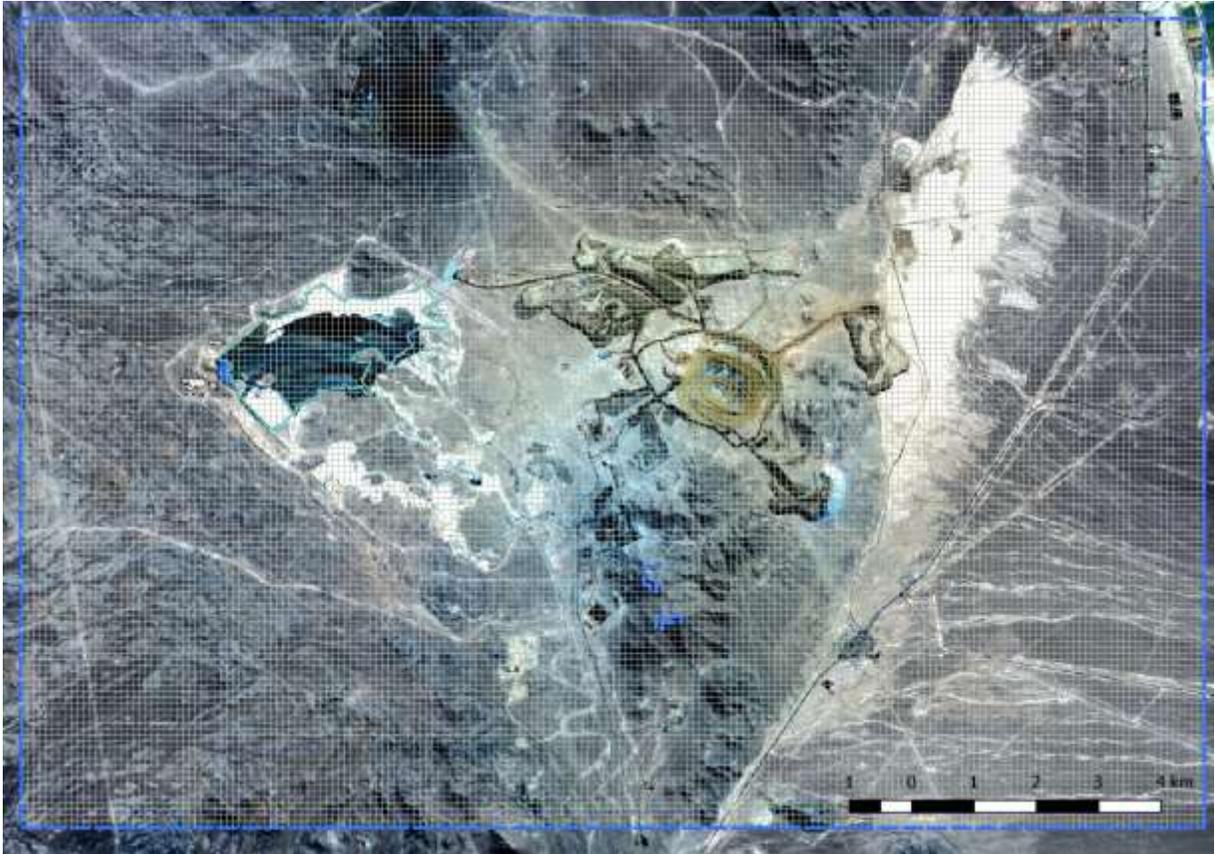
El tamaño de las celdas empleadas en el modelo 2015 no ha sido modificado en la presente actualización, manteniendo un tamaño uniforme de 100 m x 100 m, es decir, no se incluyen refinamientos focalizados. En vista del aumento del tamaño del dominio hacia el oeste se incrementó la cantidad de columnas desde 170 a 190, manteniendo la cantidad de filas en 130. De esta forma la cantidad de celdas por capa aumento de 22.100 a 24.700. De esta forma el total de celdas, considerando las 3 capas del modelo, corresponde a 74.100 sin considerar celdas inactivas.

El modelo actualizado el 2015 incluía 2 capas, las cuales no permitían contener la profundización final del rajo Catabela al 2032, razón por la cual los gradientes hidráulicos y su efecto hacia el acuífero circundante podría estar subvalorados. Para evitar esto, en el presente modelo se ha incluido una tercera capa (inferior) que en términos hidrogeológicos representa una unidad de roca fresca.

La geometría de las capas del modelo numérico 2016 fue obtenida directamente desde el modelo geométrico 3D desarrollado en Leapfrog Hydro, de esta forma existe correspondencia entre el número de unidades hidrogeológicas definidas por el modelo conceptual y la cantidad de capas empleadas en el modelo numérico. Luego la nueva geometría modifica aquella incluida en la actualización 2015 por la que se obtiene de la nueva interpretación.

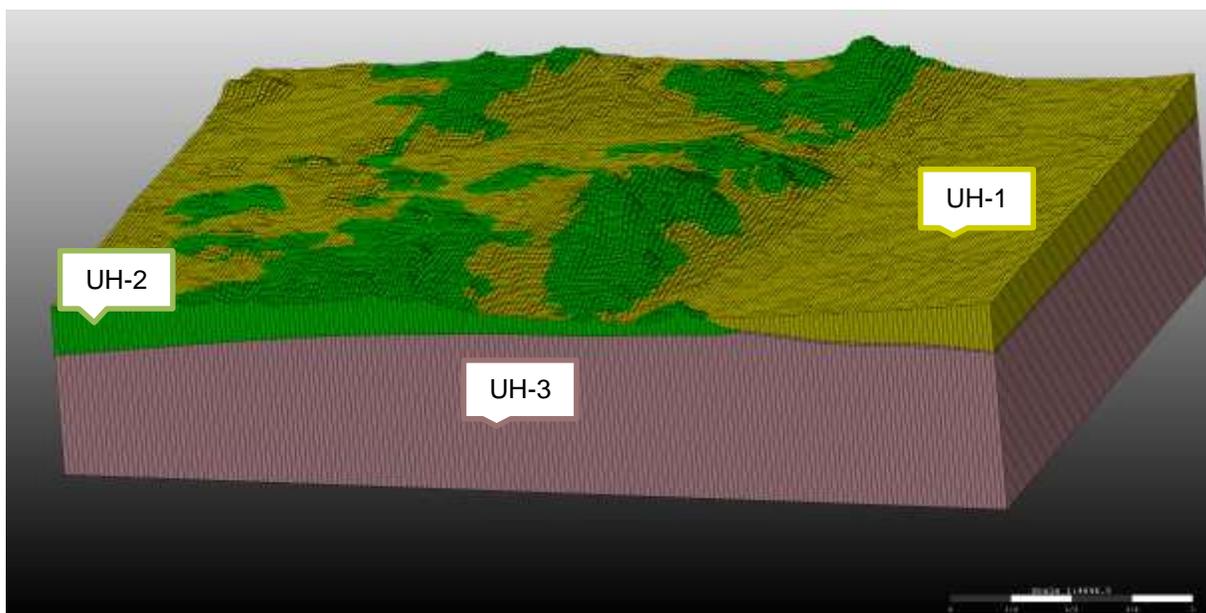
La Figura 6-2 muestra una vista en planta de la grilla del modelo, mientras que en la en la Figura 6-3 se presenta una vista en 3D de la nueva geometría incluida en el modelo.

Figura 6-2: Grilla del modelo numérico 2016



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-3: Vista 3D de la geometría del modelo



Fuente: Elaboración propia.

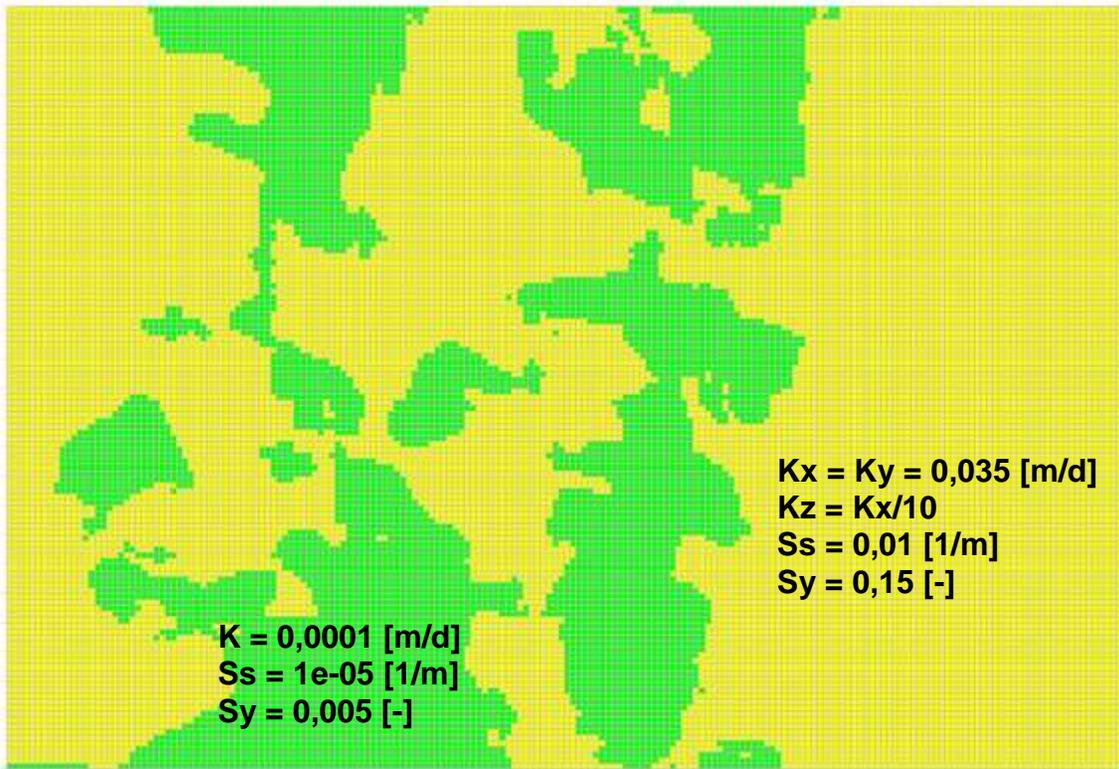
La discretización temporal se ha mantenido a escala mensual, así como el mes de inicio de la simulación (junio 2007), respecto del modelo de actualización 2015, pero se ha incrementado la cantidad de períodos de stress desde 97 a 106 períodos. De esta forma se ha incrementado la información (niveles, extracciones, topografía rajo) incluida en el modelo desde junio 2015 a marzo 2016.

Considerando que las variaciones de nivel en varios pozos no han variado sustancialmente y la cantidad de agua que circula en el modelo es muy baja, se ha optado por simular todo en el régimen transiente partiendo de una condición inicial coherente a la información medida de niveles.

6.1.4 Propiedades hidráulicas

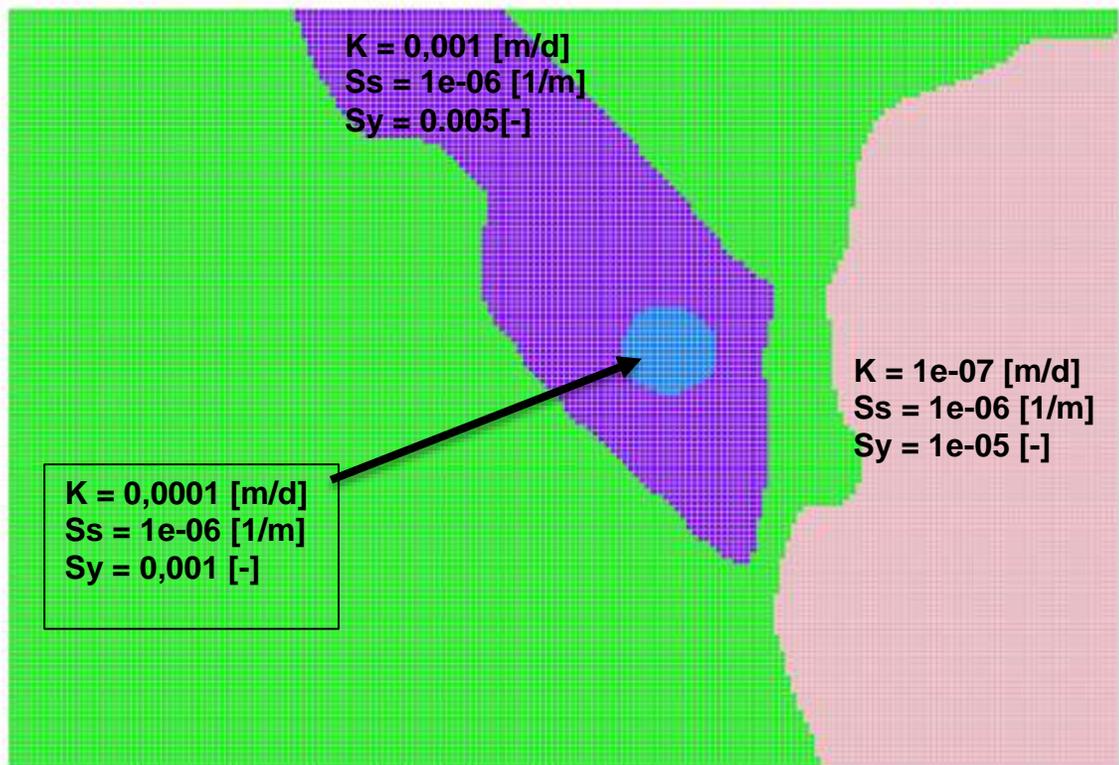
La distribución de parámetros hidráulicos, a partir del modelo Leapfrog, fue ajustada en base a la respuesta de los pozos durante la calibración del modelo. Las siguientes figuras presentan las distribuciones y valores que se obtuvieron de este proceso de calibración.

Figura 6-4: Propiedades hidráulicas Capa 1



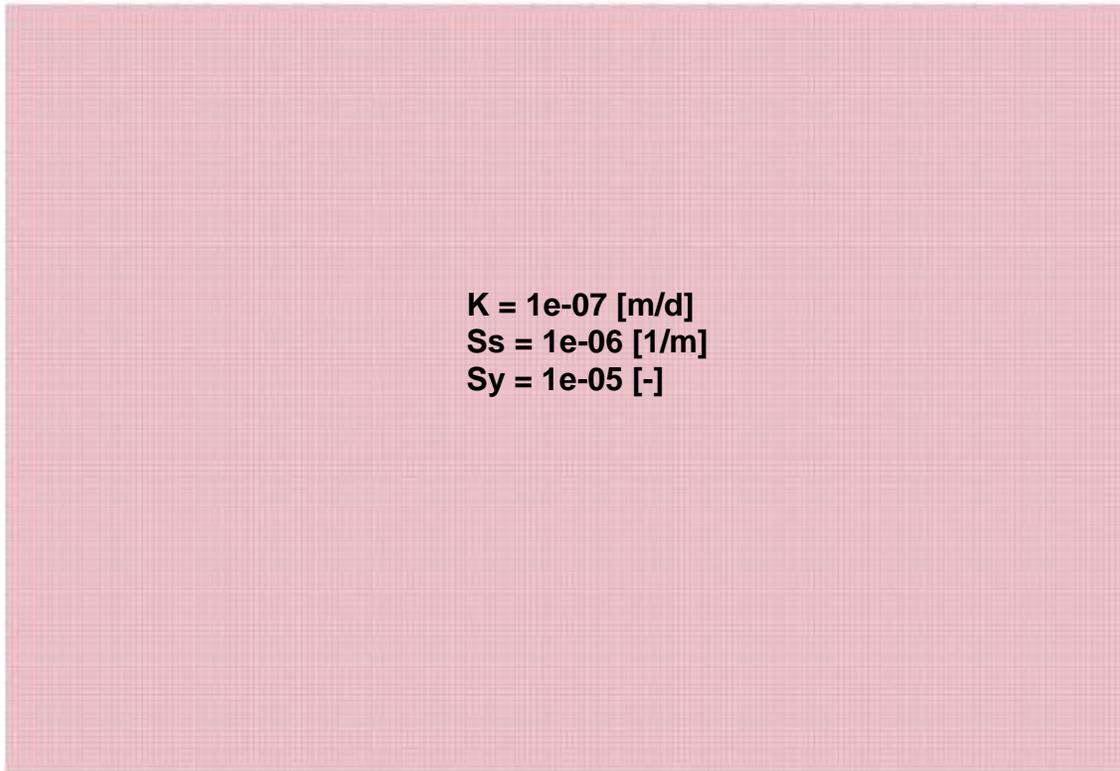
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-5: Propiedades hidráulicas Capa 2



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-6: Propiedades hidráulicas Capa 3



Fuente: Elaboración propia.

6.1.5 Condiciones de borde y extracciones de aguas subterráneas

En términos de los principales mecanismos de recarga y descarga que se incluyen dentro del modelo están:

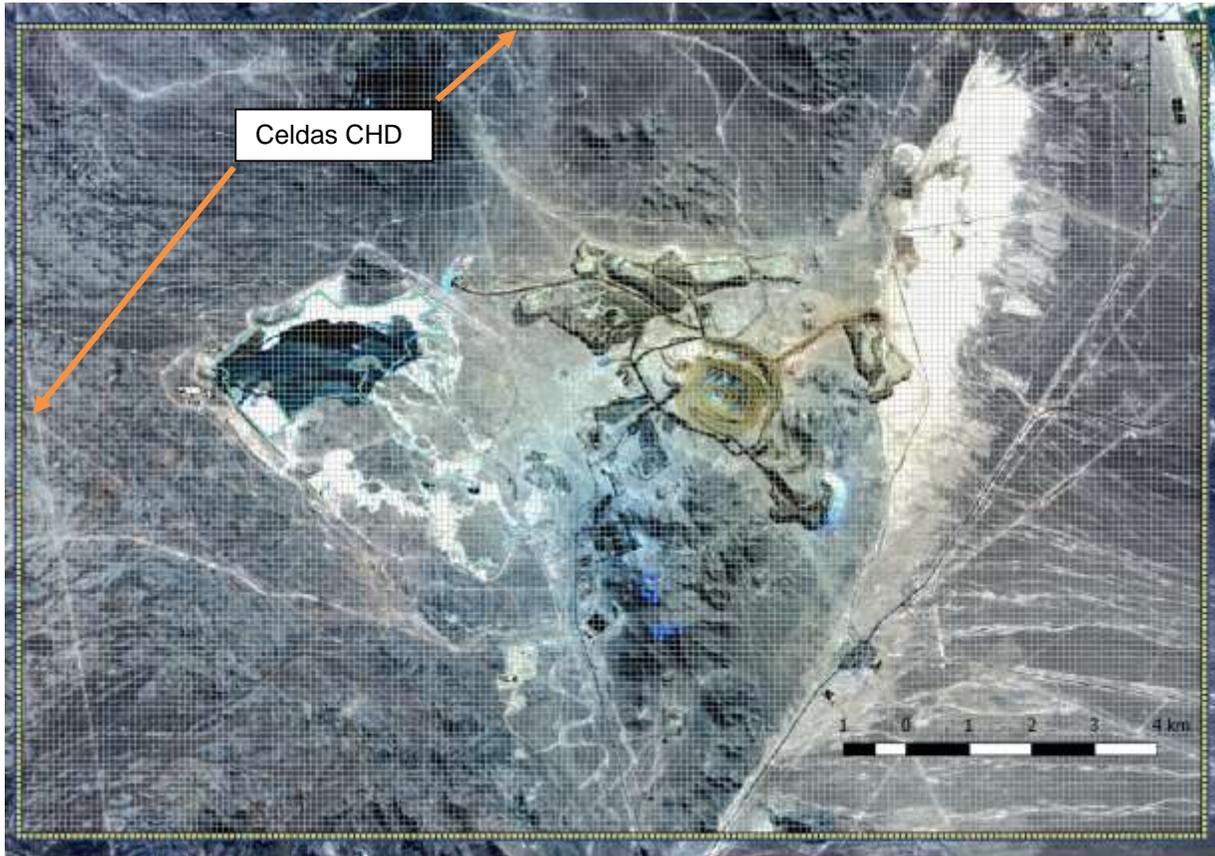
- Recarga y descarga subterránea.
- Extracción de agua producto del desaguado del rajo Catabela.
- Extracción de agua desde pozos, principalmente en pampa Lina.

A continuación, se presenta la implementación de dichos elementos sobre el modelo numérico, indicando los paquetes de MODFLOW-USG utilizados para estos fines. El análisis de cada componente fue presentado en el modelo conceptual a excepción de la profundización del rajo Catabela, lo cual es descrito aquí.

6.1.5.1 Recarga y descarga subterránea

La recarga y descarga subterránea fue implementada en el modelo empleando una condición de carga hidráulica especificada, basada en la piezometría generada por el modelo conceptual. Esta piezometría fue aplicada a cada celda del borde del modelo empleando el paquete CHD, permitiendo así tanto la entrada y salida de agua, dependiendo de la zona. El caudal de ingreso y salida por cada cara del modelo fue ajustado cambiando las permeabilidades del modelo, principalmente. Los valores de nivel aplicados a cada celda se mantuvieron constantes en el tiempo, considerando que gran parte del sistema fuera del entorno del rajo se encuentra en equilibrio. La Figura 6-7 presenta la ubicación de las celdas utilizadas. Estas se aplicaron a las 3 capas del modelo.

Figura 6-7: Celdas tipo CHD empleadas para ingresar la recarga y descarga subterránea



Fuente: Elaboración propia.

6.1.5.2 Profundización rajo Catabela

En 2012 comienza la explotación del rajo Catabela. Durante los primeros años de profundización del rajo, su fondo estuvo sobre el nivel freático. Posteriormente, a medida que el fondo del rajo se profundiza, las actividades de desagüe del rajo interfieren localmente el nivel freático. Para la modelación del rajo se dispone de las topografías desde el año 2012 hasta 2016.

La profundización del rajo en el tiempo, fue representado numéricamente con la condición de borde tipo dren (paquete DRN), la cual permite incorporar al modelo el efecto de despresurización del nivel freático adyacente a los taludes del rajo en la medida que este se profundiza.

La condición de borde tipo dren extrae agua sólo cuando la carga hidráulica es mayor a cierta cota umbral especificada y lo hace de manera proporcional a la diferencia entre ambos niveles ponderado por la conductancia, lo cual queda expresado con la siguiente relación:

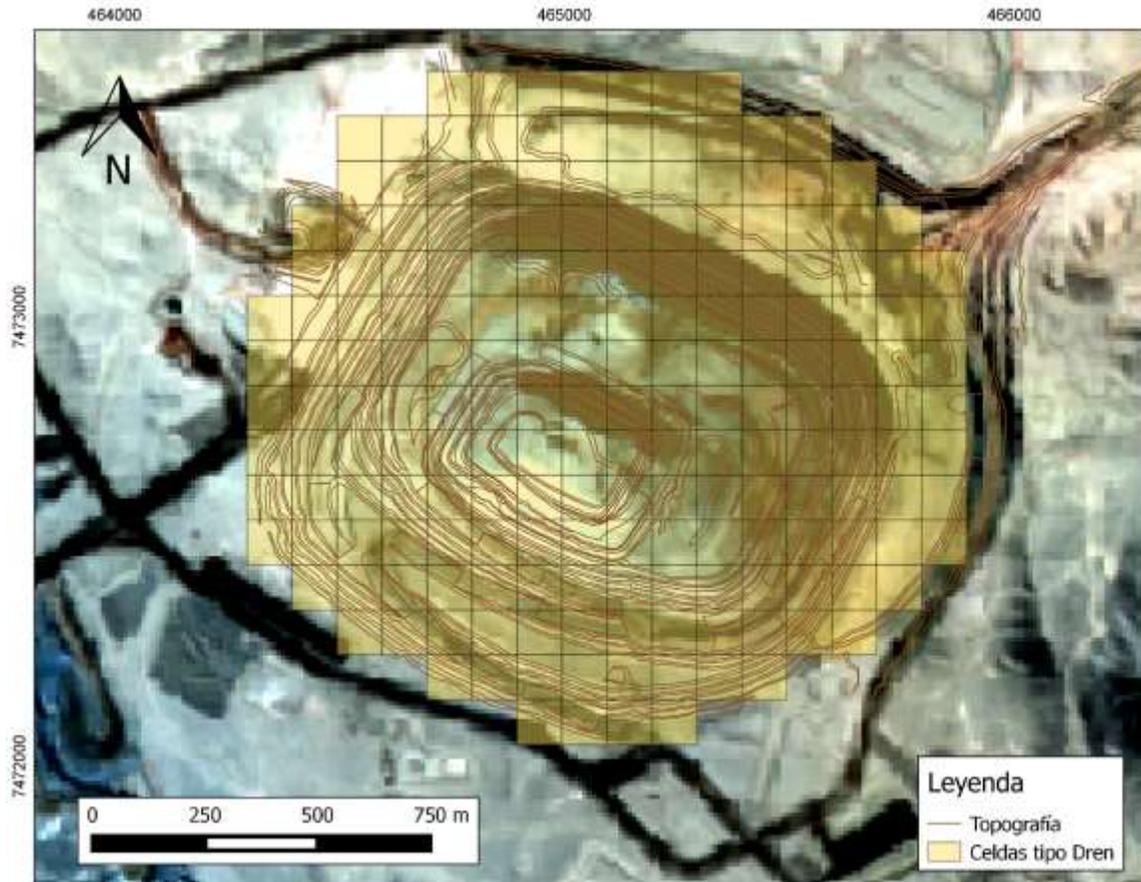
$$(1) \quad \begin{aligned} QD &= CD \times (h - d) \text{ si } h > d \\ QD &= 0 \text{ si } h \leq d \end{aligned}$$

Dónde:

QD = Caudal captado por la celda de dren (L^3/T)
 CD = Conductancia de la celda de dren (L^2/T)
 h = Carga hidráulica en la celda de dren (L)
 d = Cota umbral de la celda de dren (L)

Para aplicar esta condición de borde fue necesario definir la cantidad total de celdas requeridas para representar la profundización del rajo. Para esto se consideró el límite del tamaño máximo del rajo en marzo-2016, y este límite se intersectó con la grilla del modelo numérico, dando así un total de 193 celdas tipo dren para cada capa del modelo numérico. La Figura 6-8 muestra la distribución de las celdas de dren (color amarillo) consideradas para representar el rajo que actualmente opera Minera Sierra Gorda.

Figura 6-8: Celdas de dren empleadas en el modelo 2016



Fuente: Elaboración propia.

Una vez definida la cantidad de celdas de dren a emplear, se asignaron las cotas umbrales mediante la siguiente metodología:

1. Se emplearon topografías de escala semestral las cuales fueron interpoladas espacialmente a las celdas del modelo.
2. Debido a que el modelo opera a escala mensual las cotas umbrales de los drenes fueron interpoladas en el tiempo entre cada semestre considerado.
3. Así, por ejemplo, la topografía de julio y noviembre del año 2012 fueron asignadas al primer y segundo semestre del mismo año, respectivamente. La asignación de los periodos de stress adoptada en el modelo durante el avance del rajo se presenta en la Tabla 6-3.
4. Para los drenes inactivos se definió una cota umbral de 10.000 msnm, ya que este valor se encontrará en todos los casos sobre el nivel piezométrico y no producirá drenaje.
5. Finalmente, el parámetro de conductancia de todas las celdas de dren empleadas se fijó en 1.000 m²/día.

Tabla 6-3: Fechas de información topográfica provista por Sierra Gorda y asignación de períodos de stress del modelo numérico

Fecha con topografía disponible	Período semestral	Período de Stress adoptado en el modelo
Feb-2012	02-2012 a 06-2012	57 a 61
Jul-2012	07-2012 a 12-2012	62 y 67
Ene-2013	01-2013 a 06-2013	68 y 73
Jul-2013	07-2013 a 12-2013	74 y 79
Ene-2014	01-2014 a 06-2014	80 y 85
Jul-2014	07-2014 a 12-2014	86 y 91
Ene-2015	01-2015 a 06-2015	92 y 96
Jul-2015	07-2015 a 12-2015	97 y 103
Ene-2016	01-2016 a 03-2016	104 y 106

Fuente: Elaboración Propia.

Los caudales de extracción corresponden a los presentados en la Figura 4-17, con un valor promedio de 0,71 L/s entre el periodo comprendido desde enero 2014 a marzo 2016.

6.1.5.3 Extracciones subterráneas

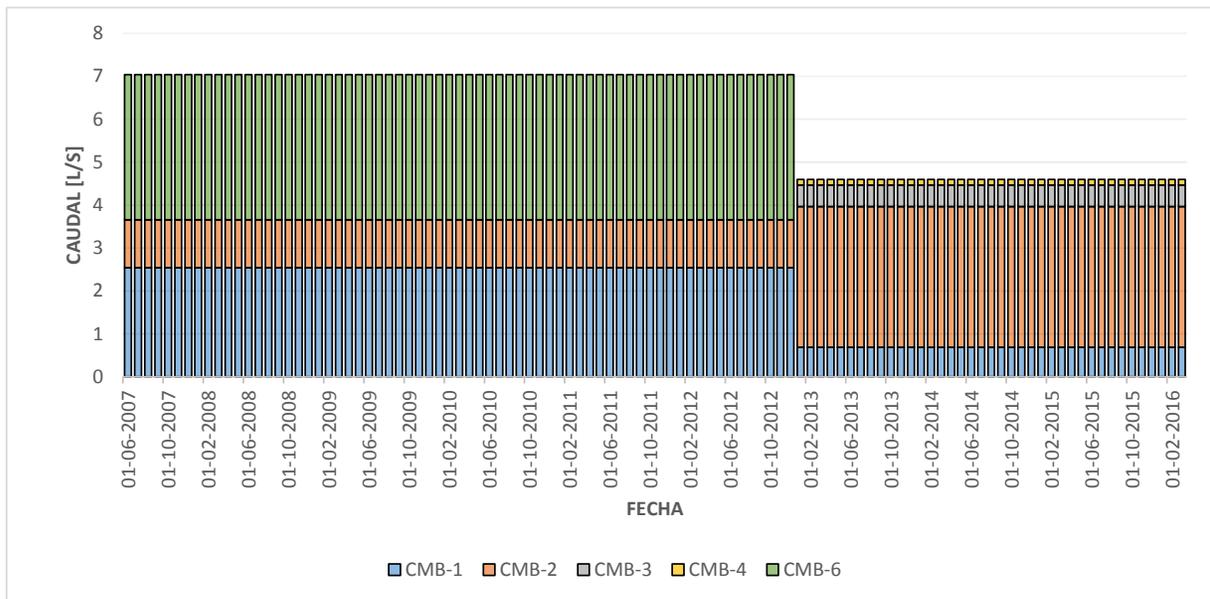
En la Figura 6-9 se presenta la ubicación de los pozos de extracción considerados en el modelo y en la Figura 6-10 los caudales por pozo. Las extracciones fueron modeladas mediante el paquete WEL.

Figura 6-9: Pozos de extracción considerados en el modelo numérico 2016



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-10: Caudal de extracción impuesto a cada pozo del modelo 2016



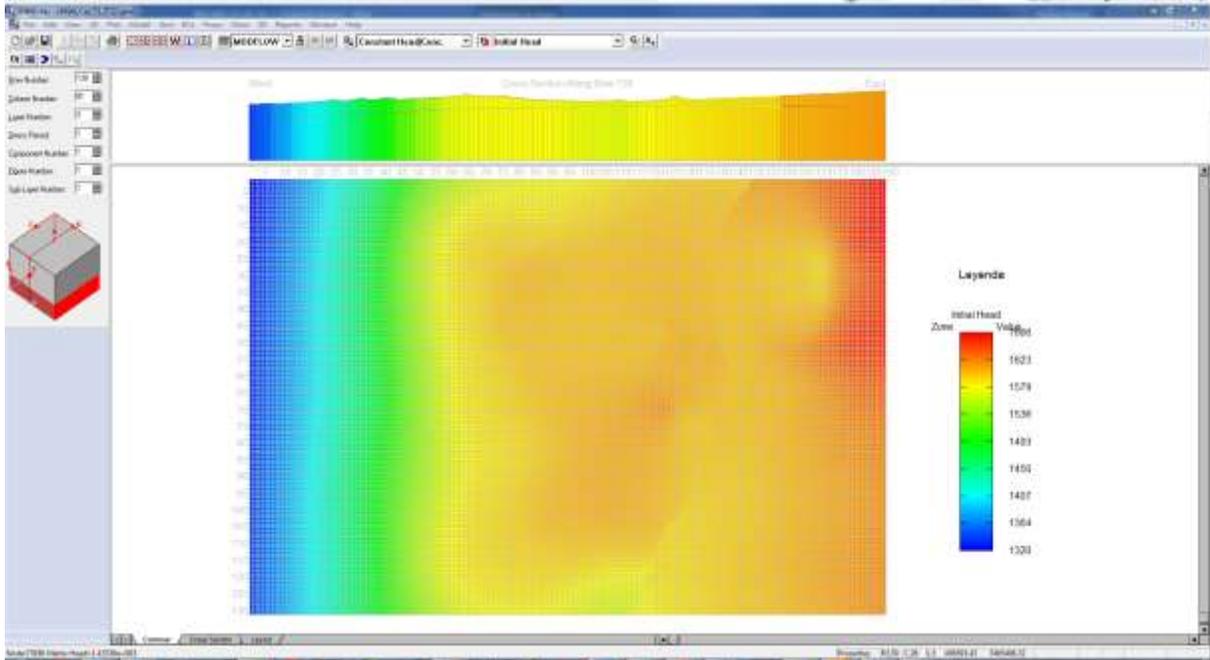
Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que los pozos con extracciones registradas durante el periodo modelado corresponden al CMB-1, CMB-2, CMB-3, CMB-4 y CMB-6, todos ellos ubicados en el sector de pampa Lina, ver Tabla 4-7.

6.1.6 Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales de la simulación transiente fueron ingresadas al modelo a través de la propiedad "Initial Head" importando la piezometría interpolada sobre cada celda del modelo. El resultado obtenido fue aplicado por igual a las 3 capas del modelo y es presentado en la Figura 6-11.

Figura 6-11: Condición inicial de la simulación transiente



Fuente: Elaboración propia.

6.2 Calibración del modelo de flujo

6.2.1 Estrategia de calibración

El modelo fue calibrado para ajustar principalmente la respuesta de niveles, teniendo en consideración los flujos subterráneos estimados por el modelo conceptual. En este proceso se han modificado los valores de permeabilidad y almacenamiento, dentro del rango definido por el modelo conceptual. El proceso de calibración se hizo tanto manualmente (prueba y error) como mediante calibración asistida con PEST (Doherty, 2016). El ajuste se hizo hasta lograr que la discrepancia entre niveles observados y simulados fuera menor a los criterios aceptados para modelos que se someten al SEIA.

6.2.2 Pozos de observación con información disponibles para el análisis

A continuación se presenta la información relativa a los pozos de observación con que se contó para esta actualización del modelo numérico. En primer lugar, el modelo desarrollado por VAI (2014) contó con un total de 37 pozos de observación, los cuales fueron utilizados en su totalidad para la actualización realizada por Arcadis (2015), en la cual se adicionaron 19 pozos de observación, utilizando un total de 56 pozos.

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Para esta nueva actualización (Arcadis 2016), se contó con un total de 81 pozos con información de nivel piezométrico, de los cuales se consideraron para el análisis 63 pozos (dentro de los cuales se incluyó los pozos utilizados en los modelos anteriores). Los pozos no utilizados correspondían a sondajes abiertos con poca información, además de pozos con infiltraciones y problemas constructivos, u otros eran pozos que presentaban ascensos de nivel, lo cual no podría ser representado por este modelo numérico. En la Tabla 6-4 se presentan los pozos que no fueron considerados dentro del análisis explicando las causas principales.

Tabla 6-4: Pozos con información de nivel no utilizados en la calibración

Nombre pozo	Observaciones
CB-7	Pozo no representativo, con infiltraciones desde TSF
CB-8	Pozo no representativo, con infiltraciones desde TSF
CB-12	Pozo no representativo, no llega a nivel de agua
KP-DH10-40	Sondaje no llega a nivel de agua subterránea
QSG09-579	Sondaje sin abierto con poca información
QSG09-581	Sondaje sin abierto con poca información
QSG09-583	Sondaje sin abierto con poca información
QSG09-591	Sondaje sin abierto con poca información
QSG09-595	Sondaje sin abierto con poca información
QSG10-629	Sondaje sin abierto con poca información
QSG10-634	Sondaje sin abierto con poca información
QSG10-665	Sondaje sin abierto con poca información
QSG10-668	Sondaje sin abierto con poca información
QSG10-684	Sondaje sin abierto con poca información
QSG10-775	Sondaje sin abierto con poca información
QSG11-787	Sondaje sin abierto con poca información
QSG11-788	Sondaje sin abierto con poca información
PDH-8	Sondaje sin abierto con poca información

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6-5 se presenta el resumen de los pozos utilizados en los distintos modelos, indicando características y cualidades.

Tabla 6-5: Pozos de observación utilizados en los modelos numéricos

Nombre pozo	Modelo VAI (2014)	Modelo Arcadis (2015)	Modelo 2016 (Estadígrafos)	Modelo 2016 (Hidrogramas)
Casing Acero	No	Si	Si	Si
CB-10	No	Si	Si	Si
CB-2	No	Si	Si	Si
CB-3	No	Si	Si	Si
CB-4	Si	Si	Si	Si
CB-5	Si	Si	Si	Si
CB-6	No	Si	Si	Si
CB-9	Si	Si	Si	Si
CON-10	No	No	No	Si
CON-15	No	No	No	Si
CON-16	No	No	No	Si

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Nombre pozo	Modelo VAI (2014)	Modelo Arcadis (2015)	Modelo 2016 (Estadígrafos)	Modelo 2016 (Hidrogramas)
CON-21	No	No	No	Si
KP-DH10-33	Si	Si	Si	Si
Loreto 3	No	Si	Si	Si
Loreto 4	No	Si	Si	Si
QSCSG6-237	Si	Si	Si	Si
QSG07-352	Si	Si	Si	Si
QSG07-386	No	Si	Si	Si
QSG07-389	No	Si	Si	Si
QSG08-402	No	Si	Si	Si
QSG08-405	No	Si	Si	Si
QSG08-410	No	Si	Si	Si
QSG08-418	No	Si	Si	Si
QSG08-421	No	Si	Si	Si
QSG08-422	No	Si	Si	Si
QSG08-423	Si	Si	Si	Si
QSG08-426	Si	Si	Si	Si
QSG08-431	Si	Si	Si	Si
QSG08-436	Si	Si	Si	Si
QSG08-439	Si	Si	Si	Si
QSG08-455	Si	Si	Si	Si
QSG08-493	Si	Si	Si	Si
QSG08-498	Si	Si	Si	Si
QSG08-502	Si	Si	Si	Si
QSG08-530	No	No	No	Si
QSG09-580	No	No	Si	Si
QSG09-582	Si	Si	Si	Si
QSG09-584	Si	Si	Si	Si
QSG09-585	Si	Si	Si	Si
QSG09-586	No	No	No	Si
QSG09-587	Si	Si	Si	Si
QSG09-592	Si	Si	Si	Si
QSG09-593	Si	Si	Si	Si
QSG09-597	Si	Si	Si	Si
QSG09-600	No	Si	Si	Si
QSG09-601	No	Si	Si	Si
QSG09-602	Si	Si	Si	Si
QSG09-605	Si	Si	Si	Si
QSG09-608	Si	Si	Si	Si
QSG09-611	Si	Si	Si	Si
QSG10-627	Si	Si	Si	Si
QSG10-675	Si	Si	Si	Si
QSG10-686	Si	Si	Si	Si
QSG10-696	Si	Si	Si	Si
QSG10-774	Si	Si	Si	Si
QSG12-857	No	Si	Si	Si
RDH-03	No	Si	Si	Si
RDH-05	Si	Si	Si	Si
SPM-14	Si	Si	Si	Si
SPM-15	Si	Si	Si	Si
SPM-17	Si	Si	Si	Si
SPM-18	Si	Si	Si	Si
SPM-2	Si	Si	Si	Si

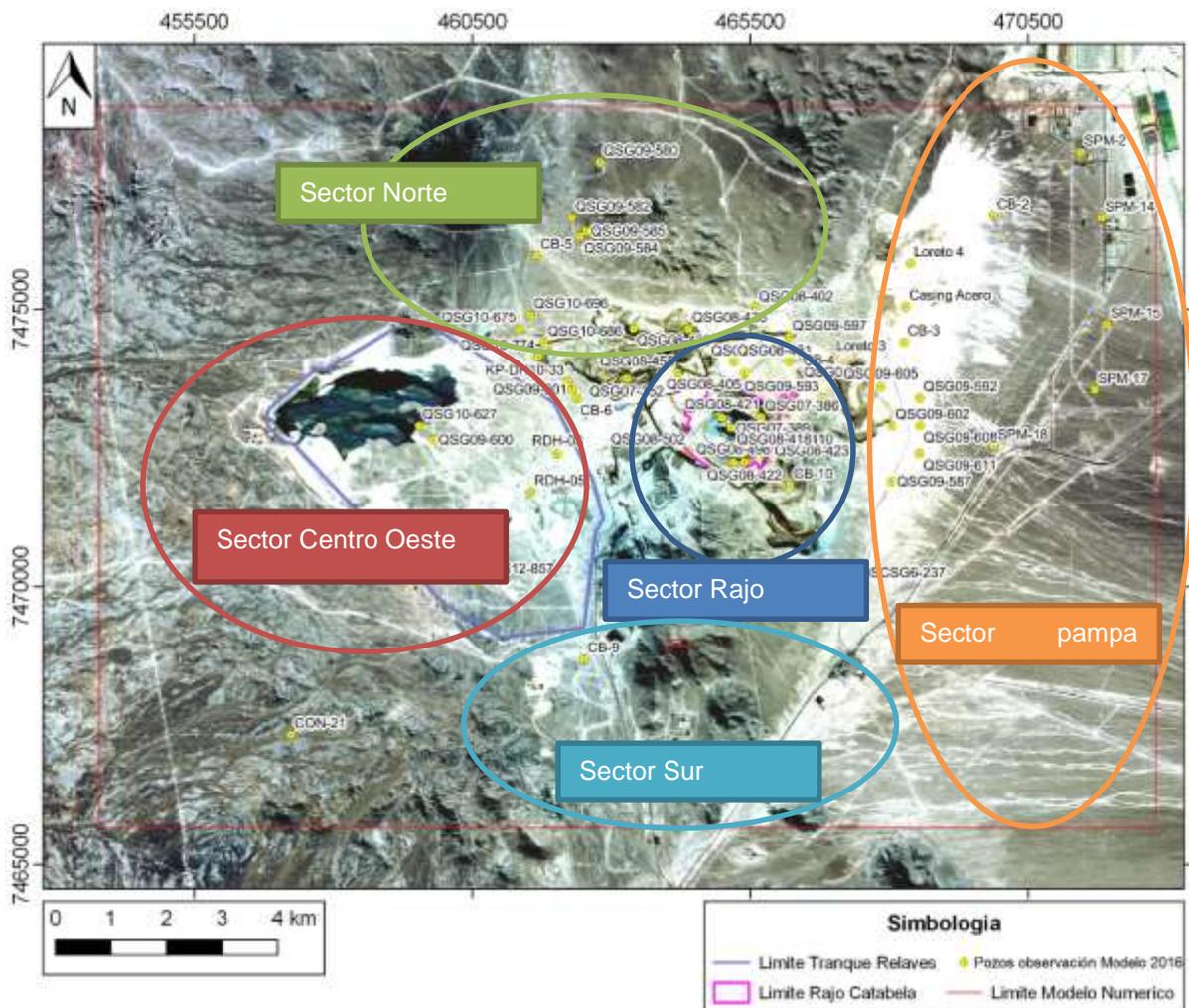
Fuente: Elaboración propia.

A cada uno de los 63 pozos utilizados, se les estimó el hidrograma de niveles piezómetros observados versus los niveles simulados, pero se utilizaron 57 pozos de estos (incorporando los 56 iniciales de la actualización 2015) para calcular los estadígrafos. Esto debido a que no fue posible reproducir algunas variaciones de niveles, las cuales eran ascendentes, o en otros las variaciones obtenidas provocaban que la estadística calculada fuera poco consistente.

6.2.3 Patrón de calibración

En la Figura 6-12 se presenta la ubicación de los 64 pozos empleados para la calibración transiente. Además de estos puntos se ha tenido en consideración los flujos de recarga y descarga subterránea estimados por el modelo conceptual.

Figura 6-12: Pozos de observación considerados en el modelo numérico

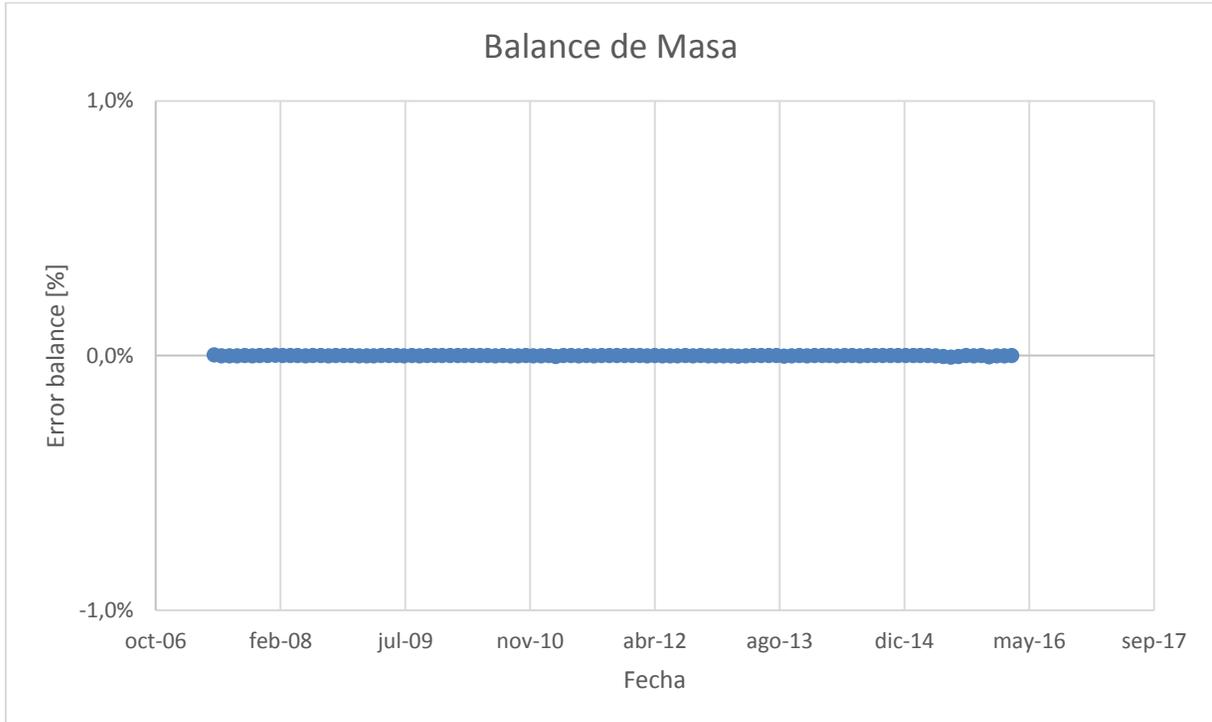


Fuente: Elaboración propia.

6.2.4 Balance de masas

En la Figura 6-13 se observa la variación temporal del error de balance del modelo, para el cual se estima un error promedio de -0,0002%, muy por debajo del 1%, lo cual se considera adecuado y cumple con el criterio definido por el SEA (2012).

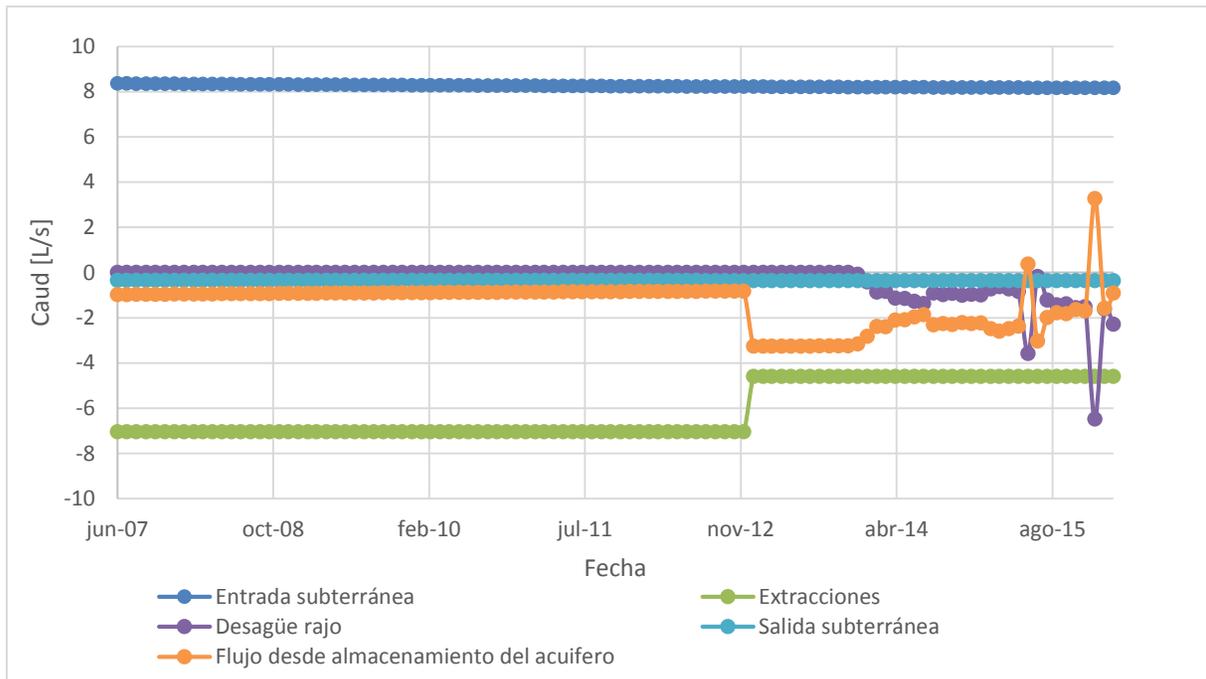
Figura 6-13: Error de balance de masa



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6-14 se presentan los distintos componentes del balance de masas transiente del modelo. Los flujos de entrada corresponden a la recarga lateral subterránea a través de la condición de borde de altura constante, además de los flujos de entrada al almacenamiento. Los flujos de salida se componen de las extracciones por pozos, extracciones por drenes (descarga hacia el rajo y descarga lateral hacia el exterior), flujos de salida desde el almacenamiento y descarga debido a la condición de borde de altura constante. La descarga de flujo hacia el rajo a través de los drenes se hace efectiva a partir de diciembre de 2013, momento en el que el rajo alcanzaría la napa subterránea. El caudal promedio de salida de flujo hacia el rajo Catabela es de 1,3 L/s.

Figura 6-14: Componentes balance de masa para toda la simulación

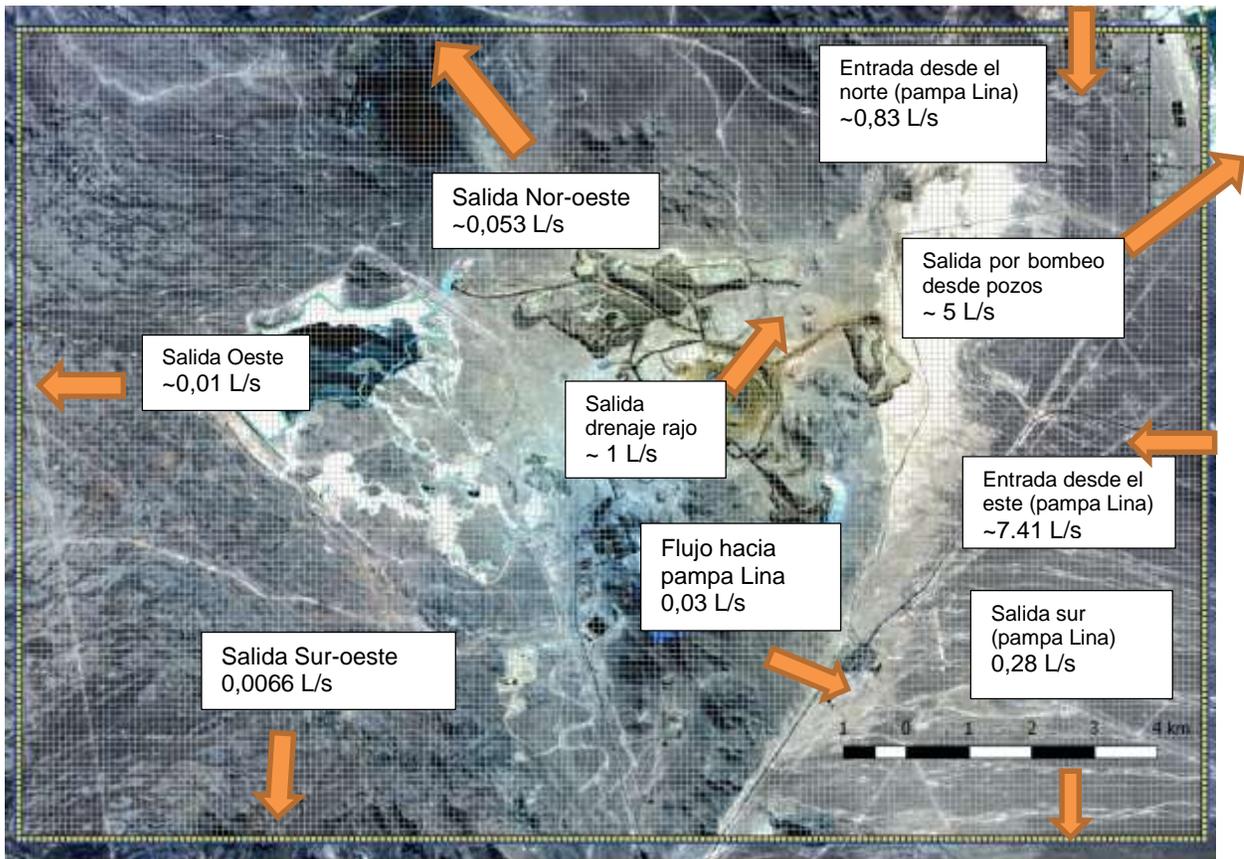


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6-15 presenta los flujos promedio a lo largo de la simulación para el dominio, para diferentes sectores de interés:

- Entrada desde el este (pampa Lina).
- Salida Sur (pampa Lina):
- Salida Nor-oeste
- Salida Oeste
- Salida Sur-oeste

Figura 6-15: Flujos subterráneos promedio para toda la simulación



Fuente: Elaboración propia.

6.2.5 Análisis de residuales

En la Tabla 6-6 se presenta un resumen de los residuales que se obtienen para el presente modelo, mostrando una comparación con el modelo 2015. La nueva actualización también logra mantener el RMS normalizado dentro del rango sugerido por SEA (2012).

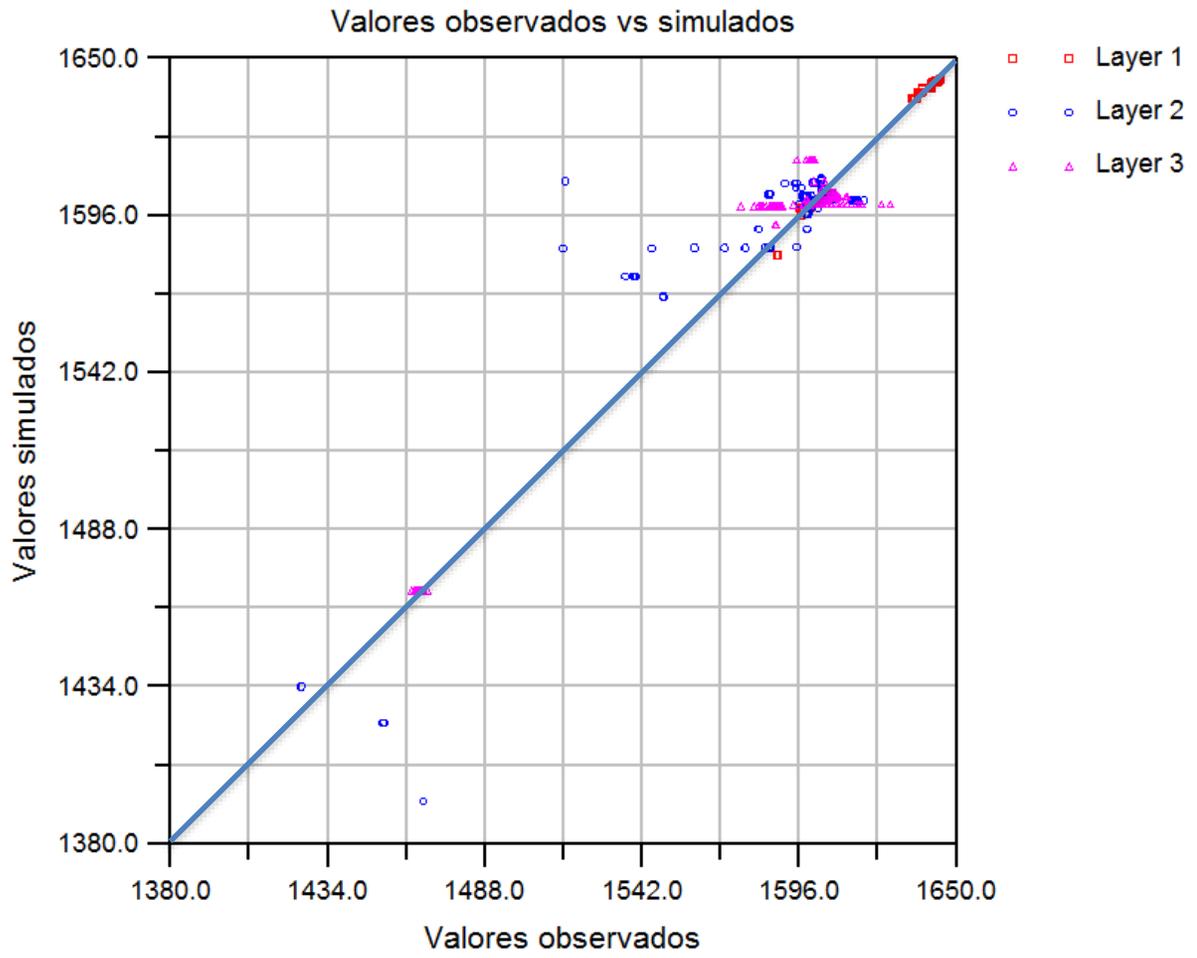
Tabla 6-6: Estadígrafos de calibración modelo 2016

Estadígrafo	Actualización 2015	Actualización 2016	Unidad
MA (error medio)	-1,4	-0,5	m
MAE (error medio absoluto)	2,3	3,7	m
RMS (error cuadrático medio)	4,5	9,01	m
Residual Min.	-18,5	-92.33	m
Residual Max.	16,5	72.2	m
N° Observaciones	2.377	3.004	-
N° Pozos	56	63	-
Rango de datos observados	106,8	219,7	m
MAE - Normalizado	2,2	1,7	%
RMS- Normalizado	4,2	4,1	%

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6-16 muestra la comparación entre niveles observados y simulados. En términos generales se ve una correlación razonable entre ambos, excepto en pozos donde el nivel de agua asciende producto del ingreso puntual de agua en ellos, lo cual, como se discutió previamente, no es un reflejo del movimiento de agua en el acuífero.

Figura 6-16: Comparación niveles simulados vs observados (todos los tiempos y pozos)



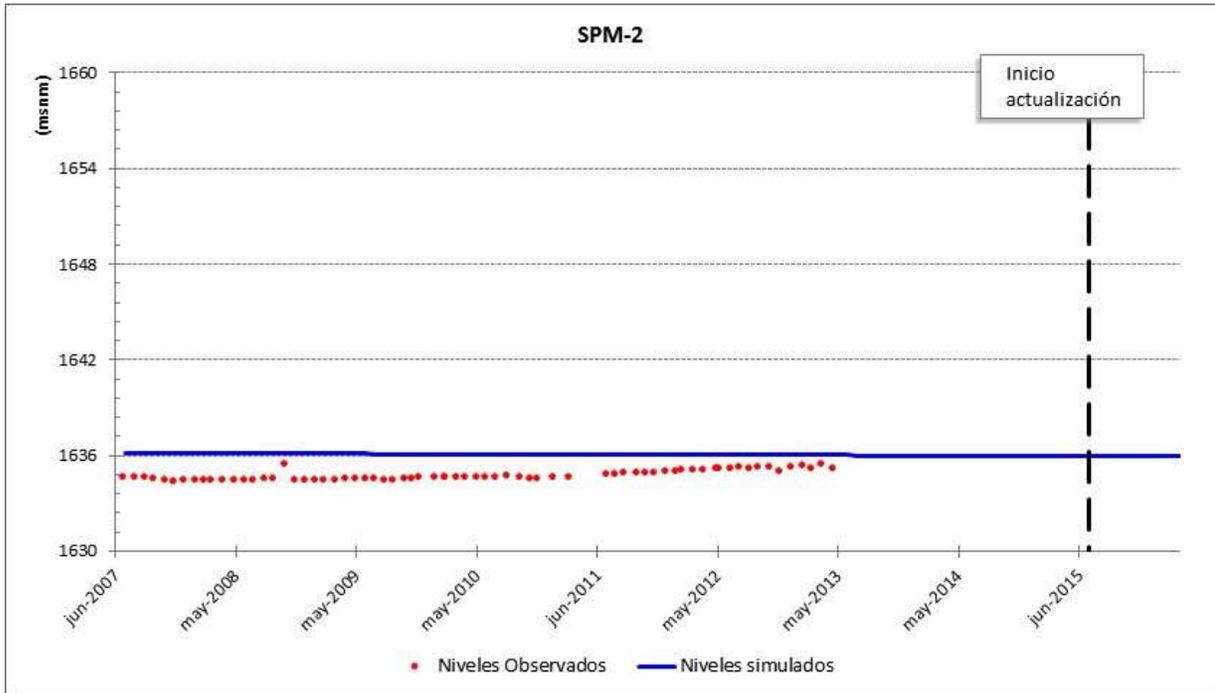
Fuente: Elaboración propia.

6.2.6 Hidrogramas

En la Figura 6-17 a la Figura 6-36 se presentan los hidrogramas de pozos seleccionados que representa la distribución de los errores del modelo en términos ajuste de niveles donde en general se observa el buen ajuste de tendencias logrado. Adicionalmente, en el Anexo C se presentan los hidrogramas de los pozos no presentados en esta sección.

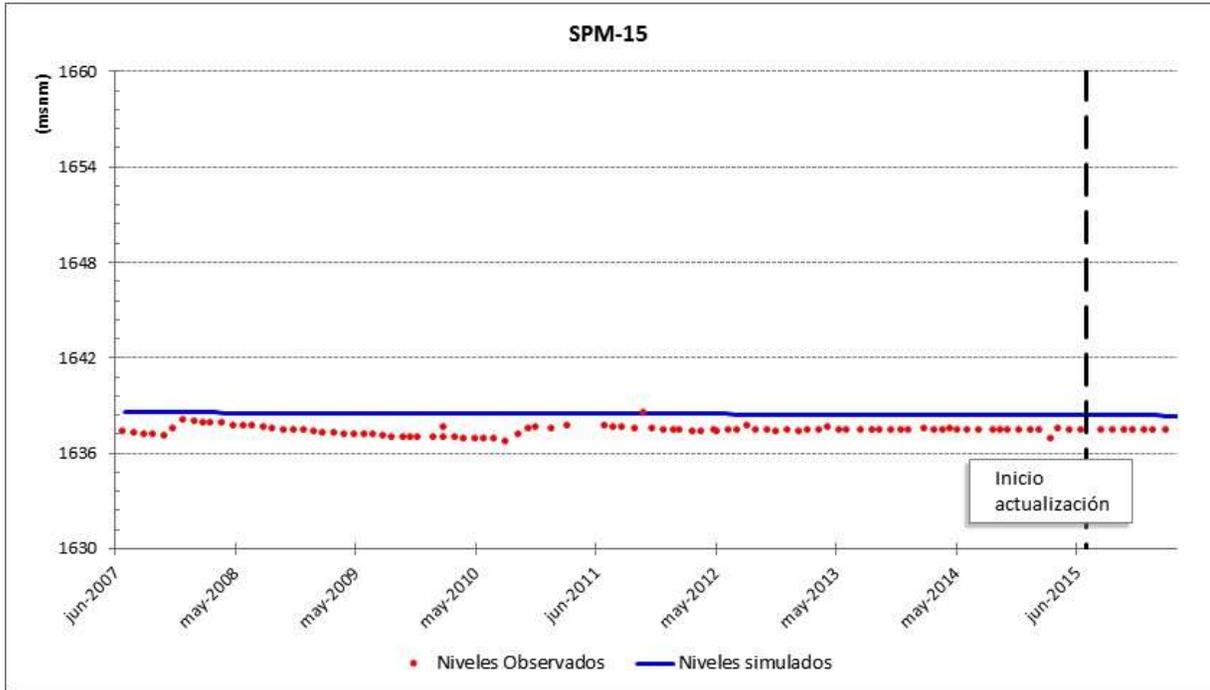
Pampa Lina

Figura 6-17: Hidrograma pozo SPM-2



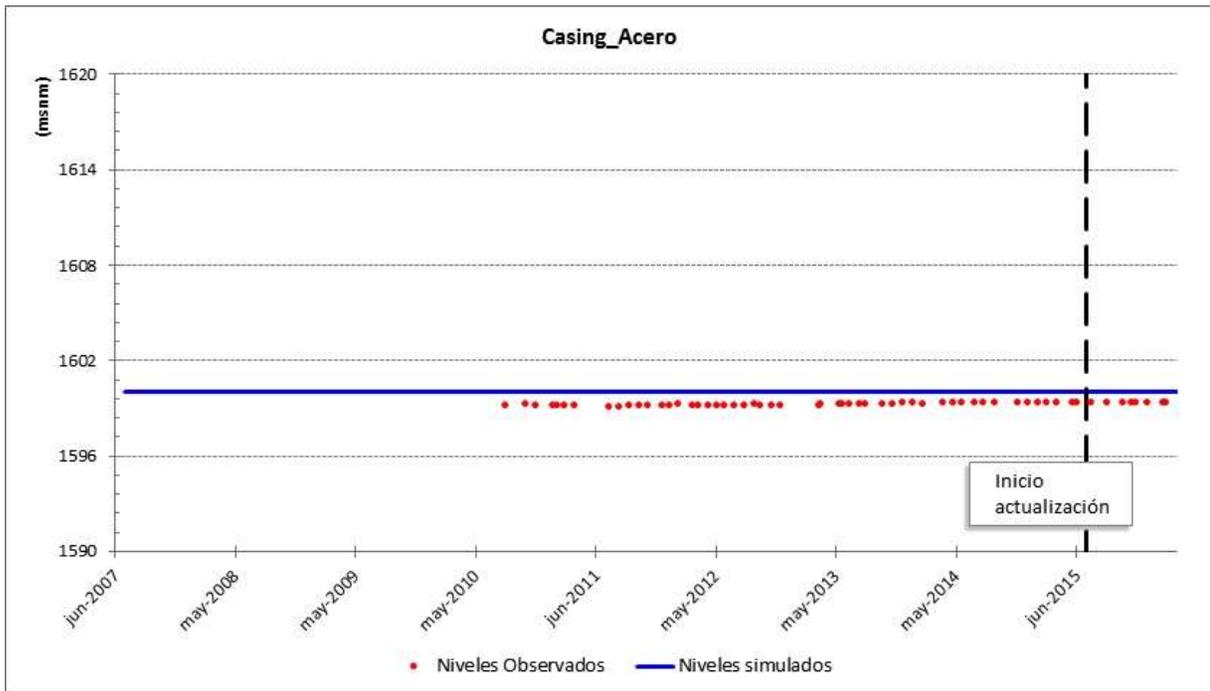
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-18: Hidrograma pozo SPM-15



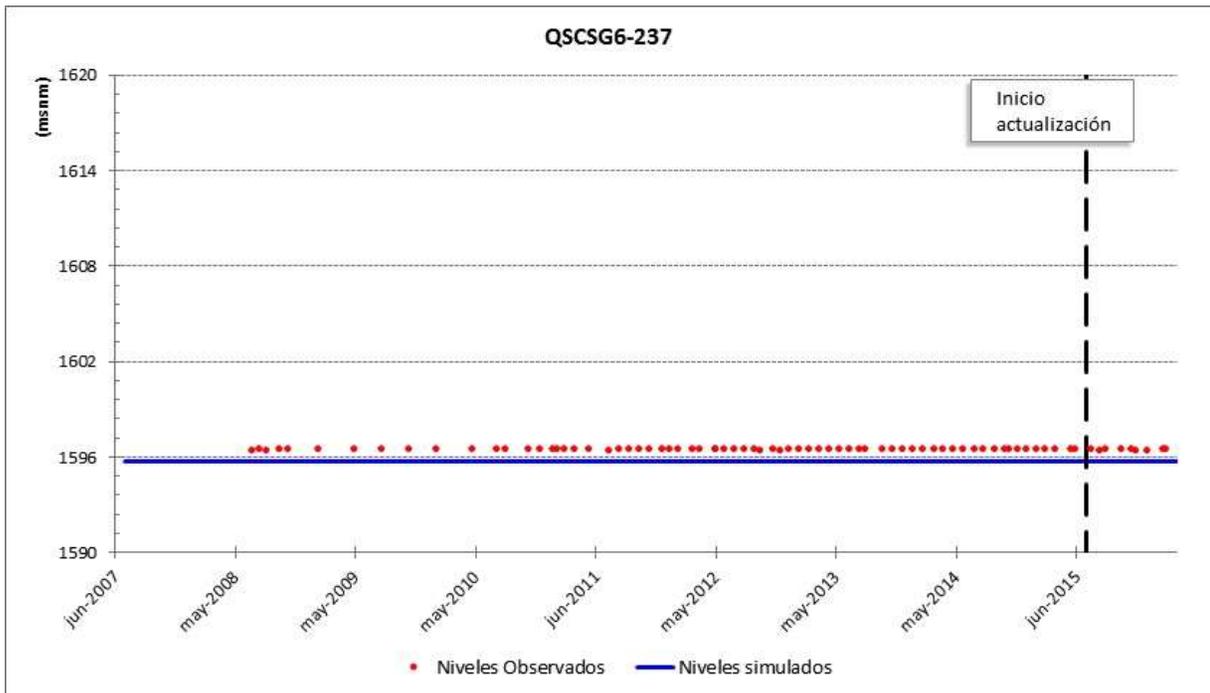
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-19: Hidrograma pozo Casing Acero



Fuente: Elaboración propia.

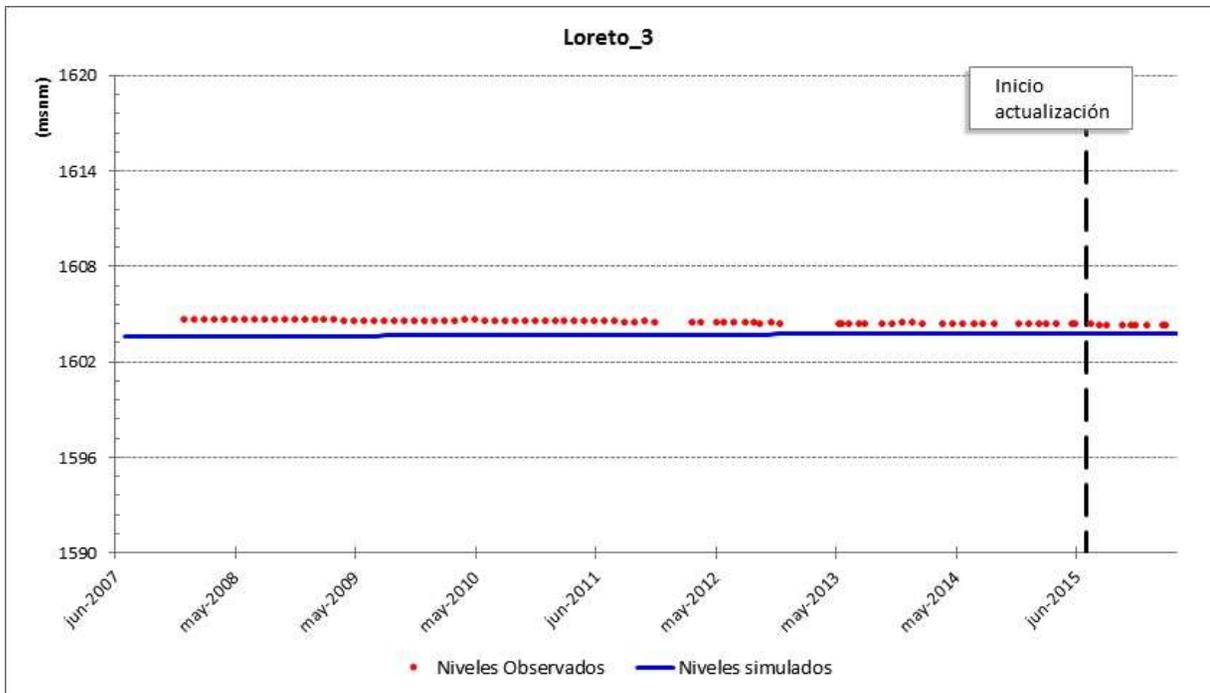
Figura 6-20: Hidrograma pozo QSCSG6-237



Fuente: Elaboración propia.

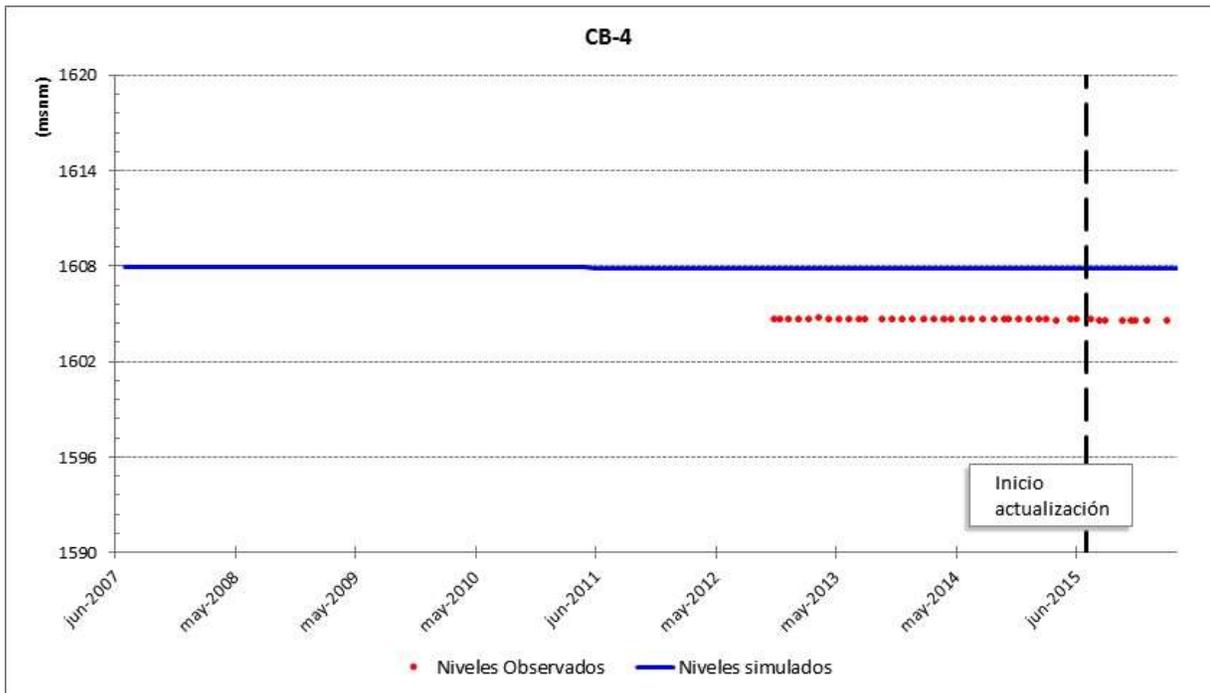
Sector rajo

Figura 6-21: Hidrograma pozo Loreto 3



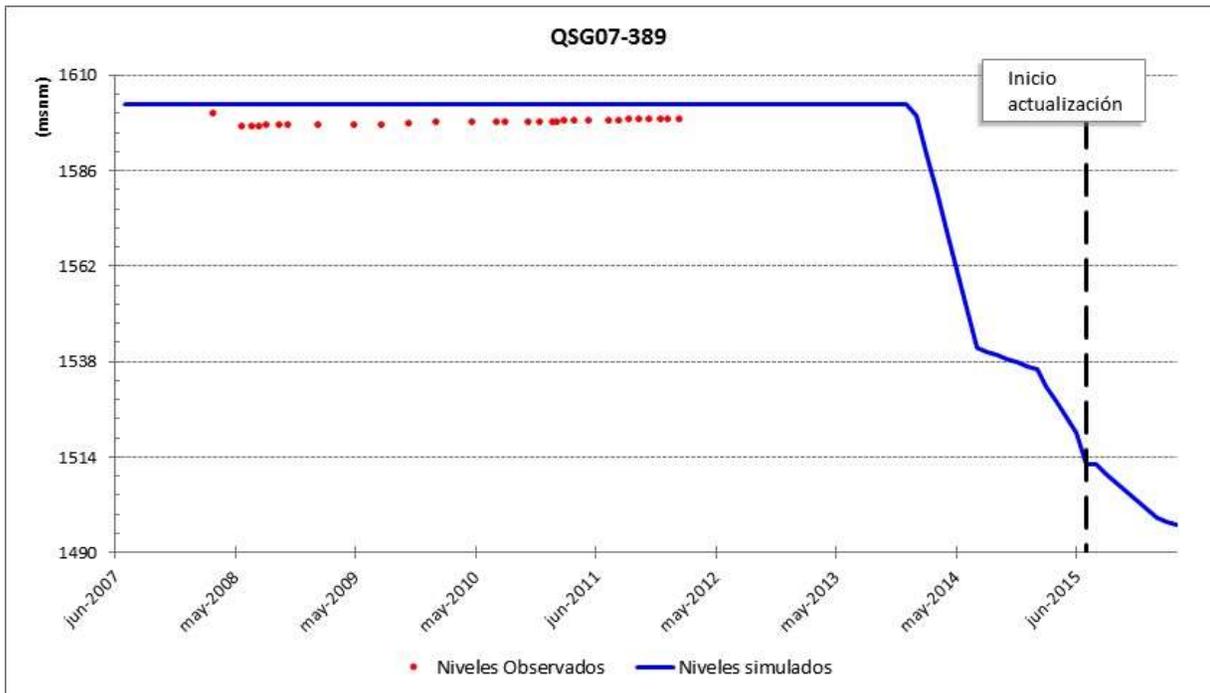
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-22: Hidrograma pozo CB-4



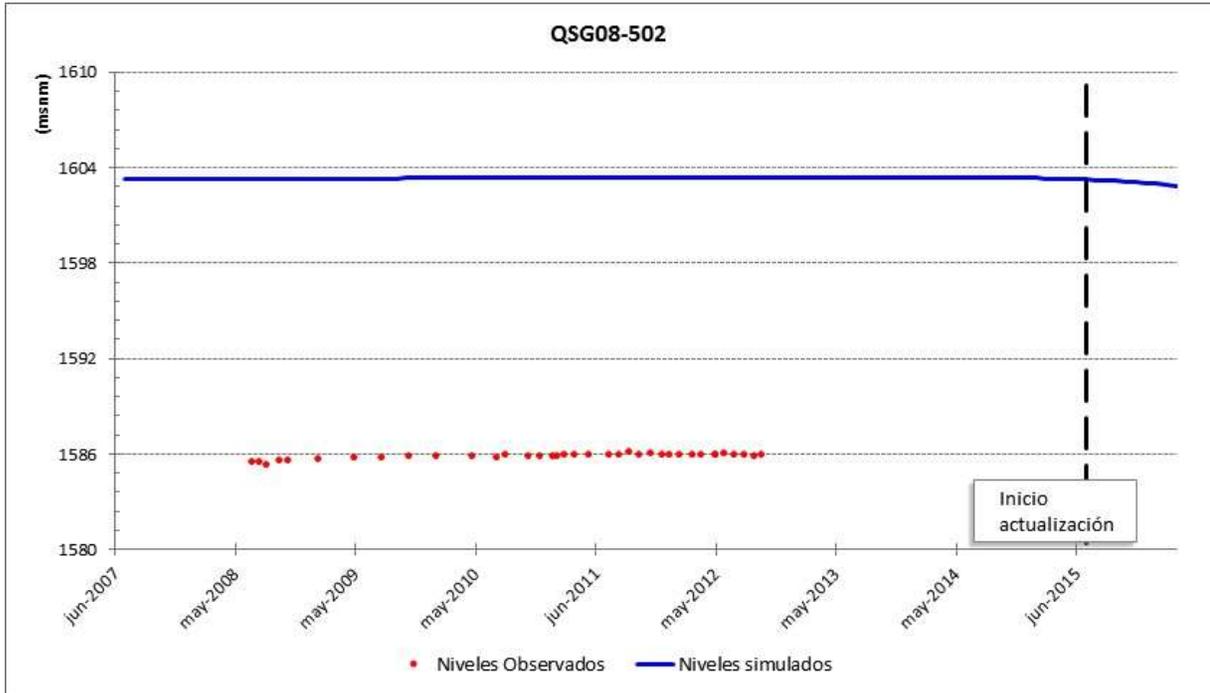
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-23: Hidrograma pozo QSG07-389



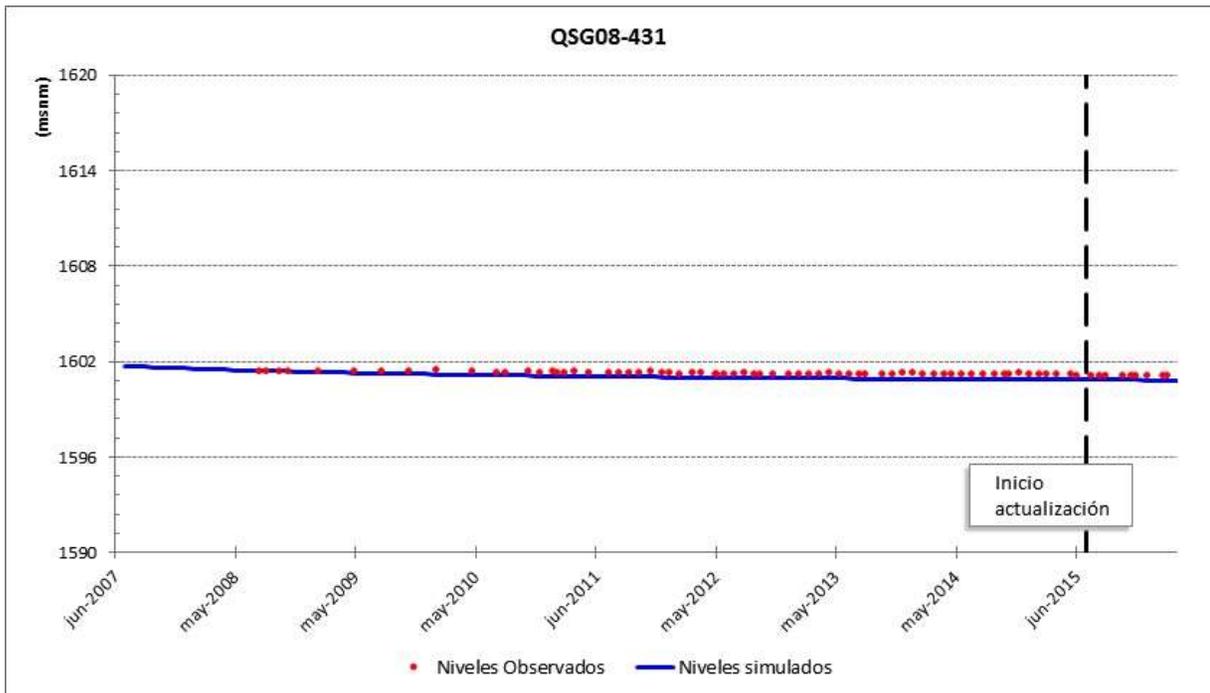
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-24: Hidrograma pozo QSG08-502



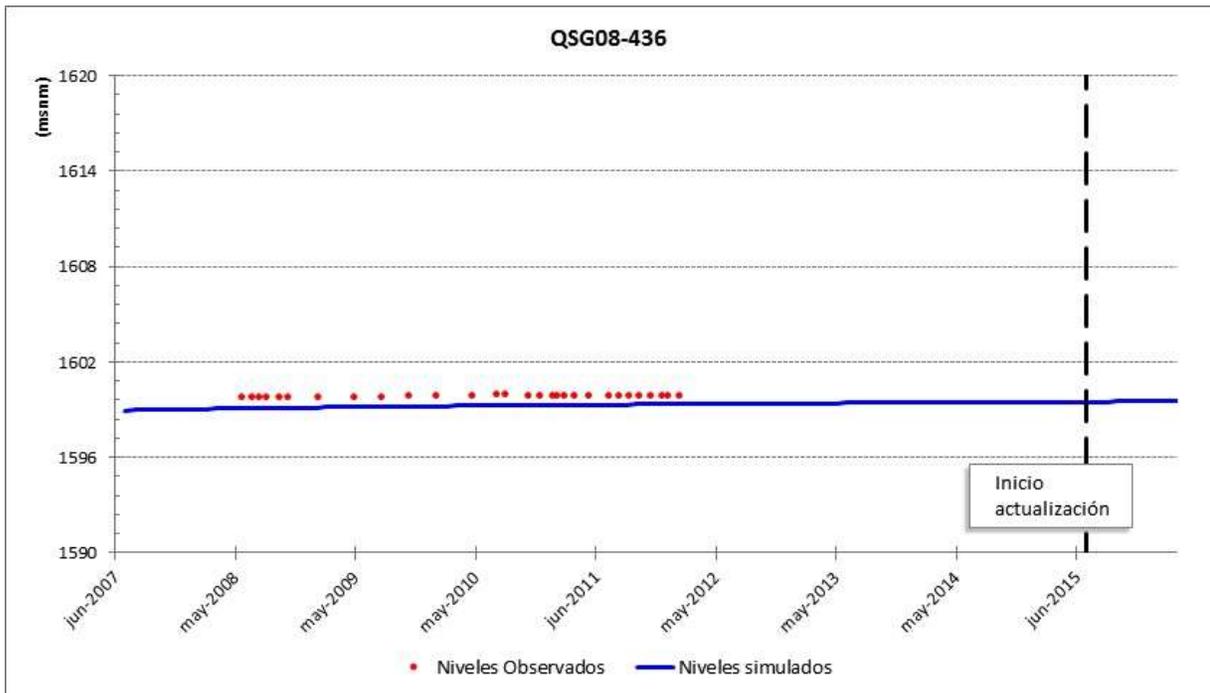
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-25: Hidrograma pozo QSG08-431



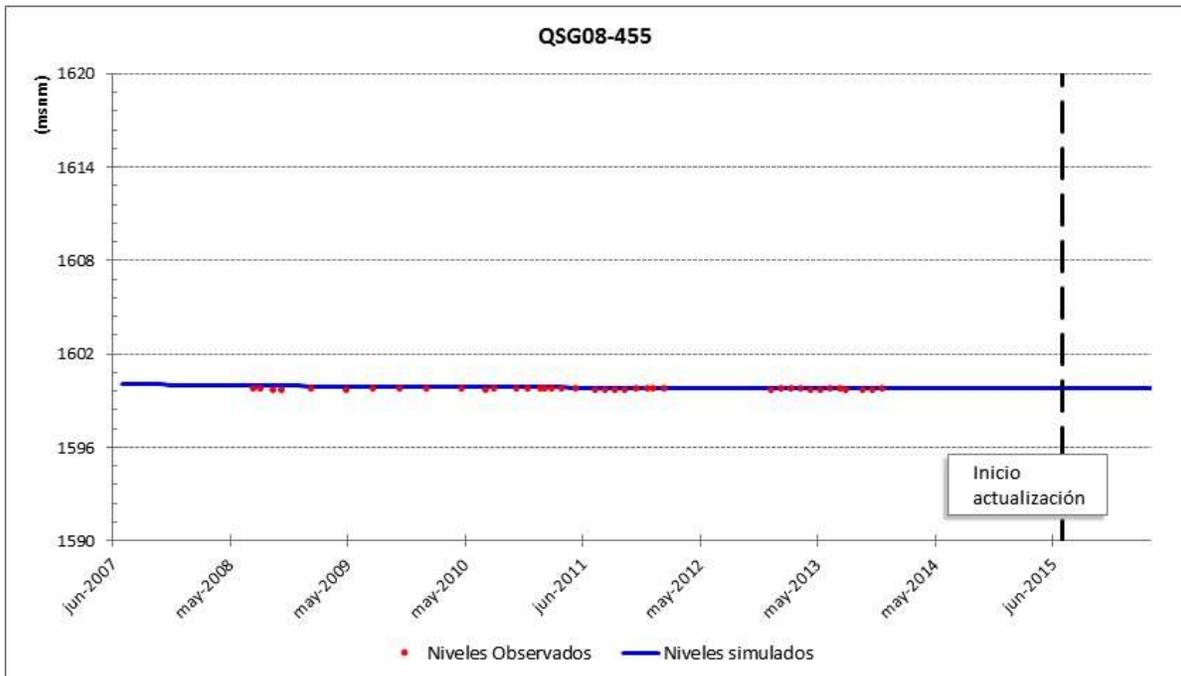
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-26: Hidrograma pozo QSG08-436



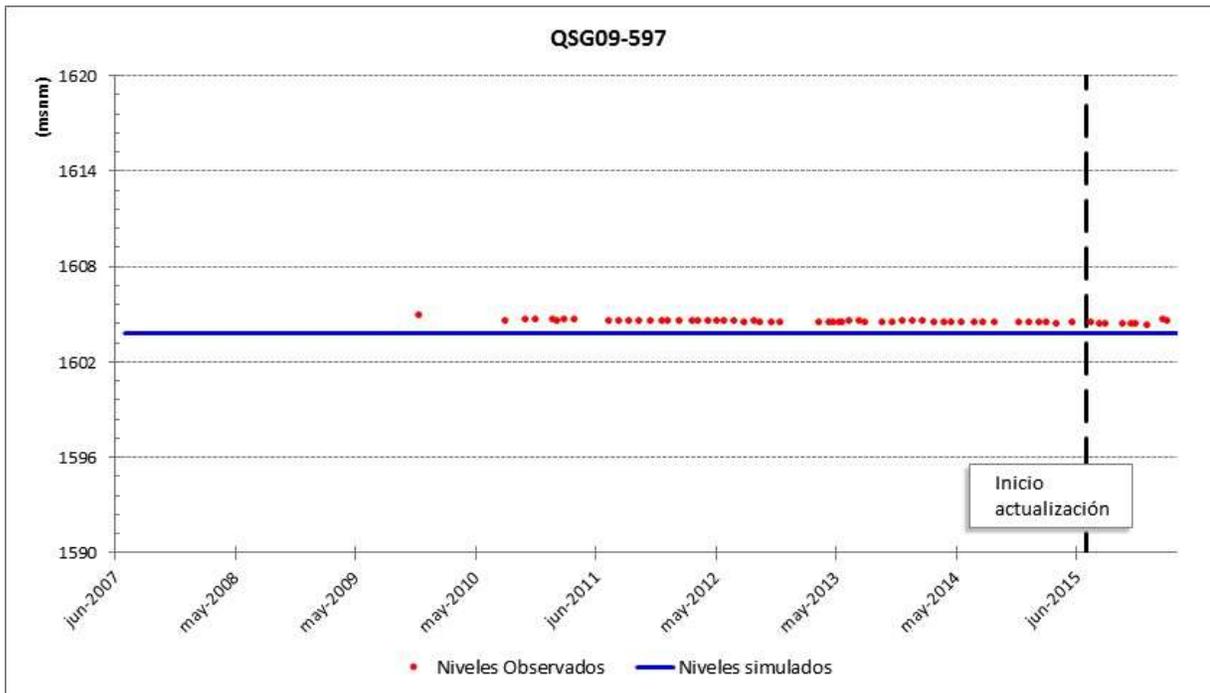
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-27: Hidrograma pozo QSG08-455



Fuente: Elaboración propia.

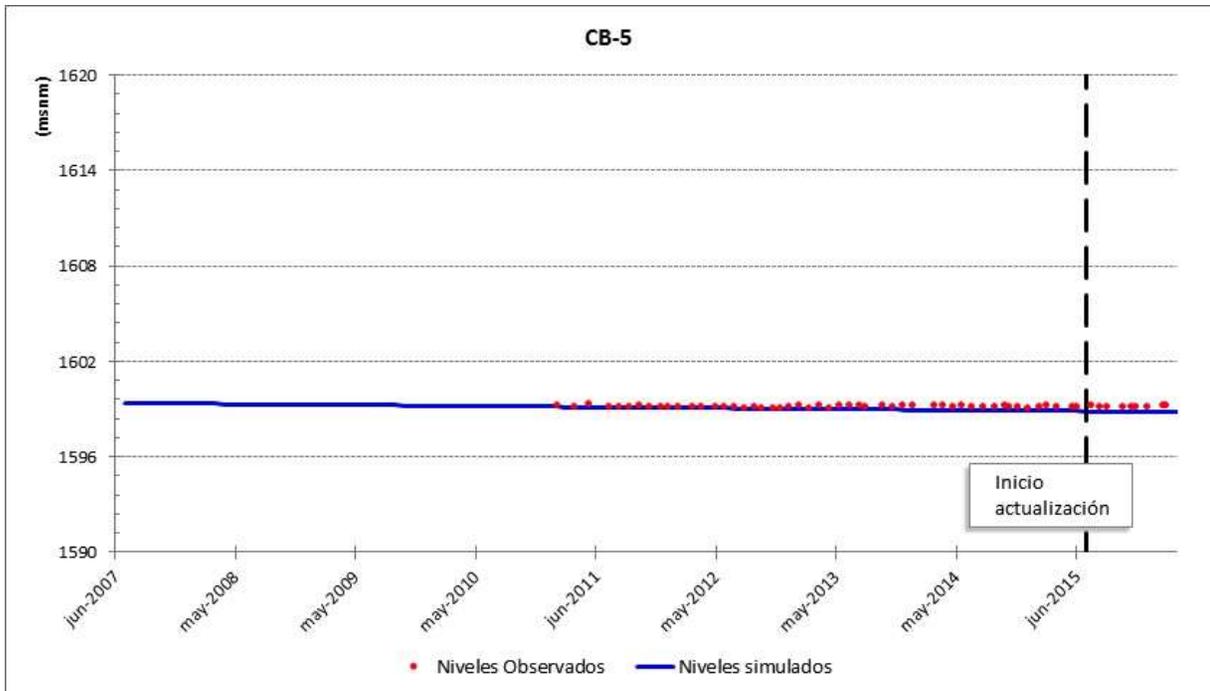
Figura 6-28: Hidrograma pozo QSG09-597



Fuente: Elaboración propia.

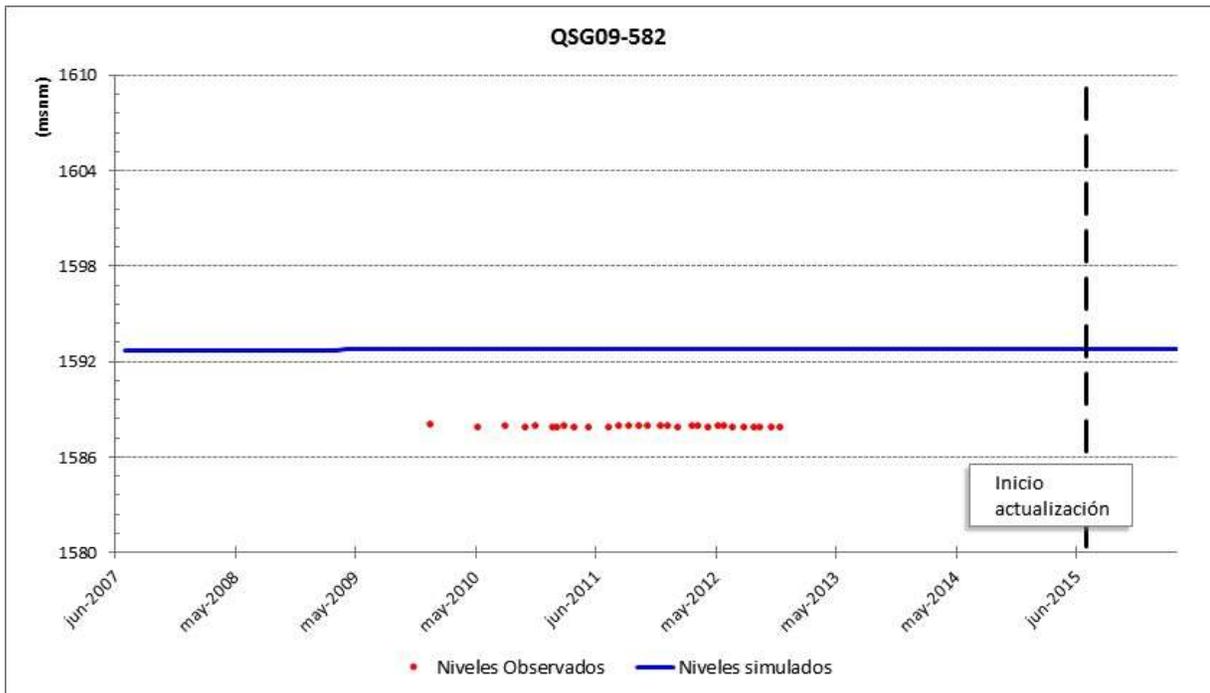
Sector Norte

Figura 6-29: Hidrograma pozo CB-5



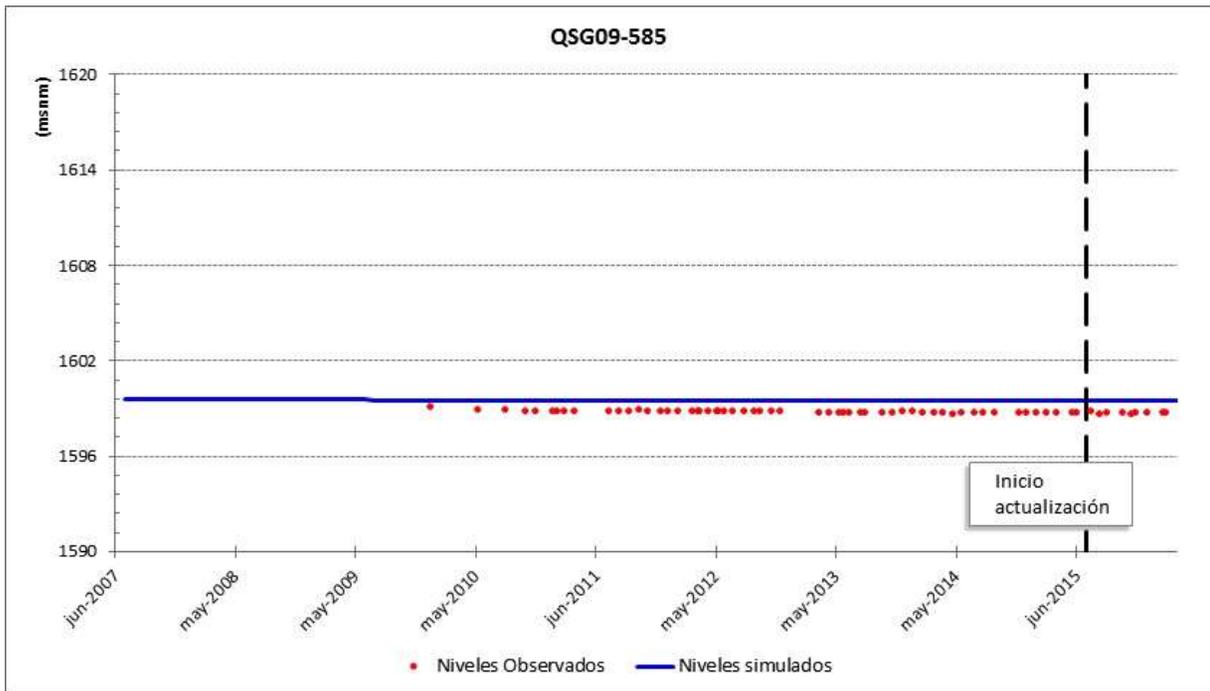
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-30: Hidrograma pozo QSG09-582



Fuente: Elaboración propia.

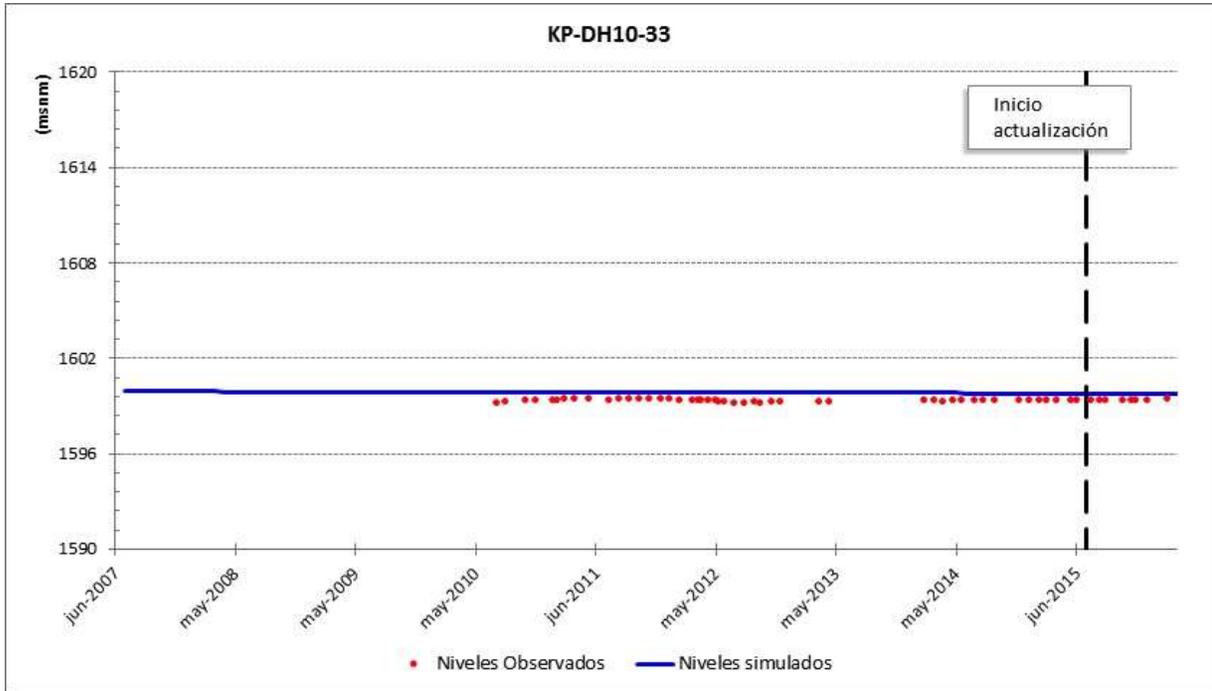
Figura 6-31: Hidrograma pozo QSG09-585



Fuente: Elaboración propia.

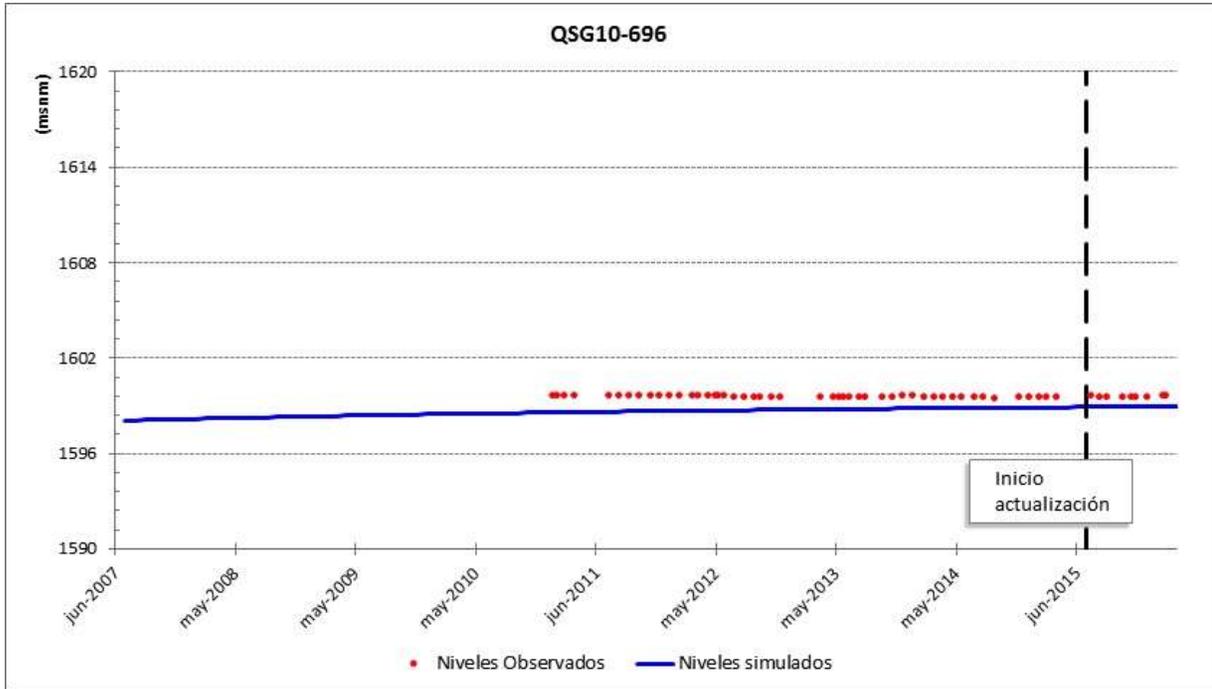
Sector Centro

Figura 6-32: Hidrograma pozo KP-DH10-33



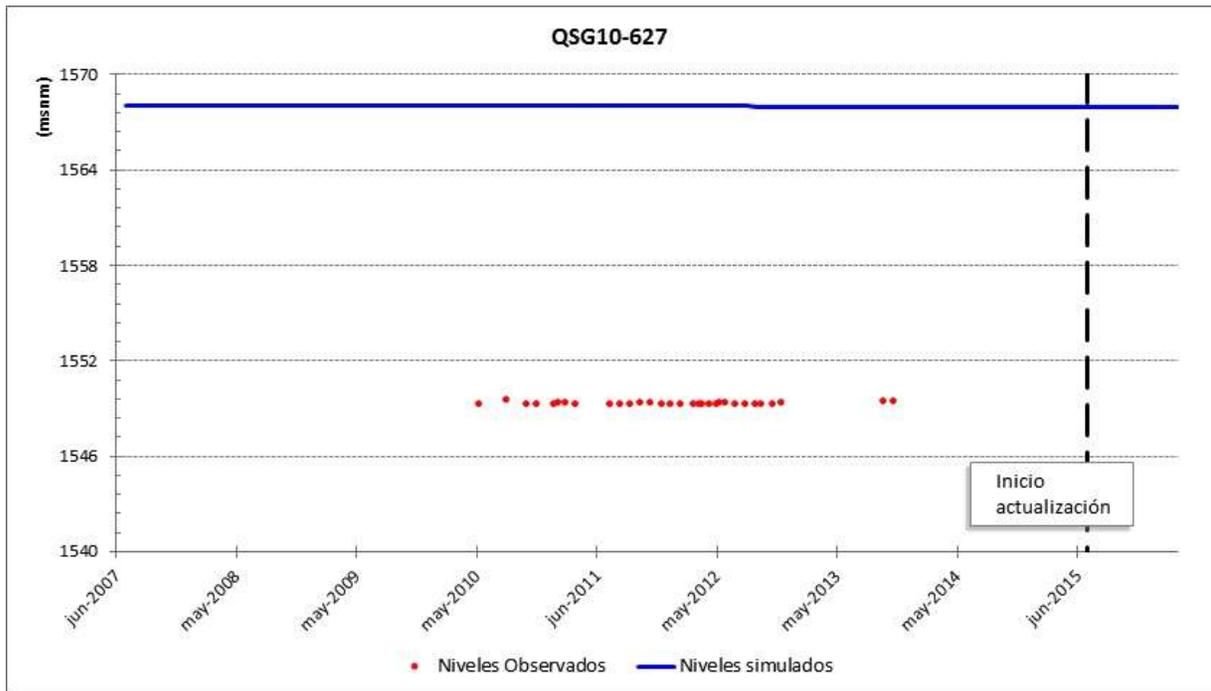
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-33: Hidrograma pozo QSG10-696



Fuente: Elaboración propia.

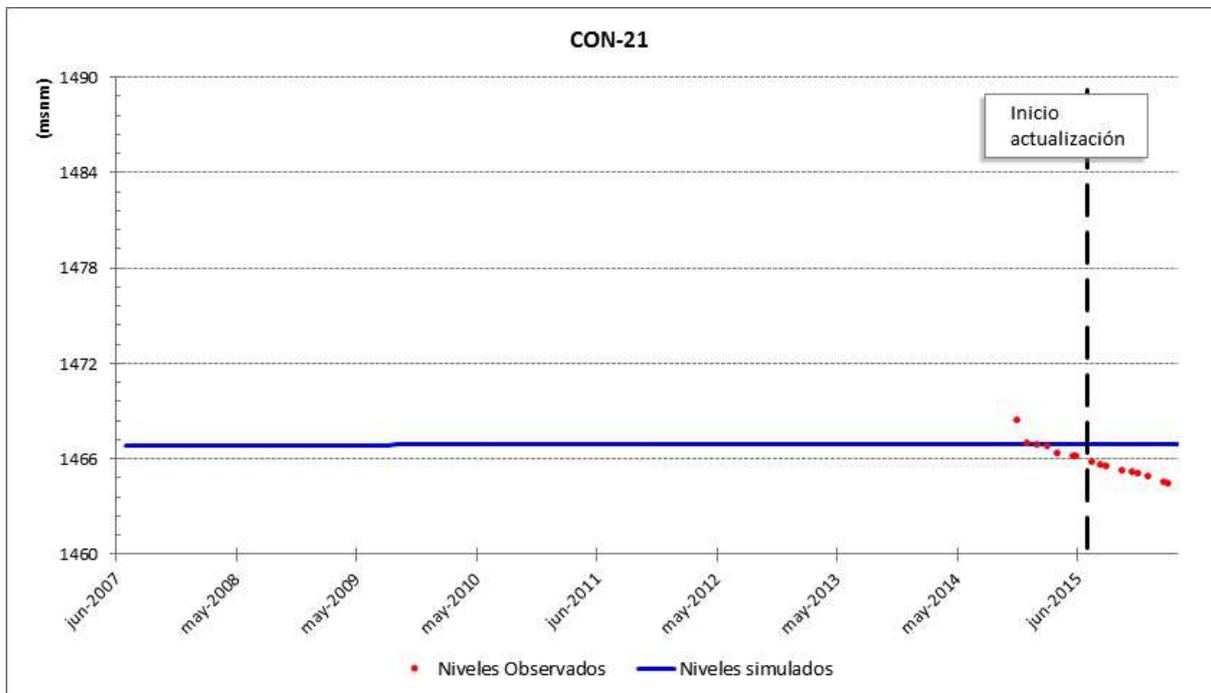
Figura 6-34: Hidrograma pozo QSG10-627



Fuente: Elaboración propia.

Sector Oeste

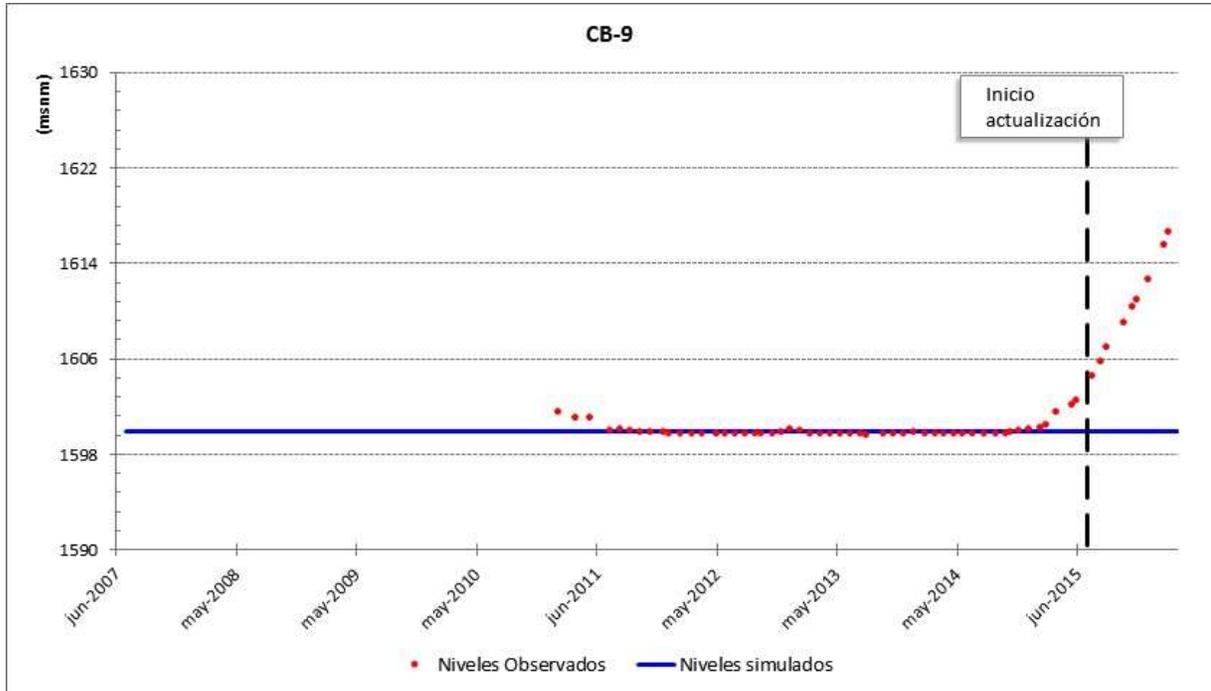
Figura 6-35: Hidrograma pozo CON-21



Fuente: Elaboración propia.

Sector Sur

Figura 6-36: Hidrograma pozo CB-9

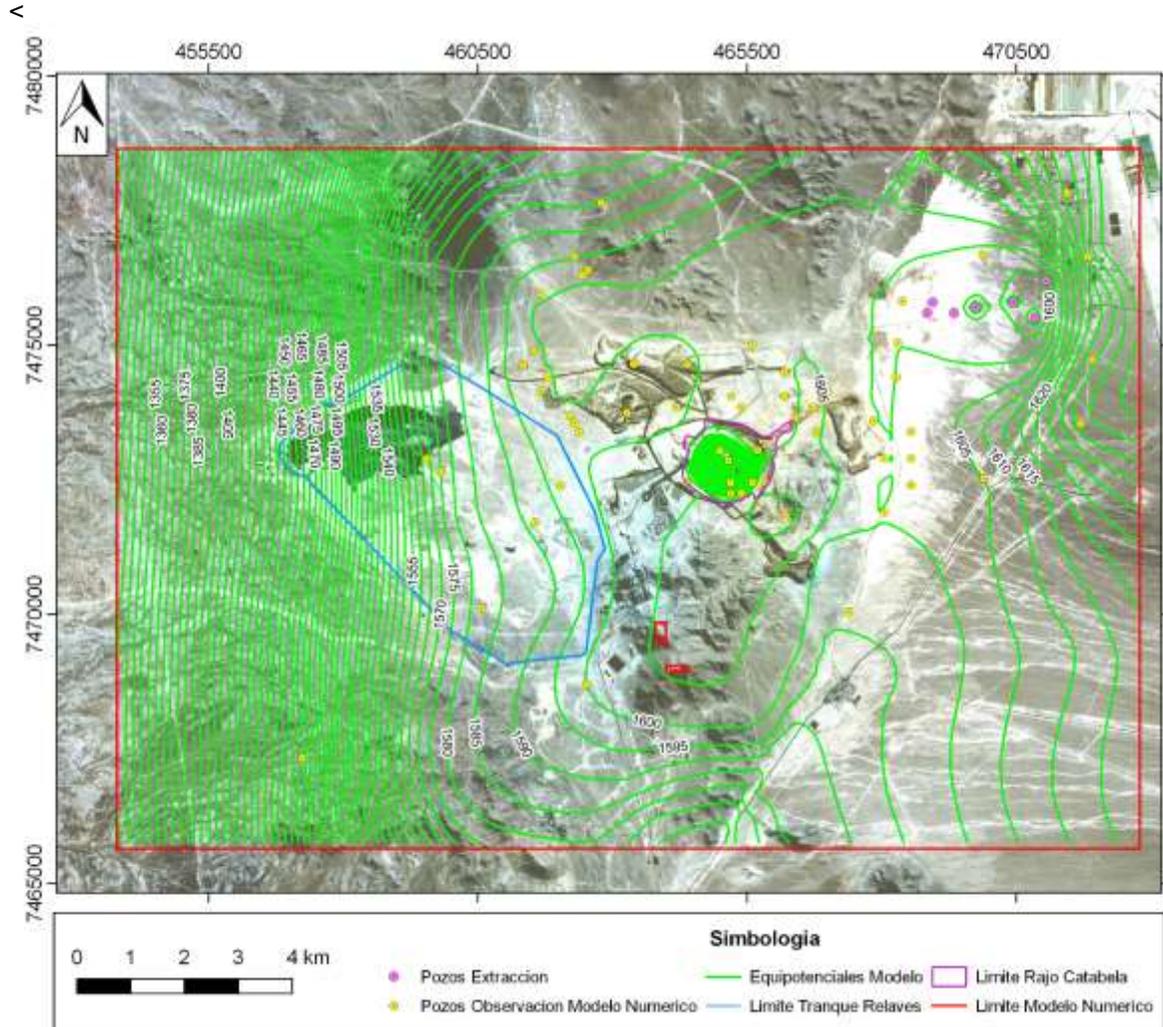


Fuente: Elaboración propia.

6.2.7 Equipotenciales

La Figura 6-37 presenta las curvas equipotenciales obtenidas a Mar-2016, es decir, al término de la calibración. Las direcciones de flujo presentadas son consistentes con lo indicado por el modelo conceptual.

Figura 6-37: Curvas equipotenciales modeladas – marzo 2016 – capa 2



Fuente: Elaboración propia.

7 CONCLUSIONES

El proyecto minero Sierra Gorda está emplazado sobre unidades de rocas volcánicas e intrusivas del Cretácico al Paleoceno, las cuales están cubiertas por depósitos aluvio-coluviales cenozoicos, que tienen su mayor espesor y relevancia en el sector de Pampa Lina. Existe un rasgo estructural de dirección principal norte-sur que separa el sector de Pampa Lina por el oriente, del sector del proyecto propiamente tal en el oeste, donde se ubican el rajo Catabela, botaderos de estériles, depósito de relaves e instalaciones.

El funcionamiento hidrogeológico del área modelada se caracteriza por una recarga por infiltración de precipitaciones prácticamente inexistentes, por lo que la única entrada natural de aguas subterráneas corresponde al flujo subsuperficial proveniente del este y asociado a la cuenca definida por la quebrada de los Arrieros. El modelo numérico ha cuantificado este flujo en un valor que fluctúa entre 7 y 8 L/s. En Pampa Lina parte del flujo entrante es extraído a través de pozos de bombeo y un parte menor, estimada por el modelo numérico en un valor inferior a 0,5 L/s, escurre hacia el sur.

En los cerros que dividen superficialmente el sector de Pampa Lina de la zona de la mina existe un nivel piezométrico en la roca más elevado que en los alrededores, además de un gradiente vertical ascendente. Esto es consistente con anomalías de mayor temperatura y conductividad eléctrica en el sector, evidenciando aportes de agua desde mayor profundidad a los niveles de roca más someros. Este flujo ocurriría a través del sistema estructural principal norte-sur que otorga una mayor permeabilidad a la roca. El mayor potencial hidráulico en estos cerros induce un flujo reducido de agua hacia el este (sector mina) y oeste (Pampa Lina) a través de la roca. Hacia el oeste de estos cerros se encuentra el rajo Catabela, donde actualmente aflora un caudal menor a 0,5 L/s, consistente con la baja permeabilidad y ausencia de recarga. Desde el rajo se ha reconocido un leve gradiente hidráulico hacia el norte y noroeste, consistente con el sistema estructural dominante en el sector de la mina de dirección noreste. El caudal que entrega el modelo numérico desde el sector de la mina hacia el nor-noroeste sería inferior a 0,1 L/s.

Hacia el oeste y suroeste de la mina y más cercano al depósito de relaves se ha reconocido un gradiente hidráulico pronunciado en un medio donde la roca tendría una menor permeabilidad que en el resto de la zona modelada. La información química e isotópica sostiene, junto con el considerable menor nivel piezométrico, un comportamiento aislado de este sector respecto a la zona de la mina donde el flujo sería aún más restringido o simplemente inexistente. Esto ha sido corroborado con el modelo numérico el cual entrega caudales de salida despreciables, con valores inferiores a 0,1 L/s en esas direcciones, lo que se considera despreciable.

Sobre las rocas del sector del depósito de relaves existen alrededor de 15 metros de depósitos aluviales y caliche. El nivel piezométrico en la zona se encuentra a más de 120 m de profundidad, por lo que la cubierta sedimentaria se encontraba inicialmente seca. Filtraciones desde el depósito de relaves evidencian una saturación de estos depósitos. Se realizó una modelación en la zona no saturada con el software SEEP/W, mediante la cual se calculó la infiltración desde el depósito de relaves producto del drenaje gravitacional del contenido de humedad. Si bien la infiltración estimada satura la capa de suelo que está en contacto con el relave, no generó un flujo horizontal y por ende la modelación no simuló los afloramientos observados aguas abajo del muro. Para este caso base la infiltración alcanzó un valor cercano a 130 L/s. Considerando los afloramientos de agua que ha habido en el muro y los niveles de los piezómetros instalados sobre estos, se modificaron las características de los muros y se simuló una "rotura" de la geomembrana, lo que generó un flujo entre 80 y 90 L/s desde la zona del depósito de relaves hacia el material aluvial. Según el modelo el agua infiltrada no llega al nivel piezométrico, lo que es consistente con la muy baja permeabilidad de las rocas, nula recarga y profundidad del nivel.

El modelo numérico 3D se realizó en base a 3 unidades hidrogeológicas principales, de base a techo; el basamento rocoso, roca fracturada-meteorizada y depósitos aluviales superficiales. Los resultados del modelo numérico son consistentes con el modelo conceptual y muestran que no existe un flujo de agua desde el sector de Pampa Lina hacia el sector de la mina. Ambos sectores se comportan de

forma prácticamente aislada y por lo tanto los efectos de la profundización del rajo Catabela, difícilmente tendrán un efecto sobre los niveles del sector de Pampa Lina. A la fecha y con una profundización mayor a 200 metros bajo el nivel freático del sector, ninguno de los pozos ubicados alrededor del rajo muestra un descenso en el nivel, evidenciando la baja permeabilidad de las rocas y la generación de un cono de depresión local, sin efecto en sectores aledaños. De la misma forma el modelo 2D muestra que los efectos de las filtraciones desde el depósito de relaves tienen efecto exclusivamente en la cubierta aluvial sin llegar al nivel de agua subterránea del sector.

El modelo numérico 3D construido para representar el flujo del acuífero fue calibrado de forma razonable considerando la calidad de la información disponible. Este modelo es coherente con el modelo conceptual desarrollado y además permite ajustar la respuesta de niveles acorde con los criterios definidos por SEA (2012) así como el balance conceptual de flujos, razón por la cual se considera que esta herramienta cumple el objetivo de representar el sistema acuífero.

No obstante lo anterior, y como se ha mencionado antes, este modelo no es capaz de representar el ascenso en los pozos cercanos al depósito de relaves debido a que estos se alimentan por un flujo que ocurre básicamente en los sedimentos superiores (caliche) los cuales formaron una napa “colgada” producto de las infiltraciones del depósito de relaves.

De todo lo anterior se desprende que, en el dominio hidrogeológico occidental, ubicado al oeste de los cerros que limitan el rajo Catabela de Pampa Lina, el agua se almacena en fracturas posiblemente debido a antiguos eventos de recarga y existiría un aporte menor desde mayor profundidad a través de estructuras. La composición química y alta salinidad de las aguas (mayor al agua de mar), sustenta lo anterior y reflejaría períodos de residencia del agua subterránea (“edad”) posiblemente del orden de miles de años.

Las particularidades del sistema hidrogeológico entregan una incertidumbre importante en los supuestos que se deben hacer para la elaboración de los modelos numéricos que se realizan en base a un medio poroso. Las bajas permeabilidades y flujo muy restringido, proveniente principalmente de agua almacenada en la roca se consideran elementos que ponen en duda la real aplicabilidad de los modelos numéricos y la realización de predicciones y toma de decisiones a partir de estos. Por el contrario, planes de monitoreo robustos, bien definidos y focalizados en los sectores de mayor interés pueden entregar una mejor comprensión del funcionamiento hidrogeológico y tienen una mayor relevancia en la activación de sistemas de alerta temprana y activación de planes de contingencia ante potenciales efectos adversos al sistema natural.

8 REFERENCIAS

- Arcadis, Marzo 2016. Interpretación de análisis isotópicos.
- DGA. Expediente ND-0203-338
- DGA. Expediente ND-0203-987
- DGA. Expediente ND-0203-966
- DGA. Expediente ND-0203-800094
- DGA. Expediente ND-0203-800097
- DGA. Expediente ND-0203-800098
- DGA. Expediente ND-0203-800060
- DGA. Expediente ND-0203-800062
- DIHA-DGA (2009)
- DICTUC (2006) Estudio Salar de Llamara
- Golder, 2010. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto “Sierra Gorda”.
- Leybourne, M., and Cameron, E., 2006. Composition of groundwaters associated with porphyry-Cu deposits, Atacama Desert, Chile: elemental and isotopic constraints on water sources and water-rock reactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*.
- Lourenço, C., and Ribeiro, L., 2007. Evaluating mineral water quality trends of Pedras Salgadas (Portugal). *Groundwater in Fractured Rocks: IAH Selected Paper Series*, volume 9.
- Krasny & Sharp, 2003. *Groundwater in Fractured Rocks: IAH Selected Paper Series*, volume 9. International Conference on Groundwater in Fractured Rocks in 2003. Published in 2007.
- Muñoz, N .1989. Geología y estratigrafía de las Hojas Baquedano y Pampa Unión, II Región, Antofagasta, Chile. Memoria, departamento de Geología, Universidad de Chile. Santiago.
- SQM, 2008. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto “Pampa Hermosa”
- Spence, 2015. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minerales Primarios. Minera Spence
- Schlumberger Water Services, 2010. Modelo numérico Mina Catabela
- Schlumberger Water Services, 2011. Caracterización Hidrogeológica Proyecto Sierra Gorda. Soporte para el Estudio de Impacto Ambiental de Proyecto Sierra Gorda.
- Schlumberger Water Services, 2013. Instalación de Pozos de Monitoreo Proyecto Sierra Gorda
- VAIGS, 2014. Actualización Modelo Hidrogeológico, Proyecto Sierra Gorda.
- VAIGS, 2015, Modelo Hidrogeológico Rajo Catabela.

9 ANEXO A: HIDROLOGÍA

El análisis presentado en esta sección se realizó a partir de la recopilación de antecedentes presentados en estudios anteriores, ya que no existen antecedentes nuevos que permitan estimar con mayor precisión las variables que componen el ciclo hidrológico en el entorno del proyecto. Para ello se han utilizado, principalmente, el estudio hidrogeológico realizados por DIHA-DGA (2009) entre la XV y III Región, enfocado en un levantamiento hidrogeológico de cuencas altiplánicas, y el estudio de VAI (2014).

Se analizaron las cuencas que intervienen en el dominio hidrogeológico estudiado (Tabla 9-1 y Figura 9-1), que corresponden a la cuenca aportante Sierra Gorda ubicada aguas arriba del dominio del modelo numérico, y seis cuencas de menor tamaño ubicadas en el dominio o aguas abajo de éste.

Tabla 9-1: Cuencas aportantes al dominio hidrogeológico

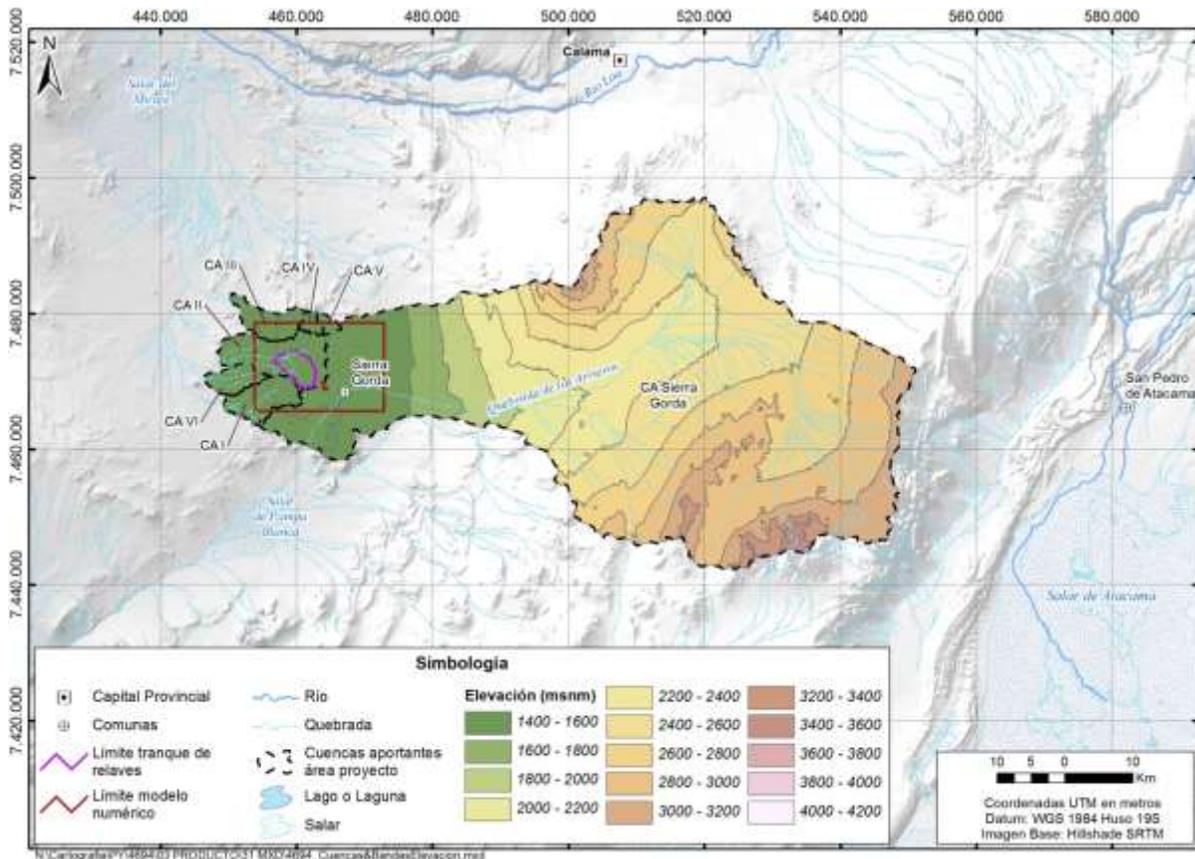
Cuenca Aportante	Área (Km ²)	Elevación media (m.s.n.m.)
Sierra Gorda	2.735	2.662
CA I	49	1.582
CA II	89	1.596
CA III	38	1.610
CA IV	8	1.657
CA V	6	1.663
CA VI	26	1.539

Fuente: Elaboración propia.

La metodología utilizada para la evaluación de la disponibilidad hídrica, consiste en la estimación de las precipitaciones en las cuencas a partir de las mediciones en una estación pluviométrica representativa de las condiciones meteorológicas de la zona estudiada. En la zona predomina un ambiente árido que se caracteriza por escasas precipitaciones, concentradas en eventos puntuales, de orígenes distintos. Por un lado se encuentran aquellas masas formadas en el Océano Pacífico que ocurren durante los meses de otoño e invierno, son de baja intensidad (menor a 8 mm/d) y se concentran mayormente bajo los 2.400 msnm, aproximadamente. Los eventos estivales ocurren durante en denominado “invierno altiplánico”, que tienen un origen en el Océano Atlántico y recorre la región del Amazonas. Pese a que al llegar a la zona de estudio las masas de aire se han debilitado durante su recorrido, son de mayor intensidad (hasta 21 mm/d), ocurren a mayor altura (sobre 2.400 msnm), y por lo tanto generarían los principales aportes al sistema hidrológico e hidrogeológico.

Debido a las diferencias de cota en las cuencas, entre 1.500 y 4.250 msnm, una estación patrón difícilmente sería representativa de toda la superficie, por lo que los registros se extrapolaron a partir de gradientes de precipitación con respecto a la altura estimados a escala regional. Para esto, las cuencas se dividieron en bandas de elevación cada 200 m (Figura 9-1), en la cual se calculó el centroide y su cota para ajustar los registros.

Figura 9-1: Ubicación de cuencas de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Considerando que la evaporación es un variable más estable tanto espacial como temporalmente, la tasa mensual representativa para la cuenca se asumió a partir de una estación patrón, basada en mediciones realizadas por la Dirección General de Aguas (DGA) en tanques evaporímetros presentados en DIHA-DGA (2009). Dada la menor variabilidad espacial de esta componente, no se consideró una corrección por la altura.

Finalmente se estimó la disponibilidad hídrica, desde donde se desprende una componente de recarga y una de flujo superficial, como la precipitación calculada menos la evapotranspiración a escala diaria.

9.1 Precipitación

Para la estimación de las precipitaciones se utilizó como estación pluviométrica patrón Chiu-Chiu, perteneciente a la DGA, debido a su cercanía con las cuencas, la extensión de la serie que permite una evaluación de su comportamiento en el largo plazo (más de 40 años, entre agosto de 1974 y enero de 2016), la elevación (2.524 msnm) similar con las cuencas analizadas, y la ocurrencia de eventos considerables de ambos orígenes, desde las masas de aire del Pacífico y Atlántico.

Para la corrección de los registros se estimaron dos gradientes de precipitación con respecto a la altura, uno bajo los 2.400 msnm y otro sobre esta cota, a partir de los registros presentados por DIHA-DGA (2009). La definición del gradiente inferior estaría bien representada por la información disponible en torno a las cuencas, con incluso la estación Sierra Gorda (DGA, 1.616 msnm) ubicada dentro de límites, pero que no se utilizó por la menor extensión de la serie (menor a 20 años).

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

La mayor dificultad en la evaluación hídrica radica en la estimación del gradiente superior, ya que en torno al área de estudio las estaciones a elevaciones mayores a 2.400 msnm se encuentran en la cuenca del Salar de Atacama, con un régimen de precipitaciones principalmente estival y de mayor intensidad que el ocurrido a partir de la vertiente pacífico desde la costa a la Cordillera de Domeyko. Por ello, además se incluyeron las estaciones ubicadas en la región media-alta de la cuenca del río Loa.

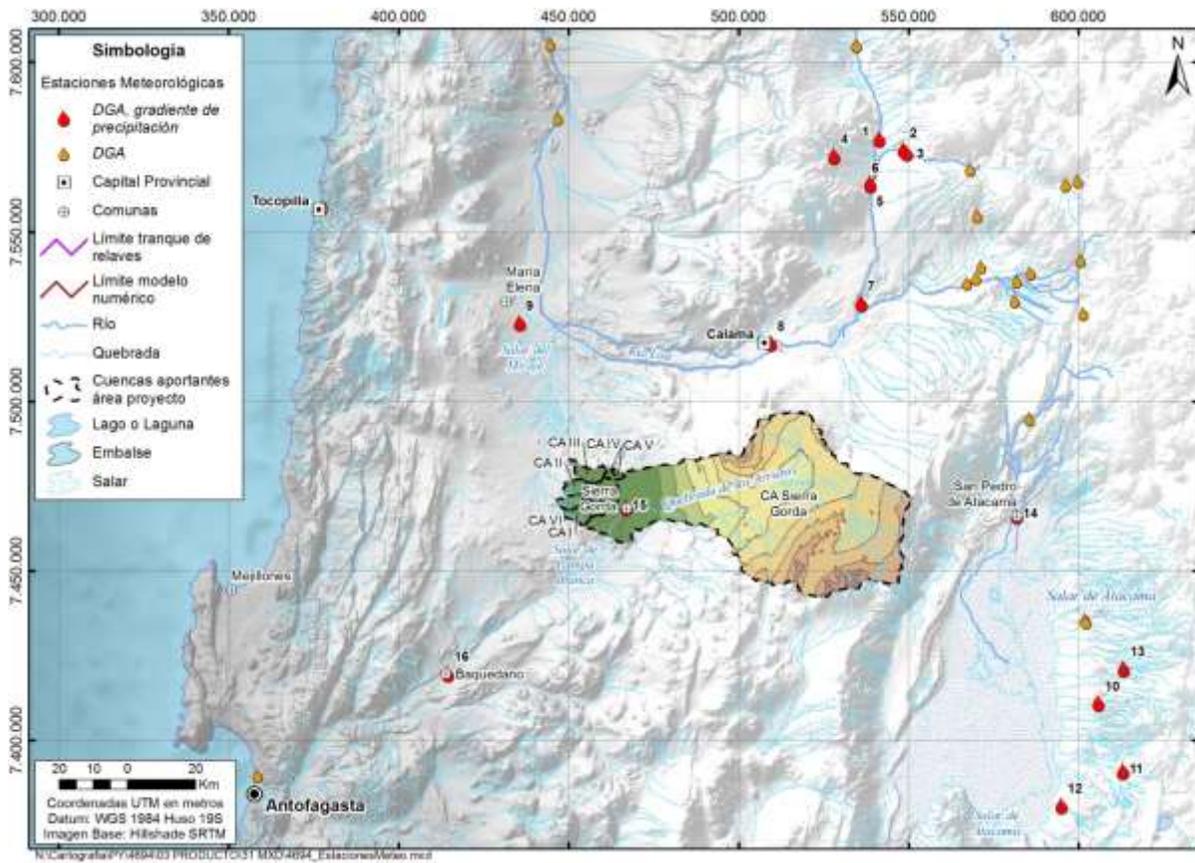
Las estaciones DGA utilizadas para la definición de los gradientes, fueron aquellas ubicadas sobre los 1.000 msnm, con más de 10 años de registros, y donde la influencia en la precipitación anual, además de la componente atlántica reflejara la influencia del pacífico. De esto se estimó que el porcentaje de precipitaciones concentradas en los meses estivales (entre diciembre y marzo) debiese acercarse al 85% de la precipitación anual, de manera que los eventos en invierno fuesen significativos. Las estaciones utilizadas y sus características, se presentan en la Tabla 9-2 y Figura 9-2. Las precipitaciones presentadas se estimaron considerando el año hidrológico comprendido entre octubre y septiembre, y para el cálculo de los gradientes se consideraron las precipitaciones rellenadas.

Tabla 9-2: Estaciones meteorológicas utilizadas para la estimación de precipitaciones

N°	Estación	Elevación (msnm)	Años original	Años rellenados	Precipitación (mm/año)	
					Original	Rellenada
1	Quinchamale	3.020	11	26	26	24
2	San Pedro de Conchi	3.217	19	19	34	34
3	Pashall N°2	3.318	33	34	31	30
4	Conchi Viejo	3.491	27	28	42	41
5	Conchi Embalse	3.010	28	28	20	20
6	Conchi Muro Embalse	3.010	11	25	20	19
7	Chiu-Chiu	2.524	29	29	6	6
8	Calama	2.260	30	30	4	4
9	Coya Sur	1.290	14	14	1	1
10	Camar	3.020	27	31	37	37
11	Socaire	3.251	29	31	42	44
12	Peine	2.480	29	29	22	22
13	Talabre	3.600	11	26	66	68
14	San Pedro de Atacama	2.450	25	25	25	25
15	Sierra Gorda	1.616	12	12	1	1
16	Baquadano	1.032	19	19	2	2

Fuente: DIHA-DGA (2009).

Figura 9-2: Ubicación de estaciones pluviométricas.



Fuente: Elaboración propia.

Con esta información se estimaron los gradientes pluviométricos representativos de la cuenca, los cuales se presentan en la Figura 9-3. Para altitudes menores a 2.400 msnm se obtuvo un gradiente de las precipitaciones de 1,9 mm/año cada 100 m, mientras que sobre los 2.400 msnm, un aumento de 3,2 mm/año cada 100 m de elevación. Como se mencionó, la información disponible no permite una estimación precisa de las precipitaciones en la parte alta de la cuenca. Estas incertidumbres sumadas al uso de estaciones meteorológicas ubicadas en zonas con una influencia mayor de las precipitaciones estivales, suponen una sobreestimación del gradiente de precipitación para las bandas superiores. Esto motiva la evaluación de las precipitaciones en las cuencas bajo dos escenarios: i) considerando dos gradientes de precipitación (bajo y sobre los 2.400 msnm), como el límite superior de las precipitaciones estimadas, y ii) considerando el gradiente inferior como representativo de toda la superficie evaluada (hasta los 4.250 msnm), de manera de acotar las precipitaciones por un límite inferior.

Con este análisis regional, a cada banda de altura (Figura 9-1) se le asignó la serie de precipitación diaria de acuerdo a la ecuación 7-1, para cada escenario.

$$Pp_d^B = Pp_d^{Ch} \cdot \left(\frac{Pp^{Ch}_{anual} + (z_B - z_{Ch}) \cdot \Delta P}{Pp^{Ch}_{anual}} \right) \quad \text{Ecuación 7-1}$$

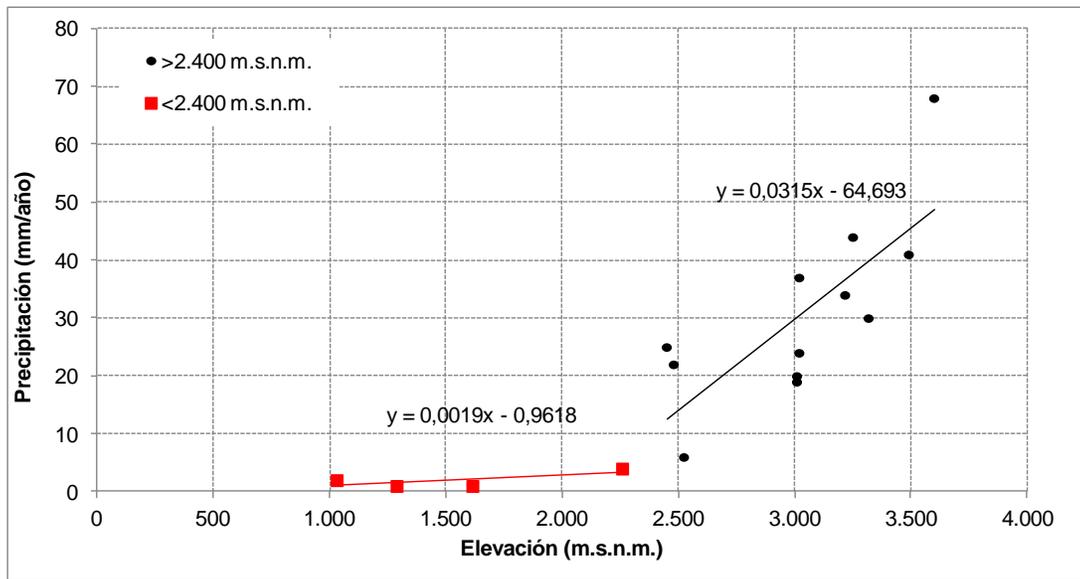
Donde Pp_d^B es la precipitación diaria en la banda de altura; Pp_d^{Ch} , la precipitación diaria en Chiu-Chiu; Pp^{Ch}_{anual} , precipitación anual en Chiu-Chiu; z_B , elevación en el centroide de la banda; z_{Ch} , elevación de la estación Chiu-Chiu; y ΔP , el gradiente de precipitación.

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Con esto se obtiene la precipitación mínima y máxima estimada por banda de elevación, la cual se presenta en la Tabla 9-3 para la cuenca Sierra Gorda y en la Tabla 9-4 para el resto de las cuencas aportantes.

Para la cuenca de Sierra Gorda se estima una precipitación entre 5,5 y 13,7 mm/año, equivalentes a 479 y 1.186 L/s. La precipitación en la cuenca Sierra Gorda (para una superficie de 2.408 Km²) fue previamente estimada por VAI (2014), obtenido un valor de 21,4 mm/año, equivalente a 1.636 L/s.

Figura 9-3: Gradiente de precipitación con respecto a la elevación.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9-3: Precipitaciones en la cuenca Sierra Gorda para distintos escenarios de estimación.

Banda de altura (m.s.n.m.)	Área (Km ²)	Elevación centroide (m.s.n.m.)	Escenario ii)		Escenario i)	
			Precipitación (mm/año)	(L/s)	Precipitación (mm/año)	(L/s)
1.400-1.600	46	1.559	3,4	5	3,4	5
1.600-1.800	231	1.649	3,6	26	3,6	26
1.800-2.000	89	1.919	4,1	12	4,1	12
2.000-2.200	98	2.109	4,5	14	4,5	14
2.200-2.400	160	2.323	4,9	25	4,9	25
2.400-2.600	366	2.534	5,3	61	5,6	65
2.600-2.800	537	2.697	5,6	95	10,7	183
2.800-3.000	476	2.898	6,0	90	17,1	258
3.000-3.200	451	3.075	6,3	90	22,7	324
3.200-3.400	216	3.272	6,7	46	28,9	198
3.400-3.600	48	3.479	7,1	11	35,4	55
3.600-3.800	12	3.695	7,5	3	42,3	16
3.800-4.000	3	3.901	7,9	1	48,8	5
4.000-4.200	1	4.121	8,3	0	55,8	2
4.200-4.400	0	4.243	8,5	0	59,6	0
Total	2.735	2.662	5,5	479	13,7	1.186

Fuente: Elaboración propia.

En el resto de las cuencas involucradas en el dominio hidrogeológico se estimó una precipitación igual a 3,5 mm/año, equivalente a 24 L/s. Dada la elevación menor de estos sectores al considerar Chiu-Chiu como la estación patrón, se sobreestimaría la precipitación para las zonas bajas de la cuenca (en la estación Sierra Gorda la precipitación media es de 0,9 mm/a con 20 años de registro). Sin embargo, dada la menor influencia de estas bandas de altura en la estimación de la disponibilidad hídrica, se optó por utilizar la misma estación patrón de forma de ser consistente con la metodología utilizada. La precipitación estimada previamente por VAI (2014) para estas cuencas (354 Km² de superficie) es de 7,9 mm/año, equivalente a 88 L/s.

Tabla 9-4: Estimación de precipitaciones en las cuencas aportantes ubicadas en el dominio hidrogeológico o aguas abajo.

Cuenca aportante	Banda de altura (m.s.n.m.)	Área (Km ²)	Elevación centroide (m.s.n.m.)	Precipitación	
				(mm/año)	(L/s)
CA I	1.400-1.600	31	1.551	3,4	3
	1.600-1.800	18	1.631	3,6	2
CA II	1.400-1.600	36	1.557	3,4	4
	1.600-1.800	53	1.638	3,6	6
	1.800-2.000	1	1.864	4,0	0
CA III	1.400-1.600	24	1.547	3,4	3
	1.600-1.800	14	1.642	3,6	2
CA IV	1.600-1.800	8	1.657	3,6	1
CA V	1.600-1.800	6	1.663	3,6	1
	1.800-2.000	0	1.814	3,9	0
CA VI	1.400-1.600	26	1.539	3,4	3
Total		217	1.592	3,5	24

Fuente: Elaboración propia.

9.2 Evaporación

Para la caracterización de la evaporación en la zona de estudio, se utilizó el análisis regional presentado por DIHA-DGA (2009) el cual se basa en mediciones en tanques evaporímetros realizados por DGA. Como mediciones representativas de las condiciones en la zona estudiada a largo plazo, se consideran las estaciones Chiu-Chiu (2.524 msnm y 33 años de registro) y Calama (2.260 msnm y 27 años de registro), esta última suspendida en la década del '90. En la Tabla 9-5 se presenta la evaporación media mensual estimada.

Tabla 9-5: Evaporación de tanque media mensual (mm/mes)

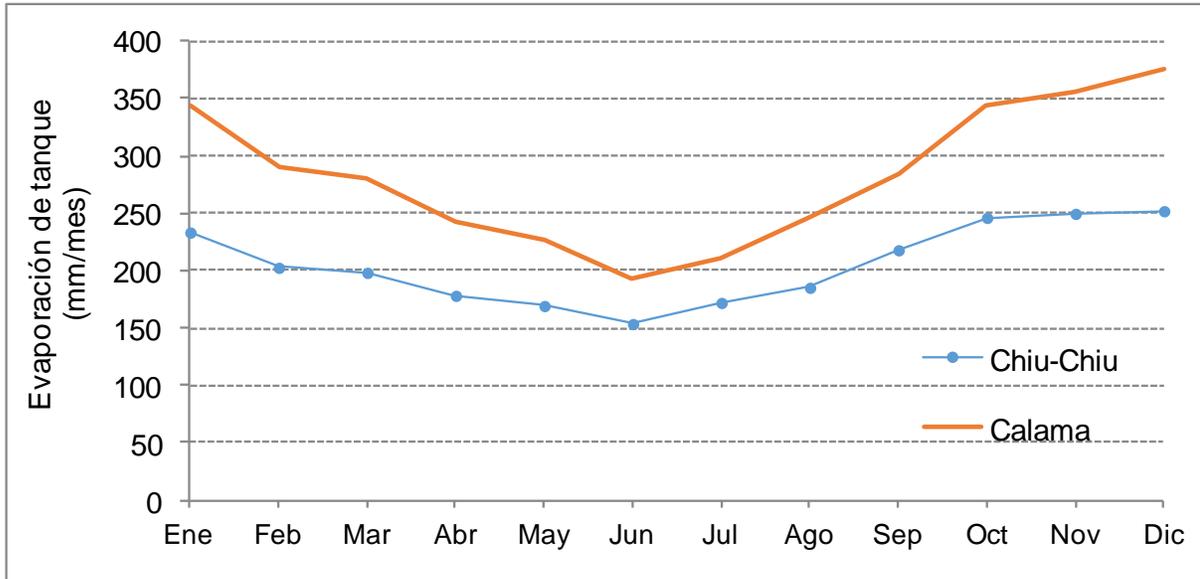
	Calama (mm/mes)	Chiu-Chiu (mm/mes)
Enero	344,1	233,5
Febrero	290,8	202,8
Marzo	280,0	198,4
Abril	243,4	178,4
Mayo	225,7	169,5
Junio	193,8	153,8
Julio	210,9	172,2
Agosto	245,9	185,4
Septiembre	285,1	218,1

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

	Calama (mm/mes)	Chiu-Chiu (mm/mes)
Octubre	344,0	246,3
Noviembre	355,1	249,8
Diciembre	374,8	252,1

Fuente: DIHA-DGA (2009).

Figura 9-4: Evaporación de tanque media mensual



Fuente: Elaboración propia.

La estimación de la evaporación potencial a partir de estas mediciones requiere una corrección por un coeficiente (factor de tanque, K_p) que depende de las condiciones climáticas de la zona. Para este tipo de condiciones se considera aceptable un factor de tanque entre 0,5 y 0,7, mientras que la DGA utiliza un coeficiente de tanque igual a 0,6 para tanques evaporímetros instalados en el altiplano (DGA, 2009). Por lo tanto, para la estimación de la evaporación potencial media diaria se consideró un factor de tanque igual a 0,6 y 0,7, obteniendo valores para la estación Calama entre 5,6 mm/d y 6,5 mm/d y para para la estación Chiu-Chiu entre 4,0 mm/d y 4,7 mm/d (Tabla 9-6).

Tabla 9-6: Evaporación potencial diaria (mm/d) con distintos factores de tanque.

Mes	$K_p = 0,6$		$K_p = 0,7$	
	Calama (mm/d)	Chiu-Chiu (mm/d)	Calama (mm/d)	Chiu-Chiu (mm/d)
Enero	6,7	4,5	7,8	5,3
Febrero	6,2	4,3	7,3	5,1
Marzo	5,4	3,8	6,3	4,5
Abril	4,9	3,6	5,7	4,2
Mayo	4,4	3,3	5,1	3,8
Junio	3,9	3,1	4,5	3,6
Julio	4,1	3,3	4,8	3,9
Agosto	4,8	3,6	5,6	4,2
Septiembre	5,7	4,4	6,7	5,1

Mes	K _p = 0,6		K _p = 0,7	
	Calama (mm/d)	Chiu-Chiu (mm/d)	Calama (mm/d)	Chiu-Chiu (mm/d)
Octubre	6,7	4,8	7,8	5,6
Noviembre	7,1	5,0	8,3	5,8
Diciembre	7,3	4,9	8,5	5,7
Promedio	5,6	4,0	6,5	4,7

Fuente: Elaboración propia.

9.3 Disponibilidad hídrica

Para la estimación de la disponibilidad hídrica se determinó una precipitación efectiva que consiste en la precipitación diaria estimada por banda menos la evaporación diaria estimada para el mes evaluado, utilizando los registros de la estación Chiu-Chiu como medición patrón, corregida por un factor de tanque igual a 0,7 (4,7 mm/d al año). Todo esto de acuerdo a la metodología presentada en las secciones 9.1 y 9.2.

Para la cuenca Sierra Gorda se evaluaron los mismos escenarios presentados en la Tabla 9-3: Precipitaciones en la cuenca Sierra Gorda para distintos escenarios de estimación.. Para el escenario de precipitaciones inferiores (ii), se estima una disponibilidad hídrica, luego de evaporar, igual 84 L/s, que equivale al 18% de lo precipitado; es decir, 82% evapora inmediatamente, y el resto queda disponible para infiltrar, escurrir o almacenarse (Tabla 9-7). Considerando que la evaluación es a largo plazo y no existe una red piezométrica para una evaluación en detalle del comportamiento de los niveles en las cuencas, se asume que los niveles no varían, por lo tanto el almacenamiento sería despreciable. Para el escenario de precipitaciones superiores (i), se estima una disponibilidad hídrica igual a 568 L/s, equivalente al 48% de lo que precipita en la cuenca.

Para el caso de las cuencas aportantes ubicadas en el dominio hidrogeológico o aguas abajo, se estima una disponibilidad hídrica igual a 2 L/s, equivalente al 10% de lo precipitado (Tabla 9-8).

Tabla 9-7: Disponibilidad hídrica en la cuenca Sierra Gorda para distintos escenarios de estimación.

Banda de altura (m.s.n.m.)	Área (Km ²)	Elevación centroide (msnm)	Escenario ii)		Escenario i)	
			Precipitación (mm/año)	(L/s)	Precipitación (mm/año)	(L/s)
1.400-1.600	46	1.559	0,3	0	0,3	0
1.600-1.800	231	1.649	0,4	3	0,4	3
1.800-2.000	89	1.919	0,5	1	0,5	1
2.000-2.200	98	2.109	0,6	2	0,6	2
2.200-2.400	160	2.323	0,7	4	0,7	4
2.400-2.600	366	2.534	0,9	10	1,0	11
2.600-2.800	537	2.697	1,0	17	3,6	61
2.800-3.000	476	2.898	1,1	17	8,1	122
3.000-3.200	451	3.075	1,2	18	12,8	183
3.200-3.400	216	3.272	1,4	9	18,4	126
3.400-3.600	48	3.479	1,6	2	24,6	38
3.600-3.800	12	3.695	1,7	1	31,1	12
3.800-4.000	3	3.901	1,9	0	37,3	4

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO SIERRA GORDA

Banda de altura (m.s.n.m.)	Área (Km ²)	Elevación centroide (msnm)	Escenario ii)		Escenario i)	
			Precipitación (mm/año)	(L/s)	Precipitación (mm/año)	(L/s)
4.000-4.200	1	4.121	2,2	0	44,1	1
4.200-4.400	0	4.243	2,3	0	47,9	0
Total	2.735	2.662	1,0	84	6,5	568

Tabla 9-8: Disponibilidad hídrica en cuencas aportantes ubicadas en el dominio hidrogeológico o aguas abajo.

Cuenca aportante	Banda de altura (m.s.n.m.)	Área (Km ²)	Elevación centroide (m.s.n.m.)	Precipitación (mm/año) (L/s)	
CA I	1.400-1.600	31	1.551	0,3	0
	1.600-1.800	18	1.631	0,4	0
CA II	1.400-1.600	36	1.557	0,3	0
	1.600-1.800	53	1.638	0,4	1
	1.800-2.000	1	1.864	0,5	0
CA III	1.400-1.600	24	1.547	0,3	0
	1.600-1.800	14	1.642	0,4	0
CA IV	1.600-1.800	8	1.657	0,4	0
CA V	1.600-1.800	6	1.663	0,4	0
	1.800-2.000	0	1.814	0,4	0
CA VI	1.400-1.600	26	1.539	0,3	0
	Total	217	1.592	0,3	2

Fuente: Elaboración propia

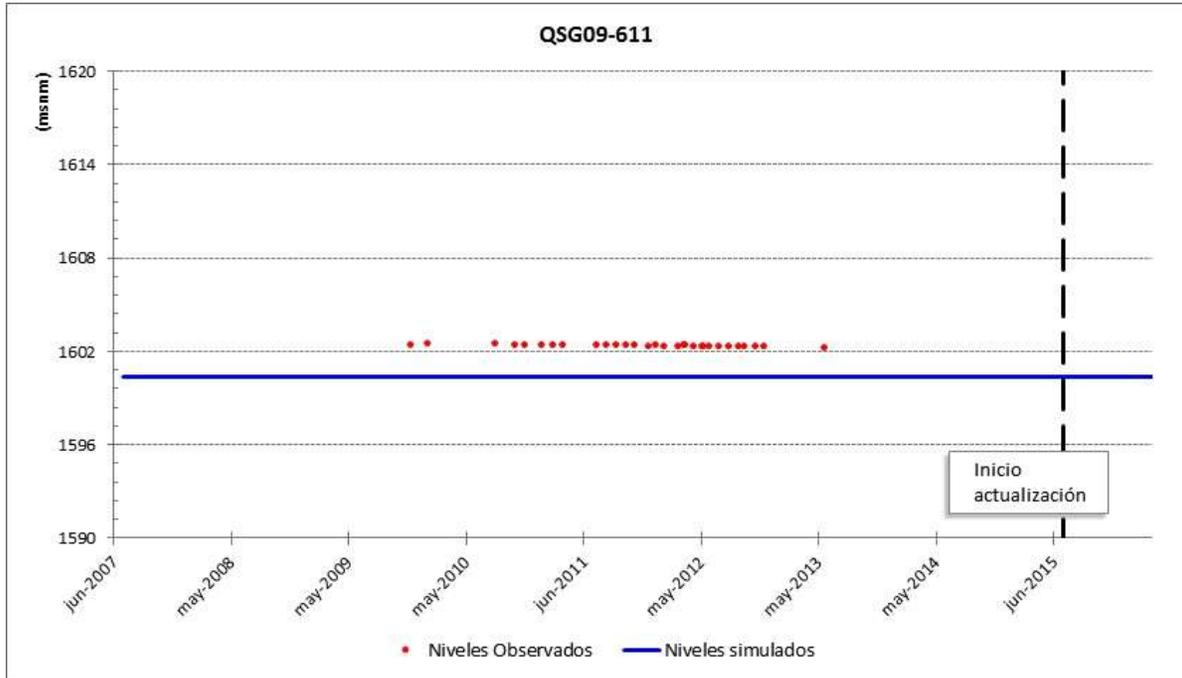
Como en las cuencas no existen mayores antecedentes que permitan cuantificar cuánta agua infiltra como recarga al acuífero, se han utilizado porcentajes de recarga respecto a la precipitación, consistentes con estudios en ambientes similares (ejm. DICTUC, 2006 en el salar de Llamara) los que se acercan al 5 %. Considerando el rango de precipitaciones entregado por el escenario 1 y 2 (Tabla 9-3) se estima una recarga entre 25 y 60 L/s para una cuenca subterránea de iguales dimensiones que la cuenca hidrológica estudiada. El resto de la disponibilidad hídrica, entre 60 y 500 L/s, estará disponible para escurrir. Para el resto de las cuencas, por ubicarse a baja elevación, la infiltración hacia el acuífero se considera despreciable.

Es importante recalcar que las estimaciones de recarga realizadas en base a la información hidrológica corresponden a una estimación gruesa para toda la cuenca aportante al sector de Pampa Lina, sin embargo, debido a que la cuenca hidrológica tiene zonas con divisorias de aguas superficiales poco definidas, se estima que solo una parte de esta recarga total de la cuenca llega de forma efectiva a Pampa Lina.

10 ANEXO B: HIDROGRAMAS DE LOS POZOS DE OBSERVACIÓN

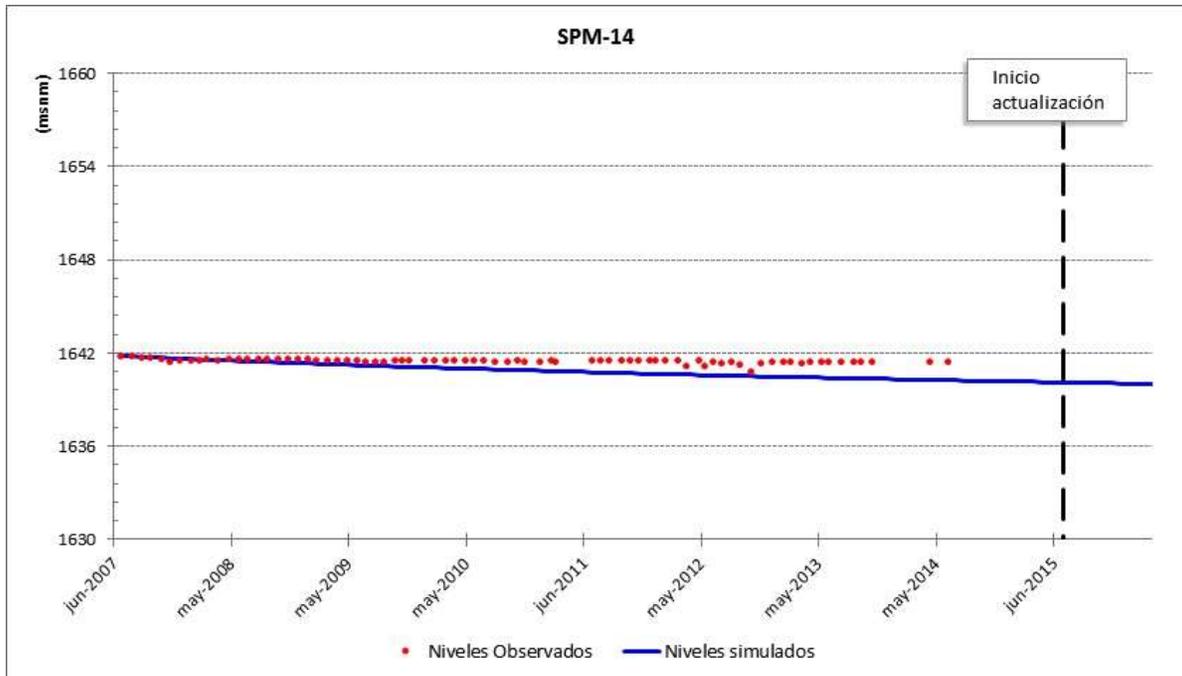
Pampa Lina.

Figura 10-1: Pozo de observación QSG09-611



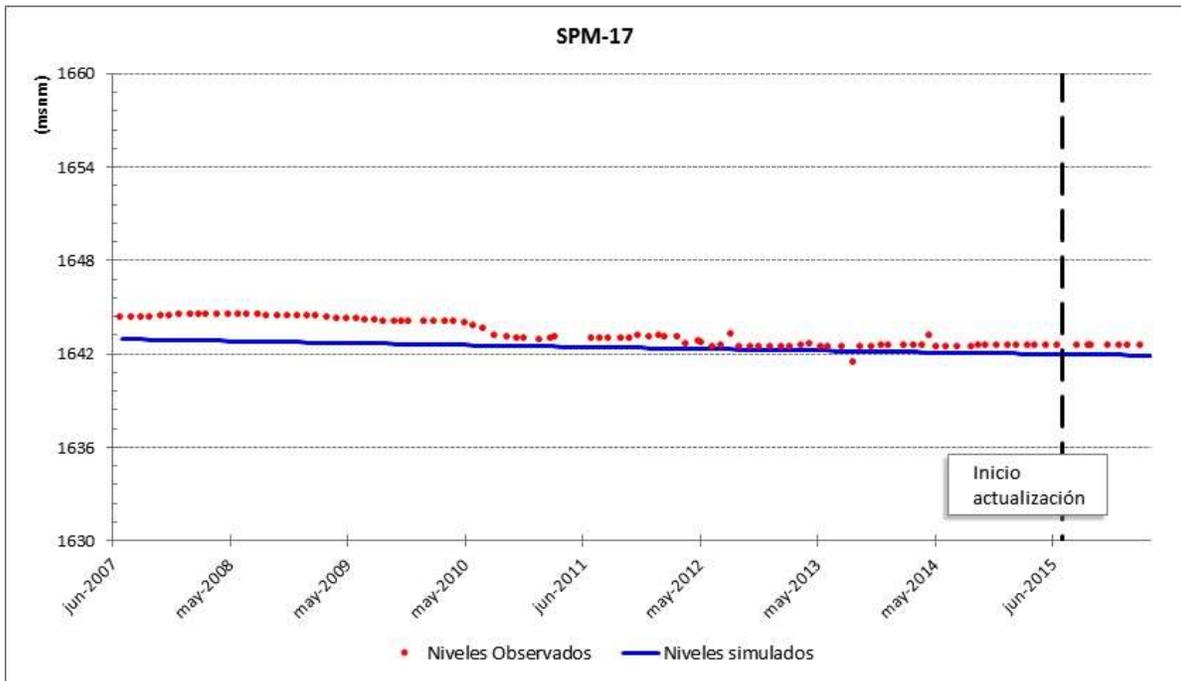
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-2: Pozo de observación SPM-14



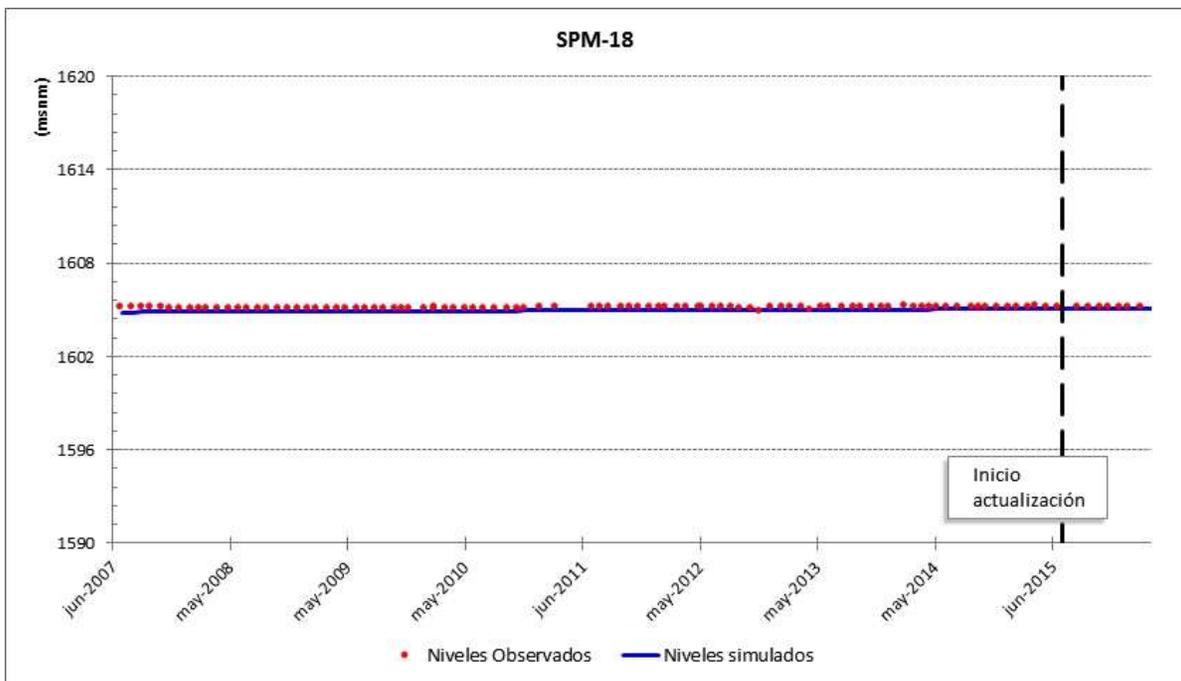
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-3: Pozo de observación SPM-17



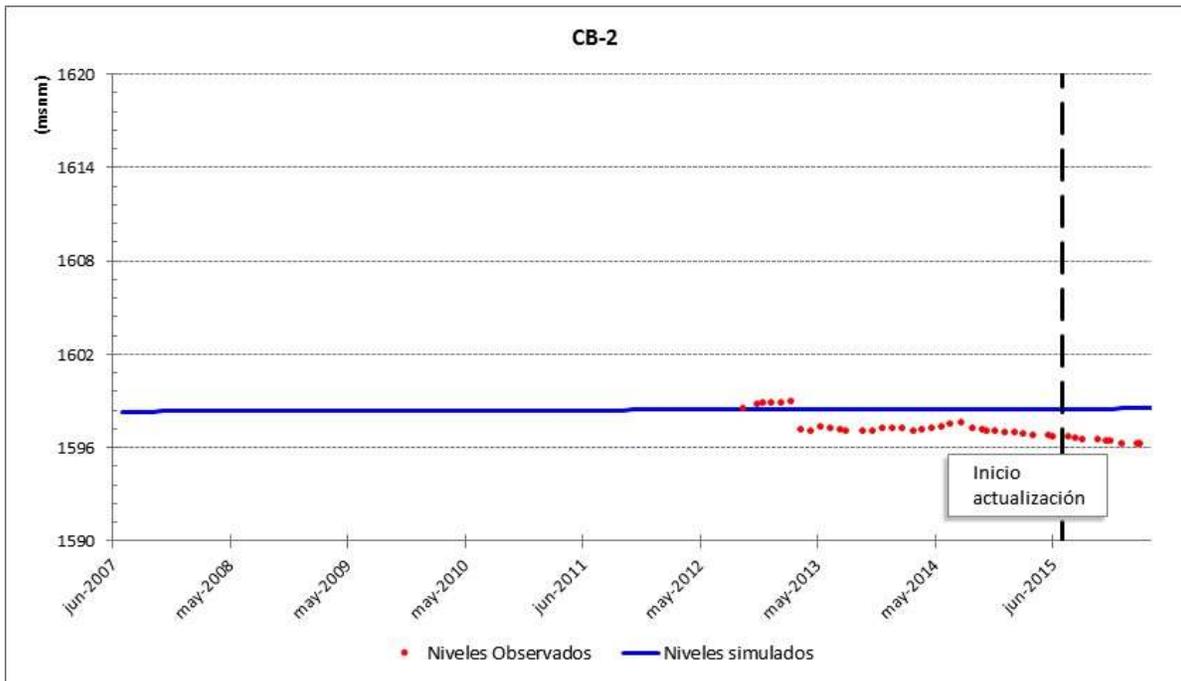
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-4: Pozo de observación SPM-18



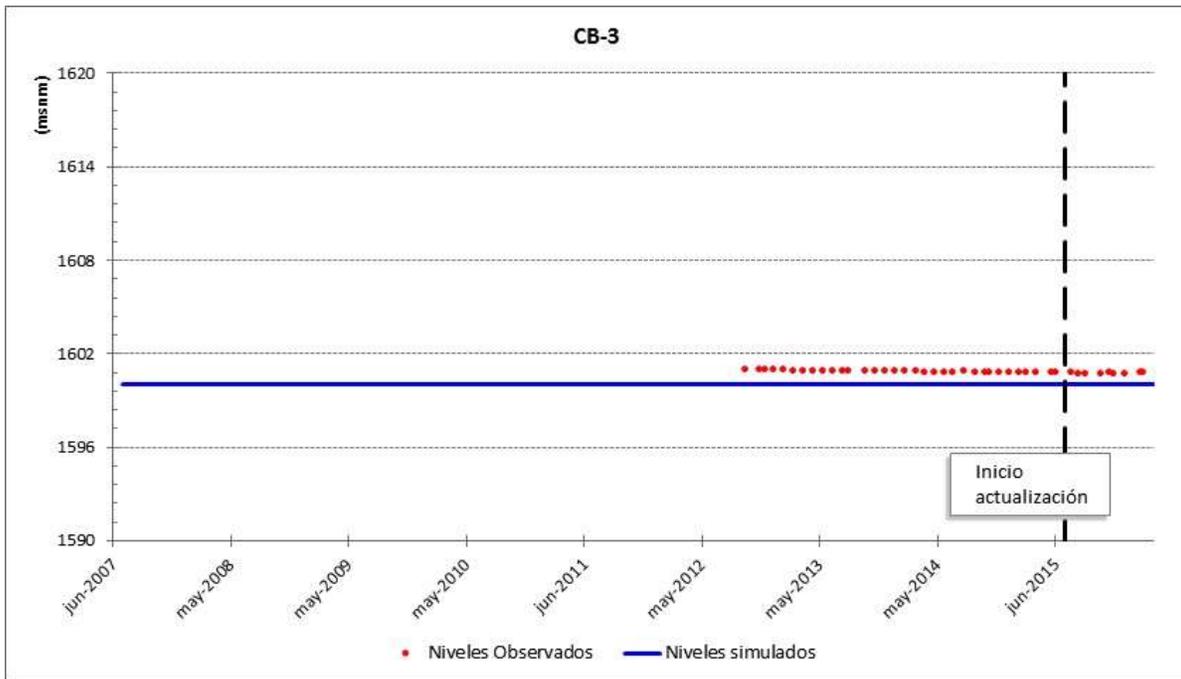
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-5: Pozo de observación CB-2



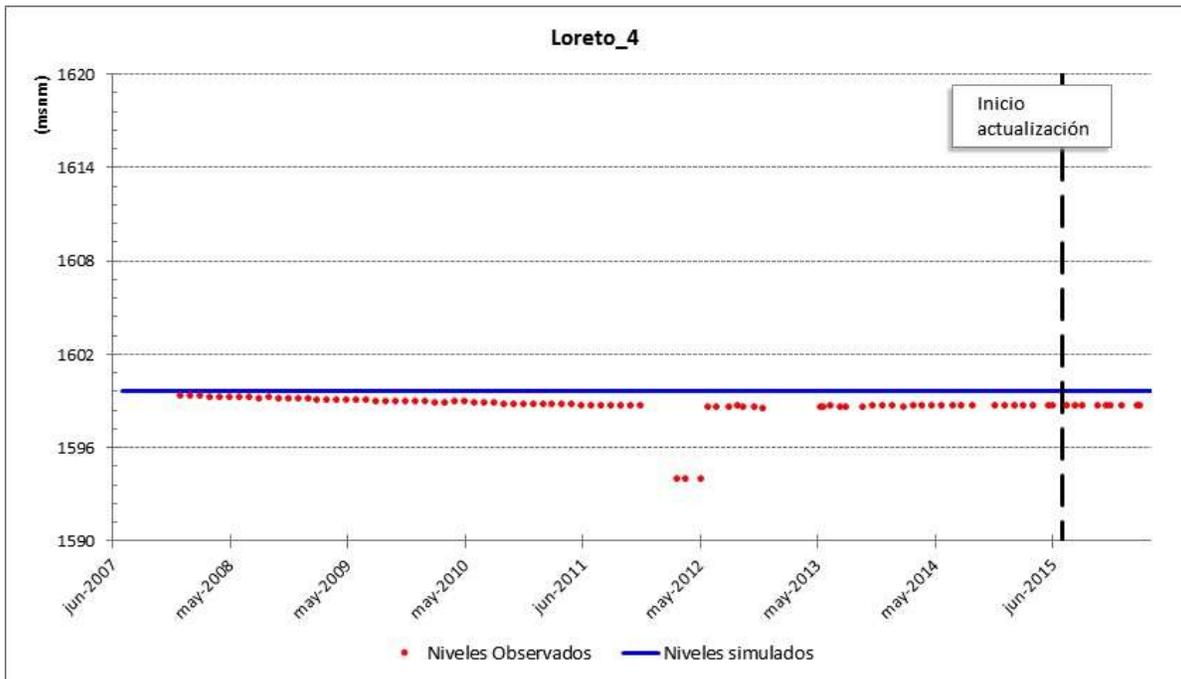
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-6: Pozo de observación CB-3



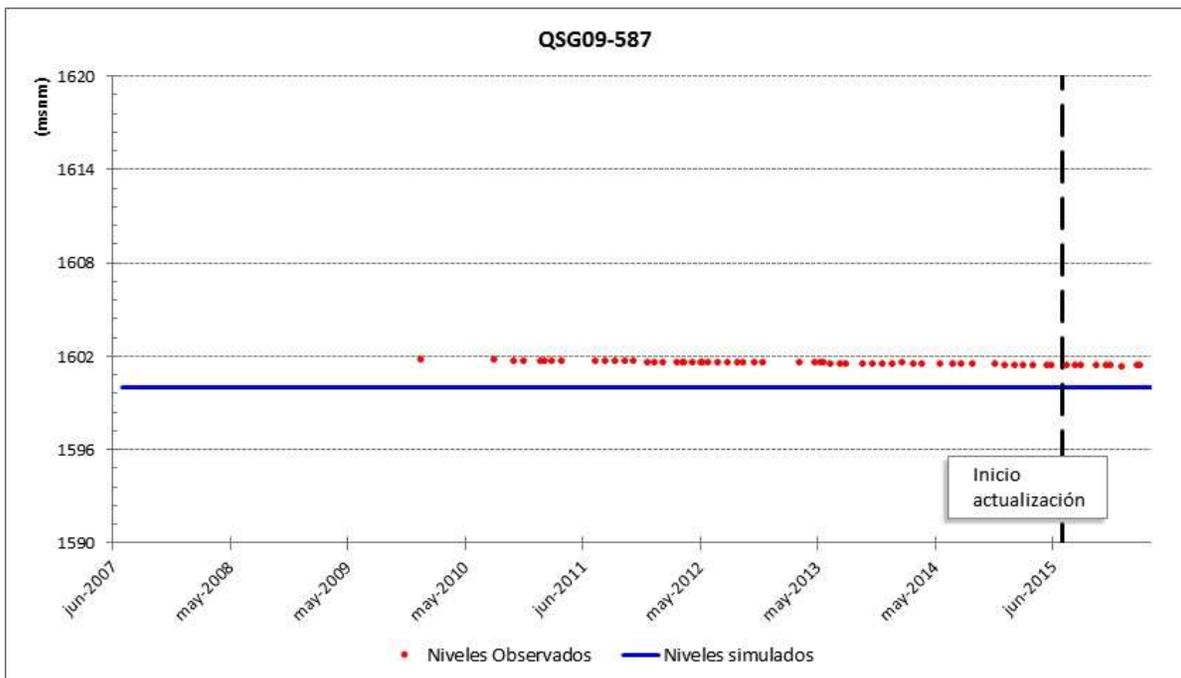
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-7: Pozo de observación Loreto 4



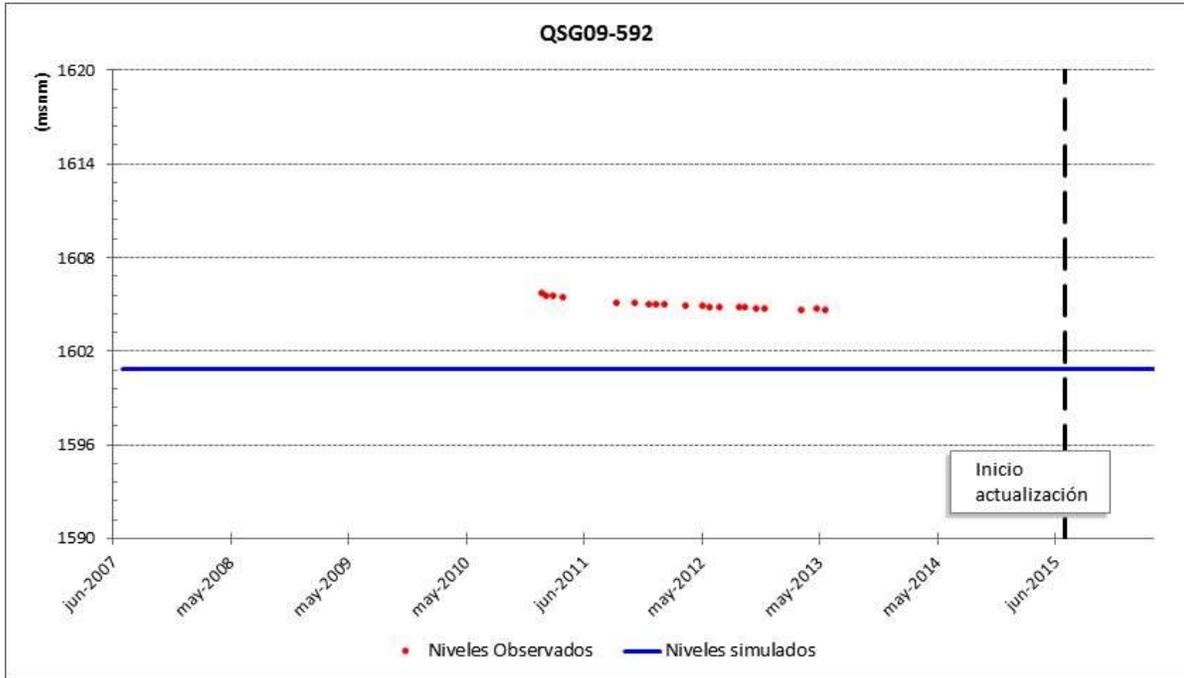
Fuente: Elaboración propia

Figura 10-8: Pozo de observación QSG09-587



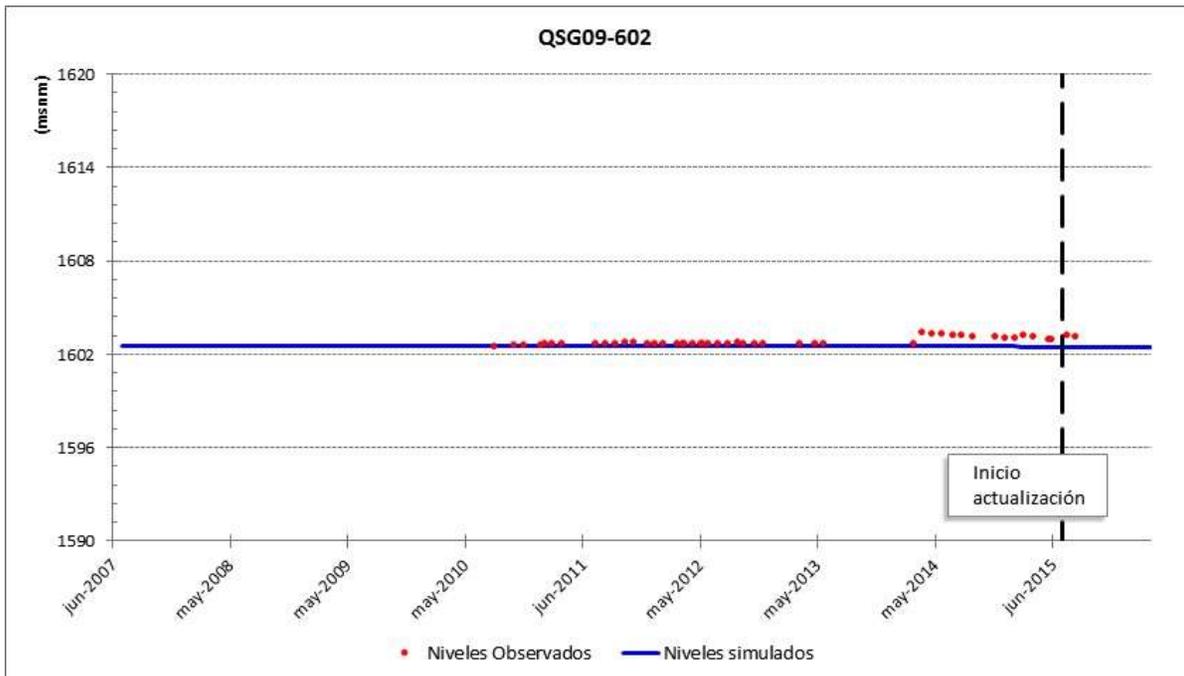
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-9: Pozo de observación QSG09-592



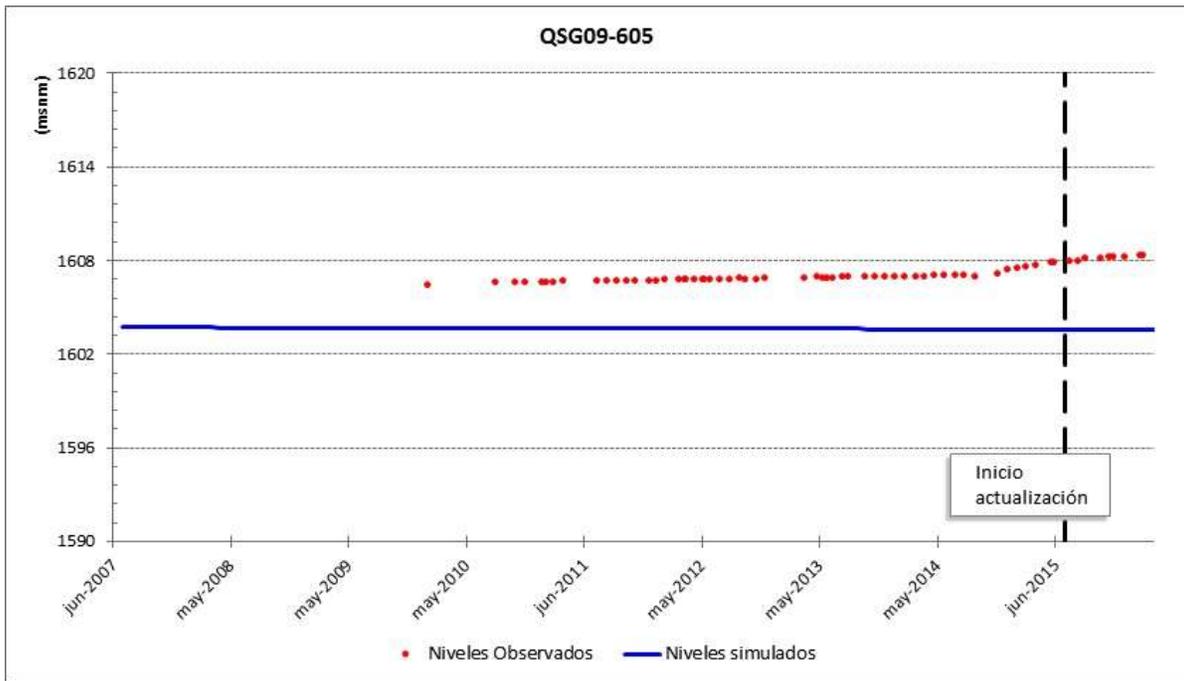
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-10: Pozo de observación QSG09-602



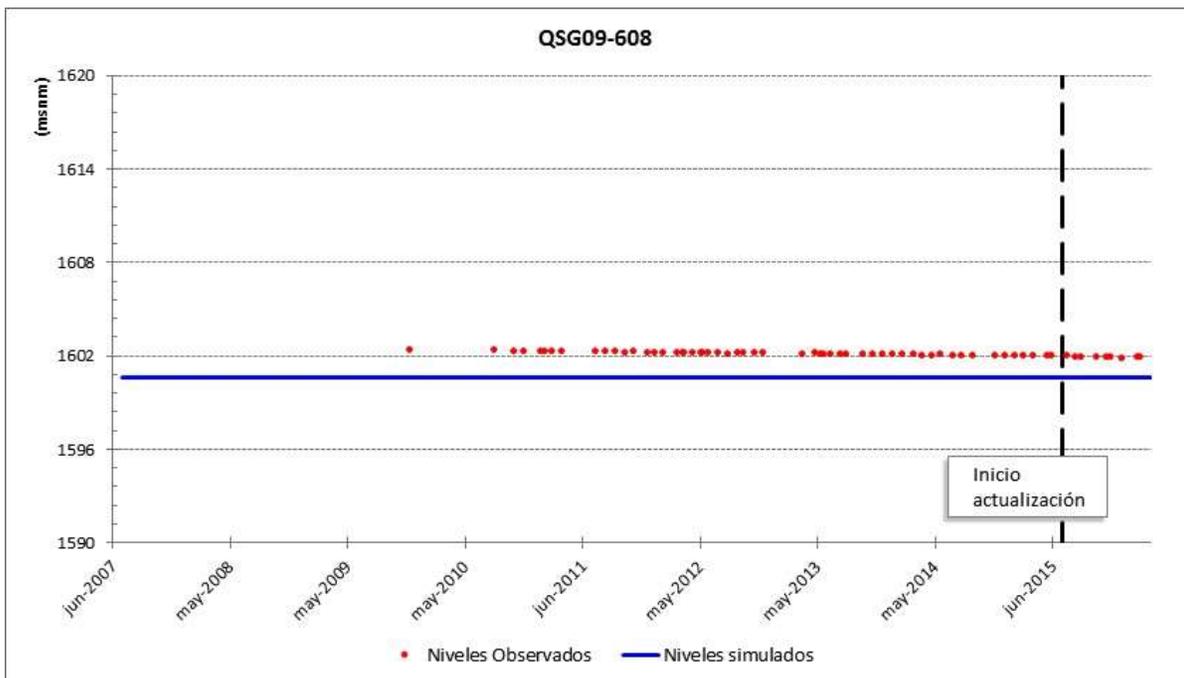
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-11: Pozo de observación QSG09-605



Fuente: Elaboración propia.

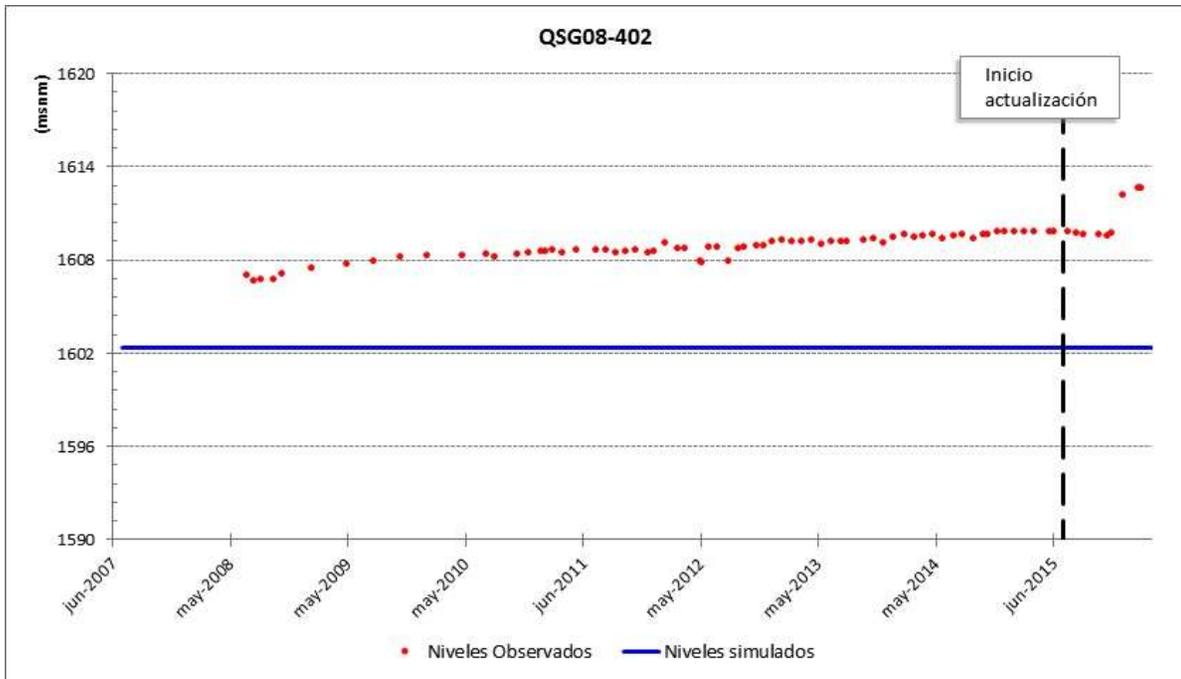
Figura 10-12: Pozo de observación QSG09-608



Fuente: Elaboración propia.

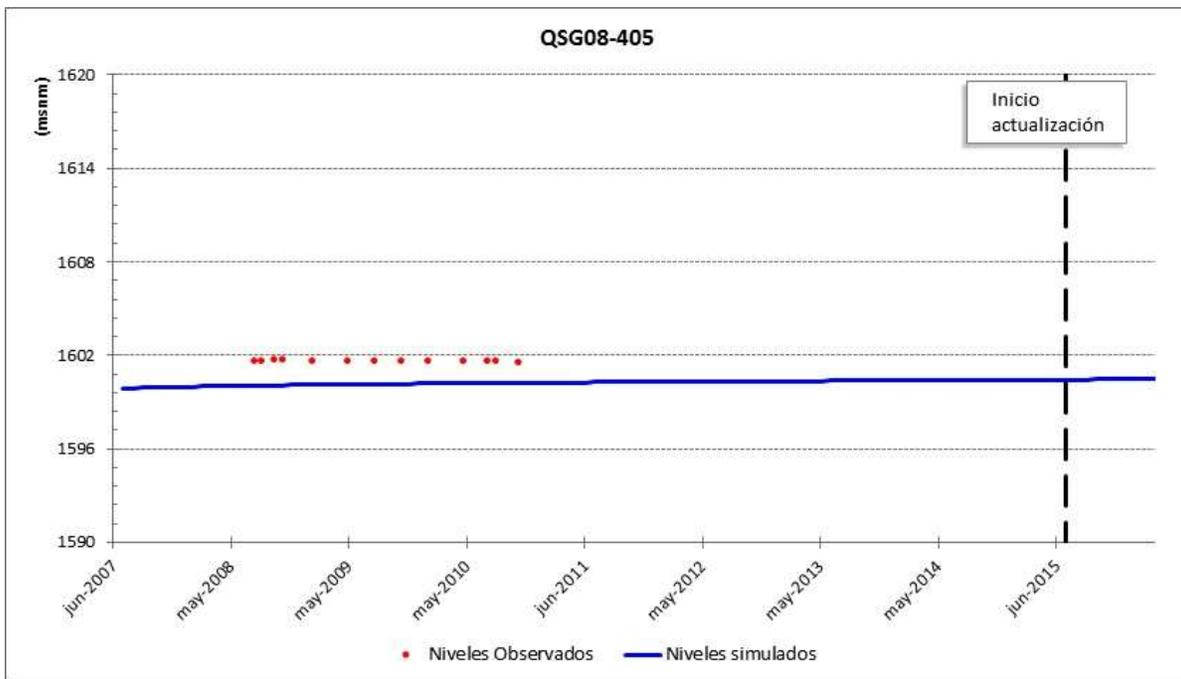
Sector rajo

Figura 10-13: Pozo de observación QSG08-402



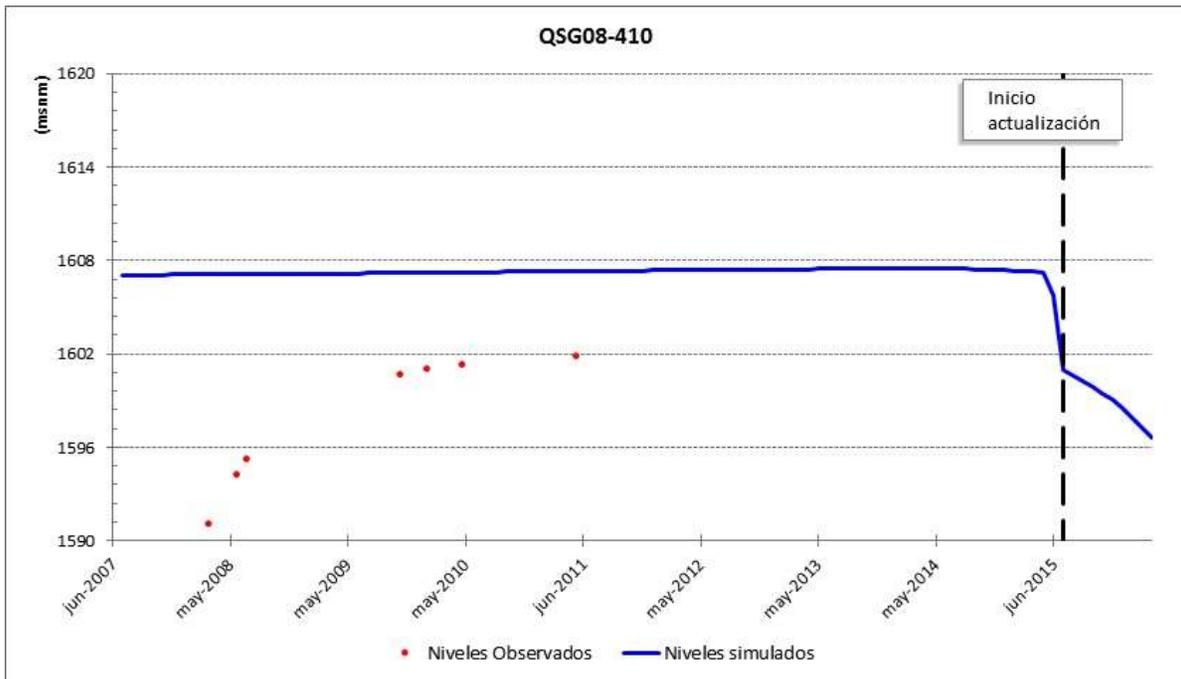
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-14: Pozo de observación QSG08-405



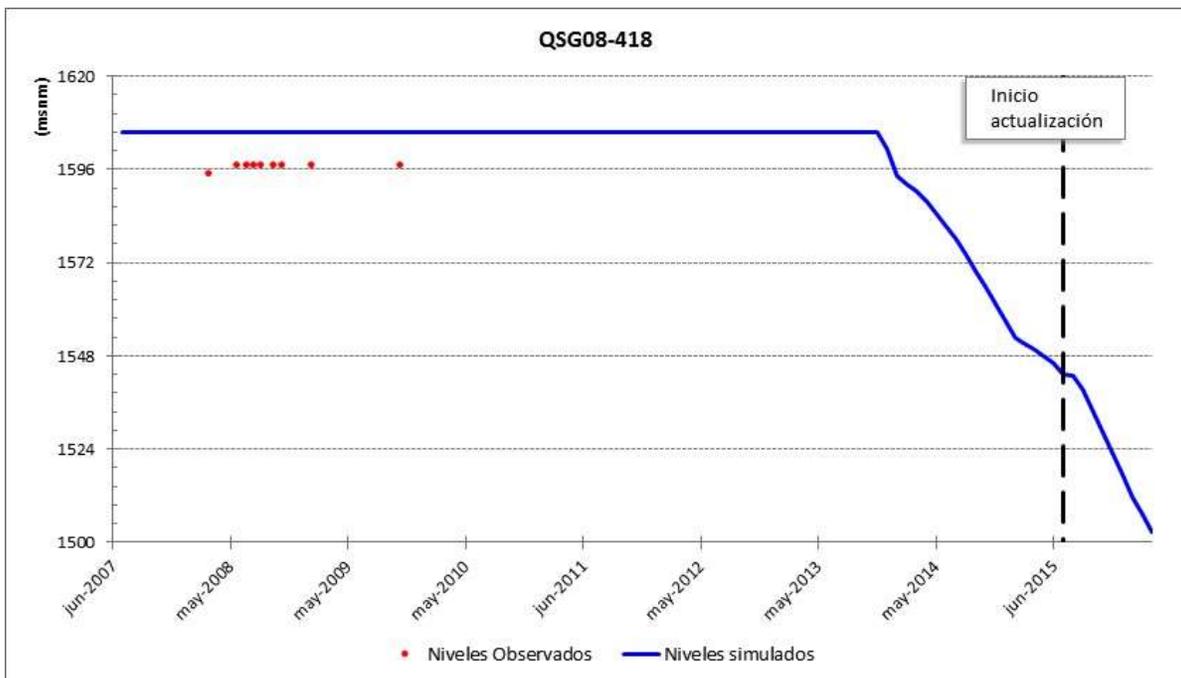
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-15: Pozo de observación QSG08-410



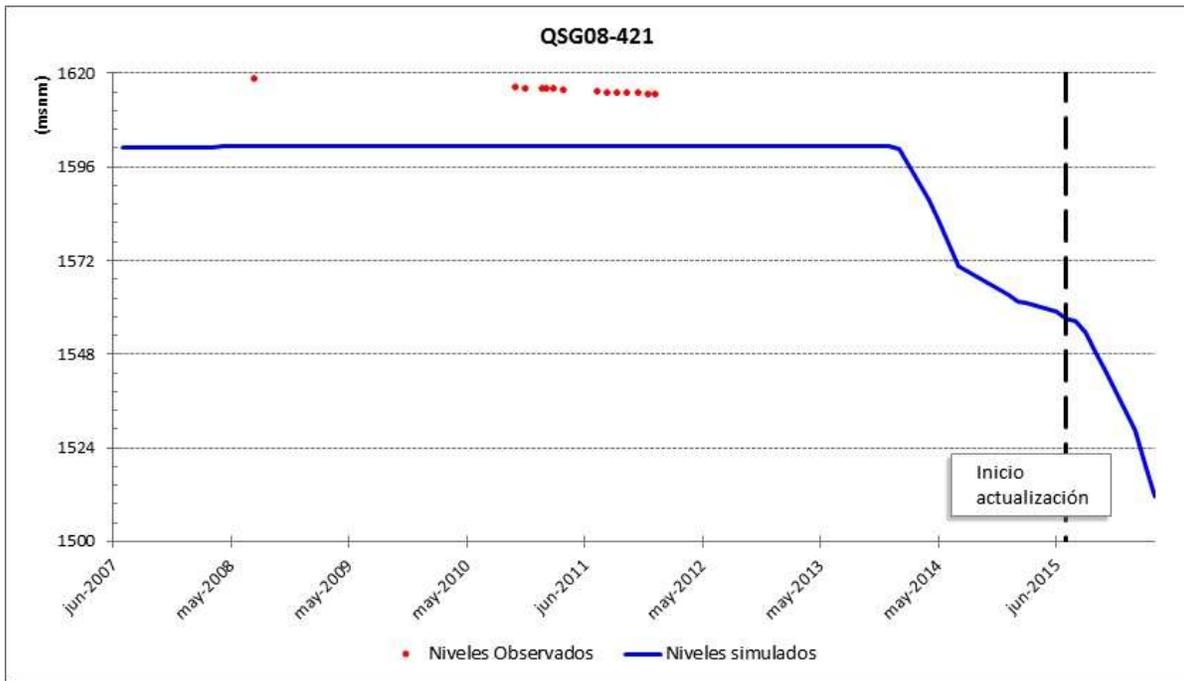
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-16: Pozo de observación QSG08-418



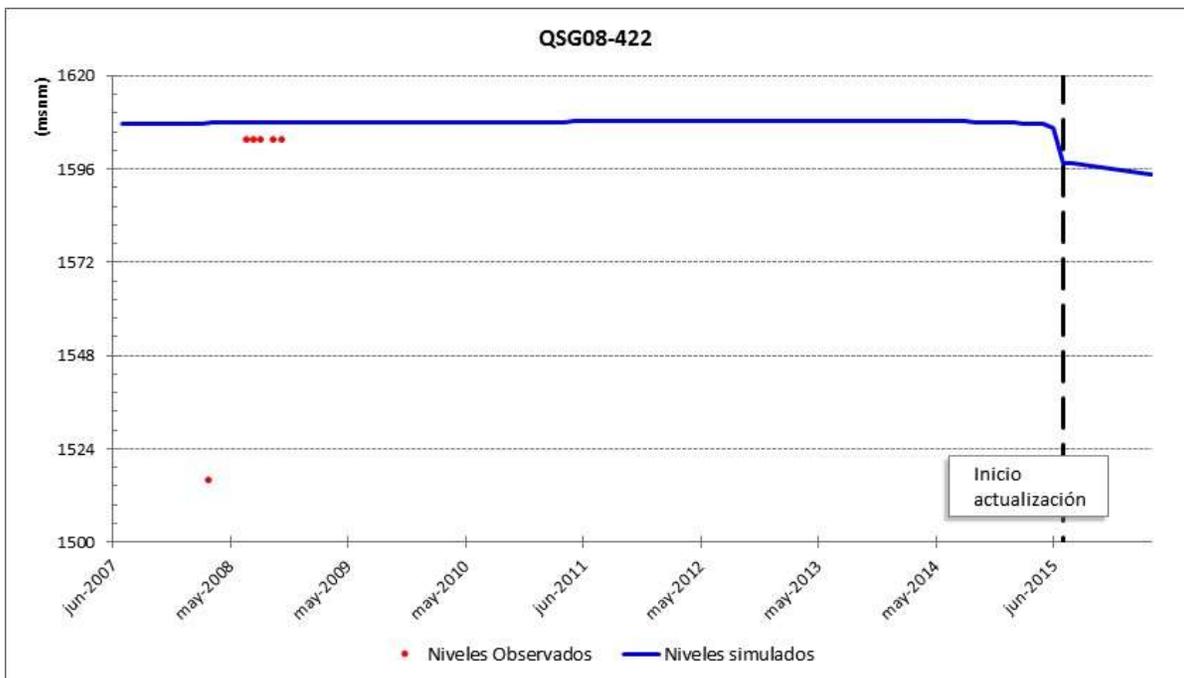
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-17: Pozo de observación QSG08-421



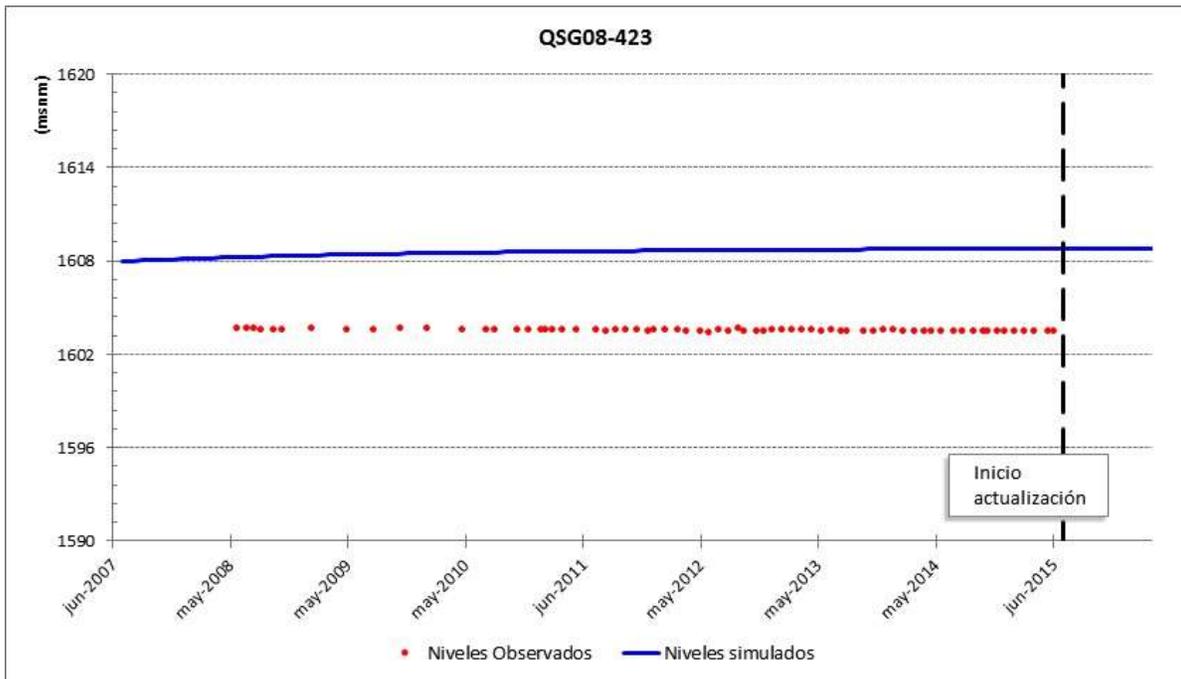
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-18: Pozo de observación QSG08-422



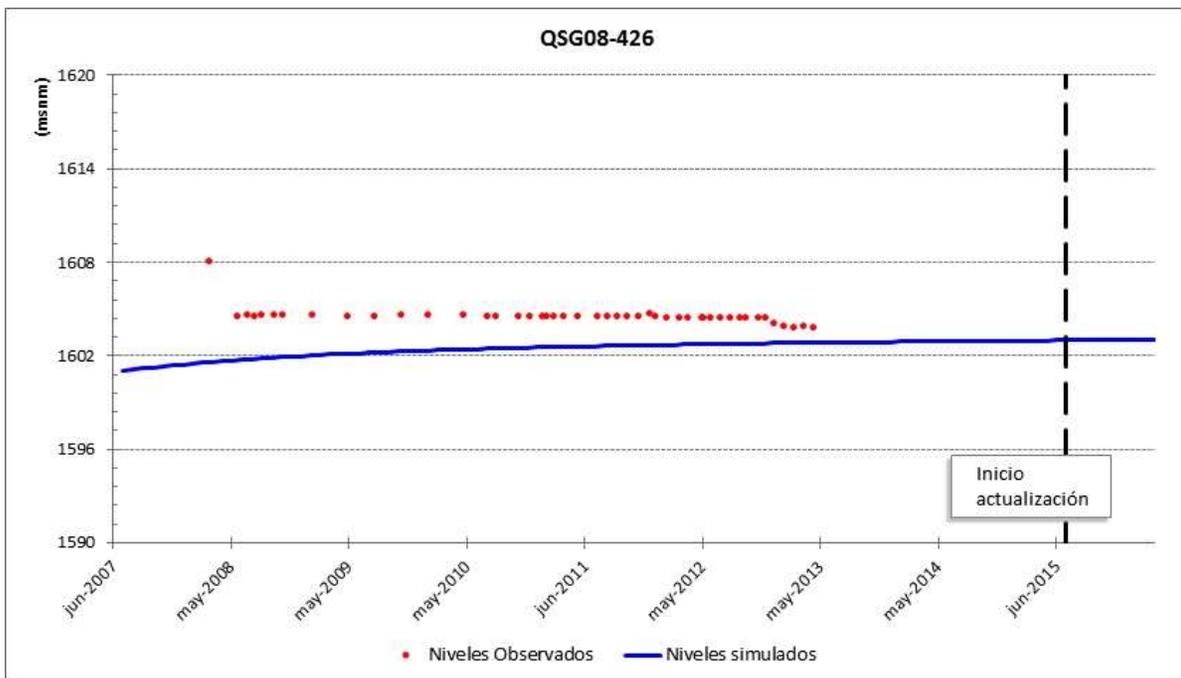
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-19: Pozo de observación QSG08-423



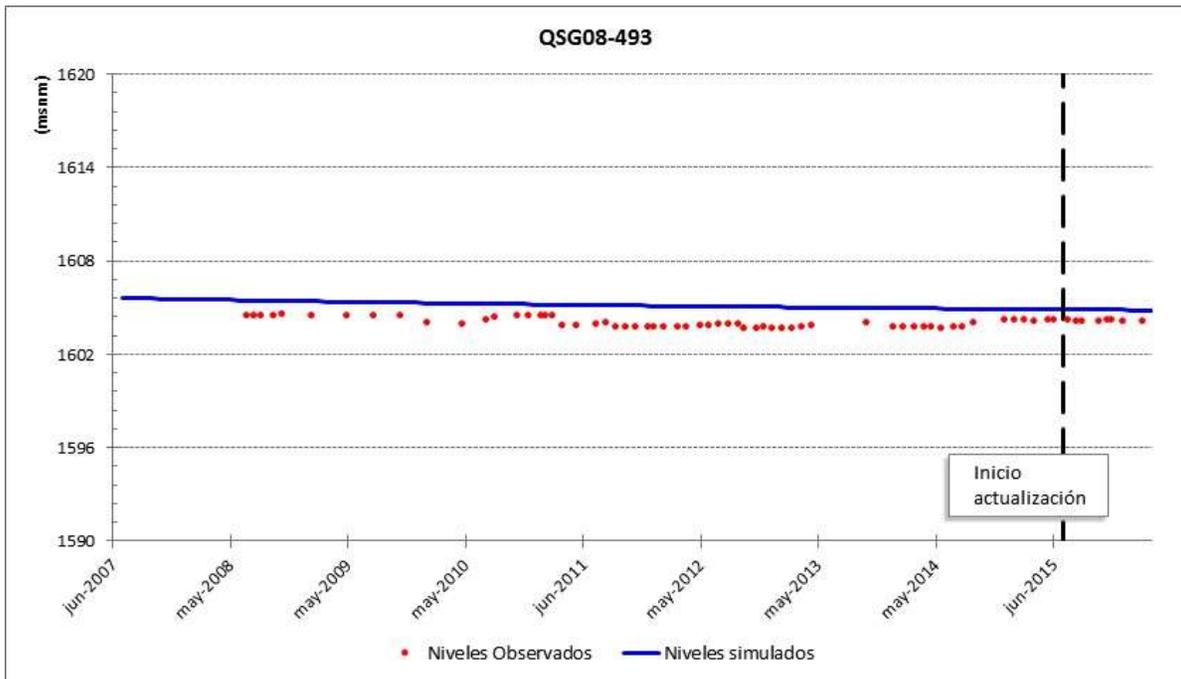
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-20: Pozo de observación QSG08-426



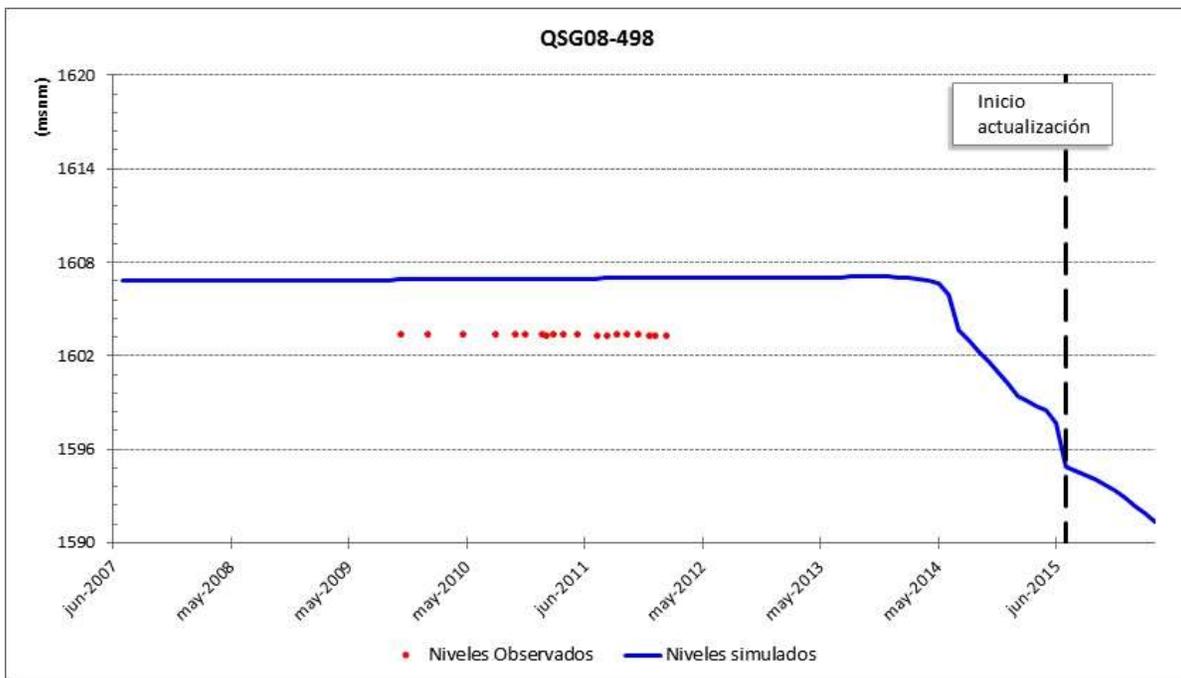
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-21: Pozo de observación QSG08-493



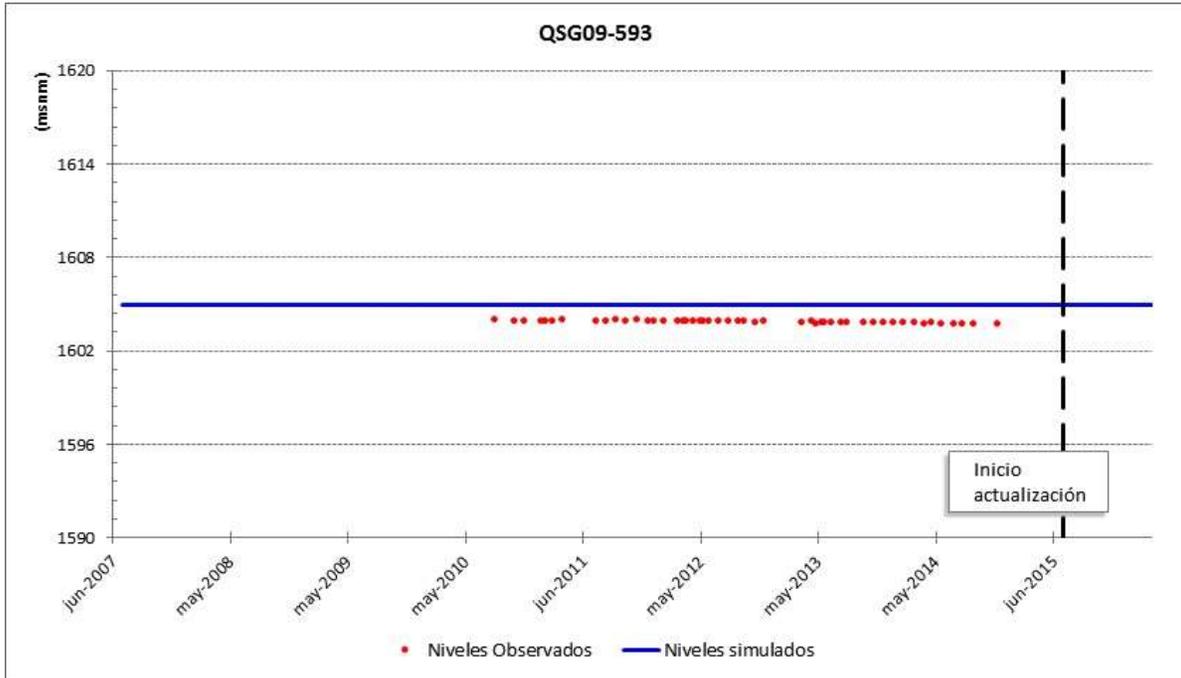
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-22: Pozo de observación QSG08-498



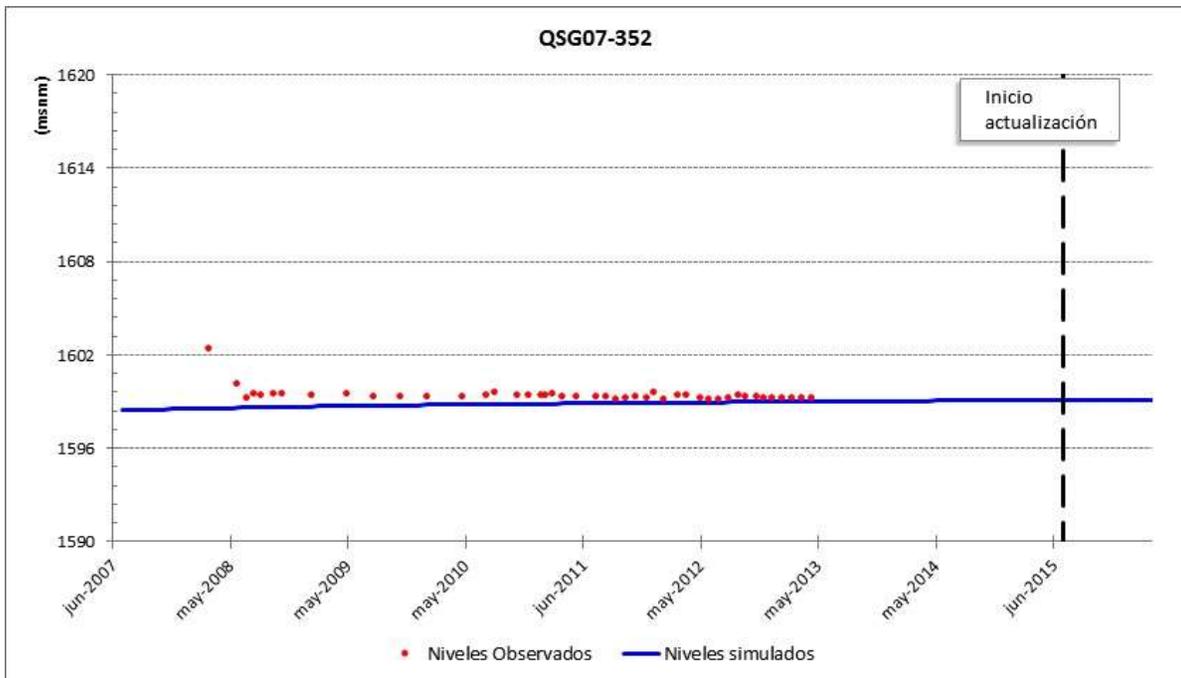
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-23: Pozo de observación QSG09-593



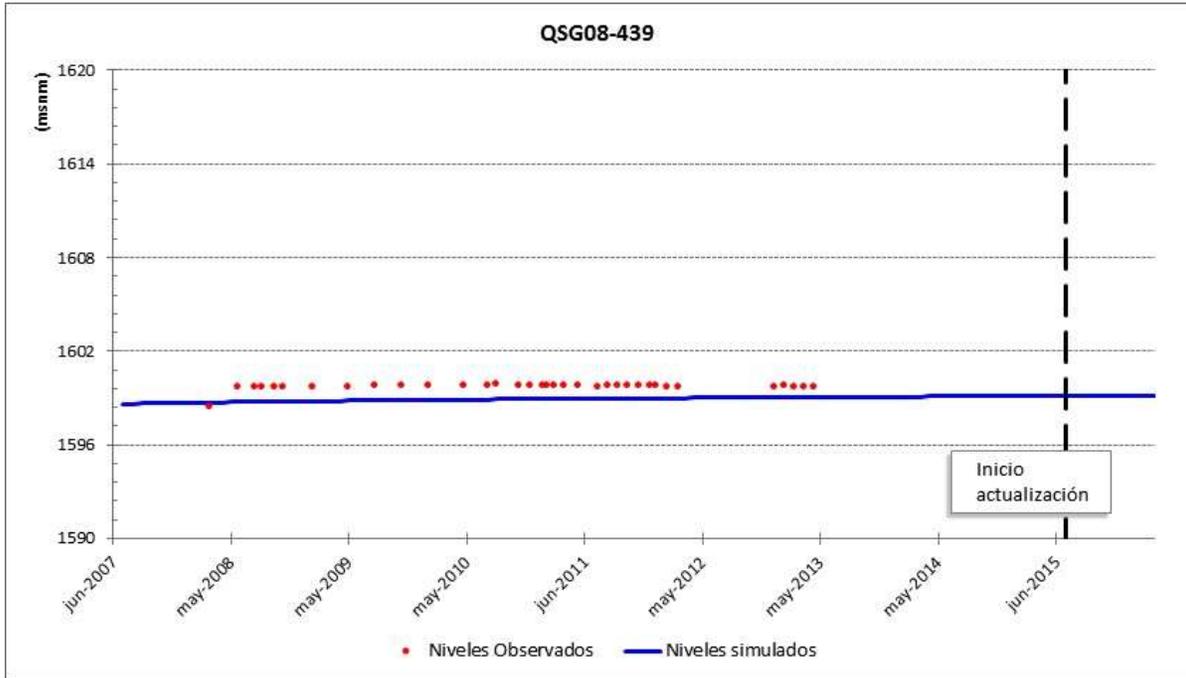
Sector centro

Figura 10-24: Pozo de observación QSG07-352



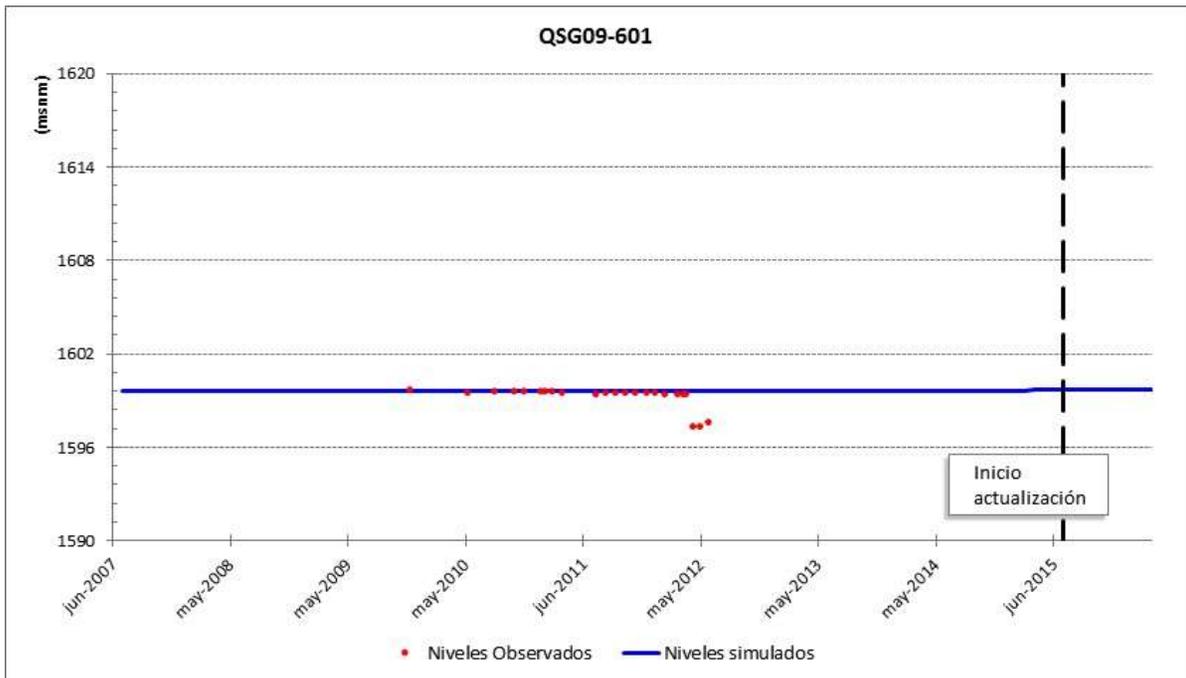
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-25: Pozo de observación QSG08-439



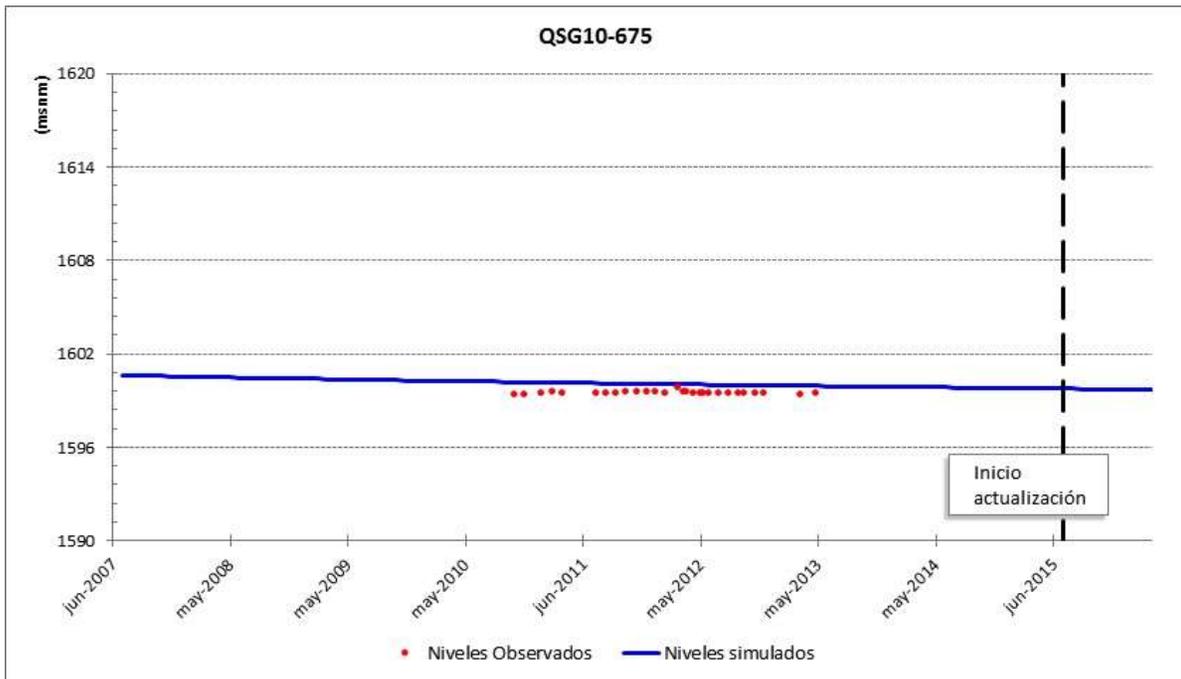
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-26: Pozo de observación QSG09-601



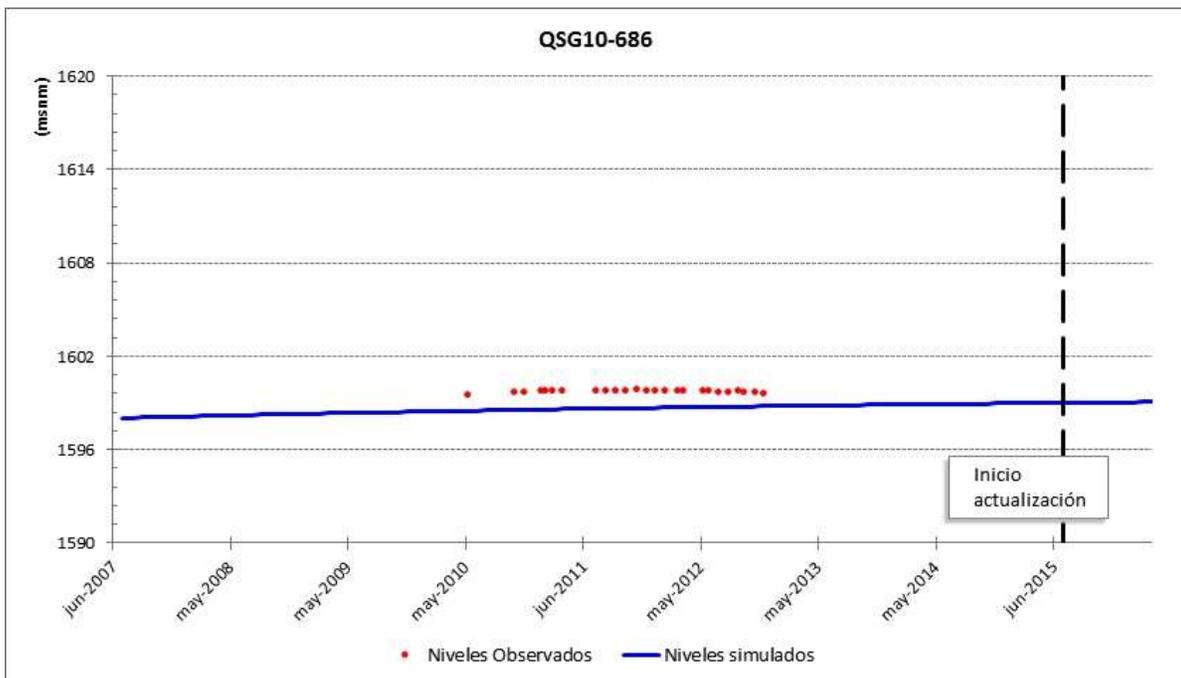
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-27: Pozo de observación QSG10-675



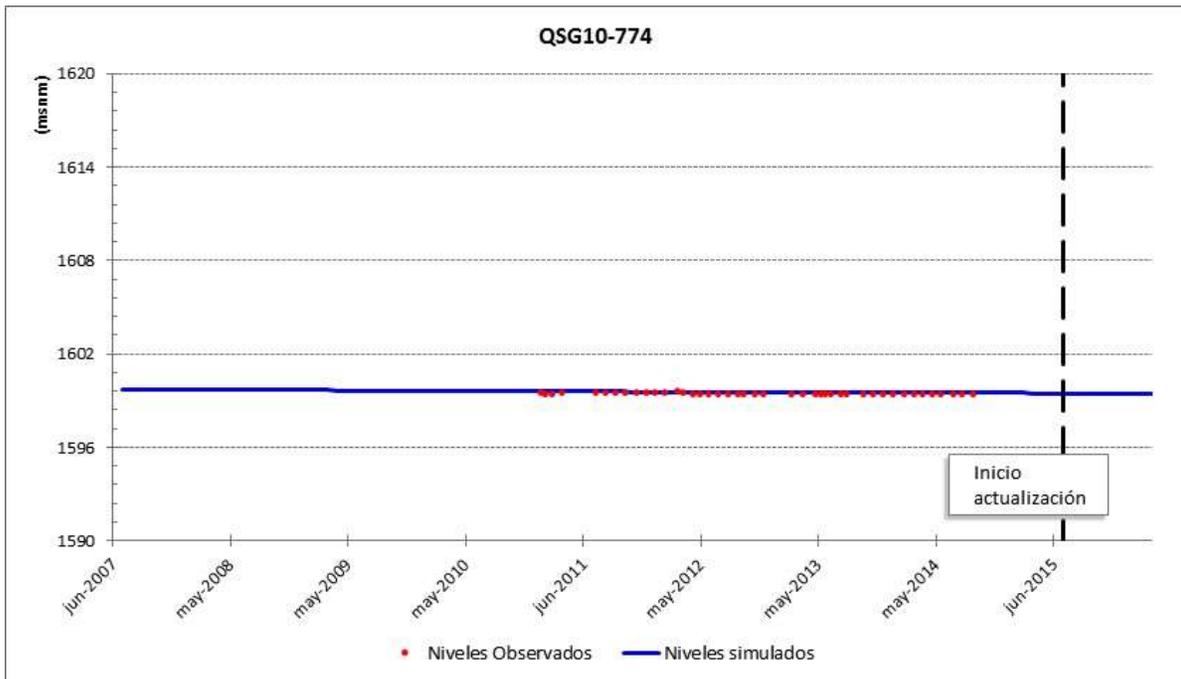
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-28: Pozo de observación QSG10-686



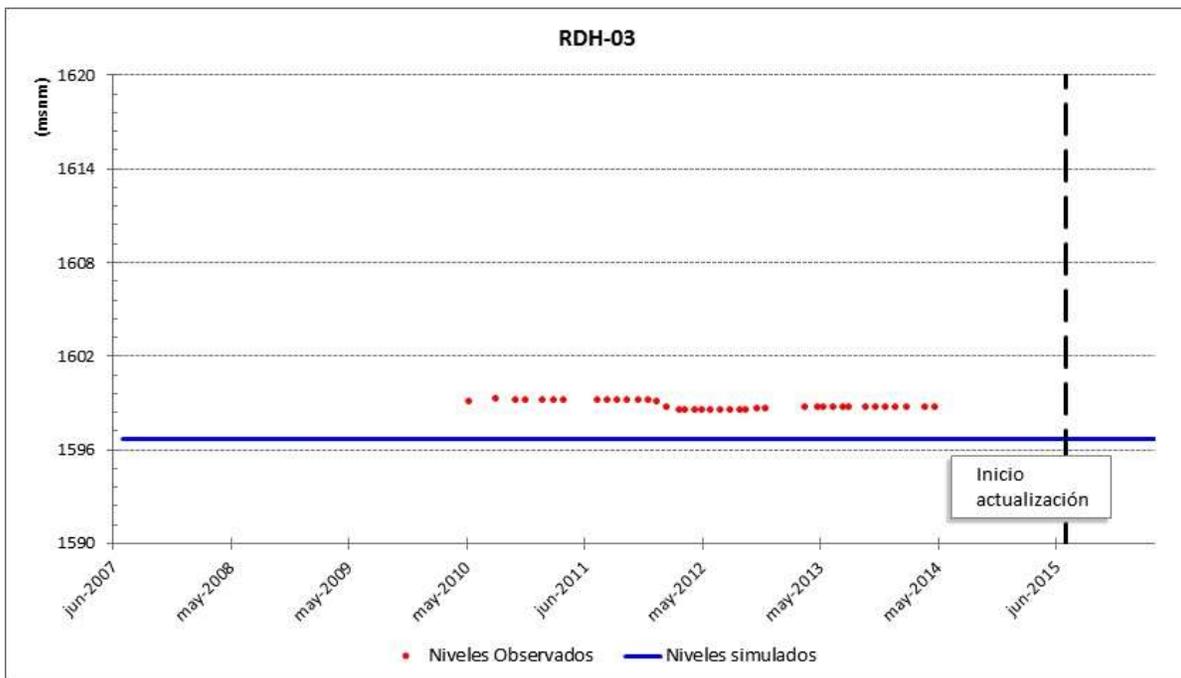
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-29: Pozo de observación QSG10-774



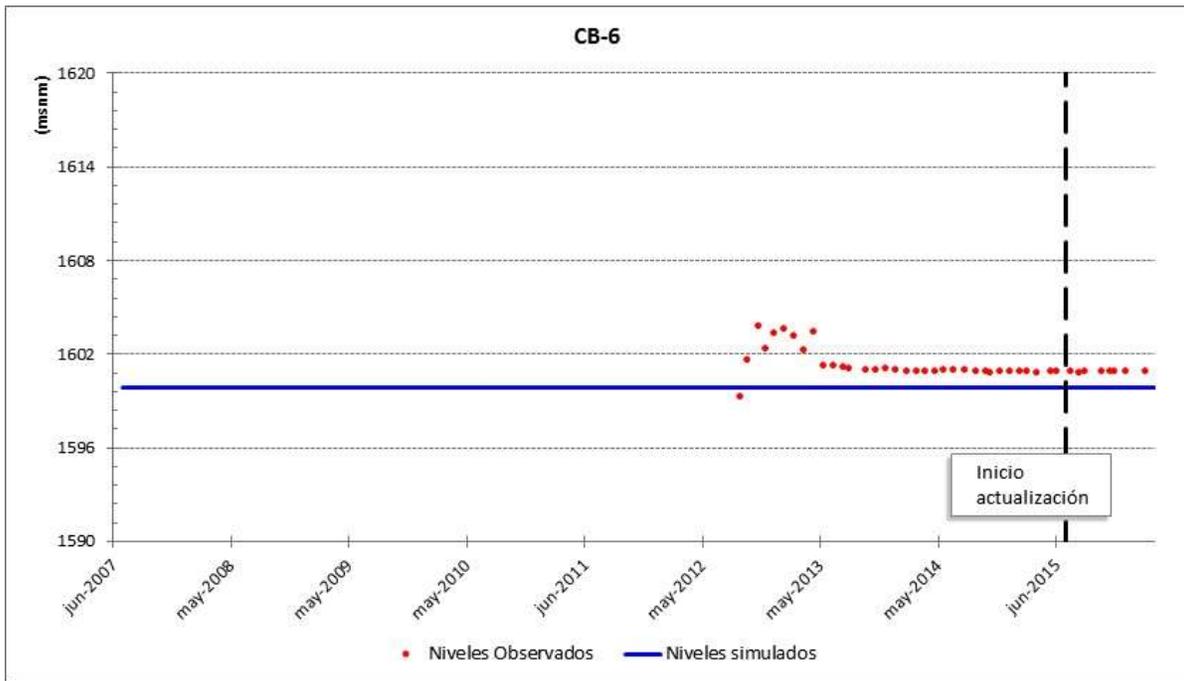
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-30: Pozo de observación RDH-03



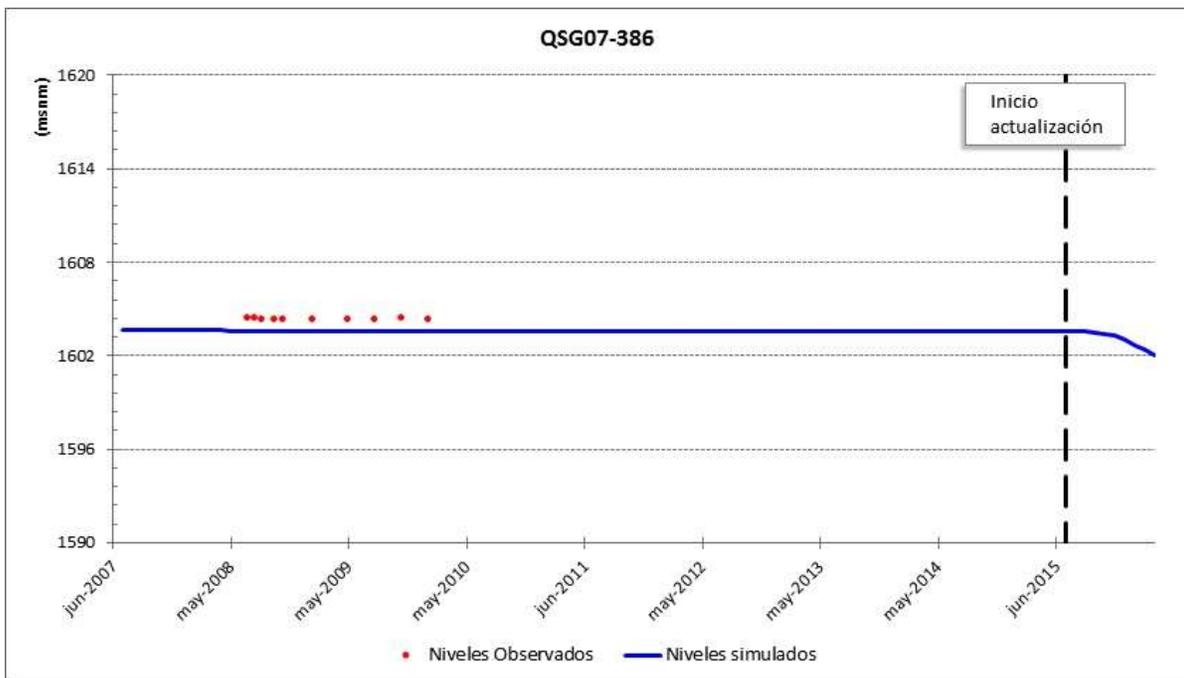
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-31: Pozo de observación CB-6



Fuente: Elaboración propia.

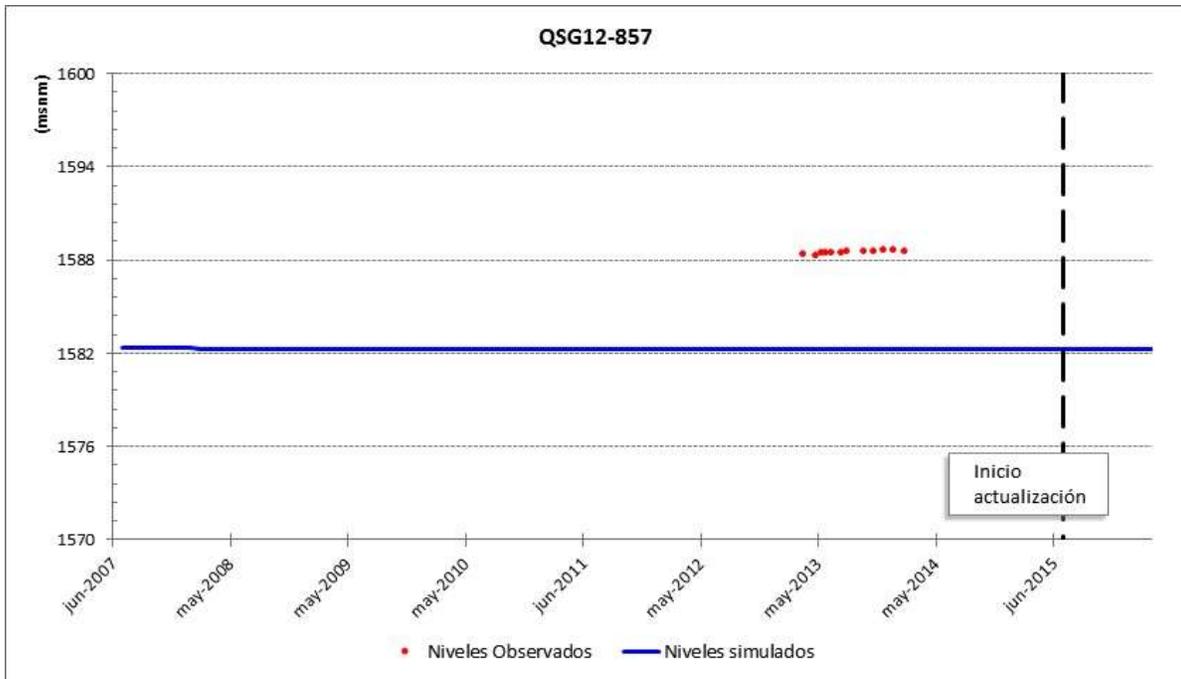
Figura 10-32: Pozo de observación QSG07-386



Fuente: Elaboración propia.

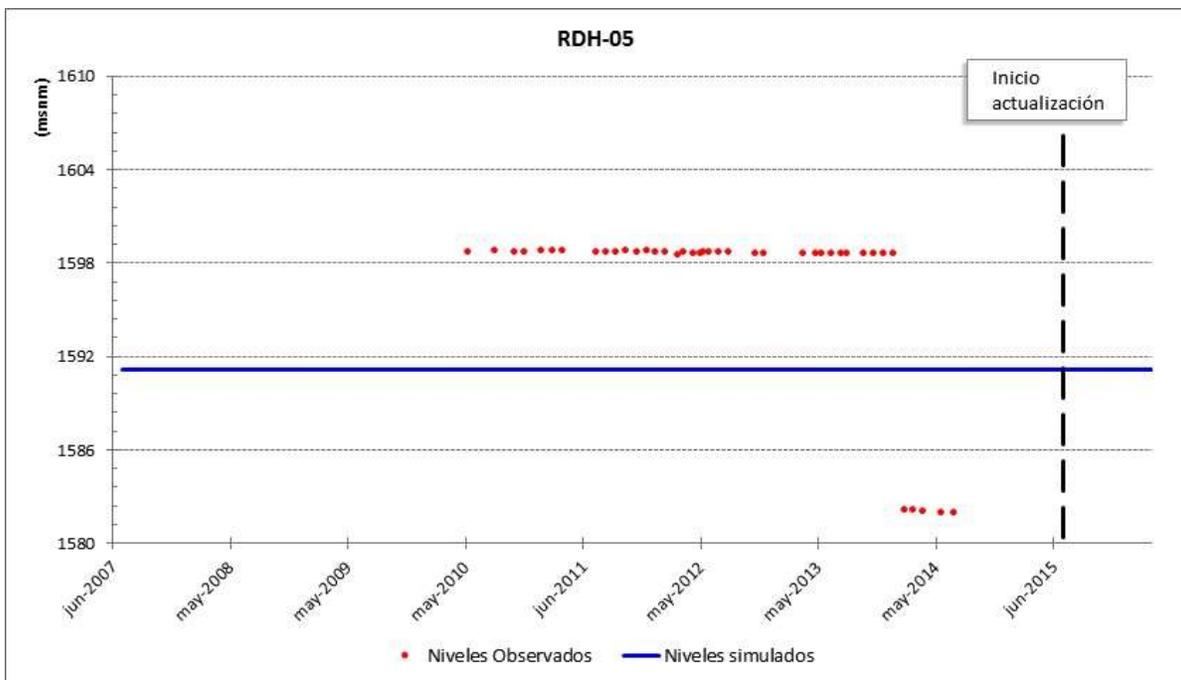
Sector norte

Figura 10-33: Pozo de observación QSG12-857



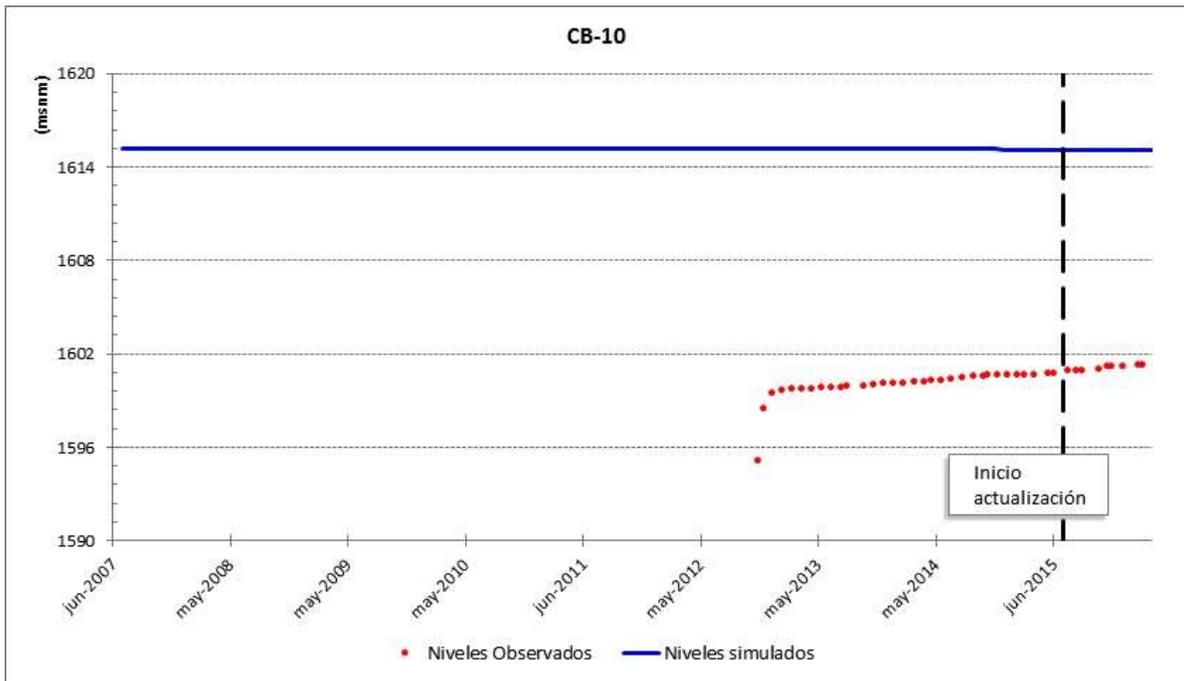
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-34: Pozo de observación RDH-05



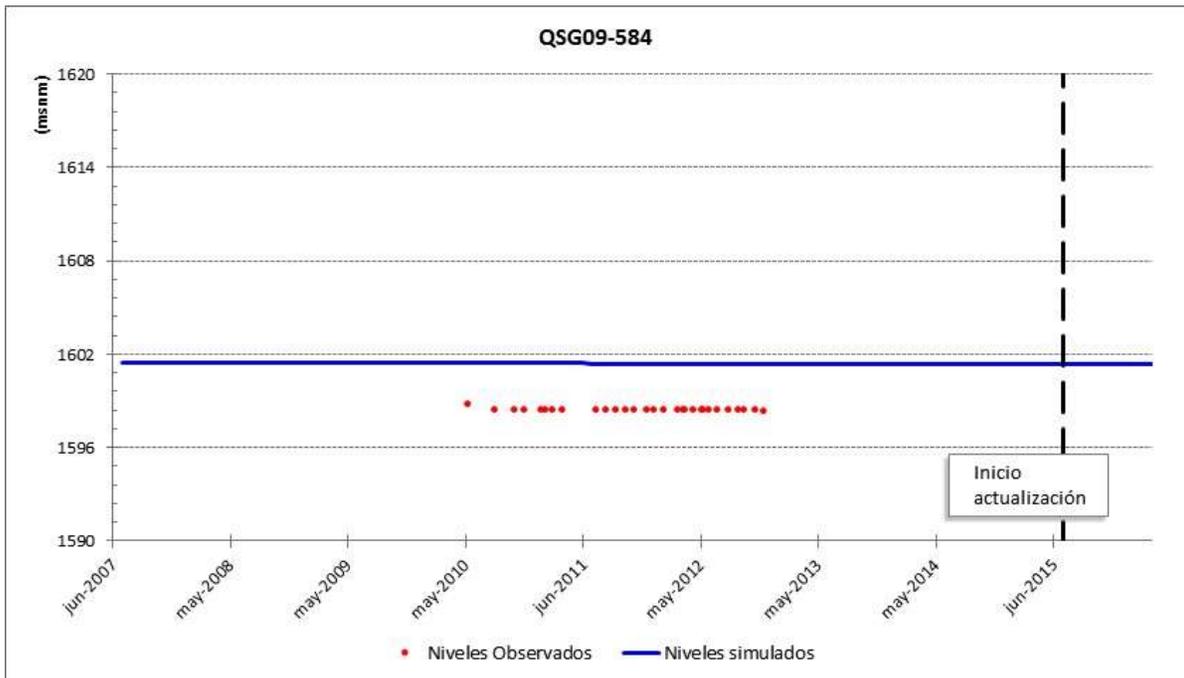
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-35: Pozo de observación CB-10



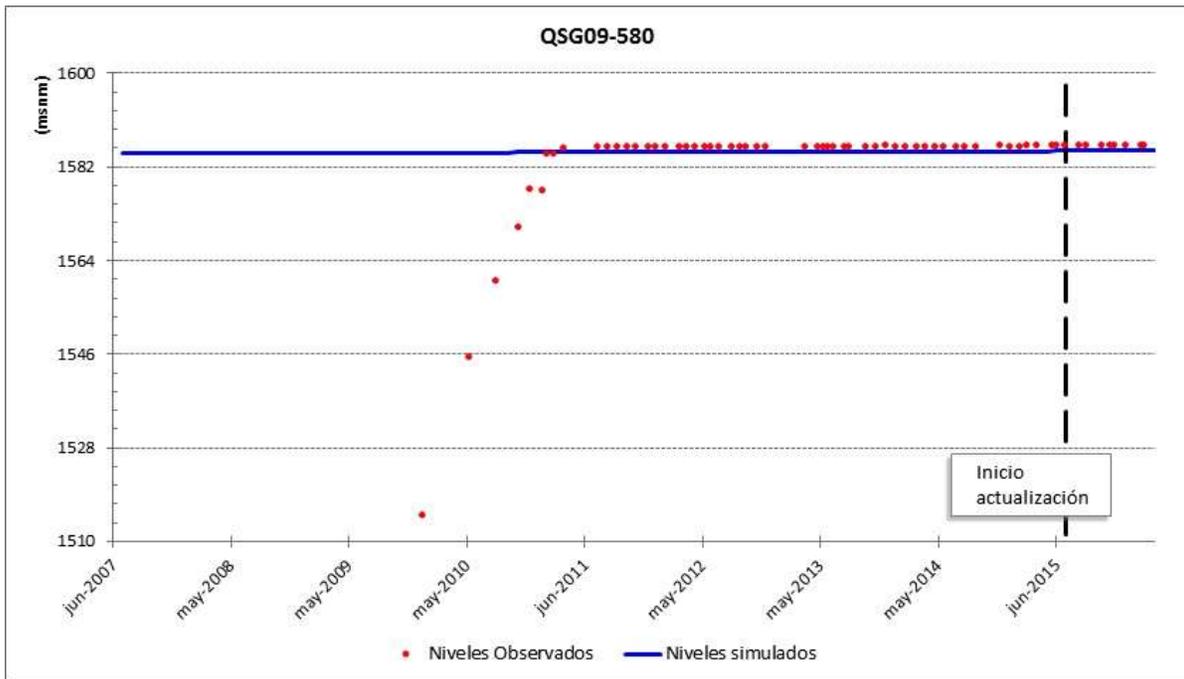
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-36: Pozo de observación QSG09-584



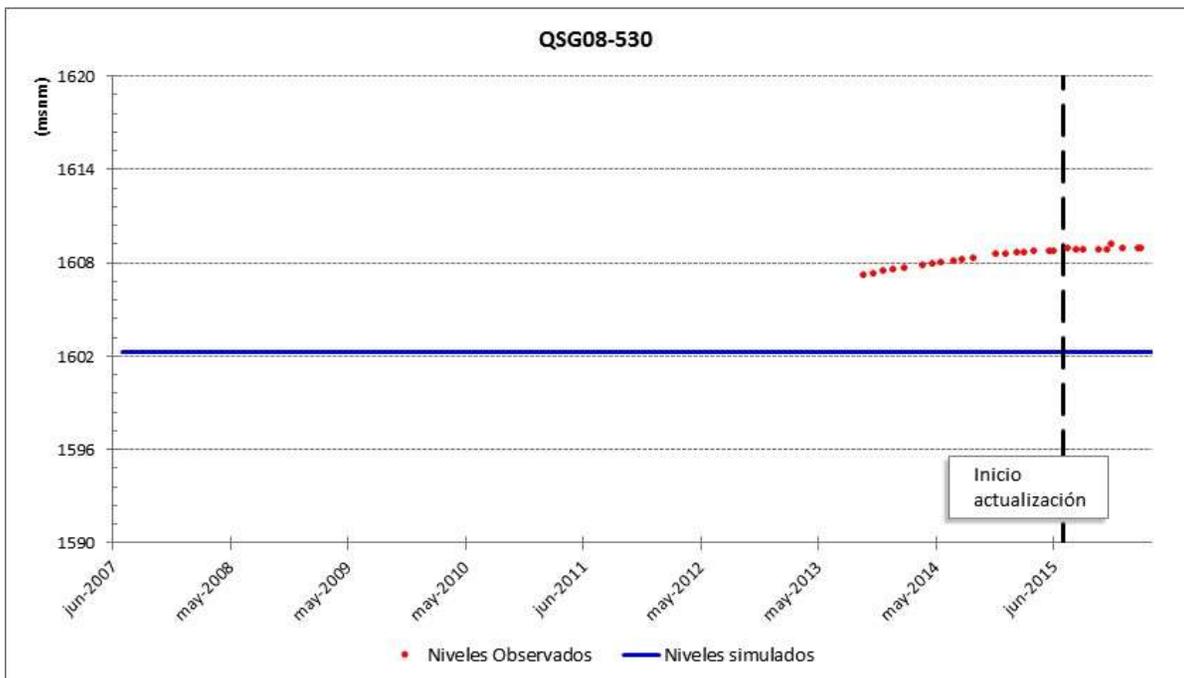
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-37: Pozo de observación QSG09-580



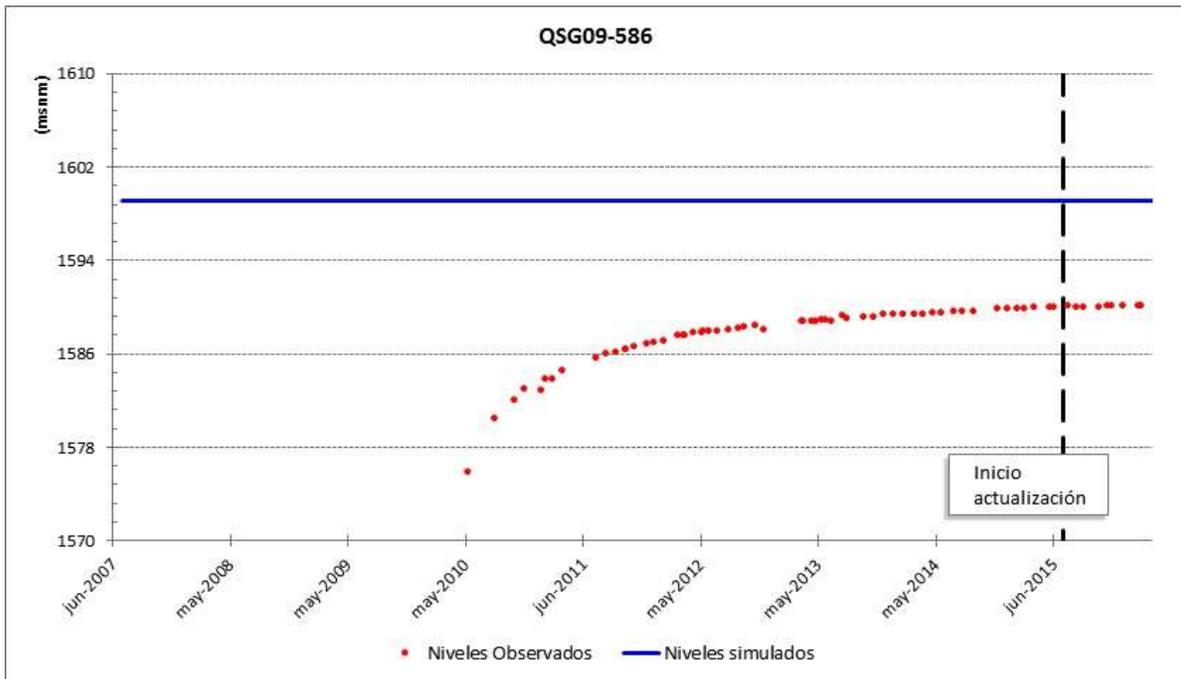
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-38: Pozo de observación QSG08-530



Fuente: Elaboración propia.

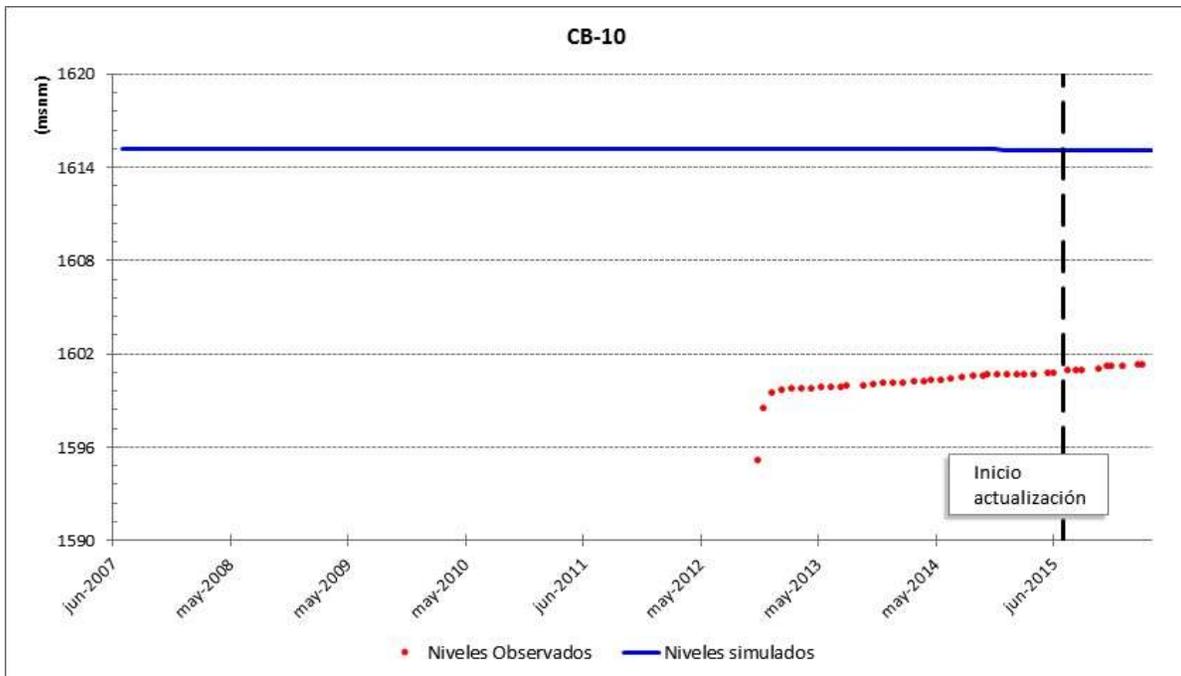
Figura 10-39: Pozo de observación QSG09-586



Fuente: Elaboración propia.

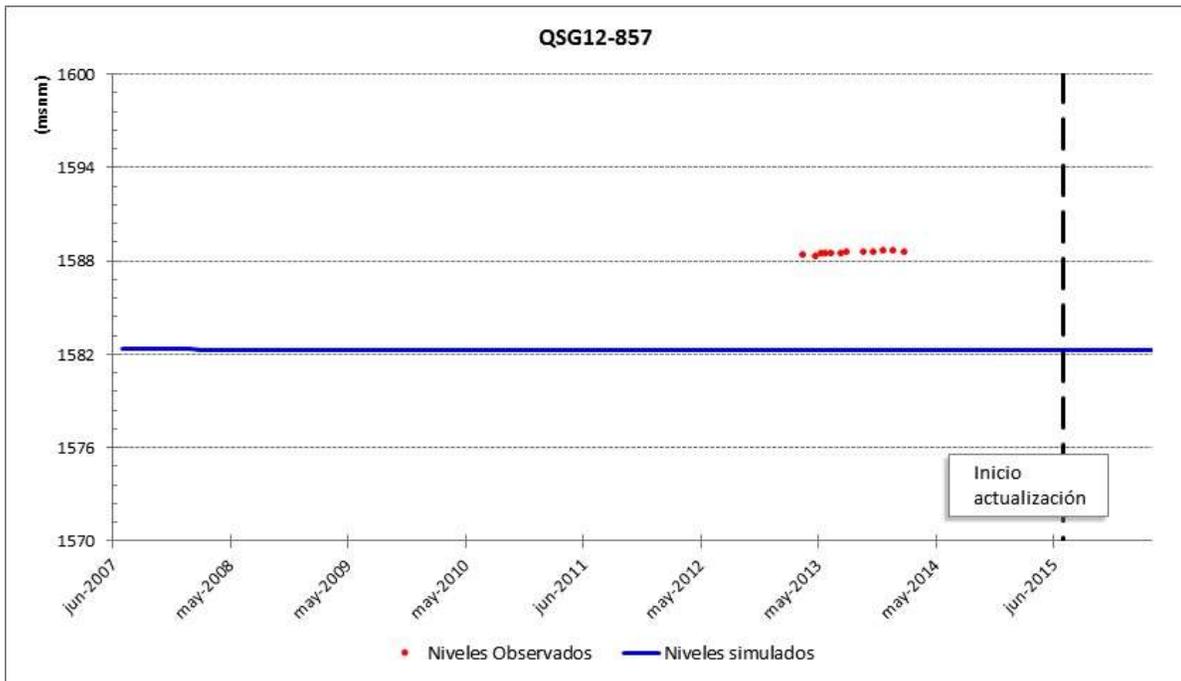
Sector sur

Figura 10-40: Pozo de observación CB-10



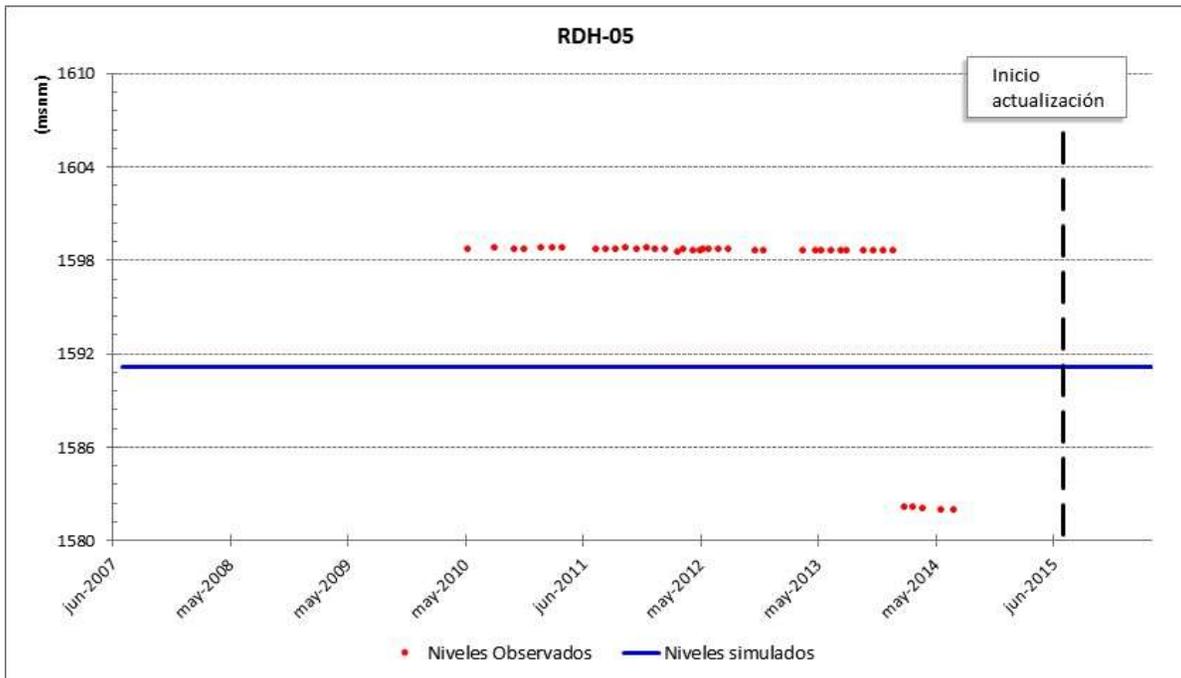
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-41: Pozo de observación QSG12-857



Fuente: Elaboración propia.

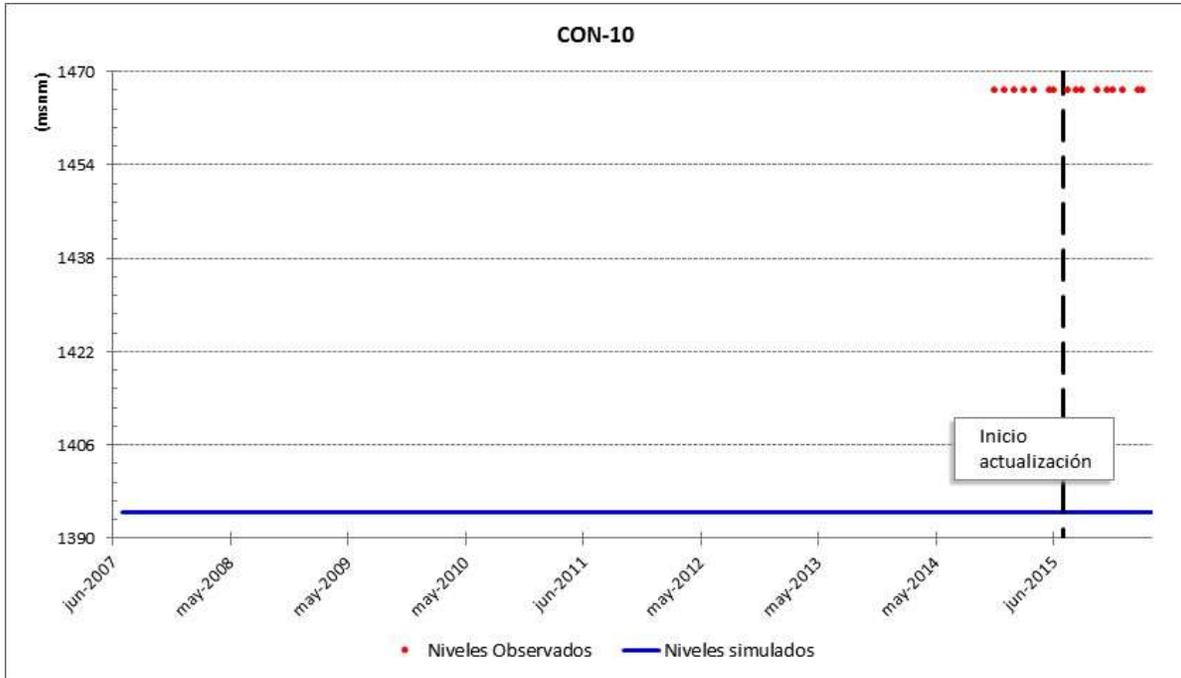
Figura 10-42: Pozo de observación RDH-05



Fuente: Elaboración propia.

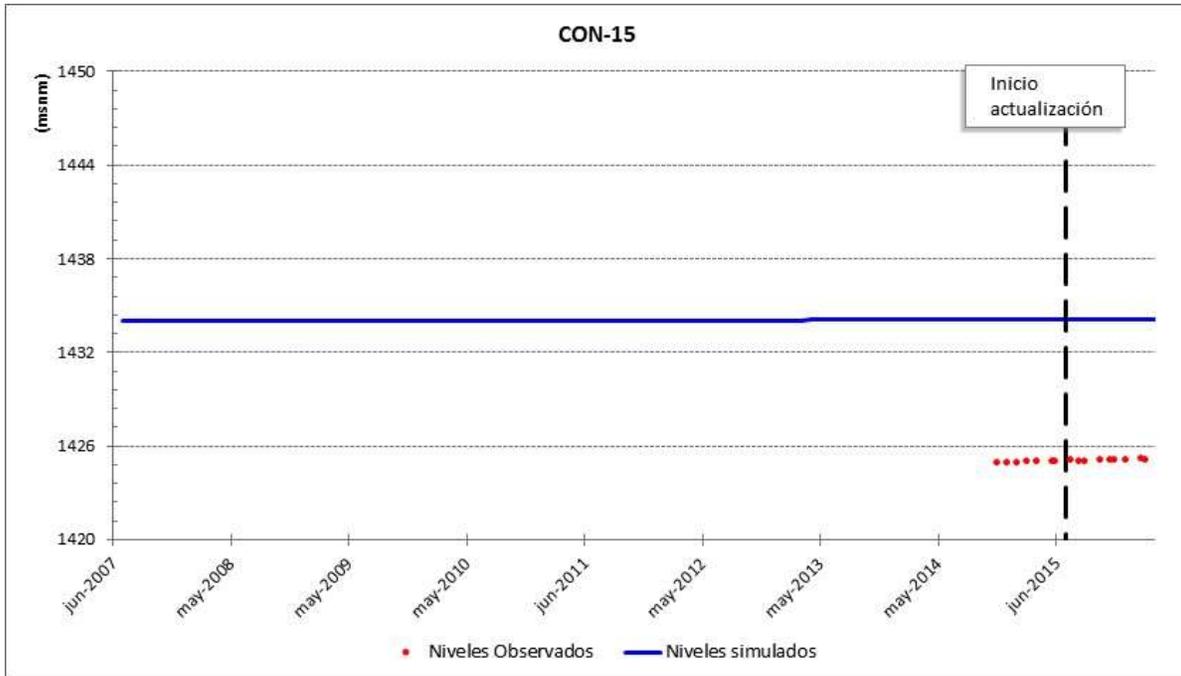
Sector Oeste

Figura 10-43: Pozo de observación CON-10



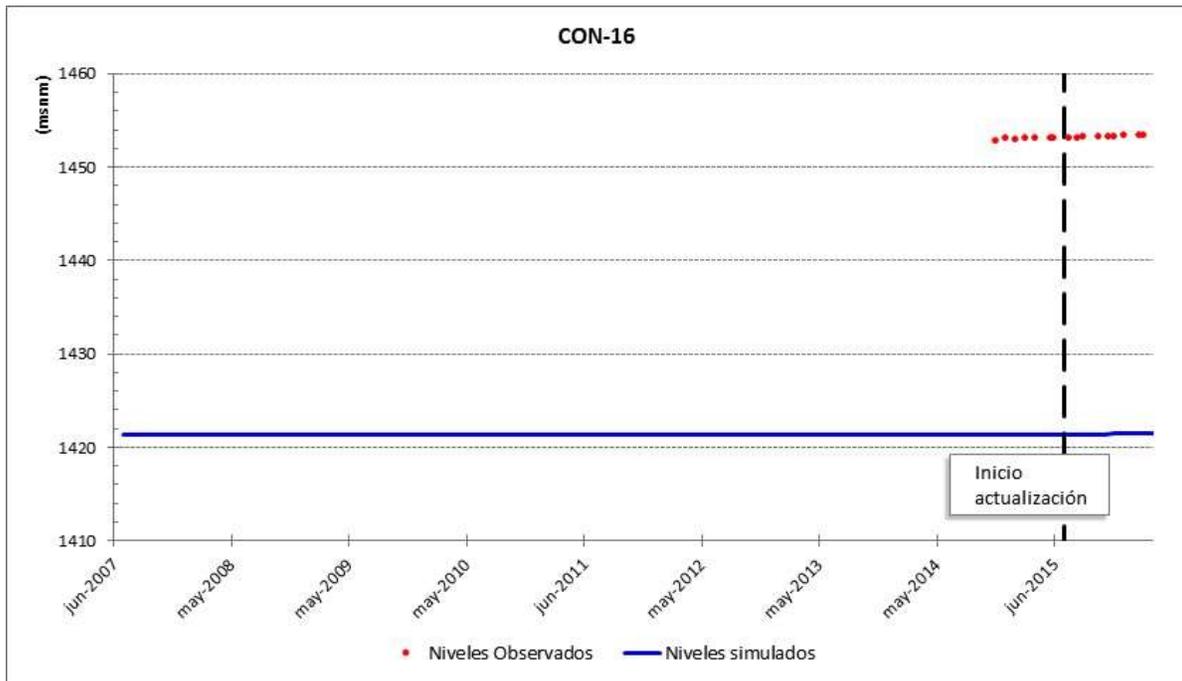
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-44: Pozo de observación CON-15



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-45: Pozo de observación CON-16



Fuente: Elaboración propia.

Arcadis

Av. Antonio Varas 621
Providencia, Santiago
T: +56 2 2381 6000

arcadis.com

