



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CATAMARCA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE LICENCIATURA EN GEOLOGÍA**

**SEMINARIO**

**VALIDACIÓN Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DE  
CAMPO DEL ARENAL, DEPARTAMENTO SANTA MARÍA,  
PROVINCIA DE CATAMARCA**

**Alumna: Sara Gimena Ríos MUN°: 286**

**Directora: Mg. Fátima Vilches  
Asesor: Dr. Luis Sebastián Vives**

**San Fernando del Valle de Catamarca  
Marzo de 2018**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Dirección Provincial de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos, por haber cedido la información y el modelo numérico, para elaborar el presente trabajo.

A la Empresa Minera Alumbreira Ltd., por su colaboración con Información técnica de Pozos Campo del Arenal, periodo 2011-2014.

A la Empresa Minera Agua Rica LLC., por su colaboración con Información de los Programas de Monitoreo en Campo Arenal y Cazadero, periodo 2011-2014.

Al personal de la consulta pública de la DiPGAM perteneciente a la Secretaría de Estado de Minería por su cálida y efectiva atención, durante la búsqueda de antecedentes.

A mi Asesor de Seminario, el Dr. Luis Sebastián Vives reconocido experto en recursos hídricos, por su valiosa guía y acompañamiento en la elaboración del presente seminario para lograr la mejor calidad en el informe y en la defensa del mismo. En lo personal le agradezco su enorme generosidad, su excelente predisposición e incentivos para alcanzar mi objetivo.

A mi directora de Seminario, la Mg. Fátima Vilches, por su dedicación e incentivos a alcanzar mi objetivo.

A mi muy querida profesora Lic. Martha Ubaldini (alias la Sra. de Giménez) por haberme brindado la oportunidad de iniciar mi faceta laboral y despertar mi pasión por la hidrogeología.

A mi incondicional amiga y colaboradora, la Lic. Elisa María de los Ángeles Achá, por brindarme su tiempo, sus valiosos aportes en sugerencias, comentarios y lectura crítica del presente trabajo.

A mis pilares fundamentales, mis amados padres Luis y Gladys y hermanos Exequiel y Romina por ser siempre maravillosos conmigo.

A mi querida familia: Abueli, Tíos, primos y sobrinos, por brindarme su amor.

A mis muy queridos amigos: Olgui, Mariangel y Wal, por su apoyo incondicional.

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1	Área de Estudio	2
1.2	Fundamentación	4
1.3	Hipótesis	4
1.4	Objetivos	4
1.4.1	Objetivo General	4
1.4.2	Objetivos Específicos	4
1.5	Estructura del Trabajo	5
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>6</b>
2.1	Modelo Conceptual	6
2.2	Modelación Numérica con el Código Visual Modflow	6
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO: CAMPO DEL ARENAL</b>	<b>8</b>
4.1	Geología Regional	8
4.2	Estructura	8
4.3	Estratigrafía	9
4.4	Geomorfología	14
4.5	Hidrología Superficial	16
<b>5</b>	<b>REVISIÓN DE ANTECEDENTES EN CAMPO DEL ARENAL</b>	<b>17</b>
5.1	Modelo Minera Alumbraera por Hydro-Geo Consultants 1995	17
5.2	Modelo Provincia de Catamarca por el INA 1998	20
5.3	Modelo Minera Agua Rica por BHP-Aquaconsult 1999	22
5.4	Modelo Minera Alumbraera por Australasian Groundwater Environmental 2002	24
5.5	Modelo Minera Agua Rica por Water Management Consultants 2007	27
5.6	Modelo Provincia de Catamarca por el INA-CRAS 2010	32
5.7	Modelo Minera Alumbraera por Australasian Groundwater Environmental 2013	40
<b>6</b>	<b>RESULTADOS ALCANZADOS</b>	<b>45</b>
6.1	DISCUSION DE ANTECEDENTES	45
6.1.1	Limitaciones de los modelos conceptuales y numéricos implementados	45
6.1.2	Propuesta de modelo conceptual actualizado para Campo del Arenal	52
6.2	VALIDACION DEL MODELO NUMÉRICO DE LA PROVINCIA DE CATAMARCA 2010	52
6.2.1	Análisis de los errores en el ajuste de niveles: Modelo INA-CRAS 2010 vs. Modelo Validado 2014	53
6.2.2	Análisis del ajuste de niveles: Modelo INA-CRAS 2010 vs. Modelo Validado 2014	55
6.3	ACTUALIZACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DE CAMPO DEL ARENAL	55
6.3.1	Información Implementada en la Actualización del Modelo	56
6.3.1.1	Programa de Monitoreo de la Cuenca del Campo del Arenal	56
6.3.1.2	Nuevas Perforaciones	59
6.3.1.3	Relevamiento Planialtimétrico de Perforaciones	60

6.3.1.4	Actualización de la Explotación por bombeo de CA .....	61
6.3.2	Análisis de los errores de ajuste de nivel: Modelo Validado a 2014 vs Modelo Actualizado 2011-2014 .....	62
6.3.3	Análisis del ajuste de niveles: Modelo Validado 2014 vs Modelo Actualizado 2014 .....	67
6.3.4	Balace de Agua: Modelo Validado 2014 vs Modelo Actualizado 2014 .....	68
6.3.5	Análisis de las Predicciones 2014-2039.....	69
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>74</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>75</b>
<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....</b>	<b>76</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Ubicación del Área de Estudio. ....	3
Figura 4-1:	Mapa Geológico – Estructural del Área. ....	10
Figura 4-2:	Cuadro Estratigráfico de la Cuenca de Santa María – Hualfin. ....	11
Figura 5-1:	Modelo Conceptual elaborado por Hydro-Geo 1995 para MAA. ....	18
Figura 5-2:	Área y pozos de observación del modelo numérico de Hydro-Geo 1995 para MAA. ....	19
Figura 5-3:	Modelo conceptual elaborado por el INA 1998 para Provincia de Catamarca.....	21
Figura 5-4:	Área y pozos de observación del modelo numérico del INA 1998 para Prov. de Catamarca.....	22
Figura 5-5:	Modelo conceptual de BHP-Aquaconsult 1999 para MAR. ....	23
Figura 5-6:	Modelo conceptual elaborado por AGE 2002 para MAA. ....	25
Figura 5-7:	Área y pozos de observación del modelo numérico de AGE 2002 para MAA. ....	27
Figura 5-8:	Modelo conceptual elaborado por WMC 2007 para MAR. ....	28
Figura 5-9:	Área y pozos de observación del modelo numérico de WMC 2007 para MAR. ....	30
Figura 5-10:	Modelo conceptual elaborado por el INA-CRAS 2010 para la Provincia de Catamarca. ....	33
Figura 5-11:	Área y pozos de observación del modelo numérico del INA-CRAS 2010.....	34
Figura 5-12:	Corte Transversal Oeste – Este del modelo numérico INA-CRAS 2010. ....	35
Figura 5-13:	Zonificación de la conductividad hidráulica: Capa 1 (izq.) y Capa 2 (dcha.). ....	35
Figura 5-14:	Perfil longitudinal Sur-Norte de la distribución de K en las capas del modelo numérico.....	36
Figura 5-15:	Zonificación del Coeficiente de Almacenamiento, Capa 1 (izq.) y Capa 2 (dcha.). ....	36
Figura 5-16:	Perfil transversal y longitudinal de la distribución de S en el área activa del modelo numérico. ....	37
Figura 5-17:	Distribución de la Recarga en el área activa del modelo numérico INA-CRAS 2010. ....	38
Figura 5-18:	Modelo conceptual de AGE 2013 para MAA. ....	41
Figura 5-19:	Área del modelo numérico AGE 2013 para MAA y pozos de monitoreo de CA. ....	43
Figura 6-1:	Errores en el ajuste del modelo numérico INA-CRAS 2010. ....	53
Figura 6-2:	Errores en el ajuste del modelo numérico validado a 2014. ....	54
Figura 6-3:	Volumen histórico extraído por MAA desde 1997-2014 informado por DPhyERH.....	61
Figura 6-4:	Extracciones acumuladas de los modelos INA-CRAS 2010 y del Actualizado 2014. ....	62
Figura 6-5:	Errores en el ajuste de nivel: modelo numérico Validado a 2014 con 8 pozos de observación.....	63

Figura 6-6: Errores en el ajuste de nivel: modelo numérico Actualizado periodo 2011 – 2014 con 17 pozos de observación. ....	63
Figura 6-7: Modelo INA-CRAS 2010 validado a 2014. ....	65
Figura 6-8: Modelo Actualizado a 2014. ....	65
Figura 6-9: Detalle de los 9 pozos de observación del modelo Validado a 2014. ....	66
Figura 6-10: Detalle de los 17 pozos de observación del modelo Actualizado a 2014. ....	66
Figura 6-11: Procesos simulados de salidas o egresos del modelo INA-CRAS 2010 Validado a 2014. ....	68
Figura 6-12: Procesos simulados de salidas o egresos del modelo Actualizado a 2014. ....	69
Figura 6-13: Predicción periodo 2014-2039 para el pozo CMW3: modelo Validado (A) y modelo Actualizado (B). ....	70
Figura 6-14: Predicción periodo 2014-2039 para el los pozos PZ2 y PZ2A: modelo Validado(A y B) y modelo Actualizado (C). ....	71
Figura 6-15: Predicción periodo 2014-2039 para el pozo CMW5A: modelo Validado (A) y modelo Actualizado (B.). ....	72

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1-1: Coordenadas de ubicación del área de estudio. ....	2
Tabla 4-1: Secuencia Estratigráfica de Campo del Arenal. ....	15
Tabla 5-1: Resumen de los Parámetros del Modelo de Alumbraera. ....	20
Tabla 5-2: Recarga por zona de aporte. ....	32
Tabla 5-3: Balance del modelo conceptual INA-CRAS 2010. ....	37
Tabla 5-4: Cálculo de la recarga de la cuenca de CA. ....	39
Tabla 5-5: Términos del balance hidrológico en situación sin explotación. ....	39
Tabla 5-6: Bombeo de MAA Periodo 1997-2010. ....	39
Tabla 5-7: Valores Acumulados: Componentes del Balance en un periodo de 13 años (1997-2010). ....	40
Tabla 6-1: Discusión de Modelos Conceptuales de CA. ....	50
Tabla 6-2: Discusión de Modelos Numéricos de CA. ....	51
Tabla 6-1: Parámetros estadísticos de ajustes de los modelos numéricos INA-CRAS 2010 y validado a 2014. ....	54
Tabla 6-4: Ajustes en la Frecuencia de Monitoreos del PM-N de CA. ....	59
Tabla 6-5: Comparación de parámetros estadísticos de ajustes entre modelos: validado y actualizado. ....	64

## **ÍNDICE DE FOTOS**

Foto 1 y 2: Medición de la profundidad del nivel de agua en el pozo CMW 13 y CMW 12. ....	57
Foto 3 y 4: Medición de la profundidad del nivel de agua en el pozo PW 1 y PW5. ....	58
Foto 5 y 6: Monitoreo de la profundidad de los niveles de agua de los pozos CMW3 y CMW10B. ....	58
Foto 7 y 8: Monitoreo de la profundidad de los niveles de agua de los pozos CMW6B y CMW9. ....	58
Foto 9 y 10: Monitoreo de la profundidad de los niveles de agua de los pozos ARM 10A y CMW 8. ....	59
Foto 11 y 12: Relevamiento Planialtimétrico de Pozos y Medición del nivel, mayo de 2015. ....	60

## **ANEXOS**

### **Anexo I**

Mapa 1: Geología de la Cuenca de Campo del Arenal.

Mapa 2: Hidrología de la Cuenca de Campo del Arenal.

### **Anexo II**

Modelo Validado: Hidrogramas de los pozos de observación (CA1, CMW2, CMW3, CMW4, CMW5A, CMW6A, CP1, PZ1 y CMW11A)

### **Anexo III**

Tabla 1: Pozos Programa Monitoreo de Niveles CA "PM-N"

Tabla 2: Últimos pozos construidos en CA periodo 2019 – 2013.

Tabla 3: Relevamiento Planialtimétrico de la DPHyERH.

### **Anexo IV**

Modelo Actualizado: Hidrogramas de los pozos de observación (CA1, CMW2, CMW3, CMW4, CMW5A, CMW6A, CP1, PZ2, CMW11A, PZ2A, PZ3A, CMW7, CMW6B, CMW10A, CMW12, CMW13 y PW3)

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación se desarrolló de acuerdo con lo estipulado en el Plan 2014 de estudios de la carrera de Licenciatura en Geología de la FTyCA, UNCa, para acceder al título de Licenciada en Geología.

La cuenca de Campo del Arenal se ubica al Suroeste del departamento Santa María, en la provincia de Catamarca, República Argentina, y en ella el sector Suroeste se encuentra bajo condiciones de bombeo intensivo desde el año 1997 por la empresa Minera Alumbraera.

Los objetivos del presente trabajo fueron analizar los distintos modelos numéricos desarrollados en Campo del Arenal, validar y actualizar el modelo del INA-CRAS 2010 con información generada durante el periodo 2011 a 2014, para contribuir a un mejor conocimiento del funcionamiento hidrogeológico del acuífero.

El modelo conceptual es una herramienta diseñada para representar una versión simplificada de la realidad. El modelo numérico, proporciona un marco de síntesis sobre la información de campo y verifica la hipótesis sobre el funcionamiento hidráulico del sistema real.

Se expusieron las características principales de los modelos conceptuales y numéricos del área de estudio, se planteó la discusión entre las contribuciones y limitaciones de cada uno y se presentó una propuesta de modelo conceptual actualizada. El código numérico de simulación del flujo de agua subterránea que se empleó en el presente trabajo fue Modflow. La información, se procesó y sistematizó a través de planillas de cálculos. La cartografía se elaboró con el software de uso libre QGIS para las salidas gráficas correspondientes.

La validación del modelo numérico del INA-CRAS 2010, consistió en ingresar los datos de monitoreos de niveles del agua subterránea desde el periodo junio de 1997 a mayo de 2014. La actualización de dicho modelo numérico, incorporó información de caudales de bombeo de MAA (período 1997 a 2014), nuevas perforaciones (período 2009-2013), datos de monitoreos niveles del agua subterránea (período 2011-2014) y datos de cotas topográficas. El ajuste sobre el volumen de explotación de MAA ingresado al modelo numérico Actualizado según datos del departamento Canon y Gestión de Agua Subterránea perteneciente a la DPHyERH demostró que el volumen acumulado de extracción de MAA fue de 343,28 Hm<sup>3</sup> hasta noviembre de 2014, mientras que para el modelo del INA-CRAS 2010 fue de 476,20 Hm<sup>3</sup>. La extracción fue sobredimensionada en este último modelo en 132,92 Hm<sup>3</sup>, siendo la extracción del modelo Actualizado, la que representó con mayor fidelidad el proceso de extracción, que se observó en el ajuste de los hidrogramas.

El ajuste del modelo mejoró considerablemente, la raíz cuadrática promedio (RMS) del modelo Actualizado fue de 16,90 m, en tanto que en el modelo numérico previo fue de 108,61 (m); la media residual obtenida fue de 0,94 (m) cercana al valor óptimo de una unidad, mientras que en el modelo original fue de 0,34 (m).

El modelo numérico Actualizado permitió concluir que los hidrogramas resultantes evidencian dos tipos comportamientos de los niveles de agua en los pozos de observación: 1) Los pozos de monitoreo en el área de influencia directa del campo de bombeo de MAA responden al mismo, al presentar fluctuaciones congruentes con la extracción del agua, observándose un muy buen ajuste y 2) Los hidrogramas de los pozos exteriores al campo de pozos de bombeo presentan comportamientos variables como era previsible.

**Palabras claves:** Campo del Arenal (CA), Acuíferos, Modelo conceptual, Modelo numérico, Código Modflow.

## 1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación científica se desarrolló de acuerdo con lo estipulado en el Plan 2014 de estudios de la carrera de Licenciatura en Geología de la Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas (FTyCA) de la Universidad Nacional de Catamarca (UNCa), para acceder al título de Licenciada en Geología.

La cuenca de Campo del Arenal (CA) se encuentra ubicada al suroeste del departamento Santa María, en la provincia de Catamarca, República Argentina.

La cuenca es una amplia depresión intermontana de origen tectónico situada en la provincia geológica de Sierras Pampeanas (González Bonorino, 1950b). Está limitada al Norte por las sierras del Cajón y de Chango Real, al Sur limita con la sierra de Capillitas y cerro El Durazno, al Este por la sierra del Cajón o de Quilmes y la sierra del Aconquija, y al Oeste por las sierras de Las Cuevas y de Chango Real. Esta depresión fue rellenada por sedimentos continentales del Paleógeno-Neógeno y del Cuaternario, abarcando estos últimos el periodo comprendido entre el Pleistoceno, en su porción inferior, hasta el Holoceno y Reciente, en su techo. Los sedimentos del Cuaternario incluyen depósitos de arenas eólicas que cubren gran parte de la cuenca y disimulan sus rasgos geológicos, geomorfológicos y estructurales, que junto a la disposición de los cordones montañosos que la rodean hacen de ésta un ámbito difícil de estudiar. (Rodríguez y Gianni, 2010)

Actualmente el CA es donde la empresa Minera Alumbraera (MAA), desde el sector Suroeste, extrae agua para su proceso productivo y se encuentra bajo condiciones de bombeo intensivo desde el año 1997. Por ello la Provincia de Catamarca, desde el inicio de la extracción, encargó al Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA) la elaboración del primer modelo numérico de la mencionada área y en el año 1998 presentaron el estudio "Evaluación Hidrogeológica del Campo del Arenal, Hidrología Subterránea y Características Químicas del Agua superficial y subterránea". En 2010 el INA a través del Centro Regional de Aguas Subterráneas (CRAS), presentó su actualización del modelo numérico llamado "Informe Final Estudio Hidrogeológico en Campo del Arenal".

En 2011 el Equipo de trabajo "Estudio Hidrogeológico Campo del Arenal" perteneciente a la Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos (DHyERH), implementó los "Programas de Monitoreos de evolución de niveles de agua y de caracterización química", con el objetivo de contar con los datos necesarios para administrar y actualizar a futuro el modelo numérico del Arenal.

El presente trabajo de actualización del modelo numérico de CA del INA-CRAS del año 2010, representa un aporte en el conocimiento del funcionamiento actual del acuífero en el área de estudio.

El Modelo Numérico, elaborado por el INA-CRAS en 2010 y la información necesaria para la realización de la presente investigación de Seminario, fueron cedidos por la Dirección Provincial de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos (DPHyERH) al igual que los datos de campo, que fueron relevados durante el periodo 2011 - 2014 por la autora del presente trabajo, quien desempeñaba tareas en el Departamento de Hidrología Subterránea de la DPHyERH.

## 1.1 Área de Estudio

El área de estudio se encuentra en la Provincia de Catamarca, República Argentina, a 70 Km al Suroeste del Departamento Santa María. Dista aproximadamente a 390 Km de la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca, Capital de la provincia. (Figura 1-1)

El acceso desde San Fernando del Valle de Catamarca se realiza por rutas nacionales partiendo hacia el Sur por la RN N°38, atravesando las localidades de Huillapima y Chumbicha hasta empalmar con la RN N°60, pasando por la Quebrada de la Cébila, continuando por Villa Mazán, Aimogasta y Alpasinche (localidades norteñas de la provincia de La Rioja), para finalmente tomar la RN N° 40 que une las localidades de: Londres, Belén, San Fernando, Hualfín y Los Nacimientos (en sentido Sur a Norte).

Si bien se establece como área de estudio a la Cuenca de Campo del Arenal, con una extensión topográfica de 4.700 Km<sup>2</sup> aproximadamente según AGE (2013), para plantear y/o validar el modelo conceptual (procesos de entrada y salida del agua del sistema hidrológico y los parámetros hidráulicos que lo componen), dentro de la misma, el área que se modeló numéricamente se halla delimitada por las siguientes coordenadas: (Tabla 1-1)

Vértice	Coordenadas Gauss Krüger (Posgar 94)	
	X	Y
NW	3434000	7022000
NE	3483000	7022000
SE	3483000	6979000
SW	3434000	6979000

Tabla 1-1: Coordenadas de ubicación del área de estudio.

La selección de un área menor dentro de la cuenca, se justifica por corresponder al área modelada numéricamente por el INA-CRAS en el año 2010 y sobre el cual se realizó la presente validación y actualización del modelo numérico.

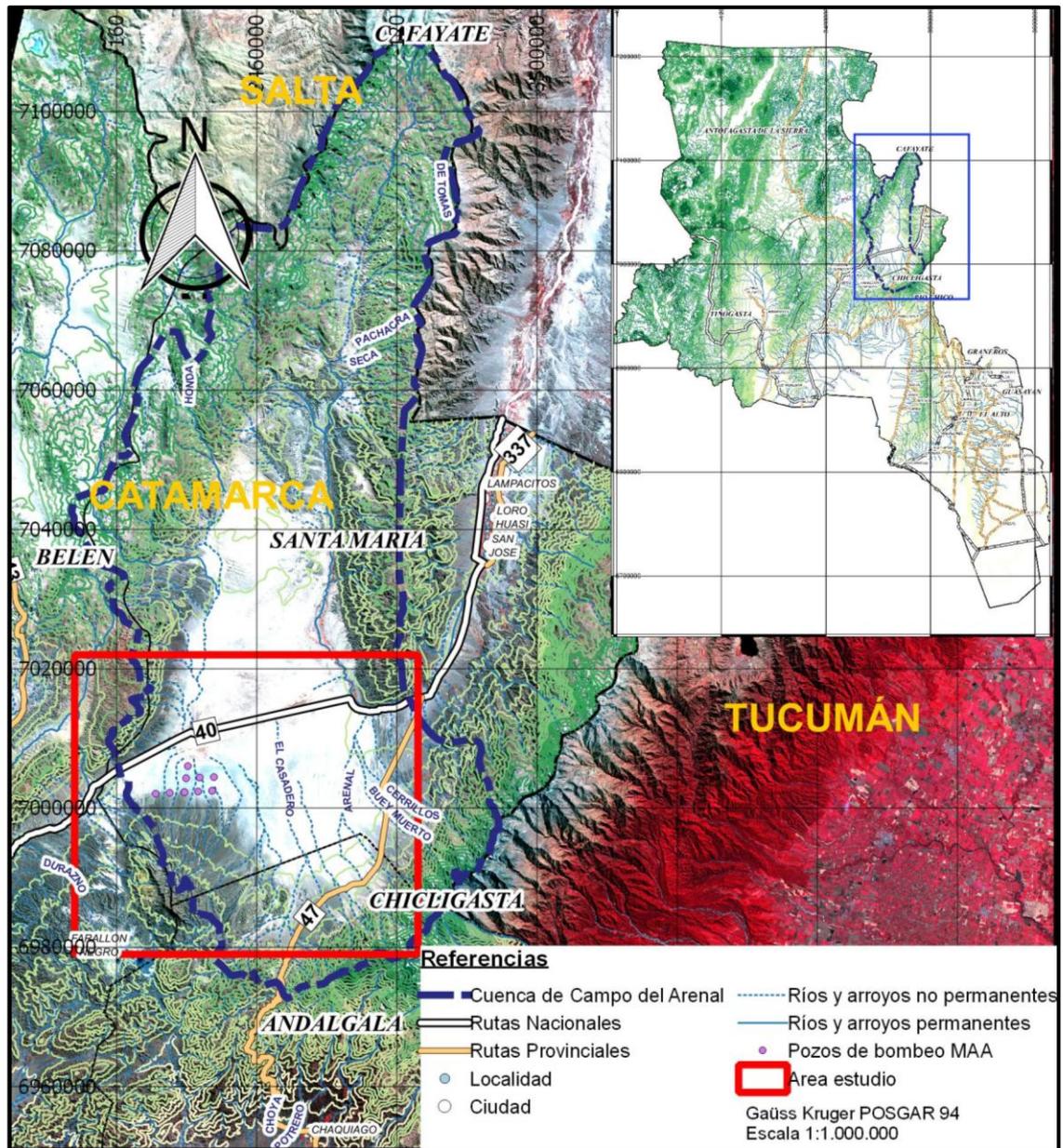


Figura 1-1: Ubicación del Área de Estudio.

## **1.2 Fundamentación**

El recurso hídrico subterráneo de CA es explotado actualmente por la batería de pozos de bombeo intensivo de la empresa MAA, ubicada en el Paraje Campo de los Pozuelos en el Suroeste de la cuenca y debido a sus constantes volúmenes de extracción requeridos por el proceso productivo, su almacenamiento ha manifestado variaciones a través del tiempo, evidenciadas por descensos de los niveles en los pozos de observación, indicando la extensión del radio de influencia del campo de bombeo.

La actividad de exploración y monitoreo por empresas privadas y organismos públicos se mantuvo constante estos últimos cinco años, generando nueva información de campo tales como: nuevas perforaciones, caudales de bombeo, programas de monitoreo de niveles, relevamiento de datos topográficos, entre otros; a la vez que también se realizaron trabajos de gabinete, como la actualización del modelo numérico por parte de MAA en el año 2013.

Teniendo en cuenta este escenario de extracción y de exploración es que se realiza el presente estudio de investigación y actualización del modelo numérico de CA cedido por la DPHyERH de la provincia de Catamarca, con el objetivo de contribuir al conocimiento del acuífero.

## **1.3 Hipótesis**

Mediante la actualización del modelo numérico es posible caracterizar el comportamiento hidrodinámico del Campo del Arenal, permitiendo una administración sustentable del acuífero y una optimización del recurso ante las distintas alternativas de empleo de sus aguas.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Validar y actualizar el modelo numérico de Campo del Arenal, departamento Santa María, provincia de Catamarca, utilizando la técnica de modelación numérica en el periodo 2011-2014, para contribuir a un mejor conocimiento del funcionamiento hidrogeológico del acuífero.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- \* Analizar los modelos conceptuales y numéricos disponibles del área de estudio.
- \* Validar el comportamiento del modelo numérico elaborado por el INA-CRAS en 2010, con la información generada a posteriori.
- \* Actualizar y Mejorar el modelo numérico elaborado por el INA-CRAS en 2010 con información de los registros de explotación declarados por la empresa minera que opera en el área y con los registros de monitoreo de niveles del agua.
- \* Analizar la posibilidad de mejorar el modelo conceptual.
- \* Confeccionar cartografía geológica e hidrogeológica para representar gráficamente el área de estudio y los resultados obtenidos.

## 1.5 Estructura del Trabajo

El presente Seminario, se encuentra estructurado por las siguientes secciones:

- \* Carátula: se presentan los datos generales de información del presente trabajo: Universidad, Facultad, Unidad académica, Título del trabajo, Alumna, Directora, Asesor, mes y año.
- \* Índice: se presenta el índice general del trabajo ordenado por doce secciones con sus correspondientes incisos. Se presenta además los correspondientes índices de figuras, tablas y anexos complementarios indicando sus páginas correspondientes.
- \* Resumen: se describen los objetivos del estudio, la metodología implementada, los resultados principales del trabajo y las conclusiones fundamentales. Se indican las palabras claves.
- \* Introducción: consiste en la exposición general del tema abordado en el presente trabajo de modelación numérica. Se presenta el área de estudio con su ubicación geográfica, se expone el problema, el objetivo general y los objetivos específicos, la importancia y el alcance del estudio.
- \* Marco Teórico: se presenta el estado del arte, con relación a la modelación conceptual y numérica.
- \* Metodología: se presenta la metodología abordada en la presente investigación, la técnica de procesamiento de datos, el análisis de la información relevante y el procedimiento empleado.
- \* Se describen las características de la Cuenca de Campo del Arenal en relación a la geología regional, la estructura, estratigrafía, geomorfología e hidrología superficial. Se presenta una revisión detallada de los antecedentes hidrogeológicos del área de estudio.
- \* Resultados alcanzados: se presentan los resultados alcanzados en función de los objetivos específicos planteados, analizados y discutidos de acuerdo con el procedimiento descrito en el marco metodológico. Es decir se plantea la discusión de los antecedentes hidrogeológicos en cuanto a sus limitaciones y contribuciones y se presenta una propuesta actualizada de modelo conceptual. Luego se realiza la Validación del modelo numérico del INA-CRAS 2010 para su posterior Actualización con información complementaria.
- \* Conclusiones: se exponen las conclusiones de acuerdo a los objetivos específicos planteados.
- \* Recomendaciones: se detallan las recomendaciones más relevantes en función de los resultados y conclusiones obtenidas.
- \* Referencia: contiene la información y bibliografía citada en el presente estudio de investigación de Seminario.
- \* Bibliografía: se presentan las fuentes de información utilizadas para la redacción del presente Seminario.
- \* Anexos: se incluyen aquí mapas y tablas complementarios sobre el estudio realizado.

## **2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Modelo Conceptual**

Un modelo es una herramienta diseñada para representar una versión simplificada de la realidad (Wang y Anderson, 1982).

El conocimiento de las características fisiográficas, hidrográficas, climatológicas y geológicas de una región representa una condición indispensable para la construcción de un modelo hidrogeológico, que involucre como elementos básicos la definición de la geometría de las unidades hidrogeológicas y de sus propiedades hidráulicas, la determinación de las redes de flujo, las estimaciones de las recargas y la descargas y la evaluación de las condiciones de calidad de las aguas subterráneas. Los datos disponibles y la información que de ellos pueda extraerse representan los insumos para llevar a cabo un procedimiento de análisis, que permita obtener como resultado el modelo conceptual de funcionamiento (Betancur y Palacios, 2009).

Es decir, el modelo conceptual hidrogeológico de funcionamiento de un sistema natural o antrópico, es el grado de entendimiento del régimen de flujo del agua subterránea de acuerdo a la información disponible.

### **2.2 Modelación Numérica con el Código Visual Modflow**

Los modelos matemáticos consisten en un conjunto de ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo del agua subterránea. Las predicciones que pueden hacerse a través de un modelo matemático dependen del grado de acercamiento que exista entre el modelo y la realidad.

Para construir el modelo deben realizarse simplificaciones de la realidad física, la cual es muy compleja como para ser simulada exactamente. Generalmente las simplificaciones necesarias para resolver analíticamente, es decir a través de fórmulas, un modelo matemático son fuertemente restrictivas. Por ejemplo, casi todas las soluciones analíticas requieren que el medio sea homogéneo e isótropo. Para simular situaciones más realistas, en general, es necesario resolver el modelo matemático aproximadamente usando técnicas numéricas. Dado el alto desarrollo de las computadoras este último método es el más usado actualmente (Wang y Anderson, op. cit.).

El código Modflow, de simulación del flujo de agua subterránea, se utilizó en la elaboración del presente estudio. Este código es el desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos por Harbaugh y MacDonald (1988) y dispone de una versión amigable, Visual Modflow, de Waterloo Hydrogeologic Inc., desarrollado por Nilson Guiguer, Thomas Franz y Bob Cleary en 1994.

Este código resuelve las ecuaciones de flujo en derivadas parciales aplicando la técnica numérica de Diferencias Finitas. El modelo numérico por lo tanto, proporciona un marco de síntesis sobre la información de campo y verifica la hipótesis sobre el funcionamiento hidráulico del sistema real. Será específico de la zona simulada y para las condiciones hidrogeológicas planteadas. Por lo tanto los modelos numéricos son herramientas predictivas valiosas para el manejo de los recursos hídricos subterráneos.

Desde que el modelo original fue desarrollado en los años '80, el Servicio Geológico de los Estados Unidos lo considera como un código estándar para simulaciones de acuífero.

### **3 METODOLOGÍA**

La metodología desarrollada para alcanzar los objetivos propuestos está organizada de forma cronológica, por las siguientes actividades:

- \* A través de un análisis y evaluación de la información recopilada en organismos públicos y privados se exponen las características principales de los modelos conceptuales y numéricos del área de estudio.
- \* Se plantea la discusión de los antecedentes analizados, haciendo énfasis en las contribuciones y limitaciones de cada uno.
- \* Luego del análisis y valoración de los antecedentes, se presenta una propuesta actualizada de modelo conceptual que representa con mayor fidelidad el funcionamiento del sistema hidrogeológico.
- \* Para la validación del comportamiento del modelo numérico del INA-CRAS 2010, se incorporan los datos de monitoreos de niveles del agua subterránea desde el periodo junio de 1997 a mayo de 2014.
- \* Para la actualización del modelo numérico del INA-CRAS 2010 se incorpora la nueva información generada por la extracción por bombeo declarada por la empresa minera que opera en el área desde junio de 1997 a septiembre de 2014, se incorpora además los resultados de la exploración hidrogeológica realizada por empresas mineras y organismos nacionales y provinciales en el área de estudio en el periodo 2011-2014 (nuevas perforaciones aportando datos de subsuelo, datos de cotas topográficas, datos de monitoreos niveles a la que se encuentra el agua subterránea).
- \* Se procesa y sistematiza la información generada desde el año 2011 a 2014 a través de planillas de cálculos. Para la modelación numérica se utiliza el software Modflow Pro Premium versión 4.2.
- \* La cartografía se elabora a partir de técnicas de teledetección de imágenes satelitales Landsat OLI 8, con el apoyo de hojas geológicas 11d Laguna Blanca, 12d Capillitas y 13d Andalgalá, mapas antecedentes de MAA y del INA que abarcan el área de estudio, empleando el software de uso libre QGIS para la salida gráfica correspondiente. Se contemplaron escalas regionales, según las necesidades de presentar las diversas variables (1: 1.000.000; 1:750.000; 1:500.000)

## **4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO: CAMPO DEL ARENAL**

### **4.1 Geología Regional**

La Cuenca de CA se ubica en el ambiente morfoestructural de las Sierras Pampeanas, en su límite con la Puna, tratándose de una cuenca de evidente origen tectónico rellena por sedimentos de edad Paleógeno-Neógeno y Cuaternaria con una compleja disposición estructural.

Los bloques de basamento de las Sierras Pampeanas Noroccidentales muestran una disposición elongada, con rumbo variable, aunque habitualmente cercano a la dirección NO–SE. Sobre una ladera, o ambas, en algunos casos aparece una superficie peneplanizada denominada “Penillanura Terciaria” (González Bonorino, op. cit.), tratándose de un paleopedimento labrado en el lapso comprendido entre el Mesozoico – Paleógeno.

La superficie original del basamento cristalino, en el inicio de la sedimentación terciaria, está definida por esta penillanura preservada en los bloques ahora emergidos, los cuales conforman una gran estructura en domo alargado en sentido NNO–SSE y fracturado.

Los bloques centrales tienen la penillanura prácticamente horizontal, mientras que los alejados del eje central inclinan cada vez más hacia el Este u Oeste. El eje imaginario baja por la Sierra de Quilmes, cruza el sector Este de CA, la sierra de Capillitas y luego nuevamente por el Bolsón de Pipanaco entrando diagonalmente en la sierra de Ambato por la quebrada de La Cébila. La estructura dómica se estrecha y termina como una cuña entre la Cordillera Oriental y la Puna, entrando por el Valle Calchaquí, ya en territorio salteño.

Estas diferencias de extensión en el domo pampeano, están relacionadas con una mayor compresión en el sector Norte debido a la presencia del bloque puneño.

Antes de la acumulación de las sedimentitas terciarias, la penillanura constituía una superficie uniforme y continua ubicada cerca del nivel del mar. En virtud de este hecho podemos aceptar que los fragmentos actuales de la penillanura definen la actitud de cada bloque pampeano luego de los sucesivos movimientos andinos ocurridos desde el Mioceno en adelante.

En vista de la conformación natural de la cuenca, los depocentros se concentran junto a fallas lístricas, que en general marcan los bordes Oeste (sierras de Papachacra, Culampajá, Zapata y Fiambalá) y Este de la cuenca (sierras de Aconquija, Capillitas y Cumbres Calchaquíes).

El análisis de los afloramientos y de las líneas sísmicas que cruzan CA, muestra un relleno con un diseño de hemigrábenes opuestos con una rampa común, que estaba ubicada en el eje sierra de Quilmes – sierra de Capillitas, cruzando por el sector oriental de CA, donde el basamento cristalino no aflora pero está muy próximo a la superficie.

### **4.2 Estructura**

El CA se encuentra limitado por estructuras de vergencia opuesta: por el Este la sierra de Aconquija es levantada por una falla inversa de alto ángulo y vergencia occidental, mientras que por el Oeste, la sierra de Hualfín lo hace con una falla con las mismas características pero de vergencia oriental (González Bonorino, op. cit.), dando como resultado un perfil asimétrico, más abrupto al Este.

La cuenca de antepaís terciaria que conforma el subsuelo de CA es fuertemente asimétrica, siendo su porción más profunda, la occidental.

En el extremo septentrional la sierra de Quilmes o del Cajón, forma una gran estructura anticlinal elevada por una falla ciega de vergencia oriental. Su geometría de deformación se determina por la posición suavemente inclinada al Oeste de la peneplanicie en su flanco occidental, mientras que en su flanco oriental, su inclinación al Este es mayor. Dicha sierra termina hacia el Sur de manera abrupta, truncada por una falla transversal a la estructura principal.

El flanco noroccidental de la sierra de Aconquija está controlado por un fallamiento regional transpresional de rumbo Noreste que favorece la asimetría de la sierra, con un flanco occidental más abrupto que el oriental, con pendientes generales alrededor de 35° que se incrementan a 65° en las proximidades de quebradas perpendiculares a la disposición regional. Los taludes poseen una espesa cubierta detrítica con poca vegetación, con predominio de fenómenos de remoción en masa en su porción superior.

### **4.3 Estratigrafía**

En términos regionales las distintas formaciones aflorantes son en su mayoría de origen sedimentario, en tanto que las rocas graníticas y metamórficas tienen importancia subordinada. (Figura 4-1)

Las unidades geológicas reconocidas en el área de estudio corresponden al Precámbrico (Basamento Cristalino), al Paleógeno- Neógeno y al Cuaternario (Rodríguez, 1999).

#### ***Precámbrico***

Las rocas del precámbrico ocupan una extensa área de afloramientos y conforman la mayor parte del borde montañoso que encierra el Campo del Arenal, como son las sierras del Aconquija, de Quilmes, de las Cuevas y de Chango Real entre otras.

Se trata de un complejo de rocas metamórficas que abarca desde rocas pelíticas prácticamente sin transformar hasta aquellas donde es difícil reconocer los rasgos texturales y mineralógicos primitivos, intruídas por cuerpos de naturaleza granítica y dimensiones batolíticas, con sus aureolas de metamorfismo; formación de migmatitas, venas de inyección de cuarzo y cuerpos pegmatíticos. En este ambiente se ha observado una gran variedad de rocas como pizarras, filitas, esquistos, micacitas, gneis, granitos, migmatitas, etc.

Las sierras de Chango Real, Las Cuevas y Hualfín están conformadas prácticamente en su totalidad por rocas granítico-migmatíticas. En algunos sectores estas rocas presentan fajas con un intenso grado de deformación que dan lugar a zonas de milonitización. Se observan diques pegmatíticos y aplíticos.

Las sierras del Cajón y del Aconquija están constituidas por rocas metamórficas e ígneas intrusivas. Las migmatitas, son abundantes desde el río Arenal hacia el Suroeste (zona de Capillitas).

En la sierra del Cajón se han reconocido pizarras, filitas y esquistos como asimismo gneis, anfibolitas y migmatitas, principalmente en su extremo Sur debido probablemente a un mayor aporte ígneo. Es frecuente observar filones de pegmatitas con turmalina como mineral accesorio.

Las rocas que conforman el Precámbrico carecen de permeabilidad primaria por lo cual no son consideradas acuíferas, no obstante observan, por fracturación y/o meteorización, posibilidades de permitir la circulación de agua hacia niveles inferiores (Rodríguez, op. cit.)

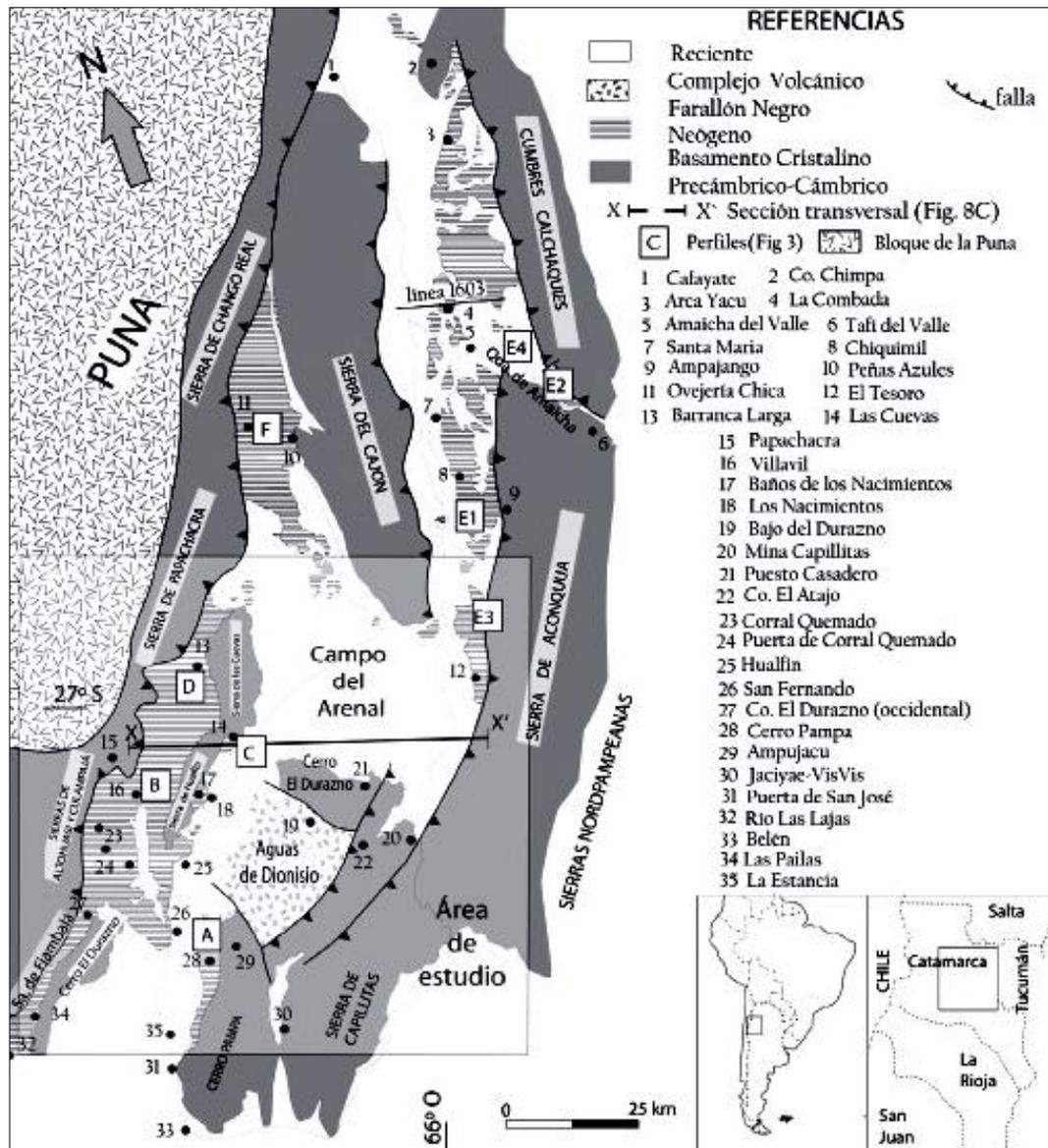


Figura 4-1: Mapa Geológico – Estructural del Área. (Bossi y Muruaga, 2009, pág. 312)

### **Paleógeno- Neógeno**

La sucesión sedimentaria presenta tres partes con sustanciales diferencias litológicas y cuyas edades se estiman diferentes (Bossi y Muruaga, 2009) (Figura 4-2)

- a) Formación Hualfin.
- b) Grupo Santa María, integrado por las formaciones: Las Arcas, Chiquimil, Andalhuala y Corral Quemado.
- c) Conglomerados de la Puna (Punaschotter).

Desde el punto de vista de la evolución tectónica se pueden reconocer varios estadios, que incluyen etapas de pre-rift (representado por la Formación Hualfin), rift inicial (Formación Las Arcas), rift clímax (Formaciones Chiquimil y Andalhuala inferior), inversión inicial (Formaciones Andalhuala superior y Corral Quemado) y clímax de inversión



La Formación Las Arcas (Muruaga op. cit.) tiene escasa jerarquización de los canales fluviales y una monótona sedimentación de areniscas finas a medias, de color rojo naranja, lo que indica una continuidad del ambiente imperante durante la Formación Hualfín.

La Formación Chiquimil se la reconoce fácilmente en el campo por el marcado color amarillo de sus areniscas. Consiste en areniscas finas en estratos tabulares continuos con estratificación cruzada tabular tangencial simple alternando con pelitas macizas y laminadas. Muestra canales bien desarrollados de ríos permanentes asociados a una planicie aluvial péltica. Esta formación según Muruaga (1998, 2001a) ha sido dividida en tres miembros, que de base a techo, son: Los Baños, El Áspero y El Jarillal.

Los afloramientos de esta unidad aparecen rodeando el núcleo central del Complejo Volcánico Farallón Negro, entre el cerro del Durazno (oriental), la sierra de Capillitas, Las Juntas, Mina Capillitas y Ampujacu. Los conglomerados y brechas volcánicas acompañados por intrusivos constituyen la base y en ocasiones la totalidad de la Formación Chiquimil.

La Formación Andalhuala representa la etapa de subsidencia térmica con depositación de una potente sucesión clástica areno-conglomerádica de facies de planicie de ríos enlazados y un área fuente en creciente ascenso y con evidencias de una progresiva aridificación.

Las areniscas son esencialmente líticas, medias a gruesas y suelen presentar colores grises a castaños claros dependiendo de la textura. Las pelitas, muy subordinadas, son de colores castaños anaranjados más oscuros. La mineralogía de arcillas es esencialmente esmectítica indicando una importante participación volcaniclástica en los materiales acarreados a la cuenca. Por otra parte esta mineralogía concuerda también con el clima seco que caracteriza a esta etapa de la sedimentación en la cuenca. La parte superior de la unidad muestra un diseño estrato granocreciente que indica el inicio de la inversión tectónica.

La Formación Corral Quemado (Plioceno) es netamente conglomerádica y corresponde a un ambiente fluvial enlazado gravoso que pasa a abanicos aluviales en los sectores proximales mejor preservados (cerro Pampa y los conglomerados ubicados en el área de El Tesoro en el faldeo occidental de la sierra de Aconquija). La sedimentación conglomerádica con fuerte procedencia del basamento cristalino, muestra el incremento del relieve en los bloques de basamento cercanos que actúan como barreras climáticas en el borde oriental de la cuenca. El contacto con la formación subyacente es neto y bien visible regionalmente en forma de una disconformidad que en la rampa cercana al cerro Pampa es suavemente angular.

La sucesión del Valle del Cajón resulta particular por la presencia de unidades separadas por disconformidades, que han sido definidas como aloformaciones. La base de la Aloformación Playa del Zorro contiene los conglomerados volcaniclásticos y coladas basálticas que pueden equiparse a los episodios correspondientes al Miembro El Áspero de la Formación Chiquimil. Algunos eventos sedimentarios, como, por ejemplo, la presencia de niveles lacustres en esta Aloformación pueden equiparse con los ubicados en el Miembro El Jarillal. La base de la Aloformación Peñas Azules tiene una edad cercana a la de la Formación Las Arcas, con la cual puede correlacionarse. Los ambientes sedimentarios de estas alonidades son similares a los descritos para los términos equivalentes de la parte central de la cuenca.

### **Cuaternario**

Los sedimentos del Cuaternario completan el cuadro geológico del área de estudio y en ellos se alojan los acuíferos más importantes (Rodríguez op. cit.)

En el sector Sureste de CA, Merea Llanos (1980) reconoce que las distintas formaciones aflorantes son fundamentalmente de origen sedimentario (fluvial y eólico), son también las

que tiene mejores características hidrogeológicas y constituyen el relleno cuaternario que alberga el acuífero más importante. Describió las siguientes formaciones de edad cuaternaria, de base a techo:

#### *Formación Campo del Arenal*

Son conglomerados de color castaño-rojizos, con sedimentación caótica y mala selección. Los clastos de tamaño variable, en su mayoría de rocas volcánicas (basaltos, andesitas), alcanzan un porcentaje de 60 a 70%; el resto lo constituyen rodados de rocas sedimentarias y graníticas (areniscas, cuarcitas, granitos).

La matriz es arenosa y en parte limo-arcillosa, presentando localmente intercalaciones lenticulares limo-arcillosas, de color marrón rojizo. Se observan también bloques de hasta 2 metros de diámetro fundamentalmente de rocas volcánicas de composición basáltica.

Esta formación se encuentra ampliamente distribuida formando lomadas alargadas en sentido generalmente Norte-Sur que los lugareños llaman "bordos". Sus depósitos aparecen disectados y erosionados por cursos de carácter temporario que descienden de la sierra de Aconquija. Se dispone discordantemente sobre depósitos de vulcanitas terciarios. En la zona Norte de la cuesta Pie de Médano estos depósitos se encontrarían localmente afectados por falla inclinando 8 grados al sureste; y en el resto de los afloramientos se encuentra horizontal, en esa misma zona se observa el contacto entre esta formación y las sedimentitas terciarias.

En la zona sur, es decir la ladera noroccidental del cerro El Durazno, los sedimentos de esta formación se acuña y desaparecen en la parte media del mencionado cerro.

Los espesores en la parte Norte oscilan entre 20 y 30 metros, mientras que en la parte sur llegan a más de 50 metros. El ambiente de depositación de esta unidad fue fluvial.

#### *Formación El Ingenio*

Representada por fanglomerados y conglomerados marrón-grisáceos, mal seleccionados, de sedimentación caótica, con matriz arenosa de arena media a gruesa, los bloques y rodados son en su mayor parte (85%) de rocas graníticas y metamórficas (gneiss, granitos, granodioritas, etc.). Presenta cementación carbonática en partes y también intercalaciones arenosas, de arena media a fina, con estructura entrecruzada.

Estos depósitos forman los abanicos aluviales que descienden de la ladera oeste de los nevados del Aconquija y que luego son cubiertos por los sedimentos de la Formación Río de las Minas y por redepósitos de los mismos.

Se observan espesores de 25 metros pero se infieren mayores para esta formación. El ambiente de depositación de esta unidad correspondería a depósitos fluviales.

#### *Formación Río de Las Minas*

Superpuestos a las unidades mencionadas se encuentran cordones de médanos de orientación general Este-Oeste, con granometría de arena mediana a fina, bien seleccionada, compuesta por cuarzo abundante (éste se observa con abundantes marcas superficiales), plagioclasa ácida y vidrio volcánico. Entre los minerales pesados se observa biotita, hornblenda, augita, apatita y turmalina.

Se distribuyen en la zona Sur de CA y cubren prácticamente todos los depósitos ocupando posiciones topográficamente altas en la ladera del Aconquija y sepultando en parte el relieve Oeste preexistente.

El espesor máximo medido es de 15 metros. Su origen es eólico y esta unidad proviene fundamentalmente de la destrucción de sedimentitas preexistentes y se depositó, cubriendo con poco espesor, a las formaciones descriptas precedentemente.

#### Depósitos recientes

Los depósitos de salinas recientes son zonas en donde el agua, por su cercanía con la superficie, asciende por capilaridad y se evapora precipitando las sales que forman estos depósitos ubicados principalmente a lo largo del trazado de la Ruta Nacional N° 40. Se distinguen por su abundante vegetación del tipo “cortadera” y por sus depósitos de sales.

Estos depósitos también se aprecian en las terminaciones de los pequeños arroyos que logran llegar hasta la parte central de CA, presentando escaso desarrollo areal y muy reducido espesor.

Los pequeños cauces actualmente están erosionando, redepositando y depositando sus sedimentos, compuestos por grava mediana, arenas y limos de colores generalmente marrones-grisáceos. Son depósitos de poco espesor (1 a 2 metros de potencia), en forma de terrazas dispuestas a ambos lados de los cauces actuales.

La perforación de exploración denominada “Campo del Arenal N°1” (CA1) atravesó, hasta los 130,5 m de profundidad, dos unidades estratigráficas: de 0,0 a 21 m. Formación Río de las Minas y de los 21 a 135,5 m. la Formación El Ingenio. Desde el punto de vista de su capacidad para admitir y/o transmitir agua, la unidad de grava arenosa de la Formación El Ingenio se comporta como acuífero (Merea Llanos, op. cit.).

Para estimar los parámetros hidráulicos del acuífero y establecer las condiciones de funcionamiento de la perforación, se realizaron dos ensayos de bombeo a caudal constante. De su interpretación surgen:  $T = 1.700 \text{ m}^2/\text{d}$  y  $k = 65 \text{ m/d}$  (Merea Llanos, op. cit.).

La secuencia estratigráfica de CA que se representa a continuación es una interpretación realizada por la autora del presente estudio sobre la base de las descripciones geológicas del área con el objetivo de analizar el comportamiento hidrogeológico específico de las formaciones que fueron descriptas en párrafos anteriores. (Tabla 4-1)

Durante la elaboración de la cartografía geológica, se identificaron depósitos fluvioglaciares, glaciares y criogénicos actuales.

El mapa donde se observan las unidades geológicas es resultado de una fotointerpretación a partir de la imagen satelital Landsat OLI 8, que data del periodo 23 de agosto de 2015, y en base a hojas geológicas, mapas geológicos de MAR 2007, del INA-CRAS 2009 y de MAA 2013. Se procesó con el software de uso libre QGIS. El mismo se presenta en el **Anexo I: Mapa 1. Geología de la Cuenca de Campo del Arenal.**

#### **4.4 Geomorfología**

La cuenca de CA constituye una gran depresión tectónica, cerrada estructuralmente, que abarca unos  $4.700 \text{ Km}^2$ , a una altura de 2.225 msnm y rodeada por cordones montañosos de entre 3.000 a 5.000 msnm.

Esta depresión está parcialmente cerrada al suroeste por el bloque del cerro El Durazno (González Bonorino, op. cit.)

El relieve de la comarca se caracteriza por sus formas simples, bien definidas. El basamento fracturado y sobreelevado en épocas recientes determina la presencia de sierras alineadas, separadas por valles tectónicos de estructura, en general, asimétrica.

Los rasgos de estas sierras son sus perfiles poco disectados y una línea de cumbres desplazada hacia el lado de las fallas, situación que se observa en la sierra de Aconquija. En algunas sierras se distinguen restos de la antigua penillanura de edad Terciaria, como en la sierra de Capillitas, cubiertos por conglomerados terciarios. En los distintos cauces de la zona es factible reconocer numerosos niveles aterrizados, tanto de acumulación como labrados en granitos, lo que pone en evidencia el levantamiento reciente de la región.

Unidades Geológicas de Campo del Arenal							
Era	Periodo	Unidades Geológicas	Ubicación	Litología	Comportamiento Hidrogeológico		
CENOZOICO	CUATERNARIO	Depósitos aluviales		Grava mediana, arena y limos marrones-grisáceos.	En los sedimentos modernos y recientes se alojan los acuíferos más importantes. Sobre ellos se encuentra el Campo de Pozos de Bombeo de Alumbraera.  (Dichiaccio y Sanchez, 2004)		
		Evaporitas	A lo largo de la Ruta Nac. N° 40	Depósitos de salinas recientes			
		Formación Río de Las Minas	Orientación E-W	Cordones de médanos: arena media a fina, bien seleccionada, compuesta: Qz, Plag. ácida y vidrio volcánico			
		Formación El Ingenio	Ángulo sureste forman los abanicos aluviales que descienden de la ladera W de los Nevados de Aconquija	<b>Fanglomerados y conglomerados</b> marrones-grisáceos de sedimentación caótica con matriz arenosa media a gruesa, 85 % boques y rodados de gneis, granitos, granodioritas. Cemento CO <sub>3</sub>			
			Formación Campo del Arenal	Ampliamente distribuida formando lomadas alargadas en sentido N-S "bordos"	<b>Conglomerados</b> castaños rojizos, con sedimentación caótica y mala selección (60-70 % clastos: basaltos, andesitas y 30-40 % areniscas, cuarcitas, granitos). <b>Matriz: arenosa</b> en parte limo-arcillosa, localmente intercalaciones lenticulares limo-arcillosas marrón rojizas. Bloques de basaltos		
	TERCIARIO	(Dichiaccio y Sanchez, 2004)	Araucanense Fm. El Cajón	Cazadero, al SE del Campo de pozos.	En contacto por falla: Terciario detrítico: areniscas, areniscas tobáceas marrones, compactas, estratificadas	Se los considera base impermeable de la cuenca de agua subterránea. Los niveles superiores del Terciario presentan bancos de texturas gruesas (areniscas y conglomerados poco consolidados) que en posición topográfica adecuada poseerían condiciones de acuífero pobre.  (Dichiaccio y Sanchez, 2004)	
			Complejo Vocánico: Fm. El Aspero	Afloramientos muy reducidos en el Campo del Arenal propiamente dicho, debido a que subyacen a una continua cubierta fluvial y eólica Cuaternaria	Sur de Campo del Arenal: Co. Negro y Co. El Durazno		Tobas, brechas, grices, grices oscuras, rojizas, etc; comp: andesítica, basálticas.
			Calchaquense: Fm. El Morterito	Noete de ruta 40: Paloma Yaco	Areniscas, areniscas tobáceas, limolitas compactas con nódulos de CaCO <sub>3</sub> y conglomerados (clastos: gneis, esquistos micáceos, cuarcitas y granitos; material intersticial: limo-arenoso		
	PRECAMBRICO	(Rodríguez, 1999)	Quilmes o Cajón, Aconquija		Complejo metamórfico intruido por cuerpos graníticos (Batolitos)	Carecen de permeabilidad primaria. No son consideradas acuíferas. Permeabilidad Secundaria: fracturas y/o meteorización.  (Rodríguez, 1999)	
					Rocas metamórficas e ígneas intrusivas: Pizarras, Filitas, esquistos, gneis, anfíbolitas y migmatitas.		
Capillitas				Migamitas			
Chango Real, Las Cuevas, Haulfín				Rocas granítico - migmatíticas			

Tabla 4-1: Secuencia Estratigráfica de Campo del Arenal.

Entre los elementos de la red de drenaje pueden mencionarse el río Nacimientos, que se encuentra recostado contra la sierra de Hualfín, debido a la asimetría tectónica de la depresión en la que éste drena, mientras que río de Las Cuevas, que antes se unía con el de Las Zanjás, sufrió un fenómeno de captura, formándose una profunda garganta.

También se pueden observar geformas resultantes de la depositación de sedimentos sobre los pie de monte formando extensos abanicos aluviales sobre la ladera occidental de las sierra de Aconquija, la ladera oriental del cerro El Durazno y sobre la ladera oriental de las sierras de Las Cuevas y de Chango Real.

Depósitos de arenas eólicas, se disponen formando cordones de médanos distribuidos en el Sur y Norte de cuenca. El resto de la misma es cubierta por sedimentos arenosos sueltos y localmente en el centro este de la cuenca se observa la formación de salinas recientes, producto de la fluctuación del nivel freático en ese sector.

#### **4.5 Hidrología Superficial**

En la zona en estudio, la mayoría de los ríos y arroyos poseen régimen temporario o eventual, dependiendo ello de las magnitudes de las precipitaciones en sus cuencas; en la mayoría de los casos son torrentes que solo aportan derrames superficiales asociados a eventos de lluvia.

En la zona de interés existe una red de arroyos y torrentes que drenan las serranías perimetrales de CA; en este la red es difusa debido a la muy elevada permeabilidad de los terrenos en los cuales atraviesan los cauces.

También suele circular agua esporádicamente por los tributarios de los sectores más altos de las cuencas de recepción y aporte, producto de la fusión de mantos de nieve o hielo de escasos espesores y aportes volumétricos, los que son el resultado de precipitaciones solidas (nieve o granizo).

El régimen de escurrimiento de estos arroyos es fundamentalmente pluvial, ocasional y torrencial. Se anticipa que las avenidas tienen marcado carácter súbito, presentando caudales máximos relativamente importantes y reducidos tiempos base de sus hidrogramas; además, en la zona serrana suelen estar acompañadas de gastos sólidos elevados, tanto en suspensión como por arrastre de fondo, debido sustancialmente a las elevadas pendientes de los álveos.

Los cauces de los principales arroyos tributarios, se encuentran cubiertos por sedimentos cuaternarios de reducidos espesores, sueltos no consolidados, constituidos por materiales de granulometría gruesa (bloques, gravas, gravillas y arenas), con escasas proporciones de finos, producto de los elevados gastos sólidos de las crecidas extraordinarias.

El mapa donde se observa la cuenca hidrológica que configura el área de aporte por escurrimiento superficial al CA, se realizó, sobre la base de interpretación de la imagen satelital Landsat OLI 8 que data del periodo 23 de agosto de 2015 y se procesó con el software de uso libre QGIS. La base cartográfica (topografía, toponimia, red vial e hidrografía) empleada corresponde al GIS del INA-CRAS de 2010. La cartografía obtenida, se presenta en el **Anexo I: Mapa 2. Hidrología de la Cuenca de Campo del Arenal.**

## 5 REVISIÓN DE ANTECEDENTES EN CAMPO DEL ARENAL

Los antecedentes analizados corresponden a estudios realizados con el objetivo de evaluar el comportamiento del acuífero frente a la explotación (acción de bombeo) de agua para suministrar a la empresa MAA. Sin embargo, al tratarse de una zona con un apreciable volumen de estudios geológicos e hidrogeológicos, pocos de ellos han abordado su estudio desde un punto de vista integral, limitándose la mayoría de ellos, a un área restringida de la cuenca. Los mismos han permitido prever, con un cierto grado de aproximación, las posibles consecuencias de la aplicación de distintas alternativas de extracción del agua subterránea en CA. Se exponen a continuación las características principales de los modelos conceptuales y numéricos del área de estudio. En la sección siguiente se plantea la discusión sobre las contribuciones y limitaciones que presenta cada uno en su elaboración.

### 5.1 Modelo Minera Alumbra por Hydro-Geo Consultants 1995

El modelo conceptual inicial fue elaborado por la Consultora Hydro-Geo Consultants Inc. para la empresa MAA y, sobre la base de este, se desarrolló el modelo numérico para la cuenca de CA. (Figura 5-1).

Para su elaboración se realizó la exploración del subsuelo, a través de perforaciones para la construcción de pozos de monitoreo (CP) y pozos de bombeo (PW).

La construcción de dos primeros pozos de monitoreo, CP1 y CP2, brindó información inicial sobre el subsuelo. El pozo CP-1 tiene filtros desde 187 a 211 m bajo el nivel del suelo y fue el pozo de monitoreo empleado para el ensayo de bombeo del pozo PW-1; el pozo CP-2 tiene filtros desde 156-174 m bajo el nivel del suelo y un nivel estático inicial 170 m bajo el nivel del suelo (del 04/09/1993).

La extracción por bombeo se realizaría a través de un grupo de perforaciones denominadas PW (1 a 7) con profundidades del orden de 220 m, con filtros entre los 150 y 220 m bajo el nivel del suelo. De las siete perforaciones sólo el pozo PW-3 no fue utilizado debido a la presencia de abundantes sedimentos limosos en su columna litológica a partir de los 120 m de profundidad bajo el nivel del suelo.

Hydro-Geo consideró en su conceptualización un acuífero libre, con un perfil litológico de arenas y gravas al que le asignaron un coeficiente de almacenamiento  $S= 0,18$ . La conductividad hidráulica promedio del acuífero fue calculada en  $7,3 \times 10^{-3}$  cm/s.

El balance hidrológico plantea una recarga conformada por el aporte de lluvia directa en el campo de 160 mm/a y en laderas de 1.924,19 l/s y un índice de infiltración basado en la comparación con una zona similar en Nevada (EE.UU) del 7%: siendo el volumen de recarga total de 2.415 l/s determinado sobre la base de recopilación de antecedentes hidrometeorológicos. Establecen una descarga de CA al río Santa María de 2.200 l/s, calculada por caudal base de los ríos.

El modelo numérico constaba de una sola capa que representaba el acuífero aluvial. La malla cubría un área de 750 Km<sup>2</sup>, con celdas uniformes de 200 por 200 m. En cuanto a los límites, asignaron celdas de carga constante al límite noreste y de flujo nulo al resto del área modelada. Se consideró un espesor saturado promedio de 170 m. La simulación se realizó para un periodo de 25 años. (Tabla 5-1 y Figura 5-2)

Para este modelo numérico se simularon seis pozos cada uno con un bombeo de 100 l/s, durante 5 años, lo que representa 600 l/s; seguido de ocho pozos que bombearían los restante 20 años 800 l/s.

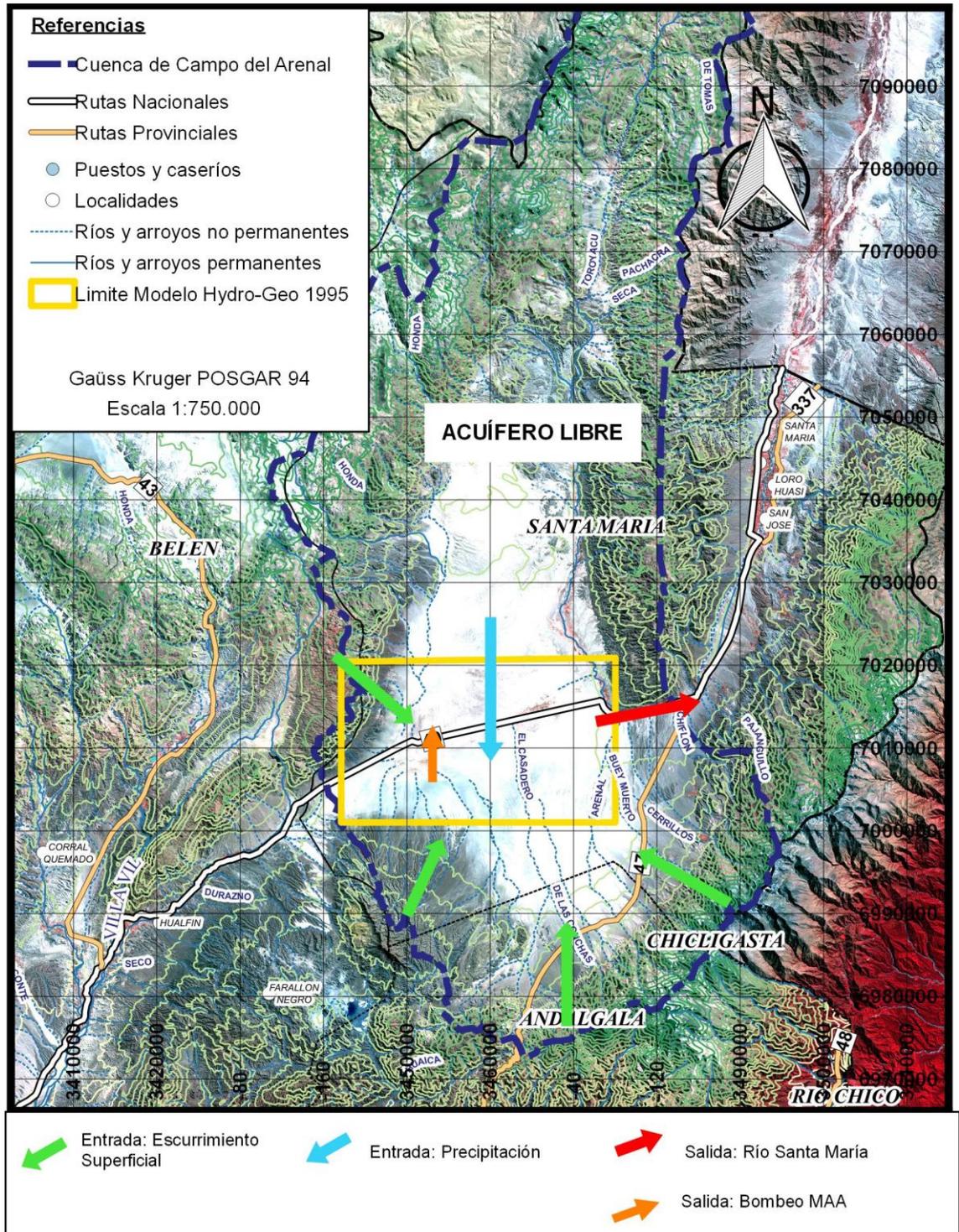


Figura 5-1: Modelo Conceptual elaborado por Hydro-Geo 1995 para MAA.

La conductividad hidráulica promedio empleada fue de  $7,3 \times 10^{-3}$  cm/s y se empleó un coeficiente de almacenamiento de 0,18. El equilibrio de volúmenes entre el caudal de entrada y de salida dentro del dominio del modelo se logró dentro de un margen de error del 0,24%.

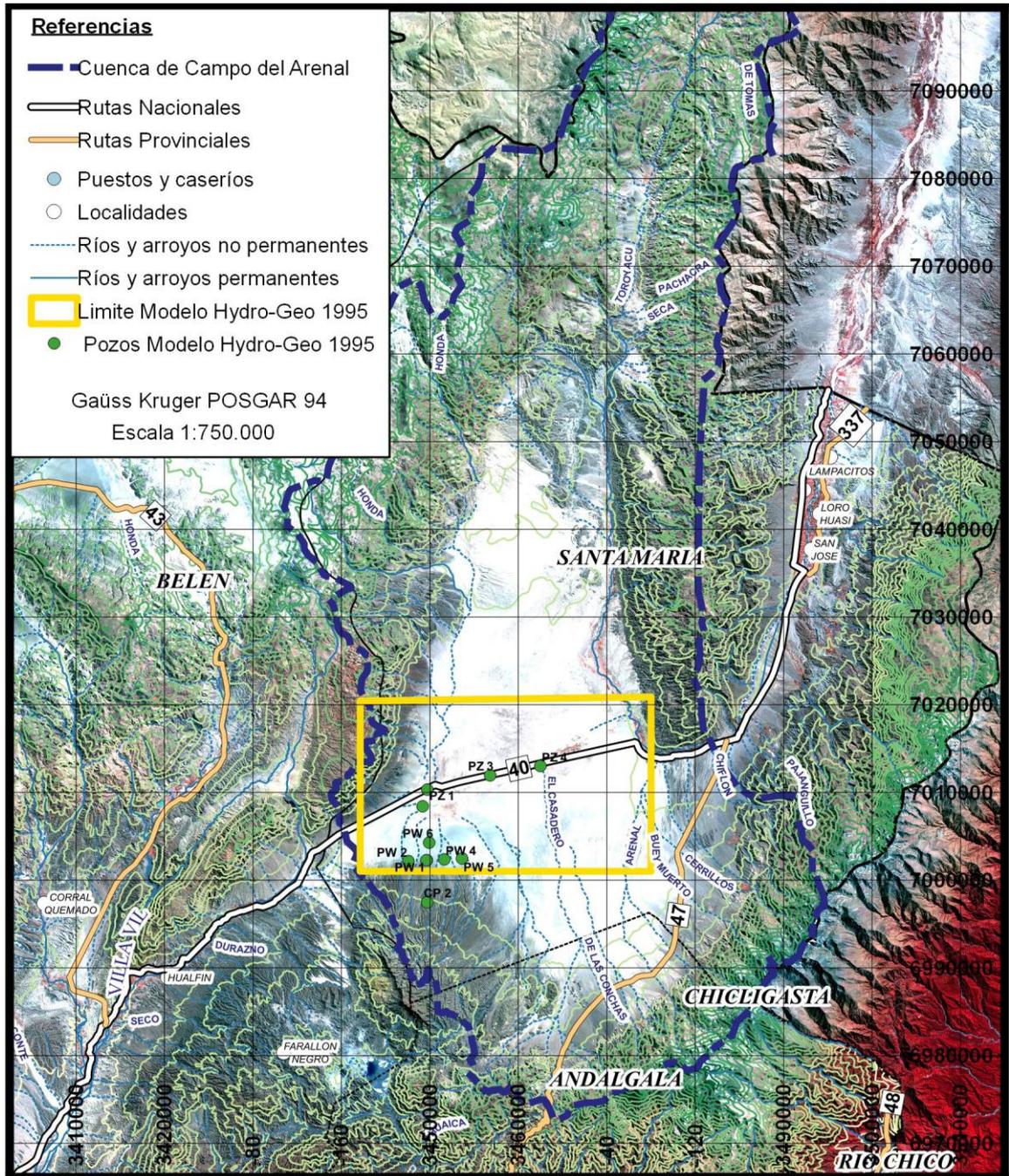


Figura 5-2: Área y pozos de observación del modelo numérico de Hydro-Geo 1995 para MAA.

Tabla 5-1: Resumen de los Parámetros del Modelo de Alumbreira.

Parámetro	Ensayos Hidráulicos (Método de Theis)	Modflow
Conductividad hidráulica (cm/s)	$7,3 \times 10^{-3}$	$6,9 \times 10^{-4}$ a $1,2 \times 10^{-2}$
Espesor del acuífero (m)	170	3 a 630
Transmisividad (cm <sup>2</sup> /s)	124	—
Almacenamiento	0,18	0,18
Recarga (m <sup>3</sup> /d)	—	23.014

Los parámetros de los ensayos hidráulicos en los pozos fueron calculados a partir de la información de los ensayos de bombeo realizados por MAA. Los parámetros empleados en el modelo Modflow fueron determinados a partir de la información de los ensayos de bombeo, la calibración del modelo y las hipótesis sobre el coeficiente filtración y de precipitaciones. Fuente: (Hydro-Geo Consultants, Inc., 1995)

## 5.2 Modelo Provincia de Catamarca por el INA 1998

A la hora de plantear el modelo conceptual el Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA), elaborado para la Secretaría del Agua y del Ambiente de la Provincia de Catamarca (SAyA), se propuso investigar el impacto de la extracción de agua subterránea de CA en el caudal del río Santa María. En el marco de este objetivo generó nueva información proveniente de: aforos en los ríos Santa María y Los Nacimientos, freáticos en el bajo central de la cuenca, análisis químicos y prospección geoelectrónica.

El modelo conceptual del INA fue planteado sobre la base de un acuífero de tipo libre. Para determinar la recarga en cada área de aporte, se aplicó el criterio de calcular el caudal específico medio de ríos que drenan cuencas similares; así, para el área de aporte de Aconquija se aplicó el caudal específico del río Andalgalá, y en la sierra de Las Cuevas y sector sur; el del río Belén, totalizando una recarga por bordes de 52 Hm<sup>3</sup>/a, en tanto que a la recarga por lluvia directa, se consideró nula. Para las descargas subterráneas de CA hacia los ríos, se determinó que: hacia el río Los Nacimientos era de 10 Hm<sup>3</sup>/a, valor calculado utilizando el método de diferencia de caudales y que hacia el río Santa María era poco significativa de 0,019 Hm<sup>3</sup>/a, valor determinado por el método de balance hidroquímico. Este modelo introduce un término en el balance que no había sido considerado hasta ese momento: la *evapotranspiración*, calculada en 45 Hm<sup>3</sup>/a. Finalmente el último término que configura el balance de este modelo corresponde a la extracción por bombeo de MAA de 25 Hm<sup>3</sup>/a. (Figura 5-3)

El modelo numérico simula un acuífero tipo libre de una sola capa que cubre una superficie modelada de 805 Km<sup>2</sup>, discretizado en celdas de 1.000 m de ancho. Se establecieron condiciones de borde del modelo con celdas de flujo nulo, salvo en la zona de descarga hacia Los Nacimientos donde aplicaron celdas de carga hidráulica constante. (Figura 5-4)

La recarga por los bordes se realizó mediante el artificio de simular pozos de recarga distribuidos sobre los contornos Norte, Sur y Este dentro del área modelada. El cálculo de la evapotranspiración se realizó con Modflow, se aplicó el valor de 45 Hm<sup>3</sup>/a. El bombeo total de MAA fue establecido en 25 Hm<sup>3</sup>/a, distribuido entre los seis pozos. Para la morfología del basamento hidrogeológico se adoptó la simplificación de suponer que el mismo se encuentra 100 m por debajo del nivel del agua.

La cota de agua inicial, fue trazada con mediciones del año 1997. La permeabilidad aplicada fue de 10 m/d y el coeficiente de almacenamiento asignado fue de 0,05. El periodo de tiempo fue el año y se simularon 20 periodos, para un total de 20 años.

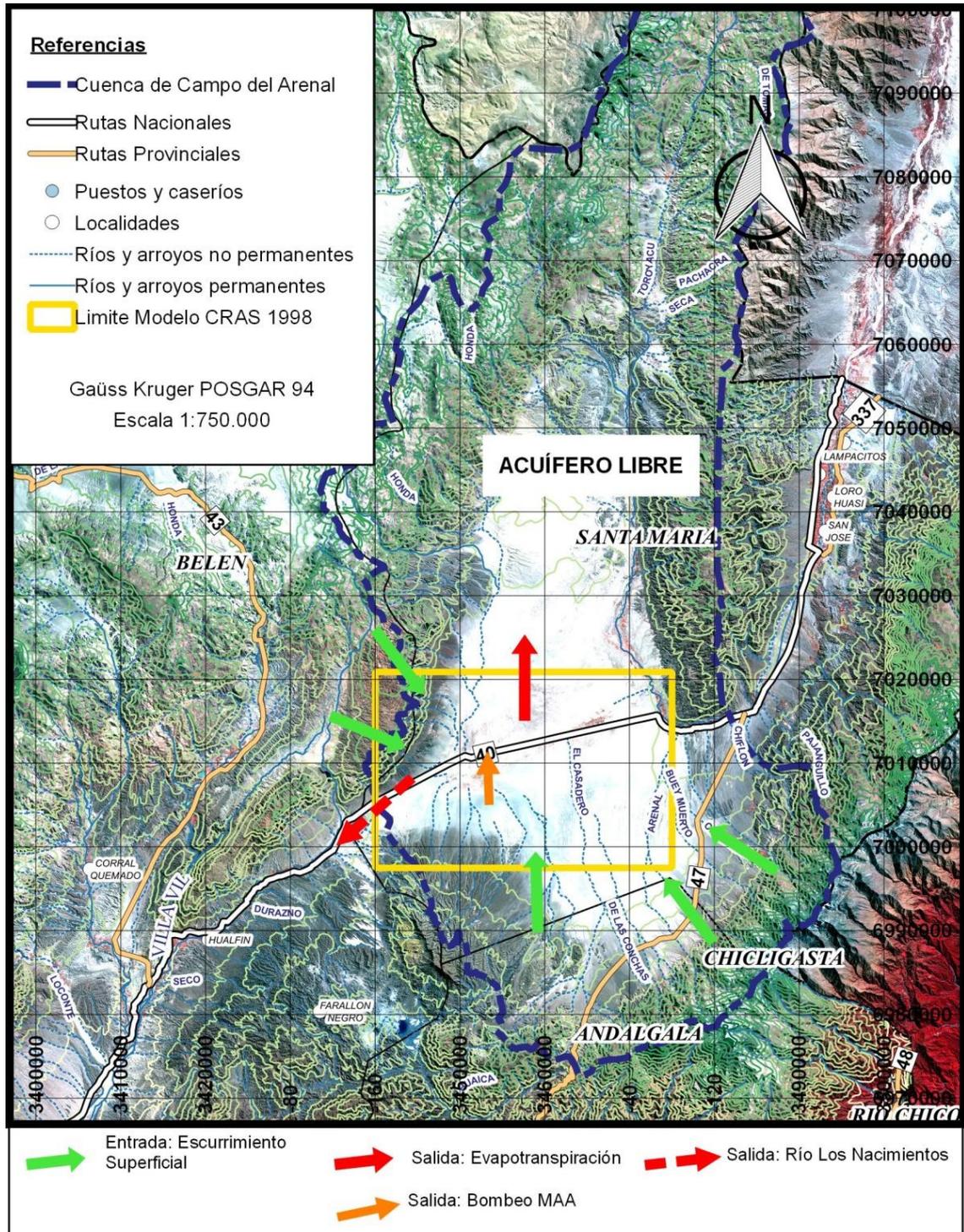


Figura 5-3: Modelo conceptual elaborado por el INA 1998 para Provincia de Catamarca.

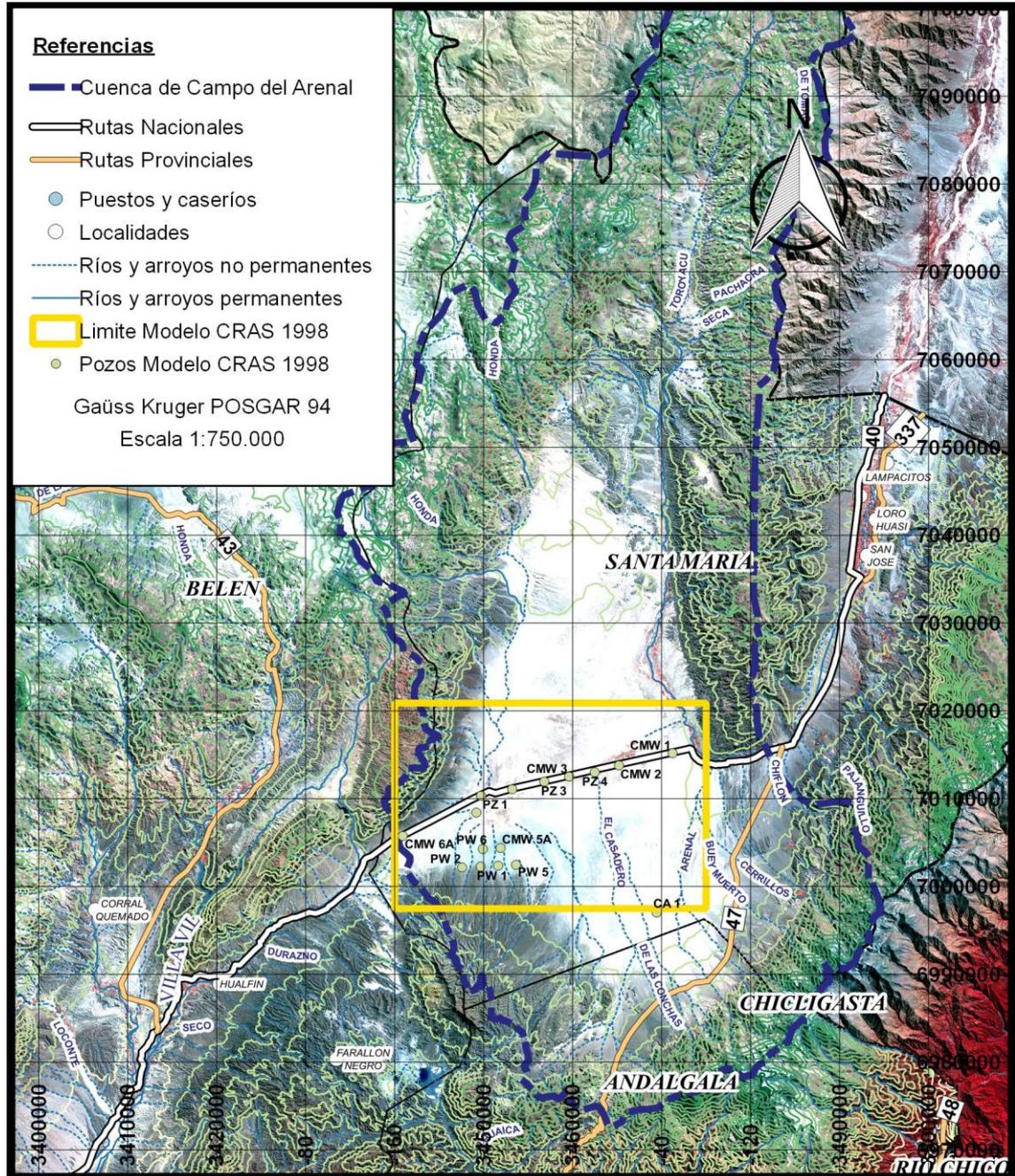


Figura 5-4: Área y pozos de observación del modelo numérico del INA 1998 para Prov. de Catamarca.

### 5.3 Modelo Minera Agua Rica por BHP-Aquaconsult 1999

El modelo conceptual elaborado por la Consultora BHP-Aquaconsult para la empresa Minera Agua Rica (MAR) se basó en la información inicial de Hydro-Geo 1995, proveniente de pozos exploratorios de monitoreo y bombeo.

Para el desarrollo de la conceptualización, se empleó información proveniente de perforaciones de observación denominadas WMA y de pozos para pruebas de bombeo denominados WEA, ejecutadas al Norte de la Ruta Nacional N° 40, y al Este y Sur de la

Ruta Provincial N° 47. Realizaron sondeos geofísicos de superficie: TEM, SEV y refracción sísmica; ensayos de bombeo; aforos de ríos de la cuenca; estudios isotópicos; mediciones de niveles piezométricos y observaciones meteorológicas.

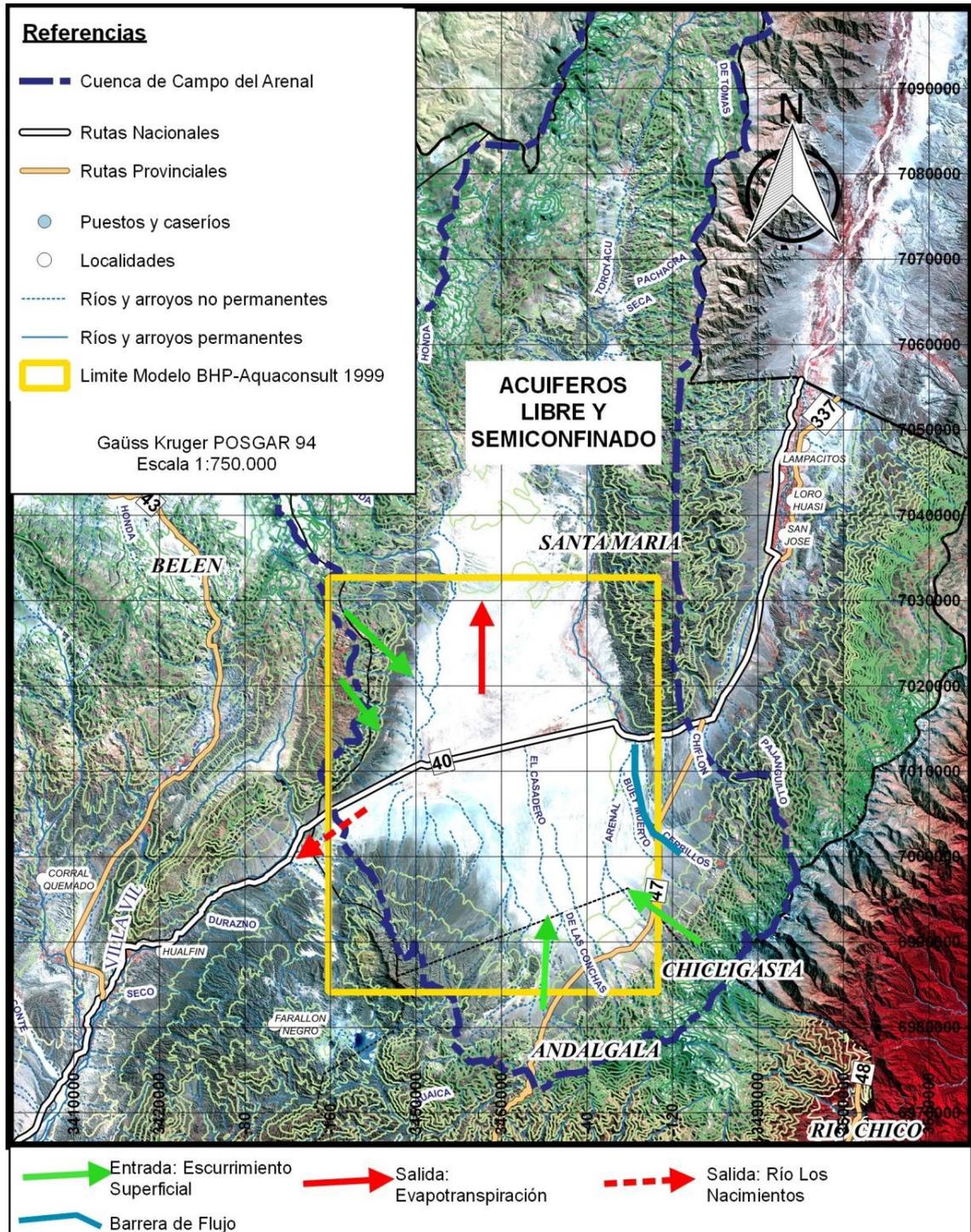


Figura 5-5: Modelo conceptual de BHP-Aquaconsult 1999 para MAR.

El planteo general y los valores calculados de recarga y descarga son similares a los realizados por el CRAS en 1998. BHP-Aquaconsult introduce una modificación en el escurrimiento desde el Este de la cuenca, proveniente de la Sierra de Aconquija, sobre la

base de interpretación del subsuelo donde establecen una interrupción del flujo por la presencia de dos bloques semielevados del Terciario.

El modelo conceptual considera que las zonas acuíferas favorables presentaban valores de conductividad hidráulica en el rango de 0,5 a 8,8 m/d; mientras que el rango de transmisividad oscilaba entre los 75 y los 900 m<sup>2</sup>/d. Contemplaba un sistema de aguas subterráneas de naturaleza semiconfinada, al tiempo que su grado de confinamiento se incrementa en las proximidades del centro de la cuenca. (Figura 5-5)

En contraposición con el valor de coeficiente de almacenamiento de 0,18, empleado por MAA en 1995, para BHP las condiciones de acuífero semiconfinado se dan en las cercanías del pozo PW-1. La geometría del acuífero es controlada por fallas rectilíneas que también afectan la secuencia terciaria, formando una serie de bloques estructurales elevados y plegados. En esta conceptualización las unidades acuíferas potenciales pertenecían a las arenas Cuaternarias no consolidadas y los depósitos Terciarios de las Formaciones Araucanense y Jujeño (Mioceno superior – Plioceno).

El modelo numérico teórico contempló un coeficiente de almacenamiento del 0,1 y un espesor saturado de 200 m, en una simulación predictiva a 20 años con una tasa total de extracción de 1.200 l/s, de los cuales 600 l/s corresponden al campo de pozos de MAA y la mitad restantes a dos configuraciones alternativas de campos de pozos de MAR:

*Opción 1*, conformada por pozos de bombeo distribuidos de la siguiente manera: cinco en el área Cazadero a una tasa total de 250 l/s, otros cinco pozos en la zona de El Ingenio – El Zarzo con una tasa total de 80 l/s y nueve pozos en la parte Norte y Centro de la cuenca sobre la Ruta Provincial N° 40, con una tasa total de bombeo de 270 l/s.

*Opción 2*, consistía en el bombeo de pozos, ubicados según se indica: cinco en el área Cazadero a una tasa total de 210 l/s, nueve pozos sobre la Ruta Provincial N° 40, con una tasa total de bombeo de 270 l/s y la extracción de agua superficial correspondiente a 120 l/s captada de las quebradas en los flancos de las Sierras de Aconquija.

#### **5.4 Modelo Minera Alumbreira por Australasian Groundwater Environmental 2002**

El informe presentado por Australasian Groundwater and Environmental Consultants Pty. Ltd. (AGE), para Minera Alumbreira (MAA) en el año 2002, incluye una revisión del modelo de agua subterránea y un modelo predictivo de distintas situaciones en la extracción de agua subterránea. Incorpora lo realizado por Hydro-Geo en 1995 y la información climatológica de Hydro-Geo (1998), cambia los valores de la recarga-descarga y construye el modelo numérico con escasas modificaciones en los datos de base.

El modelo conceptual que presenta AGE es un balance hidrogeológico conformado por los procesos de descarga plateada hacia el Este y el Oeste por escurrimiento superficial; hacia el sector oriental llega hasta el río Santa María que es de naturaleza permanente; en el sector occidental de la cuenca, drena hacia el Sudeste y luego hacia el río Los Nacimientos. (Figura 5-6)

El acuífero es de tipo libre formado por sedimentos de la era Cuaternaria, derivados de los depósitos aluviales y sedimentarios vinculados a las sierras y a las áreas de drenaje, correspondiendo a las formaciones descritas por Merea Llanos, op. cit., en el pozo CA N°1, corroboradas por los registros de perforación en los que en general, predominan sedimentos en granos muy gruesos, lo que indica un acuífero excelente. A pesar de la generalización

anterior, están presentes sedimentos de baja permeabilidad (arena limosa) que fueron interceptados en el pozo de producción PW 3 a partir de los 120 m de profundidad.

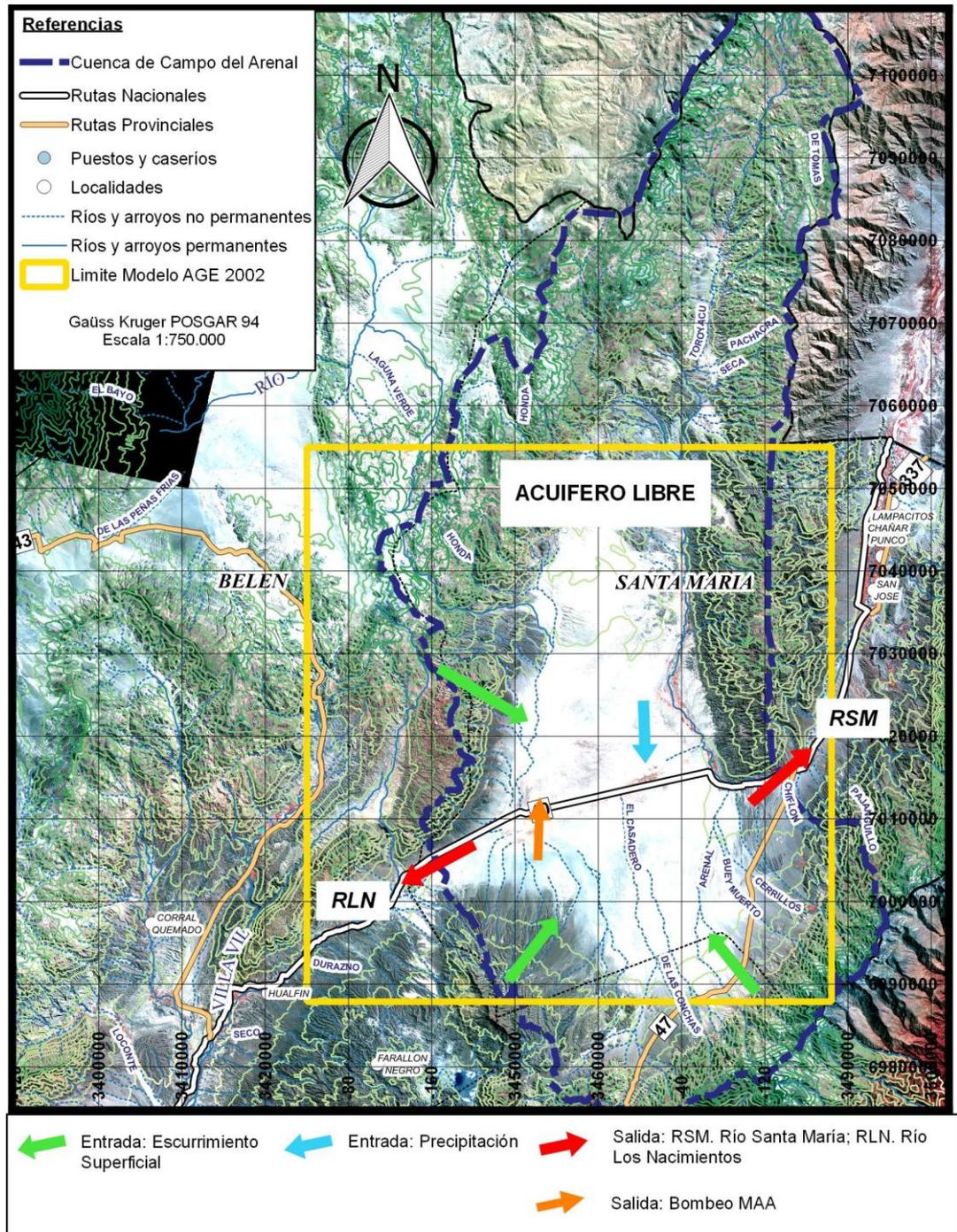


Figura 5-6: Modelo conceptual elaborado por AGE 2002 para MAA.

Los valores de conductividad hidráulica obtenidos de las pruebas de bombeo van desde los 70 m/d en CA N°1 hasta 0,43 m/d para el pozo PW6 obtenidos a partir del análisis de la información de recuperación del pozo, que son bajos para el acuífero dadas las descripciones de las muestras de perforación. El único valor de almacenamiento 0,18,

obtenido por ensayo por bombeo a caudal constante, indica que el acuífero no está confinado.

La dirección de flujo del agua subterránea, según datos sobre el nivel de agua demostrarían que en el Oeste el agua subterránea fluye hacia el río Los Nacimientos; mientras que los niveles de agua en los pozos de monitoreo CMW1 a CMW3 y en el pozo CA1 demuestran que en el sector oriental de la cuenca, el agua subterránea fluye hacia el río Santa María.

La descarga de la cuenca es planteada a través de ríos que actúan como drenes, considerando que la dirección del agua subterránea antes del bombeo, fue desde las zonas de recarga en los márgenes de la cuenca de CA hacia los ríos Santa María y Nacimientos. Esta descarga de caudal fluvial tiene un componente de descarga de agua subterránea y otro de escurrimiento superficial. Por lo que Hydro-Geo en 1999 definió, en el punto de monitoreo sobre el río Santa María, una descarga total de agua subterránea hacia el Este de 112.500 m<sup>3</sup>/día. A este valor se lo adoptó como objetivo, a los fines de la calibración y como base para la evaluación del impacto del bombeo sobre el caudal fluvial; mientras que el aporte del CA al río Los Nacimientos es de 6.600 m<sup>3</sup>/día, valor que utilizaron en la calibración del modelo y como caudal de referencia para la evaluación de los impactos de la extracción de agua del campo de pozos de MAA sobre el caudal del río Los Nacimientos.

El proceso de recarga se planteó bajo el concepto de condiciones originales (sin bombeo de MAA), la descarga de agua subterránea a través del río Santa María o del río Los Nacimientos era igual al volumen promedio de recarga anual. Por lo tanto la recarga diaria promedio para la cuenca era de 119.100 m<sup>3</sup>/día, independientemente del volumen de agua subterránea extraída desde el campo de pozos de MAA.

Según AGE la cuenca de CA recibe en promedio 159,20 mm de lluvia por año, de los cuales un porcentaje de esta precipitación recarga el acuífero libre mediante infiltración<sup>1</sup> directa. Además de la infiltración directa de precipitaciones, el escurrimiento desde las cadenas montañosas circundantes se infiltra a través de los depósitos aluviales y de pedimento de grano grueso presentes alrededor de las márgenes de la cuenca.

La interacción agua subterránea – agua superficial entre el sistema de aguas subterráneas de CA y los ríos Nacimientos y Santa María, se modeló utilizando Modflow.

El modelo numérico cubre una extensión de 1.390 Km<sup>2</sup> dentro de la cuenca hasta el contacto con las sierras circundantes. Cuenta con una grilla con tamaños de celda que varían entre 50 m x 50 m en la región del campo de pozos de producción de MAA y hasta 2.000 m x 2.000 m en los límites del modelo. El acuífero se representa como una capa única homogénea con un rendimiento específico de 0,18. (Figura 5-7)

Los procesos de recarga se dividen en: precipitación directa en la superficie sedimentaria de la cuenca y recarga indirecta proveniente de la escorrentía de las sierras circundantes. En este modelo disminuyen la recarga por lluvia directa y en laderas a 1.380 l/s, y le asignan de descarga al río Santa María el valor de 1.300 l/s, utilizando nuevamente el método de cálculo del caudal de base del río, al igual que Hydro-Geo 1995.

---

<sup>1</sup> “Hydro-Geo (1997) ha tomado como hipótesis que este porcentaje es del 7% en base a datos obtenidos en un área similar en Nevada, E.E. U.U.” (AGE, 2002).

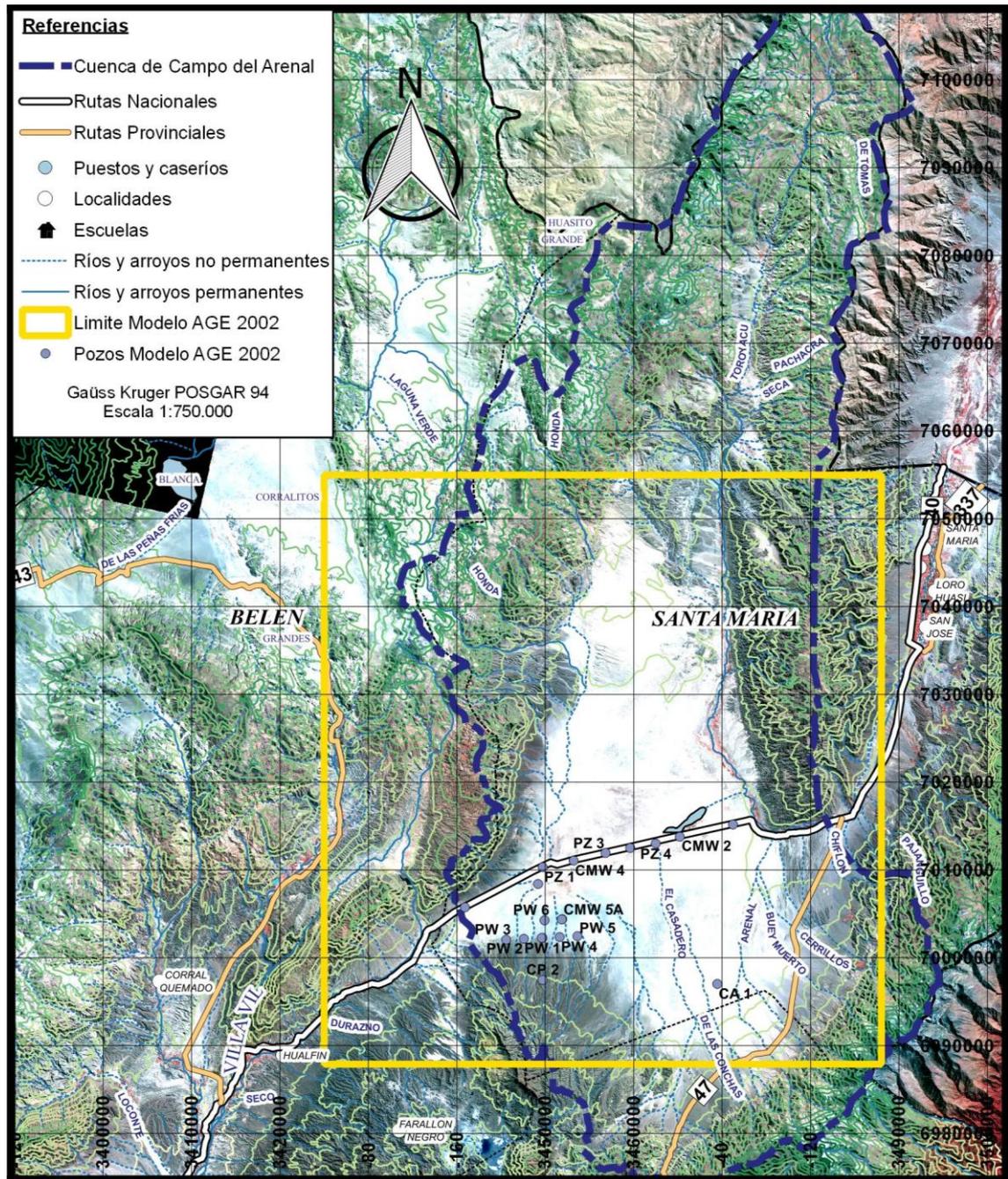


Figura 5-7: Área y pozos de observación del modelo numérico de AGE 2002 para MAA.

### 5.5 Modelo Minera Agua Rica por Water Management Consultants 2007

Al elaborar el modelo conceptual, para Minera Agua Rica (MAR), Water Management Consultants (WMC) propone que la geología más favorable para el desarrollo de los recursos hídricos en la cuenca de CA está representada por sedimentos no consolidados y fanglomerados Cuaternarios, mientras que los sedimentos Terciarios subyacentes y formaciones volcánicas ofrecen un potencial significativo de aprovisionamiento de aguas subterráneas. (Figura 5-8)

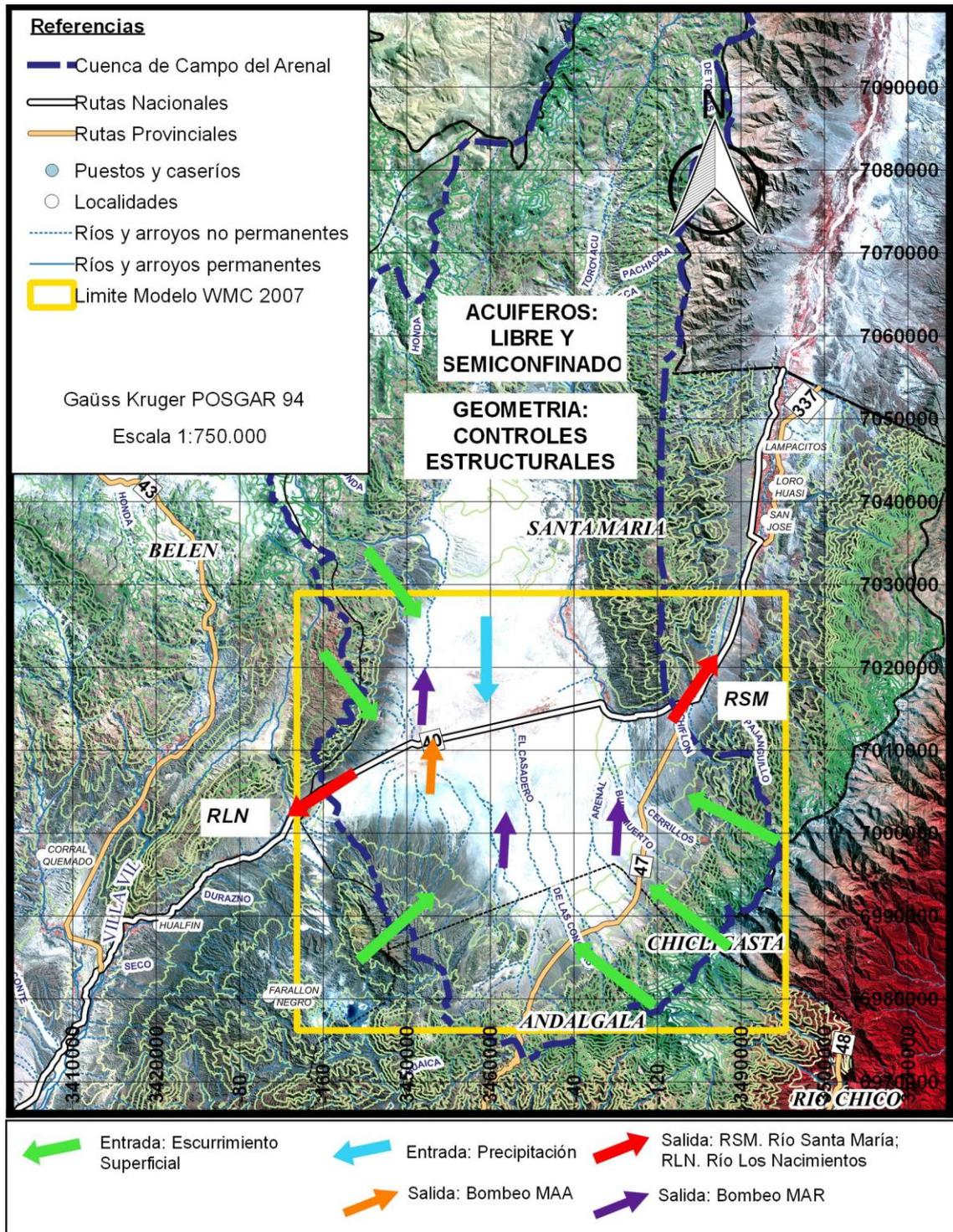


Figura 5-8: Modelo conceptual elaborado por WMC 2007 para MAR.

En este modelo se indica que la mayor parte de la recarga al sistema de aguas subterráneas de CA es recarga indirecta, es decir, por infiltración de escorrentía a través de los cursos de agua superficiales perennes y efímeros representando una recarga total según sus registros de caudal, sin considerar la pérdida por evaporación, un valor entre 1.935 l/s en la estación

húmeda y de 575 l/s en la estación seca. WMC estimó que la recarga directa al sistema de aguas subterráneas es muy baja del orden de 1 mm/a.

El análisis realizado por WMC de la superficie piezométrica del sistema de CA y de los gradientes hidráulicos, indicó que ésta fluye hacia las siguientes zonas de descarga dentro de la cuenca: hacia el Noroeste por el río Santa María y hacia el valle de Santa María; hacia el Suroeste siguiendo el río Los Nacimiento; hacia el Oeste en dirección al campo de pozos de producción de MAA y finalmente hacia el centro y al Este de la cuenca donde se ubican las áreas de evapotranspiración de Los Pozuelos y Santa Clara. Mientras que la profundidad hasta el nivel de agua subterránea oscila entre menos de 1 m, en Los Pozuelos sobre la Ruta Nacional N°40 y más de 200 m de profundidad al Sur en el área de Cazadero.

Para WMC, en su conceptualización, el acuífero de CA varía entre no confinado y semiconfinado (con pérdidas). Interpretación realizada sobre la base de los registros de perforaciones y la interpretación de los datos TEM (Transiente Electromagnética) que "...indican que en las áreas donde se observan sedimentos de granulometría fina, tienden a ser limos en lugar de arcillas, lo que impediría el desarrollo de acuíferos con un fuerte grado de confinamiento dentro de la cuenca" (Minera Agua Rica LCC, 2007), además de los resultados de las pruebas de bombeo de caudal constante en las perforaciones ARP 1 y ARP 8, se darían las condiciones para el desarrollo de acuíferos no confinados a semi-confinados en la zona de ARP 1 (Cazadero) y de acuíferos con medio a fuerte grado de confinamiento en la región de ARP 8 (Los Pozuelos Norte), (Minera Agua Rica LCC, op. cit.) WMC sostuvo que los controles litológicos y estructurales a escala de Cuenca, definían la geometría del acuífero. Lateralmente, los límites del acuífero se definen por la existencia del basamento, que a la vez es controlado por sistemas de fallas inversas; la base del acuífero es definida por las rocas metamórficas e ígneas intrusivas de baja permeabilidad que subyacen a los sedimentos.

El modelo numérico de flujo planteado por WMC se confeccionó con el objetivo de evaluar los recursos disponibles en la Cuenca para el potencial aprovisionamiento de agua subterránea por parte de MAR, como así también la respuesta a las operaciones de bombeo del campo de pozos de MAA, para ello el código de simulación utilizado fue Modflow-Surfact, que es una progresión del código estándar Modflow. (Figura 5-9)

El dominio activo del modelo se extiende abarcando la mayor parte del área septentrional de la cuenca, aunque carece de información de pozos y de niveles de aguas subterráneas en esa región, incorpora recarga indirecta sobre el límite septentrional.

Los datos fueron discretizados en una grilla regular de 250 x 250 m que comprende cuatro capas diseñadas sobre la base de cortes transversales hidrostratigráficos. La Capa 1 consta de una superficie de 1.308 Km<sup>2</sup>. La conductividad hidráulica se distribuyó en zonas sobre cada una de las capas, con valores que varían de acuíferos de buena permeabilidad 8 a 4 m/d a valores de baja permeabilidad entre 0,10 a 0,01 m/d,  $k$  en dirección vertical ( $k_v$ ) se estableció en un décimo del valor de la conductividad horizontal. Para asignar el valor de conductividad hidráulica a cada zona WMC, utilizó el método de ajuste manual durante el proceso de calibración de la variante del régimen estacionario a fin de obtener la calibración óptima de las cargas hidráulicas medidas en campo.

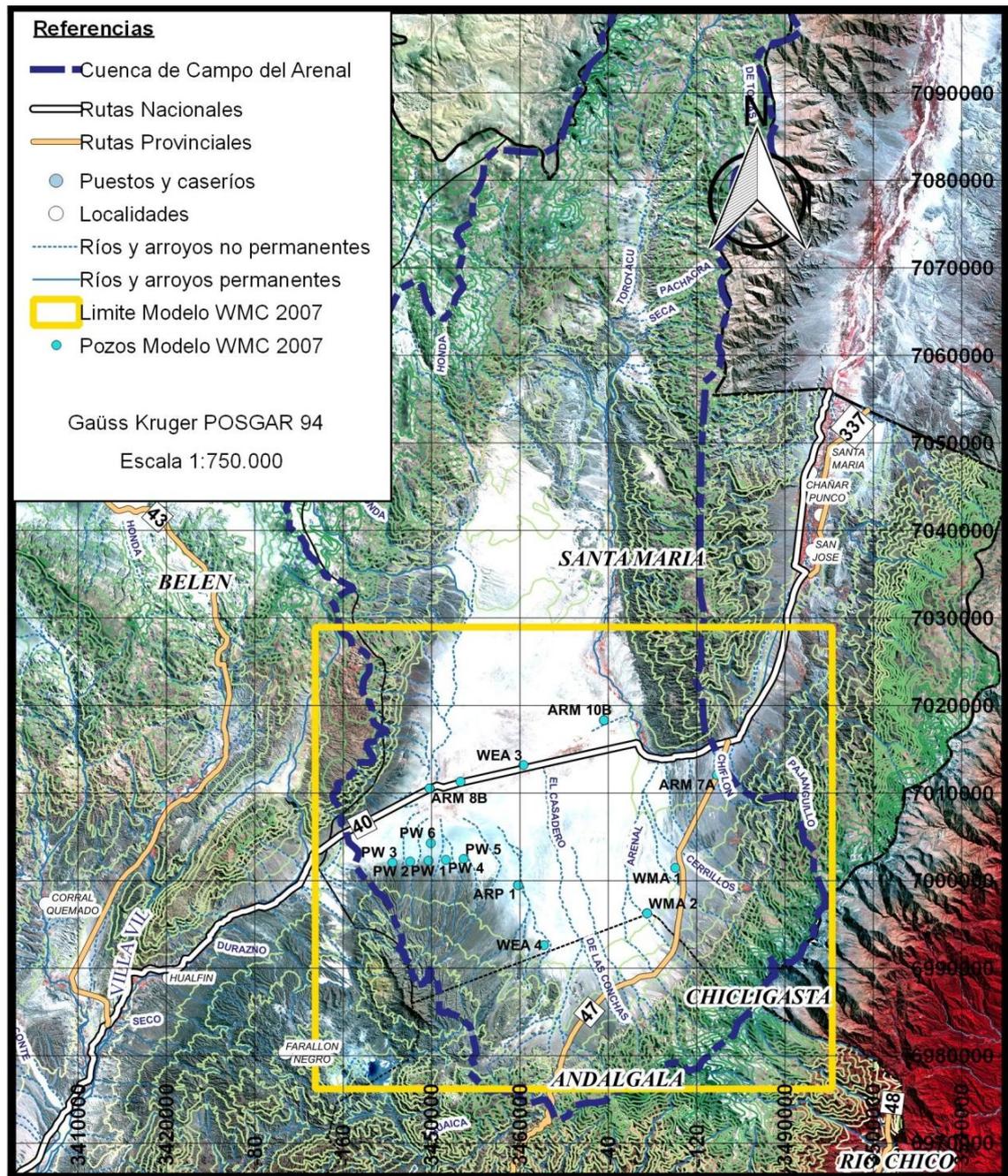


Figura 5-9: Área y pozos de observación del modelo numérico de WMC 2007 para MAR.

Los valores coeficiente del almacenamiento ( $S^2$ ) de  $3 \times 10^{-4}$  y  $6 \times 10^{-4}$  se calcularon a partir de las pruebas de bombeo de MAR realizadas en junio de 2006 en los pozos ARP-1 y ARP-8, respectivamente. En cuanto al almacenamiento específico ( $Ss^3$ ) le asignaron un valor

<sup>2</sup> El coeficiente de almacenamiento, **S**, determina el volumen de agua liberado del almacenamiento del acuífero por unidad de área ( $m^2$ ), cuando el nivel piezométrico desciende en una unidad (m). S determina el porcentaje de liberación de agua de un acuífero confinado.

<sup>3</sup> El almacenamiento específico, **Ss**, es el volumen liberado por  $1 m^3$  de acuífero confinado (no por toda la columna de acuífero) al descender 1 m la superficie piezométrica. La relación entre S y Ss es:  $S = Ss \cdot \text{Espesor}$ .

uniforme de  $2,5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  y aplicaron un espesor saturado de 200 m promedio. Con respecto al valor del rendimiento específico ( $S_y^4$ ) WMC, aplica el valor de 18%, resultante de las pruebas de caudal constante del pozo de bombeo PW-1 de MAA, aunque finalmente WMC expresa que "...el modelado numérico del flujo de aguas subterráneas permite ajustar mejor los hidrogramas históricos de pozos de observación con el valor de  $S_y$  24%, sobre la base que este es un valor típico para arena media con un grado de clasificación relativamente bueno" (Minera Agua Rica LCC, op. cit.).

Los límites del modelo consisten en bordes de flujo nulo: en el contacto entre los pie de sierras con la superficie sedimentaria, en las elevaciones Terciarias en la parte centro-oriental de la cuenca y en el sector Norte y Noreste casi al límite con el río Santa María; borde de carga hidráulica constante: en el límite Noroeste considerado de descarga al sistema de aguas subterráneas hacia el Valle de Santa María y finalmente hacia el límite Suroeste se aplicó un borde de drenaje hacia el río Los Nacimientos.

WMC calibró el modelo en régimen estacionario en un período previo al inicio de la extracción de MAA. Luego realizaron una calibración histórica de la variante transitoria en un período de simulación de nueve años (1º de junio de 2007 al 31 de mayo de 2016), correspondiendo en total a 36 periodos de stress. Plantearon dos escenarios predictivos de simulación numérica, introduciendo dos variantes del escenario B:

**Escenario A:** contempla una media de extracción por parte de MAA de 549 l/s, considerando la totalidad de los registros (junio de 1997- marzo de 2006).

**Escenario B:** sólo contempla bombeo por parte de MAR de, 390 l/s sin contar la operación del campo de pozos de MAA, con el objetivo de medir los efectos de la extracción de MAR en el sistema de aguas subterráneas de CA. La Variante 1 corresponde con una distribución de un campo de 13 pozos que bombean 30 l/s cada uno, situados al Oeste del pozo de prueba de bombeo ARP-1 y a 4 Km al Sudeste del campo de pozos de producción de MAA. La Variante 2 plantea una distribución de 17 pozos divididos en: un grupo de 10 pozos que bombean 25 l/s cada uno, ubicados al Oeste del pozo de prueba de bombeo ARP-1 (Cazadero), y otro grupo de 7 pozos que bombean 20 l/s cada uno, localizados al Oeste del pozo de bombeo de prueba ARP-8 (Los Pozuelos Norte) y 6 Km al Noroeste del campo de pozos de producción de MAA.

La recarga por los bordes se plantea dividida en 6 zonas que en conjunto conforma una Recarga total 1.583 l/s y estimaron que la recarga directa era de 1 mm/año. (Tabla 5-2)

Los mecanismos de descarga del agua subterránea simulados corresponderían a:

- \* EVT, en la capa 1, fue definida un área que cubre  $12,1 \text{ Km}^2$  en la zona de Santa Clara hasta el límite con el río Santa María. Los valores de los parámetros asignados para el paquete EVT en el modelo constituyen una tasa de evaporación (máxima) potencial de 2008 mm/a y una profundidad de extinción de 1,5 m.
- \* El río Santa María, considerado como una zona de descarga neta del sistema de aguas subterráneas de la cuenca de CA hacia los sedimentos del Valle de Santa María, es representada mediante celdas de carga hidráulica constante. Le asignan a este proceso de descarga el valor de 692 l/s.
- \* La descarga a la captación del Río Belén, basada en que la magnitud de la descarga, disminuiría en respuesta a cualquier reducción en la carga hidráulica resultante de la

<sup>4</sup> El rendimiento específico,  $S_y$ , determina la cantidad de agua liberada del almacenamiento en un acuífero no confinado por unidad de superficie ( $\text{m}^2$ ) cuando la elevación del nivel freático desciende en una unidad (m). Al igual que S, es adimensional.

extracción de aguas subterráneas en CA. Le asignan a este proceso de descarga el valor de 473 l/s.

\* Otro de los parámetros de descarga del modelo es la extracción de aguas subterráneas del campo de pozos de producción de MAA, desde mayo de 1997 conformada por 6 pozos, a una tasa media de extracción entre mayo de 1997 y marzo de 2006 de 549 l/s.

Tabla 5-2: Recarga por zona de aporte. (Minera Agua Rica LCC, 2007)

Zona de recarga del modelo	Superficie sobre la cual se distribuye la recarga en el modelo (m <sup>2</sup> )	Aporte de la recarga (l/s)	Aporte de la recarga (Hm <sup>3</sup> /a)	Porcentaje de la recarga total
1 Aconquija	139.687.500	780	24,57	49%
2 Cazadero	69.312.500	123	3,87	8%
3 Las Cuevas	64.250.000	100	3,15	6%
4 Quilmes	44.437.500	0	-	0%
5 Norte	11.375.000	146	4,60	9%
6 Norte Central	1.500.000	134	4,22	8%
7 Recarga directa (celdas activas en el modelo) a una tasa de 1 mm/a	977.625.000	43	1,35	3%
Flujo modelado de agua desde el río Santa María hasta CA (calibración en régimen estacionario)	—	257	8,10	16%
<b>Recarga total</b>		<b>1.583</b>	<b>49,86</b>	<b>100%</b>

## 5.6 Modelo Provincia de Catamarca por el INA-CRAS 2010

El modelo conceptual fue elaborado por el INA a través del Centro Regional de Aguas Subterráneas (CRAS) para la Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos perteneciente a la Subsecretaría de Planificación de Recursos Hídricos del Ministerio de Obras Públicas de la Provincia de Catamarca.

El modelo conceptual propuesto plantea un proceso de recarga principal formada por el escurrimiento superficial de las laderas, principalmente de la Sierra del Aconquija que incluye todos los cursos desde el Sur hasta el río Buey Muerto, desde el río Cerrillos y los ubicados al Norte aportarían al río Santa María. Como recarga secundaria se consideró al escurrimiento de las Sierras de Hombre Muerto y Las Cuevas. Las descargas estaban representadas por la Evapotranspiración en el bajo central, formada por dos sectores, uno en el área de Los Pozuelos (Sector A) y el otro sobre Santa Clara hasta el límite con el río Santa María (Sector B), otro componente era la descarga por flujo subterráneo hacia el río Los Nacimientos y finalmente el bombeo intensivo del campo de pozos de MAA. (Figura 5-10)

La simulación numérica de la cuenca se realizó con el software Visual Modflow -V 4.2, para ello, la cuenca fue discretizada en celdas cuadradas de 1.000 m de lado, conformando una, área activa de 908 Km<sup>2</sup>. (Figura 5-11)

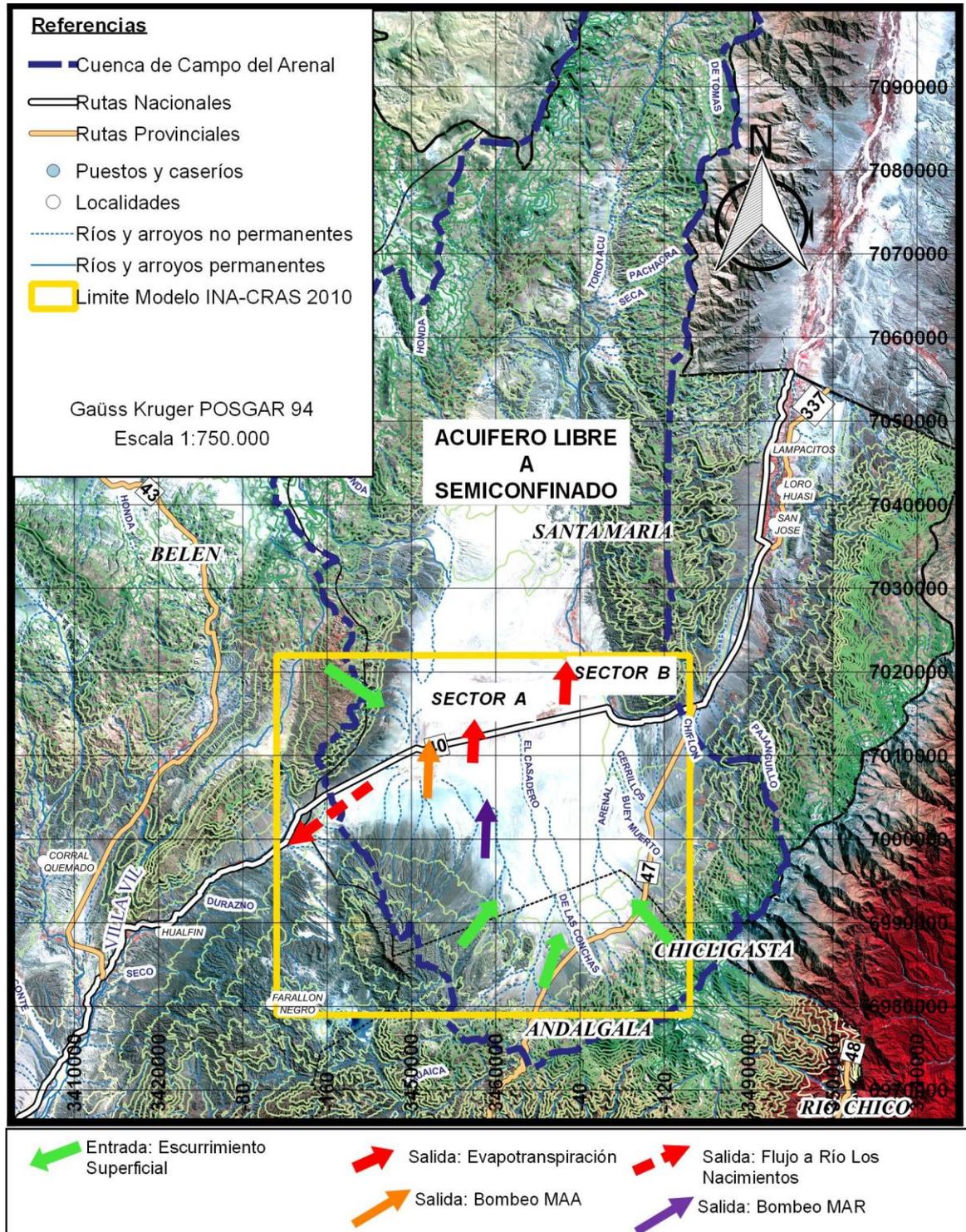


Figura 5-10: Modelo conceptual elaborado por el INA-CRAS 2010 para la Provincia de Catamarca.

Las condiciones de borde de flujo nulo del modelo se aplicaron a los límites entre los contactos geológicos de afloramientos de rocas precuaternarias y los sedimentos

Cuaternarios. En el sector del aeropuerto, las condiciones de borde son celdas de nivel constante para simular el flujo hacia el sector de Nacimientos.

El modelo numérico se discretizó en dos capas acuíferas, la capa superior ó capa 1 está compuesta por sedimentos cuaternarios sueltos, más o menos gruesos, de buena permeabilidad, de característica libre. Mientras que la inferior o capa 2, está integrada por sedimentos terciarios finos, algo compactados, con intercalaciones de limos y arcillas con permeabilidad notablemente inferior comparados con la capa superior, que está saturada y se comporta como un acuífero confinado. (Figura 5-12)

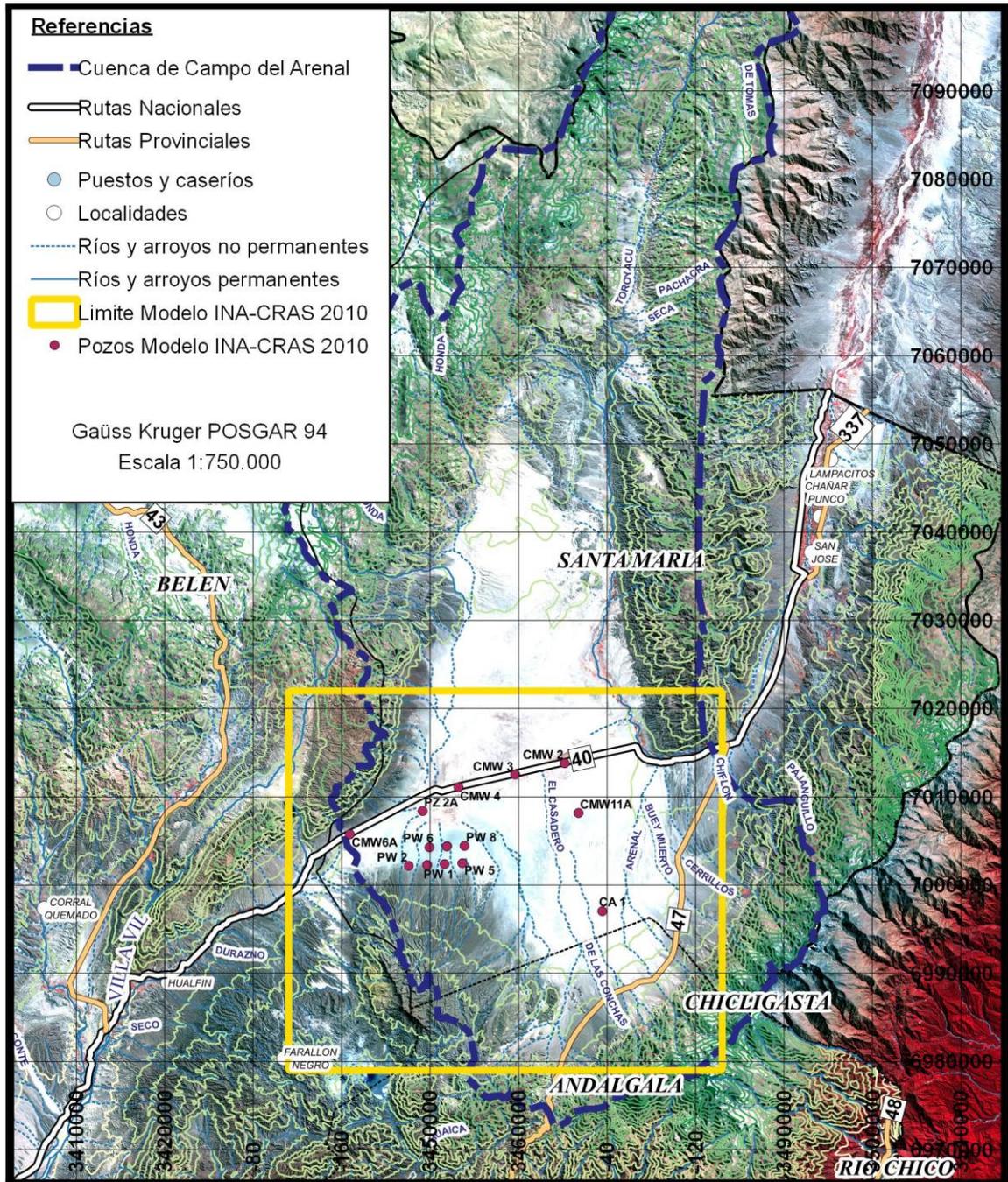


Figura 5-11: Área y pozos de observación del modelo numérico del INA-CRAS 2010.

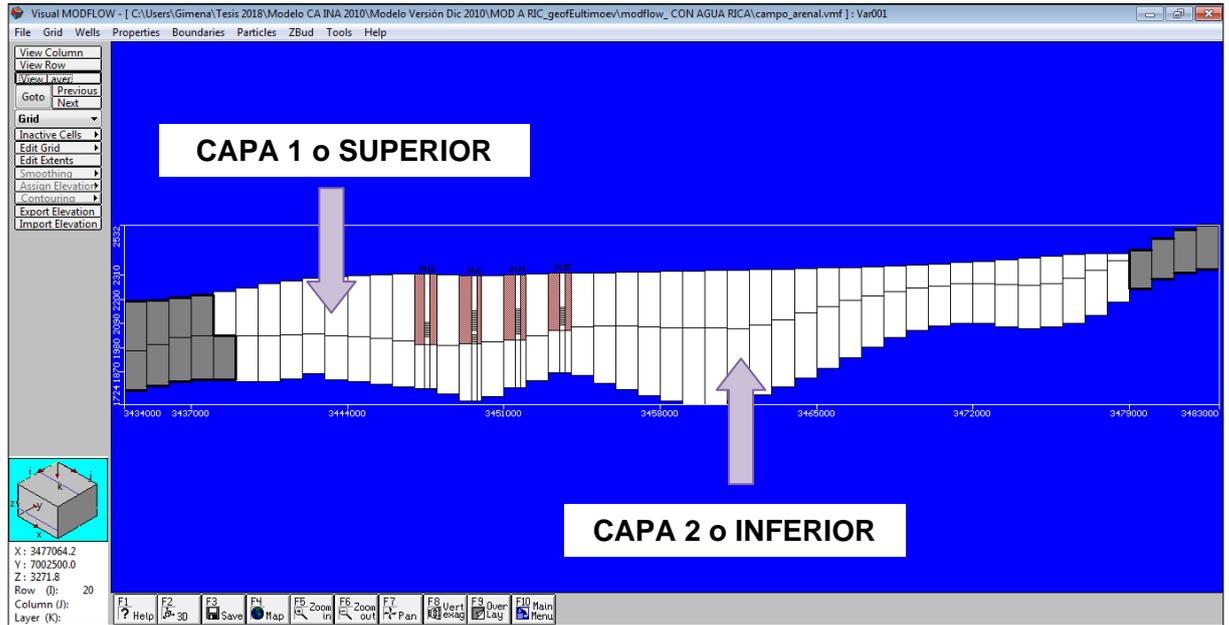


Figura 5-12: Corte Transversal Oeste – Este del modelo numérico INA-CRAS 2010.

Los espesores de la capa superior e inferior “...resultan de los mapas estructurales, los que se obtuvieron teniendo en cuenta información de perforaciones y prospección geofísica” (Victoria y Luna, 2010). Los valores medios para la Capa 1: 300 a 220 m aprox. y para la Capa 2: 270 a 260 m aproximados, corresponden a los extraídos del modelo numérico Modflow.

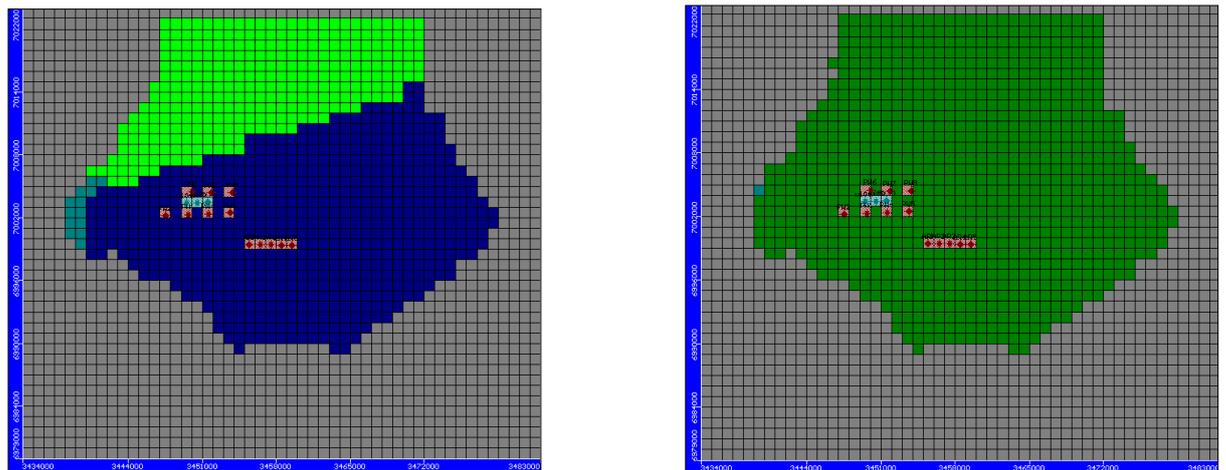


Figura 5-13: Zonificación de la conductividad hidráulica: Capa 1 (izq.) y Capa 2 (dcha.).

Los colores verdes (flúor, claro y oscuro) y azul representan los diferentes valores de la distribución de la conductividad hidráulica y conforman el área activa del modelo, mientras que el color gris representa el área inactiva o de flujo nulo del modelo numérico.

Sobre la base de ensayos de bombeo realizados en los pozos de MAA, se asignó a la primera capa en el sector ubicado al Sur de la Ruta Nacional N°40, la permeabilidad de 7 m/d. Al Norte de la ruta se asignó la permeabilidad de 2 m/d, donde para este sector "... se localizan sedimentos cuaternarios más finos" (Victoria y Luna op. cit.). Para la segunda capa se consideró una única permeabilidad de 0,7 m/d, "...según datos de ensayos de bombeo de los pozos WEA-4 de 302 m profundidad y WMA2 de 263 m profundidad" (Victoria y Luna op. cit.). En el sector del Aeropuerto, para simular el umbral sobre el cual vierte agua subterránea hacia la zona de Nacimientos, se impuso una permeabilidad muy baja, del orden de 0,01 m/d. (Figura 5-13 y Figura 5-14)

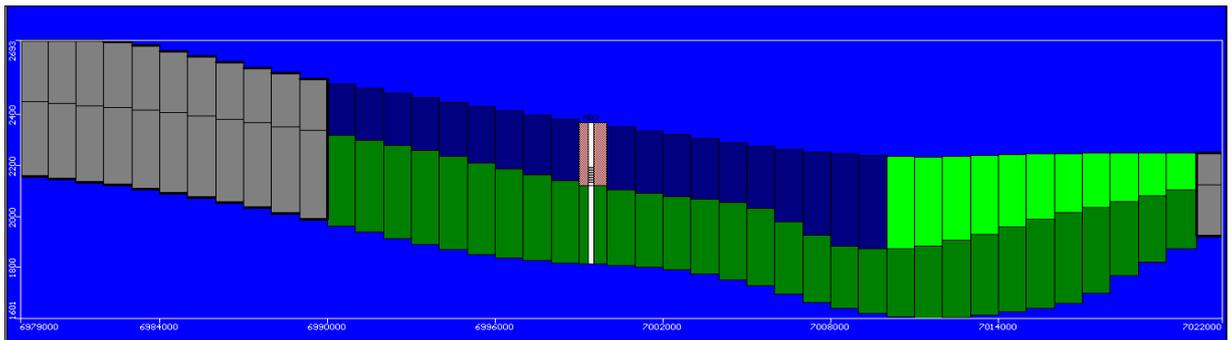


Figura 5-14: Perfil longitudinal Sur-Norte de la distribución de K en las capas del modelo numérico.

Los valores del coeficiente de almacenamiento para la capa 1 los fijaron en 0,12 y 0,03 para los sectores al Sur y Norte de la Ruta Nacional N°40 respectivamente. El valor para la segunda capa cuando está completamente saturada es  $1 \times 10^{-5}$  y cuando opera como acuífero libre 0,01. (Figura 5-15; Figura 5-16)

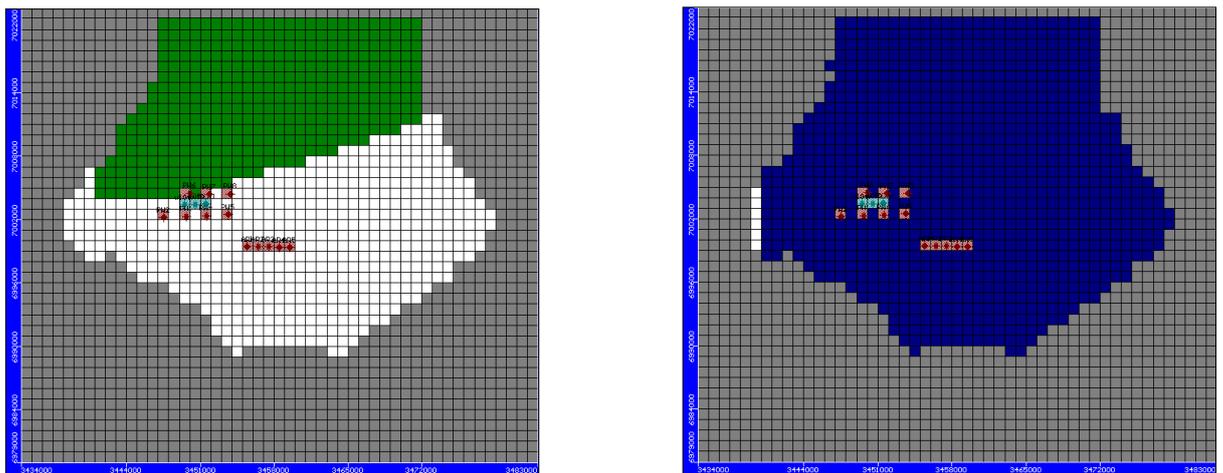


Figura 5-15: Zonificación del Coeficiente de Almacenamiento, Capa 1 (izq.) y Capa 2 (dcha.).

Los colores verde, blanco y azul representan los diferentes valores del coeficiente de almacenamiento distribuido en zonas dentro del área activa del modelo numérico, el color gris representa el área inactiva.

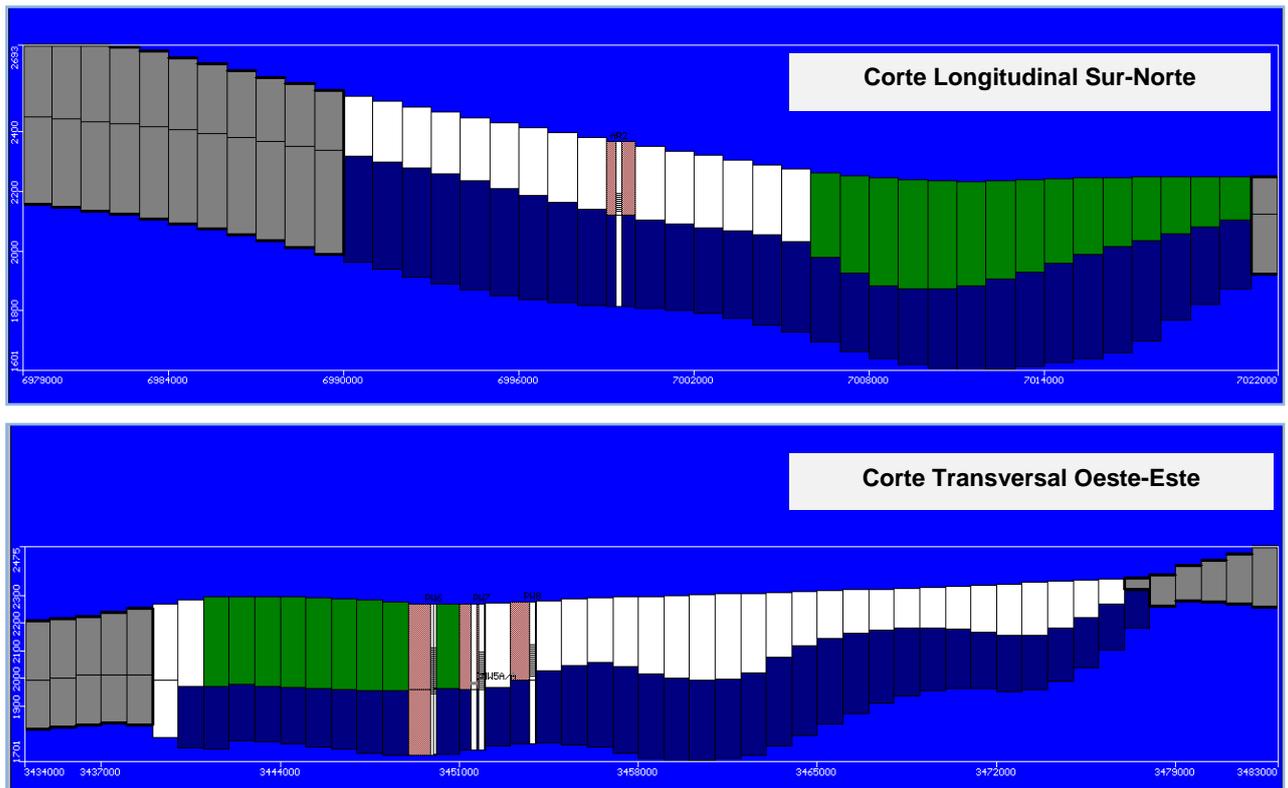


Figura 5-16: Perfil transversal y longitudinal de la distribución de S en el área activa del modelo numérico.

Para el INA-CRAS 2010, los términos del balance de la cuenca subterránea son: recarga, bombeo, flujo a Los Nacimientos y evapotranspiración en el bajo central. (Tabla 5-3)

Tabla 5-3: Balance del modelo conceptual INA-CRAS 2010.

Términos del Balance de la Cuenca	
Entradas	Salidas
Recarga	Flujo a Los Nacimientos
	Evapotranspiración (Sector A + Sector B)
	Bombeo

Para la estimación de la recarga de la cuenca utilizaron información de caudales de arroyos obtenida por la compañía BHP en el periodo 1997-1985, correspondiente al Nevado del Aconquija y sierras de las Cuevas y Chango Real, su distribución se ve en la figura siguiente. (Figura 5-17)

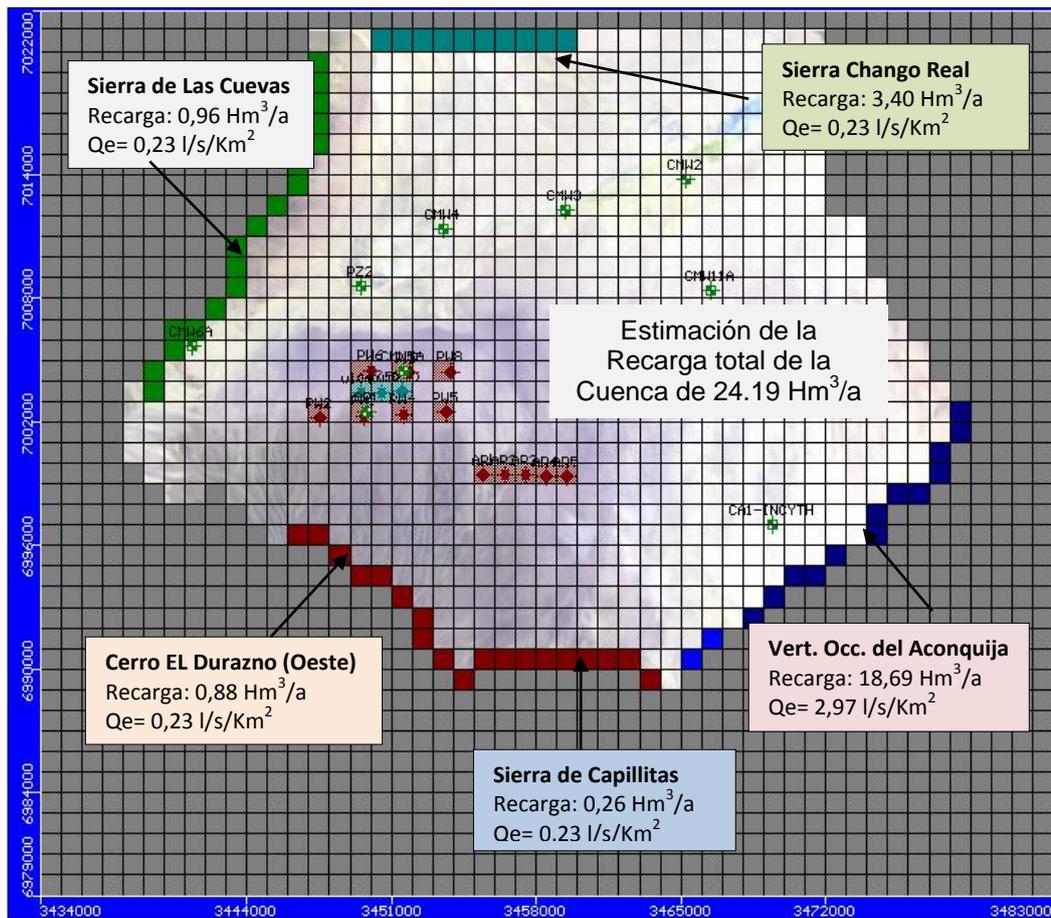


Figura 5-17: Distribución de la Recarga en el área activa del modelo numérico INA-CRAS 2010.

La metodología aplicada con la que se obtuvieron los caudales específicos ( $Q_e$ ), fue a partir de la relación de los promedios de los valores de caudales de toda la serie y la superficie de aporte de las cuencas respectivas. Para la sierra de Aconquija se consideró que la recarga al CA se origina en las cuencas ubicadas al sur del río Cerrillos y, en función de la conceptualización del modelo, se definió que, debido a fenómenos estructurales, los ríos Cerrillos, El Tesoro y El Chiflón recargan el acuífero que subyace al río Santa María al este del Puesto Las Abritas. Para los aportes del sector del cerro el Durazno y de la sierra de Capillitas, se aplicaron a las respectivas áreas de aporte el  $Q_e$  de las sierras de las Cuevas y Chango Real. Las recargas se aplicaron en las celdas activas de los bordes del modelo. (Tabla 5-4)

La evapotranspiración, en la depresión central, que se extiende a lo largo de la Ruta Nacional N°40, por ejemplo: el área con niveles menos profundos que 2 m tiene una superficie de 30 Km<sup>2</sup>, es por ello que se considera a este término del balance como uno de los más importantes de descarga de la cuenca. El valor máximo fue considerado igual a la medida en un tanque evaporimétrico, 1.800 mm/a. La profundidad de extinción fue propuesta en 1,5 m, representativa de suelos arenosos a franco arenosos. Consideraron que el "sector "A" de EVT ubicado en la Pampa de los Pozuelos era el más afectado por el bombeo de MAA". (Victoria y Luna, op. cit.)

Tabla 5-4: Cálculo de la recarga de la cuenca de CA.

Área de Aporte	Superficie Km <sup>2</sup>	Caudal Específico L/seg/Km <sup>2</sup>	Recarga Hm <sup>3</sup> /a
Aconquija	199,5	2,97	18,69
Las Cuevas	131,8	0,23	0,96
Chango Real	468,5	0,23	3,40
El Durazno	121,3	0,23	0,88
Capillitas	36,0	0,23	0,26
<b>Totales</b>	<b>957,10</b>	<b>0,80</b>	<b>24,19</b>

La descarga de CA hacia Los Nacimientos se calculó en 5 Hm<sup>3</sup>/a, en base a la diferencia de caudales medidos en Los Nacimientos de Abajo con respecto al del río Las Cuevas, conceptualmente se explica este fenómeno de circulación de flujo subterráneo desde el CA hacia la cuenca del río Los Nacimientos estableciendo que: "...el CA vierte por sobre un umbral ubicado en el área del Aeropuerto de MAA, como consecuencia de un fenómeno estructural que probablemente levantó el basamento terciario cuya permeabilidad es baja" (Victoria y Luna, op. cit.). (Tabla 5-5)

Como piezometría inicial de simulación (al momento de iniciar la explotación) utilizaron los niveles de julio de 2009 y procesaron sin bombeo numerosos periodos, para que los niveles del agua subterránea se estabilizaran.

Tabla 5-5: Términos del balance hidrológico en situación sin explotación.

Termino del Balance	Valor (Hm <sup>3</sup> /a)
Recarga	24,2
Evapotranspiración Bajo Central	Sector A: 6,4
	Sector B: 11,9
Flujo a Nacimientos	5,7

La situación de explotación simulada fue: un campo de bombeo de MAA activo en el periodo comprendido entre 1997-2017 con un caudal de extracción de 26,6 Hm<sup>3</sup>/a, al que luego se suma el bombeo de MAR en el periodo 2014-2044 con un caudal de 14 Hm<sup>3</sup>/a, presentando simultaneidad de extracciones en 3 años en los cuales el caudal de bombeo será 40,6 Hm<sup>3</sup>/a.

La simulación comprende 13 periodos o años, siendo el primer año julio 1997-junio 1998 y el último julio 2009-junio 2010. (Tabla 5-6 y Tabla 5-7)

Tabla 5-6: Bombeo de MAA Periodo 1997-2010.

Periodo	Años	Bombeo Hm <sup>3</sup> /a	Bombeo Total Hm <sup>3</sup>
Julio 97 - Junio 06	9	18.2	163.8
Julio 06- Junio 07	1	21.8	21.8
Julio 07- Junio 10	3	26.6	79.8
<b>Totales</b>	<b>13</b>		<b>295.4</b>

Tabla 5-7: Valores Acumulados: Componentes del Balance en un periodo de 13 años (1997-2010).

Componente	Valor (Hm <sup>3</sup> )
Recarga	314,5
Bombeo	265,7
Descarga a Los Nacimientos	71,5
Descarga por Evapotranspiración	166,5
Variación Volumen Almacenado	189,0
$\Delta A = \text{Ingresos: } 314,5 \text{ Hm}^3 - \text{Egresos: } 503,7 \text{ Hm}^3$	-189,0

## 5.7 Modelo Minera Alumbra por Australasian Groundwater Environmental 2013

El modelo conceptual de Australasian Groundwater Environmental Consultants Pty. Ltd. (AGE), elaborado para MAA en el año 2013, fue una actualización del modelo AGE de 2005 debido a nueva información surgida de la investigación realizada hasta esa fecha. En este modelo se presenta un esquema de múltiples capas que incorporan la presencia de una “capa potencialmente semi-confinante dentro del campo de los pozos” (AGE, 2013).

En este sistema hidrogeológico, los procesos corresponden a: la recarga directa obtenida de los registros desde 1980 hasta mediados de 2012 y “asumiendo cierta incertidumbre en el cálculo” (AGE, op. cit.), el promedio asciende a 180 mm/año, valor comparable con el informado por AGE en 2005 de 159 mm/a, promedio. AGE considera que la principal fuente de recarga de agua subterránea es el escurrimiento desde los cordones montañoso que rodean la zona más escurrimiento de largo plazo proveniente del deshielo, y consideran una recarga diaria promedio entre 110.000 m<sup>3</sup>/día y 164.200 m<sup>3</sup>/día. (Figura 5-18)

Se presenta la descarga de la cuenca por procesos de flujo subterráneo: hacia el Este y el Suroeste, hacia los ríos Santa María y Los Nacimientos debido a que los mismos “mantienen su caudal todo el año mediante la descarga de agua subterránea ya sea de la cuenca o de las montañas que los rodean” (AGE, op. cit.). Introduce otro término, la evapotranspiración (EVT), concentrada en una zona deprimida y alineada con la Ruta Nacional N°40, que configura “una importante zona de descarga de agua subterránea según demuestra el nivel freático somero, la superficie húmeda del suelo con la presencia de depósitos salitrosos producto de la evaporación sobre la superficie y la cobertura vegetal del suelo” (AGE, op. cit.). MAA estimó la evaporación anual potencial en la zona entre casi 2.400 mm y 2.500 mm, en base a información meteorológica recopilada entre julio de 2004 y junio de 2005 en tres estaciones meteorológicas. Finalmente el último término de salida es el régimen de extracción del campo de pozos que fue variando entre 50.000 m<sup>3</sup>/día y 70.000 m<sup>3</sup>/día desde el año 2005.

El agua subterránea está contenida tanto en los sedimentos de edad Cuaternaria (Q1), que constituyen el acuífero primario dentro de la cuenca debido a su naturaleza gruesa y no consolidada, “lo que indica un acuífero excelente” (AGE, op. cit.), como en los fanglomerados Cuaternarios subyacentes, y las arenas y conglomerados consolidados de edad Terciaria, conformando acuíferos secundarios debido a la menor conductividad hidráulica generada por la consolidación.

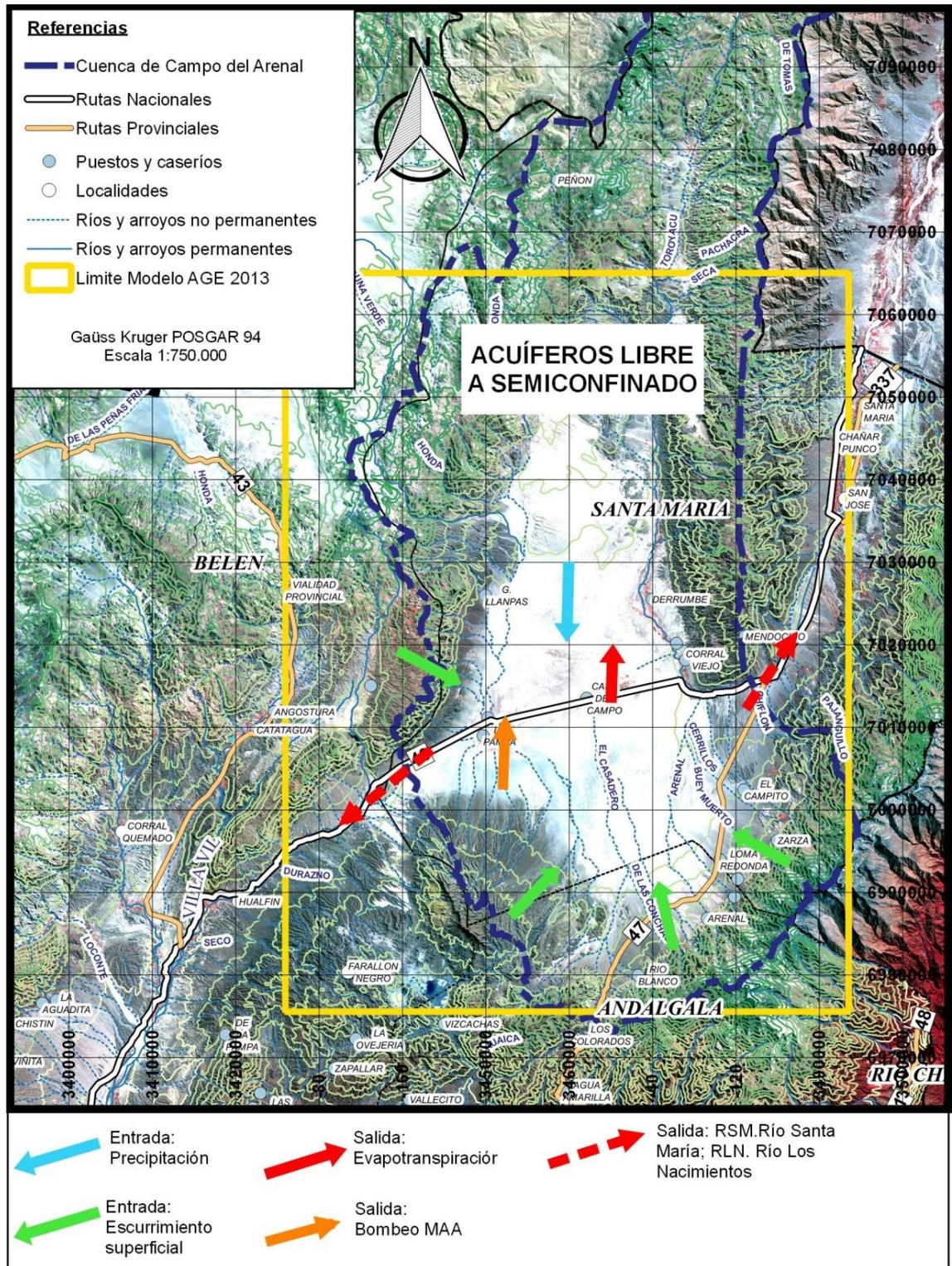


Figura 5-18: Modelo conceptual de AGE 2013 para MAA.

En cuanto al espesor del acuífero esperan sea mayor de 200 m debido a que “ninguno de los pozos perforados interceptó la roca de basamento” (AGE, op. cit.), y destacaron el dato

informado por WMC del año 2006, según el cual el espesor saturado del acuífero puede llegar a un máximo de 430 m.

El único valor de rendimiento específico de 0,18 fue obtenido a partir del análisis del ensayo de bombeo en el pozo CA1, indica que el acuífero tiene un elevado nivel de almacenamiento disponible, con una  $K = 70,8$  m/d, mientras que la conductividad hidráulica a partir de los ensayos de bombeo y análisis granulométricos del campo de los pozos de MAA varía de 10,8 a 2,4 m/d y en pozos de MAR varía de 7,22 a 0,08 m/d.

AGE elaboró su modelo numérico incorporando nueva información en un modelo formulado en cuatro capas y la presencia una barrera de flujo entre la cuenca de CA y la cuenca del río Los Nacimientos. (Figura 5-19)

El modelo fue calibrado en estado estacionario como transitorio a través de una simulación combinada, utilizando los niveles calibrados de agua subterránea en estado estacionario como puntos de partida para la simulación transitoria. El modelo simuló el bombeo histórico y la extracción planificada de agua subterránea. La calibración transitoria comenzó el 12 de mayo de 1997, y tomó los regímenes mensuales promedio de bombeo suministrados por MAA. El modelo predictivo tomó las tasas de recarga y se determinó la distribución durante la calibración.

El código empleado para el modelo numérico corresponde a Modflow-Surfact. El tamaño de las celdas de la grilla del modelo oscila entre los 50 m x 50 m en el área del campo de pozos hasta 500 m x 500 m en los extremos del dominio del modelo. AGE en esta revisión se dividió el modelo en cuatro capas a los efectos de representar mejor una unidad semi-confinada postulada por MAA.

Se utilizaron tres zonas de propiedades hidráulicas en base al mapeo geológico del área. La zona de conductividad hidráulica más elevada (gravas y arenas cuaternarias sueltas) "fue definida por una distribución de valores a través del proceso de *punto piloto*, este enfoque permite que la heterogeneidad espacial esté mejor representada en el modelo" (AGE, op. cit.). Se aplicó la recarga a todas las celdas en el dominio activo del modelo. La simulación numérica realizada por AGE (2005) indicó una tasa de recarga de 146.400 m<sup>3</sup>/día.

Las condiciones límite en los bordes del modelo fueron definidas como "sin flujo o flujo nulo", estos límites fueron impuestos sobre todo el perímetro de la cuenca en el contacto del basamento de sierras circundantes con los sedimentos aflorantes. Una condición de borde de "carga fija o carga hidráulica constante" representa caudal de base en el río Los Nacimientos, determinada mediante un examen de imágenes satelitales.

Los caudales de los ríos Santa María y de otros drenajes superficiales fueron representados mediante el borde del paquete Modflow "river". De acuerdo a AGE, "Sólo los ríos Santa María y el Ingenio tienen capacidad para suministrar agua directamente al acuífero debido al caudal continuo" (AGE, op. cit.) La descarga fluvial fue aplicada en cinco zonas: Cuevas/Nacimientos; Las Conchas; Campo El Ingenio; Santa María y Drenaje superior, donde la conductancia fue influenciada por las propiedades físicas de los ríos (ancho, profundidad del lecho y profundidad del agua en el río).

La descarga por EVT proveniente de la depresión salina, fue determinada a partir de mapas topográficos, de imágenes satelitales y delimitada en el centro de la cuenca a ambos lados de la Ruta Nacional N° 40 en sentido Suroeste-Noreste (Los Pozuelos –Santa Clara –río Santa María), asumiendo la profundidad de extinción en 1,5 m. La tasa EVT máxima fue configurada a un valor promedio anual constante de 4,3 mm/día para los escenarios predictivos.

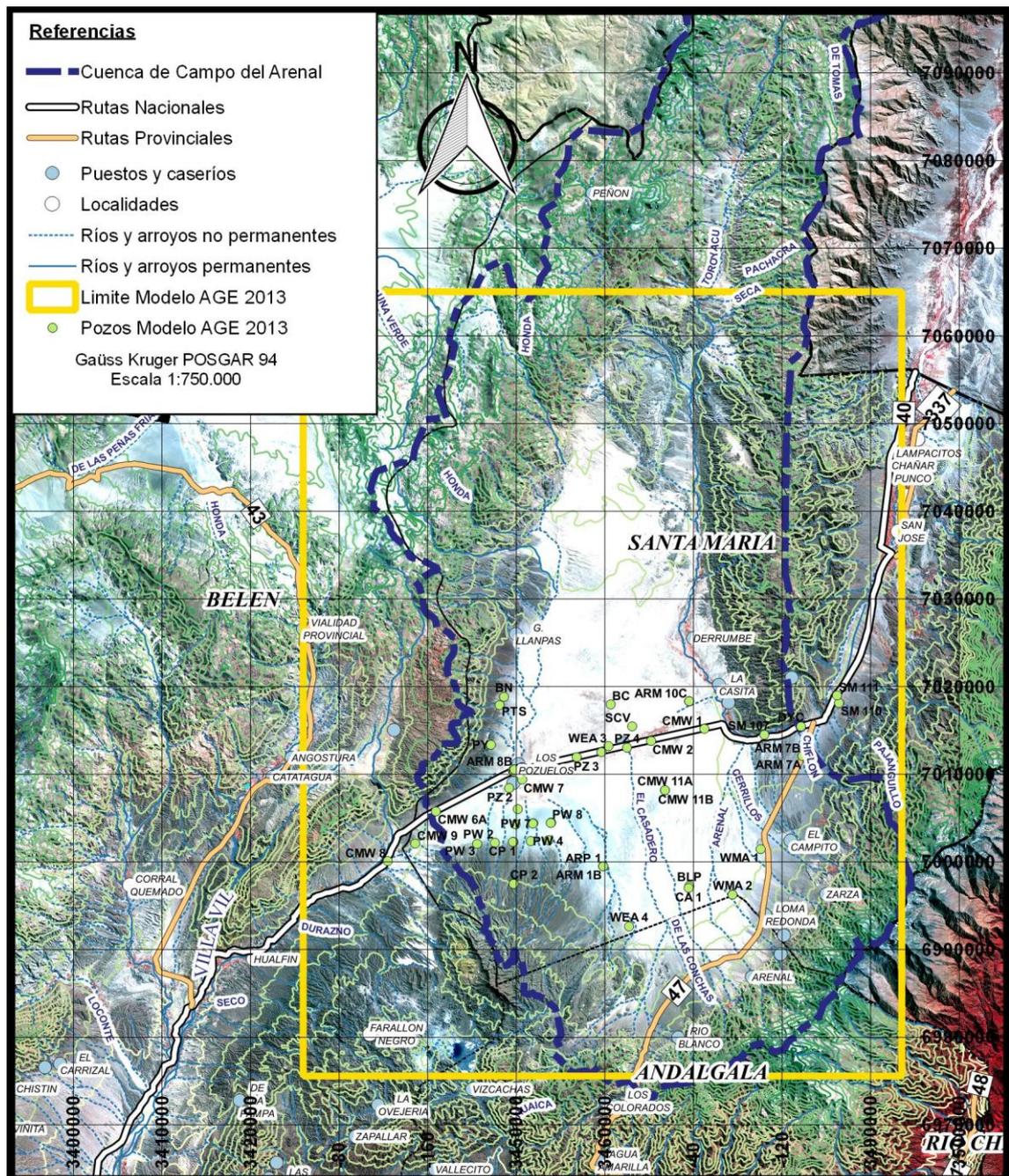


Figura 5-19: Área del modelo numérico AGE 2013 para MAA y pozos de monitoreo de CA.

La distribución de la recarga del área a partir de la precipitación y del escurrimiento superficial desde los cordones montañosos circundantes, fue zonificada en base a la geología superficial en tres zonas diferentes (fanglomerados de edad cuaternaria; depósitos clásticos de edad terciaria; y gravas y arenas cuaternarias sueltas en el centro del CA). Se aplicó una barrera de flujo horizontal entre los pozos PW03 y CMW06 para simular la presencia de un límite hidráulico. Esta barrera permitió simular mejor la conductancia entre el campo de pozos de MAA y CMW06A ya que reduce la conexión hidráulica entre la cuenca del CA y la cuenca de Los Nacimientos. El límite fue asignado en un punto nominal y fue aplicado a todas las capas del modelo en ese punto.

Para la discretización temporal el modelo utilizó períodos de esfuerzo de variada duración: desde 1997 a 2012 = 1 mes; desde 2012 a 2043 = 3 meses y desde 2043 a 2143 = 1 año. El modelo fue ejecutado hasta fines de 2144 para evaluar la tasa de recuperación de agua subterránea tras la salida de servicio del campo de pozos de MAA en 2018. Por lo tanto el período total de simulación se extendió desde 1997 hasta 2144 (inclusive), es decir, aproximadamente 148 años de duración.

Los objetivos de la calibración del modelo fueron: reproducir los niveles estimados de agua subterránea que existían en CA con anterioridad y los medidos con posterioridad a la puesta en servicio del campo de pozos de MAA como meta primaria; y obtener las descargas a los RSM y RLN y de EVT del salitral, como meta secundaria. La calibración del modelo fue realizada utilizando tanto las simulaciones en estado estacionario como transitorio en una ejecución combinada del modelo.

Los niveles de agua de 19 pozos de monitoreo, que se consideraba que no eran afectados por el campo de pozos de MAA, fueron utilizados como valores para la calibración en estado estacionario.

Los niveles transitorios de agua subterránea, (medidos luego de la puesta en servicio del campo de pozos), fueron interpolados desde los hidrogramas de los pozos de monitoreo. Se estimó que la fluctuación natural de los mismos en los pozos de monitoreo antes de la puesta en servicio del campo de pozos de MAA variaba entre casi 0,3 m (CMW04) con fluctuaciones registradas en la mayoría de los pozos de entre casi 1 m y 1,5 m.

Los valores de descarga de agua subterránea en estado estacionario simulada hacia el río Santa María  $103.005 \text{ m}^3/\text{d}$ , la descarga al río Los Nacimientos  $8.689 \text{ m}^3/\text{d}$  y finalmente hacia el salitral fue de  $25.910 \text{ m}^3/\text{d}$ .

“El error del balance de masas, es decir, la diferencia entre las entradas y salidas del modelo, al concluir la ejecución de calibración, expresado como porcentaje de discrepancia, fue 0,05%, lo que indica precisión de la solución numérica y estabilidad general del modelo” (AGE, op. cit.).

## 6 RESULTADOS ALCANZADOS

### 6.1 DISCUSION DE ANTECEDENTES

En esta sección, se describirán las limitaciones y los aportes de cada modelo presentado precedentemente, con el objetivo de poder comparar cuál de ellos, a posteriori reproduce con mayor precisión el funcionamiento del sistema acuífero de CA.

Seguidamente se presentan dos tablas comparativas que sintetizan los principales procesos considerados en los distintos modelos analizados. La Tabla 6-1 muestra las diferencias entre los modelos conceptuales y la Tabla 6-2 muestra las diferencias entre los modelos numéricos.

Finalmente se presenta una propuesta de modelo conceptual actualizada.

#### 6.1.1 Limitaciones de los modelos conceptuales y numéricos implementados

##### **Modelo Minera Alumbraera por Hydro-Geo Consultants 1995**

Este modelo plantea la primera idea del funcionamiento del sistema hidrogeológico y presenta un modelo conceptual inicial de un acuífero libre, con características de muy buena permeabilidad en el cual se representan como procesos a: la recarga directa y principalmente a la recarga por escurrimiento producido en las laderas. En el proceso de descarga de CA se considera a: la descarga subterránea hacia el río Santa María y al bombeo de MAA. Este modelo no considera descarga por Evapotranspiración ni descarga subterránea a través del río Los Nacimientos.

Si bien se establece como área de estudio a la cuenca hidrológica de CA de 1400 Km<sup>2</sup>, modelaron numéricamente un área menor de 750 Km<sup>2</sup>.

En particular, en este modelo conceptual se plantea la discusión sobre los datos de profundidad a la que se encontraba el agua subterránea en algunos sectores de la cuenca y sobre los cuales se basó Hydro-Geo para considerar como libre al acuífero. En este sentido, algunos investigadores presentan los siguientes ejemplos que ponen de manifiesto la duda sobre el postulado original de acuífero libre: tales son los casos de los pozos de monitoreo profundo CP1 que a principios del año 2006 cuando se llegó a la profundidad de 95 m, este se encontraba seco. *“Cabe la duda sobre una respuesta correcta en los niveles de este pozo y sobre la validez de los registros de tantos años”* (Ubal dini, 2006); el pozo CP-2 con filtros desde 156-174 m de profundidad y con una profundidad de nivel del agua en estado estacionario de 170 m (del 04/09/1993) que no se volvió a registrar en posteriores monitoreo e *“Hydro-Geo lo consideró en los mapas de isopiezas que muestran un escurrimiento desde el Sur que parece poco consistente”* (Ubal dini, op, cit.). También en este modelo se presenta el caso del pozo destinado a producción PW3, que no fue puesto en funcionamiento debido a que en su columna litológica, a partir de los 120 m de profundidad, observaron abundante material fino (limos).

##### **Modelo Provincia de Catamarca por el INA 1998**

Este modelo incorpora la conceptualización de Hydro-Geo, es decir en líneas generales presenta un modelo basado en un único acuífero libre en el que la conceptualización de los procesos modelados es similar: considerando como la principal fuente de recarga a la

originada sobre las laderas circundantes, a diferencia del modelo anterior de Hydro-Geo en este caso no considera recarga directa por precipitación, plantea la descarga subterránea por el río Santa María y por bombeo intensivo de MAA. Lo que representa una notable diferencia en este modelo, es la incorporación del proceso de evapotranspiración, al que el INA le atribuye un valor casi comparable con el de bombeo de MAA, lo que destaca la importancia de incorporar este proceso. El INA, modela numéricamente un área de 805 Km<sup>2</sup>, mayor que la de Hydro-Geo, pero igualmente localizada en cuanto a la extensión de la cuenca en general.

En cuanto al cálculo de la recarga indirecta o por laderas, el INA planteó la metodología de calcular para cada área de aporte, el caudal específico (Qe) para cada una de las subcuencas que conforman las áreas de aporte al CA y aplicando el criterio de considerar el Qe medio de ríos que drenan cuencas similares, impuso el Qe del Río Belén en el sector del río Las Cueva y sector sur del CA y el Qe del Río Andalgalá a los aportes provenientes de la Sierra de Aconquija en su vertiente occidental. Cabe destacar que esta simplificación plantea la duda sobre si los valores incorporado por el INA en esos sectores son más elevado que los reales, debido a la diferencia de las áreas de aporte entre las mencionadas cuencas.

Otro concepto llamativo es que no consideraron recarga directa (precipitación), al sistema de aguas subterráneas, quitando este parámetro dentro de los procesos a considerar.

Otra limitación en la conceptualización de este modelo es que se partió de la idea original planteada por Hydro-Geo, de un acuífero de tipo libre y aunque reconocieron que “la permeabilidad, según los ensayos de bombeo disponibles del pozo PW1 con pozo de monitoreo CP1, era bastante más baja que la que se debía esperar y no descartan que la formación explotada no sea cuaternaria sino terciaria superior” (Victoria et al., 1998), pero no cambian la línea de investigación y continúan con el mismo criterio que Hydro-Geo en 1995.

En cuanto a la profundidad del basamento, lo establecieron arbitrariamente 100 m por debajo del nivel del agua, conformando en espesor saturado homogéneo de 100 m, aunque habían realizado campañas de exploración de subsuelo, no incorporan sus propias observaciones.

Como aportes de información, para la elaboración de este modelo, se realizaron estudios de hidroquímica sobre el río Santa María y de caudales en el río Los Nacimientos, y la introducción de un nuevo componente en el balance: la Evapotranspiración, utilizando 26 freatómetros para evaluar su comportamiento.

### ***Modelo Minera Agua Rica por BHP-Aquaconsult 1999***

BHP-Aquaconsult presenta sólo un modelo teórico, que se opone conceptualmente a sus predecesores planteando acuíferos semiconfinados a confinados en el cual su geometría es controlada por fallas rectilíneas que también afectan la secuencia terciaria, formando una serie de bloques estructurales elevados y plegados. En esta conceptualización las unidades acuíferas potenciales pertenecían a las arenas Cuaternarias no consolidadas y los depósitos de las Formaciones Araucanense y Jujeño (Mioceno superior – Plioceno).

Se observa como aporte principal en este modelo que: la exploración permitió las definiciones sobre estructuras del subsuelo que generan una barrera en el flujo subterráneo, en el sector al este del puesto en Ingenio, que cruza en sentido SE-NW hacia el río Santa María hasta puesto de Pie de Médano, como resultado de la aplicación de métodos geofísicos, campañas de aforos de ríos, perforaciones y monitoreo de niveles.

Se consideran un importante aporte al conocimiento como resultados de prospección-exploración del área.

### ***Modelo Minera Alumbra por Australasian Groundwater Environmental 2002***

Este modelo AGE en líneas generales incorpora lo realizado por Hydro-Geo 1995, pero modifica los valores de recarga y descarga y construye su modelo numérico con escasas modificaciones, es decir el tipo de acuífero continúa siendo libre, lo que amplían sensiblemente es el área modelada, de 750 Km<sup>2</sup> a 1.390 Km<sup>2</sup>.

### ***Modelo Minera Agua Rica por Water Management Consultants 2007***

En lo referente al modelo conceptual, se plantea sobre una extensión de cuenca de 3444 Km<sup>2</sup>, considera la existencia de acuíferos semiconfinados a confinados, introduce la complejidad estructural que eleva bloques terciarios en el sector Este de la cuenca y condicionan las áreas de aporte proveniente de la Sierra de Aconquija.

En relación a las limitaciones que presenta este modelo numérico, se señalan las siguientes: aunque fue el primer modelo numérico de los desarrollados hasta ese momento en cuatro capas, no se especifican los espesores de las mismas, siendo este último un dato fundamental, en la discretización del acuífero solo plantea un espesor de 200 m como supuesto, es decir regresa al punto de partida en considerar un acuífero de espesor homogéneo.

Los resultados la calibración del modelo, realizado por WMC en régimen estacionario, en un período previo al inicio de la extracción por parte de MAA, se representó en unas figuras que por razones de escala, no se pudieron analizar.

Los escenarios predictivos son muy confusos en sus descripciones y resultados debido a que por ejemplo el Escenario A solo considera el bombeo de MAA, por lo tanto no podría aplicarse la variante 1 ya que corresponde a pozos de bombeo de MAR; mientras que el Escenario B, considera solo el impacto que representa el bombeo de MAR con dos variantes que involucran diferentes distribuciones de campos de bombeo en la cuenca de CA. Estos escenarios predictivos no representan el impacto global de la situación planteada por WMC, es decir, la presencia de campos de pozos de bombeo con distribuciones diferentes, de dos Empresas mineras distintas, que desarrollarían su actividad de extracción en forma simultánea, en el periodo de cinco años (2009 a 2014). Se destaca que los resultados de las simulaciones predictivas no pudieron analizarse debido a la escala de las figuras.

### ***Modelo Provincia de Catamarca por INA-CRAS 2010***

Presentan un modelo nuevo ya que dejan de lado la idea de acuífero libre e incorporan sus observaciones de la geología del subsuelo y formulan un modelo de acuífero libre a semiconfinado en dos capas. Aunque que no modifican el área modelada, esta sigue siendo muy restringida al sector Centro Sur de la cuenca.

Este modelo no considera los procesos de recarga directa sobre la cuenca y de descarga a través de flujo subterráneo por el río Santa María.

Es muy interesante la incorporación en este modelo de una barrera de flujo desde el sector Centro Este hasta Pie del Médano, que limita la vinculación entre el río Santa María y la cuenca subterránea de CA y que a su vez limita el aporte por infiltración del escurrimiento superficial de los cursos provenientes del sector norte de la sierra del Aconquija (ríos Cerrillos, El Tesoro y El Chiflón). Coincidirían en este postulado con el realizado por WMC

en 2007, quienes lo atribuyen a una complejidad estructural que eleva bloques terciarios en ese sector.

Aunque ajustaron los valores de recarga por laderas, debido a la introducción de datos de aforos realizados por la consultora BHP en la vertiente occidental del Nevado del Aconquija, periodo Octubre 1997- Septiembre 2005 y ríos de la vertiente oriental de la Sierra de las Cuevas, periodo Noviembre 1997 – Octubre 1998, se observa que, en la simulación numérica, algunos sectores obtienen niveles de agua más bajos que los medidos, por ejemplo los pozos de observación CMW2, CMW3, CMW11A y en otros, los niveles son bastante más altos por ejemplo en el WEA4. Por lo que se plantea la discusión de si son representativos para las diferentes áreas. Además, los valores considerados de recarga para el sector Sur de la cuenca (El Durazno y Capillitas) corresponden a los de la Sierra del Hombre Muerto y Las Cuevas, con áreas de aporte no comparables.

En el área Sureste de la cuenca, la capa 1 o superior se seca, es decir que el modelo ubica el nivel del agua dentro de la segunda capa. Considerando esto, el pozo CA1 según la simulación numérica está contenido en la segunda capa, es decir en sedimentos terciarios de baja permeabilidad, aunque este pozo tiene buen rendimiento, propio de sedimentos cuaternarios de permeabilidad mucho mayor que la asignada a la capa 2. Para explicar esto el INA-CRAS asumió que se debe a la morfología de las bases y techos de las capas, las que a su vez resultaron, principalmente, de la interpretación geofísica. En cuanto a esta última observación se discute el hecho que las capas ingresadas al modelo numérico sí presentan una morfología definida, como se puede observar en los cortes longitudinales y transversales del modelo de las imágenes 5-14 y 5-16, razón por la cual se pone en duda esa afirmación y se plantea la hipótesis que en el sector del pozo CA1 el acuífero presenta un comportamiento particular conformando una subcuenca.

### ***Modelo Minera Alumbra por Australasian Groundwater Environmental 2013***

La diferencia principal de este con los otros modelos desarrollados para MAA es que, luego de incorporar información de subsuelo proveniente de nuevas perforaciones y de técnicas geofísicas, modifican el concepto de un único acuífero libre que desarrollaron desde 1995 y plantean la presencia de un acuífero semiconfinado en el sector del campo de pozos, conformando su modelo por acuíferos libre y semiconfinado, que son modelados numéricamente en cuatro capas de espesores variables, basándose en "...la variabilidad de las respuestas en el nivel de agua a diversas profundidades durante la extracción de agua" (AGE, 2013)

Aunque asumen un acuífero primario de edad Cuaternaria (Q1) de naturaleza gruesa y no consolidada, "...lo que indica un acuífero excelente" (AGE, op. cit.) incorporan finalmente el perfil litológico del pozo de producción PW03, del año 1996, en el cual se observaron sedimentos de menor permeabilidad (limos arenosos), durante la construcción del pozo a partir de los 120 m de profundidad bajo el nivel del suelo.

La barrera hidráulica de flujo horizontal que se presenta en el modelo conceptual es incorporada en el modelo numérico, pero no representada como una típica barrera que involucre varias celdas de la grilla, sino que es representada en una sola celda, lo que pone en dudas el concepto de "barrera".

Aunque el modelo numérico presentado por AGE en 2013 explica detalladamente todos los procesos y metodologías empleados para calcular los parámetros del acuífero no presenta los datos que finalmente introdujo en su modelo por ejemplo: conductividad hidráulica,

rendimiento específico y espesores aproximados de las capas, incorporando un factor de interrogante, tal omisión de datos.

El modelo conceptual AGE de 2013 integra todos los procesos que se venían planteando en los diferentes modelos de AGE y de otras Empresas y Organismos. En este modelo mantiene la recarga directa sobre CA y como recarga principal la originada en las laderas que se infiltran por el escurrimiento de los cursos de ríos; en cuanto a la descarga mantiene el flujo hacia el río Los Nacimientos y el río Santa María, como así también considera la generada por el bombeo de MAA, e incorpora la Evapotranspiración que, en este planteo, supera en gran medida las precipitaciones de todo el año. Este modelo se realiza para un área de 1390 km<sup>2</sup>, la más extensa hasta ahora modelada.

Se puede decir que, desde el punto de vista conceptual, este es el modelo más robusto que se ha formulado para la cuenca de CA, producto de 16 años de exploración e investigación de la misma.

Tabla 6-1: Discusión de Modelos Conceptuales de CA.

Fuentes Analizadas	Tipo de Acuífero	Procesos						Observaciones
		Recargas		Descargas				
		Recarga directa: Precipitación	Escurrimiento Superficial por Laderas	Subterránea Río Santa María	Subterránea Río Los Nacimientos	EVT	Bombeo MAA	
<b>Hydro-Geo 1995</b>	Acuífero Libre	✓	✓	✓			✓	Volumen de recarga total (Precipitación + Escurrimiento Laderas) = 2.415 l/s (76,2 Hm <sup>3</sup> /a)
<b>CRAS 1998</b>	Acuífero Libre		✓	✓		✓	✓	Recarga laderas: Caudal específico de cuencas similares
<b>BHP Aquaconsult 1999</b>	Acuíferos Semiconfinados a Confinados	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Aunque establecen que es un modelo teórico, presentan un bombeo de MAR
<b>AGE 2002</b>	Acuífero Libre	✓	✓	✓	✓		✓	
<b>WMC 2007</b>	Acuíferos Libres a semiconfinados		✓	✓	✓	✓	✓	Sedimentos no consolidados y fanglomerados cuaternarios, formaciones terciarias y volcánicas clásticas
								Geometría: controles estructurales
<b>CRAS 2010</b>	Acuífero Libre y Semiconfinado		✓		✓	✓	✓	Recarga laderas: aforos BHP
								ET: 1800 mm/a (Prof. extinción = 1,5 m; Suelo: arenoso a franco arenoso)
								Barrera estructural: sedimentos terciarios condicionan aporte A con quija a CA.
<b>AGE 2013</b>	Acuíferos Libre a Semiconfinado	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Barrera de flujo entre CA y la Cuenca de Río Los Nacimientos.
								EVT prof. extinción 1,5 m.

Tabla 6-2: Discusión de Modelos Numéricos de CA.

Fuentes Analizadas	Área modelada	N° de Capas	Espesor Capa	Periodo de simulación	Regimen Temporal	Parámetros hidráulicos		Procesos simulados						Observaciones
						k	S	Entradas		Salidas				
								Recarga Directa	Recarga Bordes	Río Santa María	Río Los Nacimientos	Bombeo	EVT	
Hydro-Geo 1995	750 Km <sup>2</sup>	1 capa	3 m a 630 m	25 años	Transitorio	k= de 1,2 x 10 <sup>-3</sup> a 7,4 x 10 <sup>-3</sup> cm/s	S: 0,18	160 mm/a	23.014 m <sup>3</sup> /d (8,4 Hm <sup>3</sup> /a)	190.100 m <sup>3</sup> /día (69,4 Hm <sup>3</sup> /a)			Inicial: 600 l/s (18,9 Hm <sup>3</sup> /a) Final: 800 l/s (25,2 Hm <sup>3</sup> /a)	
CRAS 1998	805 Km <sup>2</sup>	1 capa	100 m	20 años	Estacionario + Transitorio	k: 10 m/d	S: 0,05		52,5 Hm <sup>3</sup> /a		10 Hm <sup>3</sup> /a	25 Hm <sup>3</sup> /a	45 Hm <sup>3</sup> /a	Recarga Bordes: pozos que inyectan el caudal.
AGE 2002	1.390 Km <sup>2</sup>	1 capa	170 m	15 años (mayo 1997 - junio 2011)	Estacionario + Transitorio	k: 9,76 a 0,79 m/d	S: 0,18	159,20 mm/a	119.100 m <sup>3</sup> /d (43,47 Hm <sup>3</sup> /a)	112.500 m <sup>3</sup> /d (41,06 Hm <sup>3</sup> /a)	6600 m <sup>3</sup> /d (2,4 Hm <sup>3</sup> /a)	Escenario 1: 29.610 m <sup>3</sup> /d (10,80 Hm <sup>3</sup> /a) Escenario 2: 37.012 m <sup>3</sup> /d (13,50 Hm <sup>3</sup> /a) Escenario 3: 69.120 m <sup>3</sup> /d (34,69 Hm <sup>3</sup> /a)		Periodos de bombeo: 1 a 4 bombeo real; 5 a 15 bombeo de escenarios del 1 al 3.
WMC 2007	1.308 Km <sup>2</sup>	4 capas	Variables	17 años y 4 meses (Jun 1997 - Nov 2014)	Transitorio	k: 8 - 4 m/d k: 0,1 - 0,01 m/d	S: 0,24	1 mm/a	1.583 l/s (49,86 Hm <sup>3</sup> /a)	692 l/s (21,82 Hm <sup>3</sup> /a)	473 l/s (14,92 Hm <sup>3</sup> /a)	549 l/s (17,29 Hm <sup>3</sup> /a)	2.008 mm/a	Predicción de bombeo de MAR 1 Dic 2009 - 30 Nov 2035 de 390 l/s.
CRAS 2010	908 Km <sup>2</sup>	2 capas	Capa 1: 300 a 220 m aprox. Capa 2: 270 a 260 m aprox.	13 años (julio 1997-junio 2010)	Estacionario + Transitorio	Capa 1 Sur RN 40: 7 m/d Capa 1 Norte RN 40: 2 m/d Capa 2: 0,7 m/d Nacimientos: 0,01 m/d	S: 0,12 S: 0,03 S: 0,01 y 1 x 10 <sup>-5</sup> S: 0,12		766,82 l/s (24.19 Hm <sup>3</sup> /a)		180,69 l/s (5,7 Hm <sup>3</sup> /a)	MAA: 18,2 Hm <sup>3</sup> /a (9 periodos); 21,8 Hm <sup>3</sup> /a (1 periodo); 26.6 Hm <sup>3</sup> /a (9 periodos) MAR: 14 Hm <sup>3</sup> /a (23 periodos)	1.800 mm/a	Simultaneidad de extracciones =3 años, con bombeo total de 40.6 Hm <sup>3</sup> /a, periodos 17 a 19 (años 2014 a 2016). Lugo continúa predicción de bombeo de MAR hasta periodo 39 (año 2036).
AGE 2013	1.390 Km <sup>2</sup>	4 capas	Variables > 200 m	15 años (mayo 1997 - mayo 2012)	Estacionario + Transitorio			180 mm/a	146.400 m <sup>3</sup> /d (53,44 Hm <sup>3</sup> /a)	103.005 m <sup>3</sup> /d (37,60 Hm <sup>3</sup> /a)	8.689 m <sup>3</sup> /d (3,17 Hm <sup>3</sup> /a)	50.000 m <sup>3</sup> /día y 70.000 m <sup>3</sup> /día (18,25 Hm <sup>3</sup> /a -25,55 Hm <sup>3</sup> /a)	1.570 mm/a	Se simulan Ríos con drenaje = Descarga fluvial. Recarga sobre a todas las celdas del dominio activo: Recarga directa + Recarga por esc. superf.= 3 zonas.

Observación: Los valores entre paréntesis se han convertido en Hm<sup>3</sup>/a para poder realizar una comparación rápida entre los diferentes modelo

### **6.1.2 Propuesta de modelo conceptual actualizado para Campo del Arenal**

Luego de la discusión sobre los aportes y limitaciones de los modelos implementados en el área de estudio, se presenta una propuesta de Modelo Conceptual que, a priori, a criterio de la autora representa con mayor fidelidad el comportamiento hidrogeológico del acuífero de CA.

Se propone un modelo conceptual que contemple los siguientes procesos naturales:

Recarga o ingresos: representadas por recarga directa o meteórica; recarga por escurrimiento superficial desde las laderas circundantes, en el cual los datos estén ajustados a mediciones de aforos realizadas sobre las correspondientes áreas de aporte;

Descargas o salidas: estén representadas por evapotranspiración desde la zona central y centro-este de la cuenca; flujo subterráneo hacia los cursos superficiales que drenan hacia las cuencas de los ríos Los Nacimientos y Santa María;

En cuanto a las salidas por procesos antrópicos representar el bombeo actual de MAA e introducir posibles campos de pozos de bombeo de empresas que tengan permiso de uso de agua subterránea.

En cuanto al sistema hidrogeológico, se propone un modelo que considere la existencia de acuíferos libres a semiconfinados, en el sector de Los Pozuelos y al Norte de la Ruta Nacional N°40 sea semiconfinado. Que incorpore un comportamiento del acuífero en el sector sureste de la cuenca regido por estructuras de subsuelo. Que se incorporen las observaciones realizadas por las consultoras que exploraron el área de estudio en cuanto a: una barrera de flujo entre la cuenca de CA y la cuenca del río Los Nacimientos postulada por AGE, 2013 y la barrera de flujo en el sector centro-oeste de la cuenca que limita el escurrimiento de la Sierra del Aconquija en su sector Norte y su vinculación con el río Santa María en el paraje Las Abritas, concordando con WMC en 2007 e INA-CRAS en 2010.

Que las propiedades hidráulicas se establezcan en base al mapeo geológico del área y se introduzcan aplicando métodos como por ejemplo: el “punto piloto” considerado por AGE, 2013 u otro superador.

Que la geometría del modelo responda a la exploración del subsuelo por técnicas indirectas como las geofísicas y a directas como nuevas perforaciones y que abarque la mayor extensión de la cuenca.

Finalmente que considere una red de pozos destinados a medir la freática entre 0,5 y 2,5 m de profundidad como los piezómetros del INA-CRAS en 1998 y 2010 o los pozos cortos de MAR en 2007, con el fin de evaluar el comportamiento en el sector central de la cuenca de CA.

## **6.2 VALIDACION DEL MODELO NUMÉRICO DE LA PROVINCIA DE CATAMARCA 2010**

La presente sección corresponde a la validación del modelo INA-CRAS presentado en el año 2010 como parte del acuerdo de colaboración firmado con el Gobierno de la Provincia de Catamarca, para el estudio de varias cuencas hídricas de la provincia, entre ellas la del CA, dada la importancia estratégica. La ejecución de estos proyectos los realizó la Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos, actualmente con rango de Dirección Provincial (DPHyERH), perteneciente al Ministerio de Obras Públicas de la Provincia de Catamarca.

Es a partir de los resultados de la modelación realizada por el INA-CRAS en el año 2010, que se realiza la validación del modelo numérico. Esta consiste en incorporar datos de mediciones de niveles, en este caso, la serie completa de registros desde junio de 1997 a mayo de 2014, sin modificar ningún parámetro del acuífero ( $k$ ,  $S$ , espesores), caudales de bombeo, condiciones de borde, áreas de recarga y periodo de simulación. Todo esto se realiza con la premisa de que el modelo en ningún momento cambiará los resultados ya obtenidos.

El objetivo de esta rutina de modelación es analizar el comportamiento de los datos de niveles de agua y verificar si el modelo tal como fue planteado originalmente por el INA-CRAS 2010, con que precisión simula los registros ingresados. Además también observar el grado de ajuste en las predicciones realizadas en cuanto al comportamiento de los pozos de observación en el periodo 2011-2014.

Los resultados de esta validación se presentan en los ítems siguientes: 6.2.1 Análisis de los errores en el ajuste de nivel y 6.2.2 Análisis del ajuste de niveles.

### 6.2.1 Análisis de los errores en el ajuste de niveles: Modelo INA-CRAS 2010 vs. Modelo Validado 2014

En la Figura 6-1 y Figura 6-2, se presentan tanto los niveles de agua que fueron ingresados en el modelo original del INA-CRAS de 2010, como los ingresados para validar el mismo hasta el año 2014, representados en diagramas de dispersión obtenidos mediante el software Modflow, expresados en niveles observados y calculados en estado transitorio. En estas figuras se muestran los datos provenientes de los pozos de observación seleccionados por el INA-CRAS utilizados en la calibración correspondiente a: CA1, CMW2, CMW3, CMW4, CMW5A, CMW6A, CP1, PZ1 y CMW11A.

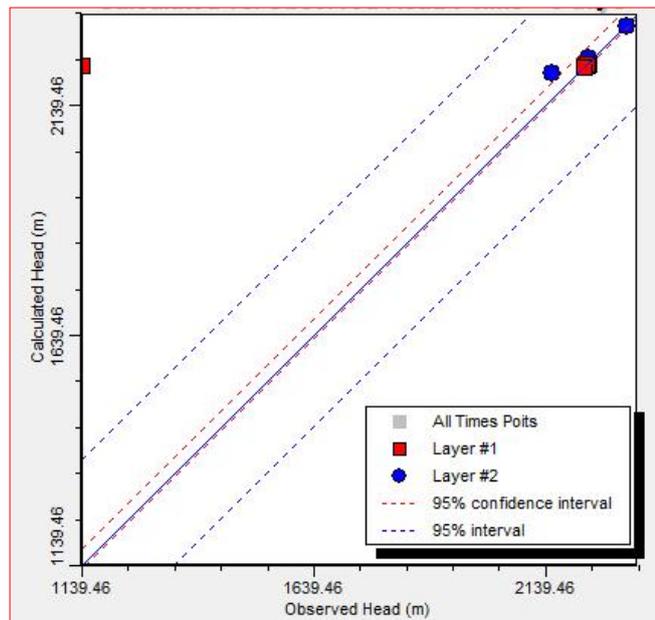


Figura 6-1: Errores en el ajuste del modelo numérico INA-CRAS 2010.

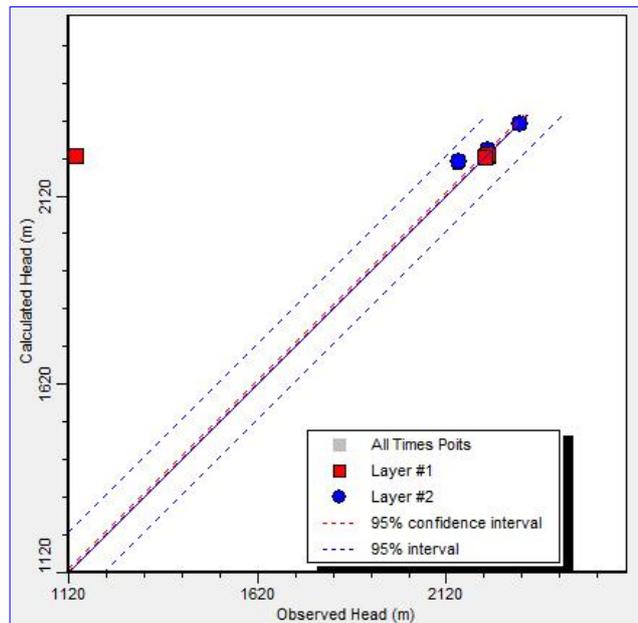


Figura 6-2: Errores en el ajuste del modelo numérico validado a 2014.

Para evaluar la calibración del modelo se examinan los parámetros estadísticos asociados, mediante la medición del error entre los niveles de agua simulados por el modelo y los observados o medidos in situ.

En la Tabla 6-3 se observa que las estadísticas de calibración mejoraron al ingresar 520 datos de niveles provenientes de 9 pozos de observación, comparados con los 104 datos provenientes de los mismos 9 pozos de observación. Los resultados de los parámetros demuestran comparativamente la mejora de sus valores: la raíz cuadrática promedio (RMS) del modelo validado fue de 51,11 m, en tanto que en el modelo numérico previo fue de 108,61 (m) y la media residual obtenida fue de 0,67 (m), mientras que en el modelo original fue de 0,34 (m). Se observan que los errores de ajustes obtenidos de la calibración del modelo validado disminuyeron a la mitad en comparación con el modelo original.

Tabla 6-3: Parámetros estadísticos de ajustes de los modelos numéricos INA-CRAS 2010 y validado a 2014.

Parámetro	Valor	
	Modelo INA-CRAS 2010	Modelo Validado hasta el año 2014
Número de Pozos	9	9
Número de Observaciones	104	520
Error estándar de la estimación (m)	10,59	2,22
Raíz cuadrática promedio (m)	108,61	51,11
Raíz cuadrática promedio Normalizada (%)	9,24	4,35
Coefficiente de correlación	0,34	0,67
Media residual (m)	15,73	7,12
Media residual absoluta (m)	19,85	9,46
Máximo residual	1087,66 en CP1	1087,66 en CP1
Mínimo Residual	0,013 en PZ2	0,002 en CMW3

## **6.2.2 Análisis del ajuste de niveles: Modelo INA-CRAS 2010 vs. Modelo Validado 2014**

Para analizar el ajuste de los hidrogramas entre ambos modelos, una buena apreciación se consigue comparando los gráficos de niveles de cada pozo de observación, considerados en ambos modelos numéricos. Se consideraron los siguientes pozos debido a que fueron los seleccionados por el INA-CRAS como variables de ajuste de su modelo numérico: CA1, CMW2, CMW3, CMW4, CMW5A, CMW6A, CP1, PZ2 y CMW11A. Se presentan en el **Anexo II** Modelo Validado: Hidrogramas de los pozos de observación.

Los hidrogramas indican que los pozos de monitoreo ubicados en el área de influencia directa del campo de bombeo de MAA, responden al mismo; tales son los casos de los pozos CMW5A y PZ 2.

Un caso particular representa el pozo CMW3, en el que se puede observar un buen ajuste entre los valores calculados y los observados, despertando la incertidumbre que en ese sector central de la cuenca el pozo responda a un nivel acuífero superior, debido a la profundidad del mismo de 25 m.

Los hidrogramas de los pozos exteriores al campo de pozos de bombeo presentan comportamientos variables, según sea su área de ubicación, lo que podría indicar que los niveles de agua monitoreados en esos lugares tienen poca o ninguna conexión con el sistema de agua subterránea del que se realiza la extracción, tal comportamiento es presentado por los pozos: CMW2, CMW4, CMW11A.

En el caso del pozo CMW6A ubicado en el sector suroeste de la cuenca, se observa que está influenciado por la condición de borde impuesta de carga hidráulica constante, es decir que representa una condición en la que el caudal entrante o saliente permanece invariable en todo el proceso.

El pozo CA1 ubicado en el sector Centro Este de la cuenca, presenta una recuperación de su nivel según los datos observados, mientras que los calculados simulan un descenso. Esto se puede deber a que responde al proceso de recarga por encontrarse más cercano al área de aporte principal postulada por el INA-CRAS en su conceptualización del modelo.

## **6.3 ACTUALIZACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DE CAMPO DEL ARENAL**

La presente actualización del modelo numérico del INA-CRAS de 2010, que en adelante se llamará modelo Actualizado, se realiza sobre el marco teórico que los modelos numéricos son diseñados para permitir su posterior actualización a medida que esté disponible nueva información, lo que representa el objeto del presente Seminario. Es por ello que con esta actualización se mejoró dicho modelo numérico al:

- \* Corregir la altura de unos datos de niveles del pozo CP1, utilizando información verificada de los relevamientos de campo,
- \* Introducir datos de mediciones de profundidad de niveles del agua subterránea, tanto los informados por las empresas mineras: MAA y MAR, relevados por el INA, INA-CRAS y los provenientes del Programa de monitoreo de niveles de la DPHyERH,
- \* Ampliar el número de pozos de observación al incorporar pozos preexistentes dentro del área de estudio que el modelo del INA-CRAS 2010 no consideró, principalmente ubicados en el sector de bombeo intensivo de MAA,

- \* Mejorar la distribución del bombeo de MAA conforme se incorporaron nuevos pozos de bombeo,
- \* Introducir los caudales de bombeo informados por MAA al departamento de Canon, perteneciente a la DPHyERH desde mayo 1997 a septiembre de 2014,
- \* Eliminar el bombeo de MAR, dado que hasta el presente la empresa minera no inició actividades extractivas en la zona de estudio.

El alcance del trabajo correspondiente al estudio actual fue:

1. Evaluar los nuevos datos de niveles incorporados frente a las predicciones previas del modelo del INA-CRAS 2010.
2. Evaluar la respuesta de los pozos de monitoreo frente a los caudales históricos del periodo 1997-2010 y los nuevos caudales de extracción de MAA desde el periodo 2011-2014.

Se utilizaron los resultados del modelo validado de la sección anterior para comparar con los resultados del modelo Actualizado que se presentan a continuación en los ítems: 6.3.2 Análisis de los errores en el ajuste de nivel; 6.3.3 Análisis del ajustes de niveles; 6.3.4 Balance de Agua y 6.3.5 Análisis de las Predicciones 2014 - 2039.

### **6.3.1 Información Implementada en la Actualización del Modelo**

#### **6.3.1.1 Programa de Monitoreo de la Cuenca del Campo del Arenal**

La cuenca de CA fue estudiada desde año 1979 con la primera perforación exploratoria denominada CA N°1, realizada por el Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídrica (INCTYH). En 1997 se puso en funcionamiento el Campo de Pozos de Bombeo de MAA, por tal motivo la Secretaría del Agua y del Ambiente (SAyA) en ese entonces, inicia un programa de monitoreo de agua. En agosto del 2000 se designó como responsables de los monitoreos ambientales a la Secretaría de Minería y dentro de ella a la Unidad de Gestión Ambiental Provincial (UGAP) y a la Policía Minera. En la actualidad la UGAP ha sido jerarquizada como Dirección Provincial de Gestión Ambiental Minera (DiPGAM) y es el organismo provincial que oficialmente realiza los monitoreos ambientales hasta el presente, ya que es la autoridad de aplicación de la Ley N° 24.585 “De la protección ambiental para la actividad minera”

Desde el año 1993 MAA y posteriormente en 1998 MAR, realizan estudios en el área con fines prospectivos y exploratorios para su posterior inicio de actividades, realizando hasta la actualidad monitoreos de: profundidad de niveles de agua, calidad química del agua, parámetros climáticos, aforos de ríos y otros, que forman parte de sus bases de datos y son presentados en las actualizaciones de Informes de Impacto Ambiental (IIA).

Por estos motivos la antes Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos y actualmente Dirección Provincial, perteneciente a la Subsecretaría de Planificación de Recursos Hídricos vio la necesidad de crear en 2006 el equipo de Trabajo para el “Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Campo del Arenal”.

Dentro de este marco se plantearon los siguientes objetivos:

- Implementar los Programas de Monitoreos para evaluar la evolución de los niveles y las características químicas del agua en la cuenca CA y, que permitan aplicar criterios hidrogeológicos e hidroquímicos

- Contar con herramientas que sirvan de guía para la toma de decisiones.

A partir de mayo de 2011 ese equipo de trabajo, propone implementar el Programa de Monitoreo en la Cuenca del Campo del Arenal y Cuencas Vinculadas, con el objetivo de contar con información propia para la posterior toma de decisiones por parte de las autoridades provinciales. (Nieto, R., 2011)

A continuación se exponen los principales aspectos relacionados con el Programa de Monitoreo de Niveles de Agua - Campo del Arenal (PM-N), sobre los que se basó la presente actualización del modelo numéricos. (Foto 1 – 10)

- destinado a evaluar la evolución de los niveles piezométricos del agua subterránea mediante la medición de los pozos pertenecientes a MAA, MAR, pozos domésticos y pozos realizados por el INA y en un futuro incluir otros pozos que surjan de la exploración del área (Nieto, op. cit.)

- incluye el grupo de perforaciones destinadas al bombeo de MAA, perforaciones profundas al este y norte perteneciente a MAR, pozos cortos o freáticos en la zona de la Ruta Nacional N° 40 de MAR y del INA y nuevos pozos de exploración – monitoreo de MAA (Nieto, op. cit.)

- se elaboró el Programa original con 36 pozos seleccionados en base a su ubicación y profundidad, para la medición de niveles de agua en CA. (**Anexo III**: Tabla 1: Pozos Programa Monitoreo de Niveles CA “PM-N”)



Foto 1 y 2: Medición de la profundidad del nivel de agua en el pozo CMW 13 y CMW 12.

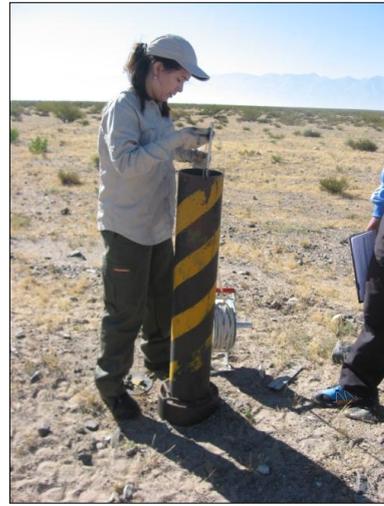


Foto 3 y 4: Medición de la profundidad del nivel de agua en el pozo PW 1 y PW5.



Foto 5 y 6: Monitoreo de la profundidad de los niveles de agua de los pozos CMW3 y CMW10B.



Foto 7 y 8: Monitoreo de la profundidad de los niveles de agua de los pozos CMW6B y CMW9.



Foto 9 y 10: Monitoreo de la profundidad de los niveles de agua de los pozos ARM 10A y CMW 8.

Con el transcurso del tiempo de la implementación del PM-N, este fue adaptándose a la realidad del terreno y surgieron modificaciones de algunos puntos monitoreados, hasta el año 2014. (Tabla 6-4)

Tabla 6-4: Ajustes en la Frecuencia de Monitoreos del PM-N de CA.

Frecuencia Monitoreo		Puntos de Monitoreo de Niveles de Agua "PM-N"
<b>Monitoreo Cuatrimestral</b>	Abril	CMW 8, CMW 9, <u>CMW 6A</u> , CMW 10A, CMW 10B, CMW 5A, PW 3, CMW 7, <u>Simón Marcial</u> , ARM 8A, ARM 8B, CMW 4, ARM 9, Paloma Yaco, Potrerillos, CMW 3, WEA 3, Santa Clara Viejo, <u>Santa Clara Nuevo</u> , CMW 2, ARM 10A, ARM 10B, ARM 10C, CMW 1, CMW 11A, CMW 11B, ARP 1, ARM 1A, CA 1, WEA 4, WMA 2, WMA 1, <u>ARM 7B</u> .
	Agosto	*Se agregan CMW 12, PW 1, ARP 8, PZ 2A; se reemplaza CMW 6A por CMW 6B, se excluyen Simón Marcial y ARM 7B por estar ambos secos y Santa Clara Nuevo por estar tapado por dunas.
	Diciembre	**Se agregan CMW 13 y PZ 3A, PZ 4A
<b>Monitoreo Anual o Bianual</b>		<u>PW 1</u> , PW 6, PW 7.  PW 1 es desde 2011 pozo de monitoreo fue reemplazado por el nuevo pozo de bombeo PW 1A.

### 6.3.1.2 Nuevas Perforaciones

Como resultado de un trabajo de evaluación de antecedentes, la DPHyERH, en 2008 le solicitó a MAA un plan de exploración de subsuelo. Es por ello que en 2009 se iniciaron las actividades de campo.

En el **Anexo III**, se presenta la Tabla 2: Últimos pozos construidos en CA, donde se puede ver la información más relevante en cuanto a los detalles de construcción de los pozos perforados desde el año 2009 a 2013.

### **6.3.1.3 Relevamiento Planialtimétrico de Perforaciones**

Para la presente actualización del modelo numérico se realizaron tareas de campo tendientes a medir las cotas a suelo de las manifestaciones de agua subterránea, para realizar posteriormente los cálculos de las cotas de agua en cada pozo. Las mediciones y el procesamiento de los datos se realizaron por el grupo de agentes de la DPHyERH, formado por la Ing. Agrimensora María de los Ángeles Luna, el Técnico Topógrafo Cesar Solohaga y la autora del presente trabajo, quien prestaba servicios en ese organismo de la administración pública. (Foto 11 y 12)

Estas medidas fueron relevadas mediante el sistema de posicionamiento global con receptores GPS geodésicos de simple frecuencia, con la siguiente precisión:

- \*  $\pm 0.50$  m en la determinaciones planimétricas.
- \*  $\pm 0.05$  m en la determinaciones altimétricas.

Las alturas se modelaron mediante ajuste al modelo geopotencial EGM96 y el EGM 2008, eligiéndose el EGM96 debido a que presenta menores diferencias con los relevamientos de campañas anterior de la DPHyERH en los periodos 2008 y 2009.

Los datos resultantes se presentan en el **Anexo III**: Tabla 3 Relevamiento Planialtimétrico de la DPHyERH.



Foto 11 y 12: Relevamiento Planialtimétrico de Pozos y Medición del nivel.

### 6.3.1.4 Actualización de la Explotación por bombeo de CA

Los datos de consumo informados por MAA al departamento de Canon y Gestión de Agua Subterránea perteneciente a la DPHyERH, incorporados al modelo numérico actualizado, corresponden al periodo comprendido entre mayo 1997 y septiembre de 2014. Estos caudales de extracción fueron los concesionados a extraer por permiso de Concesión de Uso de Agua Pública subterránea, de carácter permanente y oneroso, inicialmente en un caudal Normal 660 l/s (20.79 Hm<sup>3</sup>/a), posteriormente se le otorga una ampliación de 140 l/s que sumados a los ya otorgados representan un caudal normal de 800 l/s (25.20 Hm<sup>3</sup>/a) con picos de 1100 l/s (34.65 Hm<sup>3</sup>/a), publicado en los Boletines Oficiales N° 42 y N° 47, de la provincia de Catamarca.

Para incorporar los datos de extracción por bombeo se ajusto la distribución de los mismos conforme se incorporaron nuevos pozos de bombeo, que inicialmente desde 1997 fueron seis pozos: PW1, PW2, PW4, PW5, PW6 y PW7, en 2006 se incorpora PW8 y finalmente en 2010 se incorpora PW9.

Los datos se informan como valor consumido en m<sup>3</sup> por periodos, trimestrales generalmente, lo que requirió que sean procesados en planillas de cálculo, para obtener los volúmenes extraídos y distribuirlos en la cantidad de pozos adecuados. (Figura 6-3)

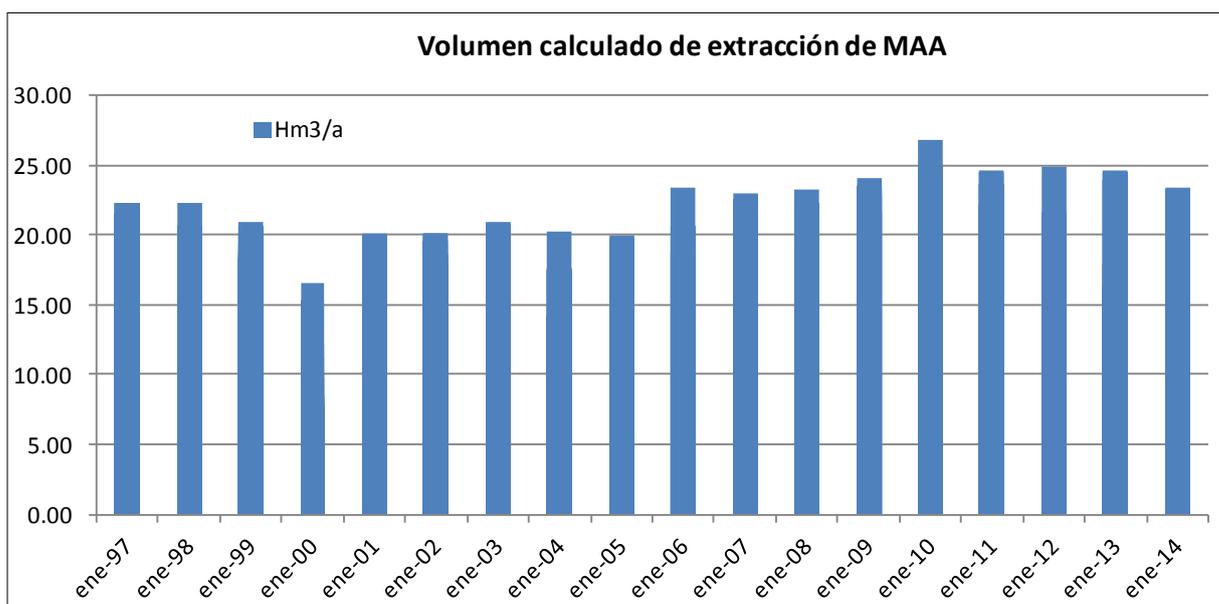


Figura 6-3: Volumen histórico extraído por MAA desde 1997-2014 informado por DPHyERH.

En base al procesamiento de datos se realizó el gráfico siguiente donde se puede analizar la diferencia entre los datos ingresados en el modelo INA-CRAS 2010 y los ingresados en el modelo numérico actualizado. (Figura 6-4)

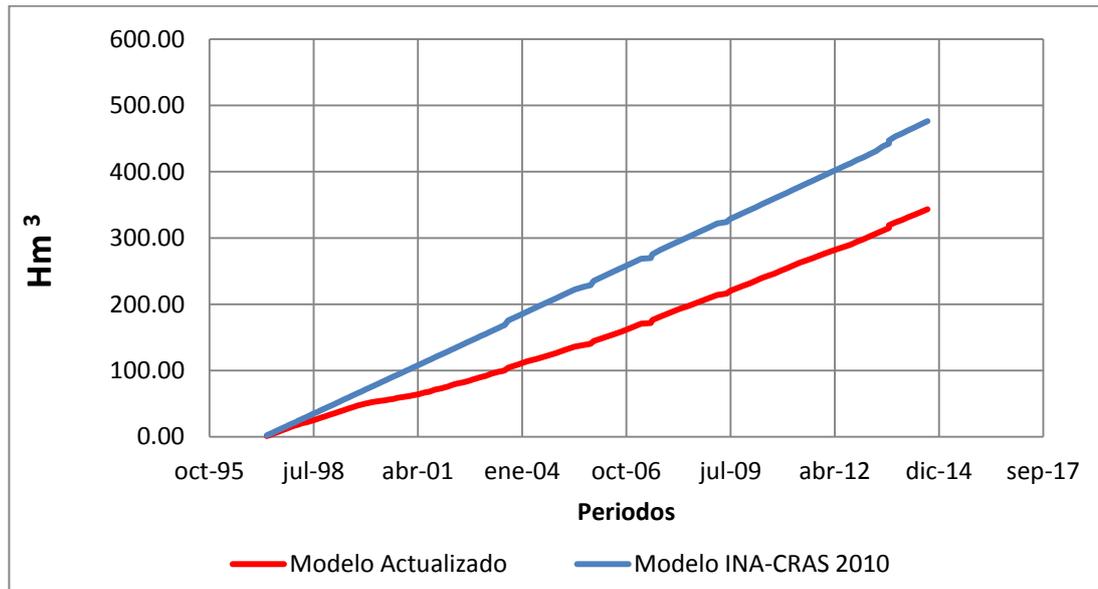


Figura 6-4: Extracciones acumuladas de los modelos INA-CRAS 2010 y del Actualizado 2014.

Al realizar este ajuste de esta variable ingresada al modelo numérico actualizado se puede ver como el volumen acumulado de extracción por el campo de pozos de MAA, es de 343,28 Hm<sup>3</sup> hasta noviembre de 2014 y se mantiene por debajo del volumen acumulado del modelo del INA-CRAS 2010 durante todo el periodo simulado, mientras que para el INA-CRAS es de 476,20 Hm<sup>3</sup>.

Se observa así que esta variable fue sobredimensionada en el modelo anterior en 132.92 Hm<sup>3</sup>, siendo la extracción del modelo actualizado, la que representa con mayor fidelidad el proceso de extracción.

### 6.3.2 Análisis de los errores de ajuste de nivel: Modelo Validado a 2014 vs Modelo Actualizado 2011-2014

En la Figura 6-5 y la Figura 6-6, se presentan los niveles de agua del modelo Validado a 2014 como los incorporados en el modelo Actualizado, con los que fueron calibrados en estado transitorio. Se representan en diagramas de dispersión obtenidos con Modflow y se representan como valores observados y calculados. En estas figuras se muestran los datos provenientes de los nueve pozos de observación utilizados en la calibración del modelo del INA-CRAS del año 2010, validado al año 2014 y los 17 pozos utilizados para la calibración del modelo Actualizado a 2014.

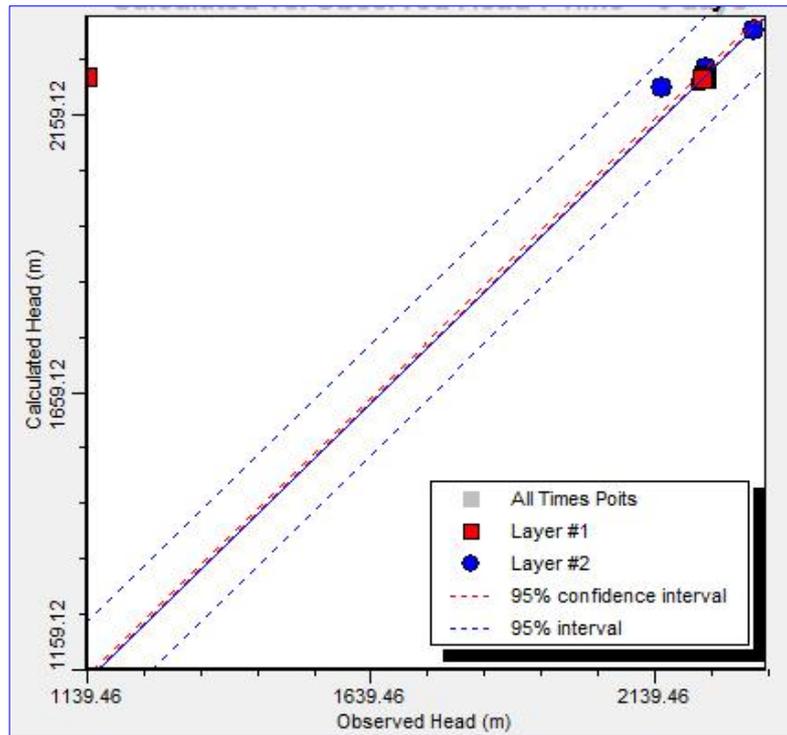


Figura 6-5: Errores en el ajuste de nivel: modelo numérico Validado a 2014 con 8 pozos de observación.

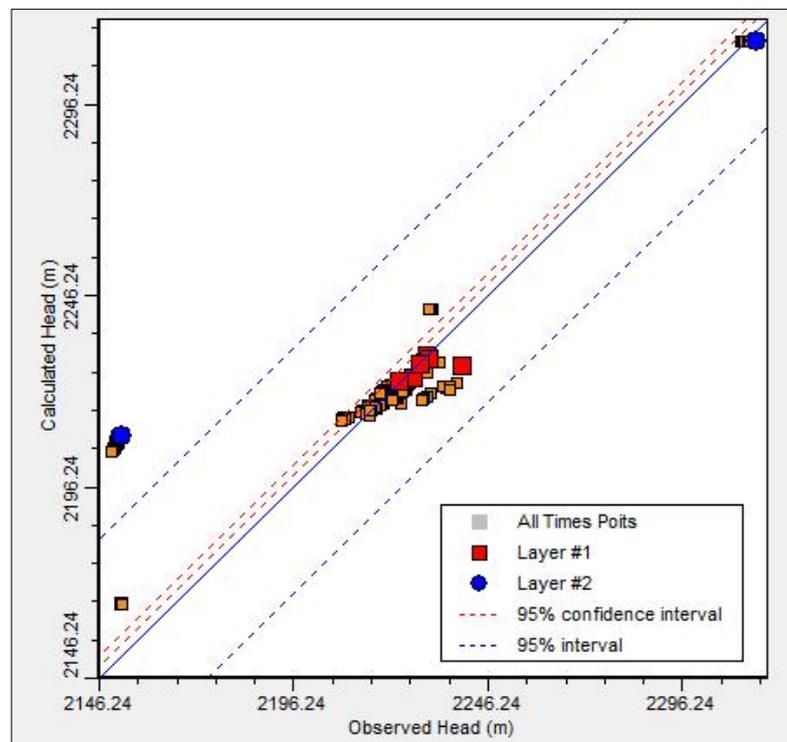


Figura 6-6: Errores en el ajuste de nivel: modelo numérico Actualizado periodo 2011 – 2014 con 17 pozos de observación.

Como se mencionara en la sección anterior, para evaluar la calibración de los modelos, se analizan los parámetros estadísticos asociados con la misma. Este método consiste, en la medición del error entre los niveles de agua observados o medidos en el campo y calculados por Modflow.

En la Tabla 6-5, se presenta un análisis detallado de los parámetros estadísticos de ajustes entre los modelos numéricos Validado y Actualizado. En la misma se pueden observar que las estadísticas de calibración mejoraron considerablemente al ingresar 633 datos provenientes de 17 pozos de observación, comparados con los 104 datos provenientes del modelo original o los 520 de 9 pozos de observación del modelo original y del modelo validado. Para comparar la mejora de los valores, se presentan los resultados de los siguientes parámetros: la raíz cuadrática promedio (RMS) del modelo actualizado fue de 16,90 m, en tanto que en el modelo numérico previo validado fue de 51,11 (m) y la media residual obtenida fue de 0,94 (m) cercana al valor óptimo de una unidad, mientras que en el modelo original validado fue de 0,67 (m).

Tabla 6-5: Comparación de parámetros estadísticos de ajustes entre modelos: validado y actualizado.

Parámetros	Valores	
	Modelo Validado hasta el año 2014	Modelo Actualizado hasta el año 2014
Número de Pozos	9	17
Número de Observaciones	520	633
Error estándar de la estimación (m)	2,22	0,65
Raíz cuadrática promedio (m)	51,11	16,90
Raíz cuadrática promedio Normalizada (%)	4,35	10,20
Coefficiente de correlación	0,67	0,937
Media residual (m)	7,12	4,39
Media residual absoluta (m)	9,46	6,75
Máximo residual	1087,66 en CP1	58,53 en CMW6A
Mínimo Residual	0,002 en CMW3	-0,003 en CMW3

En las siguientes figuras se presentan las salidas gráficas obtenidas con Modflow de los modelos numéricos analizados, en ellas se pueden observar la incorporación de los nuevos ocho pozos de monitoreo y la modificación de la simulación del campo de pozos de MAR que hasta la fecha no fue puesto en funcionamiento. (Figura 6-7; Figura 6-8; Figura 6-9; Figura 6-10)

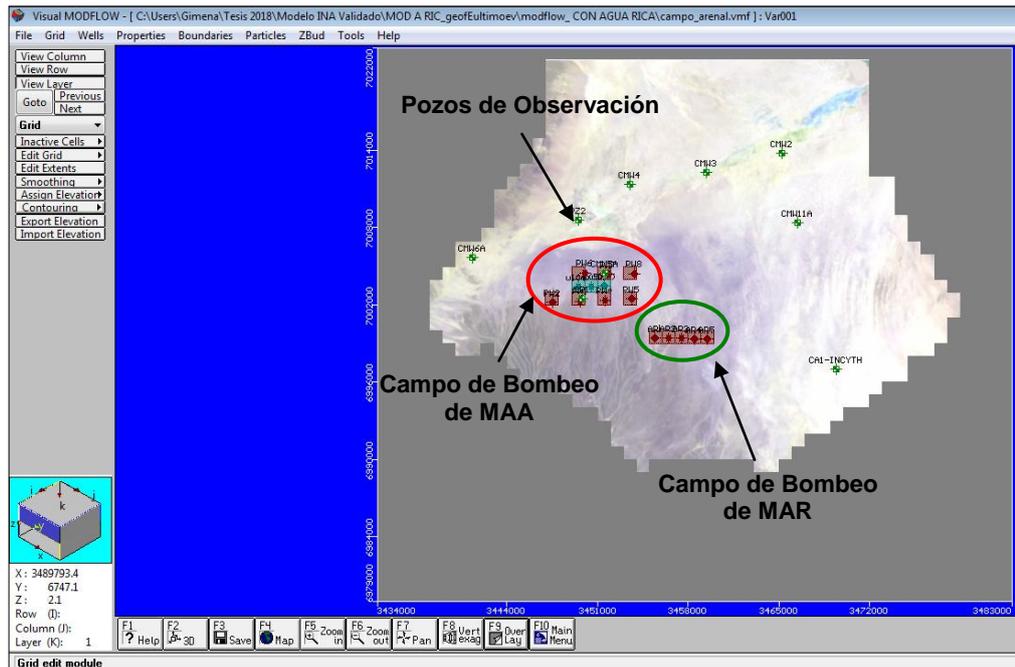


Figura 6-7: Modelo INA-CRAS 2010 validado a 2014.

En esta figura se observan en color verde los pozos de observación: CA1- CMW11A- CMW2- CMW3- CMW4- PZ2- CMW6A- CMW5A y CP1; los pozos de bombeo de MAA dentro del círculo rojo formado por: PW1- PW2- PW4- PW5- PW6- PW7 y PW8. Finalmente dentro del círculo verde se presentan el posible campo de bombeo de MAR.

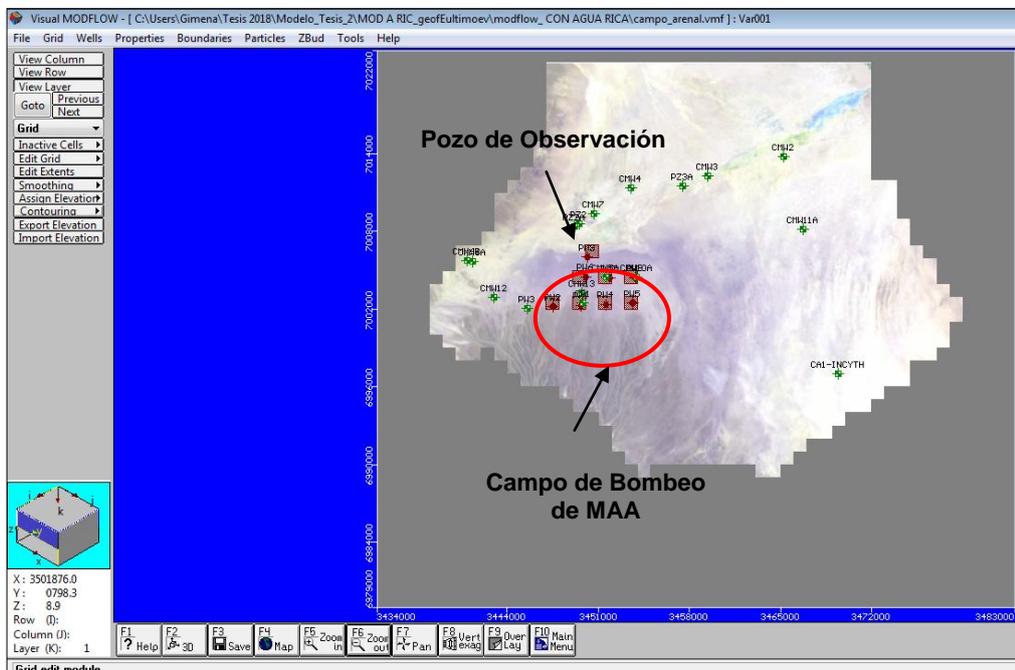


Figura 6-8: Modelo Actualizado a 2014.

En esta figura se observan en color verde los pozos de observación: CA1- CMW11A- CMW2- CMW3- PZ3A- CMW4- CMW7- PZ2- PZ2A- CMW6A- CMW6B- CMW13- CMW12- PW3- CMW5A- CMW10A y CP1; los pozos de bombeo de MAA dentro del círculo rojo formado por: PW1- PW2- PW4- PW5- PW6- PW7- PW8 y PW9.

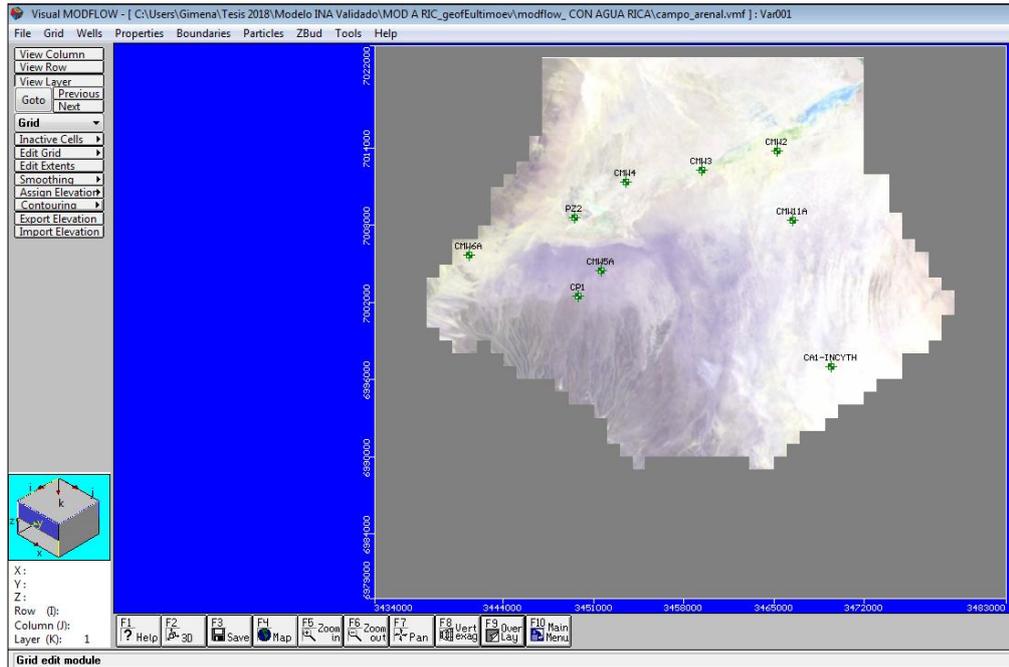


Figura 6-9: Detalle de los 9 pozos de observación del modelo Validado a 2014.

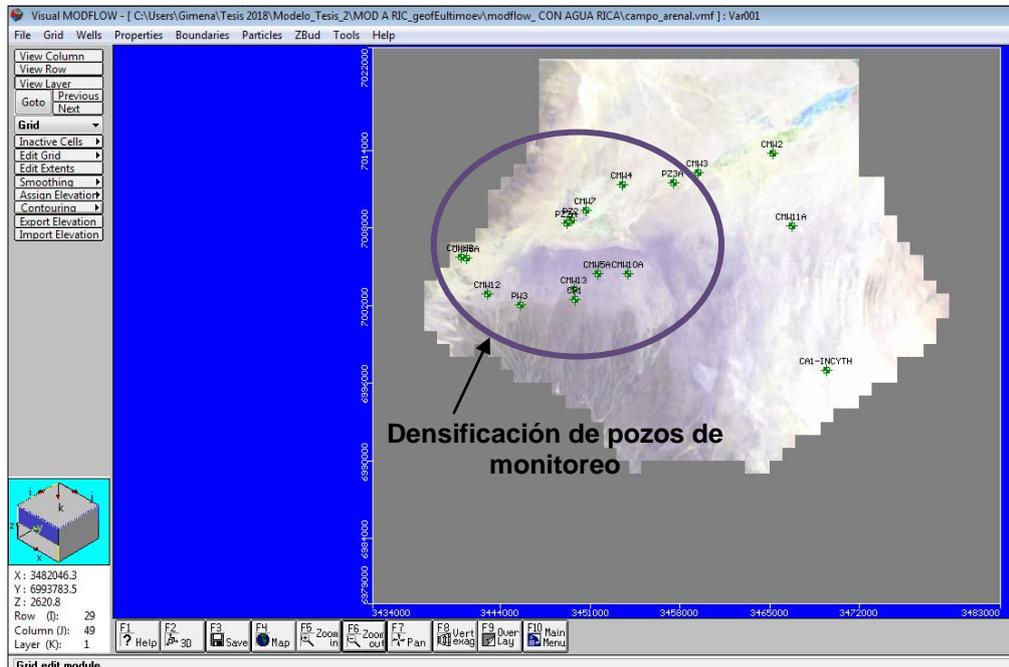


Figura 6-10: Detalle de los 17 pozos de observación del modelo Actualizado a 2014.

### **6.3.3 Análisis del ajuste de niveles: Modelo Validado 2014 vs Modelo Actualizado 2014**

Para analizar los ajustes de los niveles entre ambos modelos numéricos, se realiza la comparación entre los hidrogramas de cada pozo de observación considerado. En el modelo numérico original con datos validados se contemplan los pozos: CA1, CMW2, CMW3, CMW4, CMW5A, CMW6A, CP1, PZ2 y CMW11A y el modelo numérico Actualizado incluye a los anteriores e incorpora a los nuevos pozos de observación: PZ2A, PZ3A, CMW7, CMW6B, CMW10A, CMW12, CMW13 y PW3 y se presentan en el **Anexo IV** Modelo Actualizado: Hidrogramas de los pozos de observación.

En estos hidrogramas se puede observar un mejor ajuste con los datos medidos, este resultado se debe a los caudales de extracción del campo de pozos de MAA, según lo informado por la empresa y por departamento Canon y Gestión de Agua Subterránea perteneciente a la DPHyERH.

Del análisis de los hidrogramas se evidencian dos tipos comportamientos de los pozos de observación, en general indican que:

Los pozos de monitoreo ubicados en el área de influencia directa del campo de bombeo de MAA (CMW7, PZ2A, PZ2, CMW13, CMW12, CMW10A, CMW5A y PW3), responden al mismo, es decir presentan fluctuaciones congruentes con la extracción del agua, observándose un muy buen ajuste entre ambas curvas.

Los hidrogramas de los pozos exteriores al campo de pozos de bombeo presentan comportamientos variables según sea su área de ubicación, lo que podría indicar poca o ninguna influencia del campo de pozos o estar condicionados por otros parámetros del modelo numérico, tales como: las condiciones de borde impuestas; área y volumen de recarga, geometría de la capa; profundidad a la que el pozo monitorea el acuífero; cercanía a un curso de escurrimiento superficial; y profundidad del nivel de extinción de EVT.

Los pozos CMW6A y CMW6B: ubicado en el sector sur-oeste sobre el límite del modelo con carga hidráulica constante, es decir que representa una condición en la que el caudal entrante o saliente permanece invariable en todo el proceso, por ello el nivel medido real, no se representa en el calculado por el modelo numérico, ya que este obedece a la condición de borde impuesta.

Respecto a los pozos CA1 y CMW11A, ubicados en el sector centro-este de la cuenca, se observa una recuperación de los niveles en CA1, pudiendo estar influenciado por su cercanía al área de recarga principal, la Sierra del Aconquija; mientras que CMW11A mantiene estable su nivel sin fluctuaciones pero el modelo simula sus valores 12 m por encima de las mediciones reales.

Los pozos CMW 2, CMW4, PZ3A, se encuentran en el centro de la cuenca sobre la Ruta Nacional N° 40, siendo los dos primeros pozos entre 25 a 30 m de profundidad, mientras que el pozo PZ3A es de 100m. En estos hidrogramas se puede observar que los niveles de estos pozos no muestran descenso, sino que mantienen sus niveles estables a través de toda la simulación, mientras que Modflow calcula por debajo sus niveles.

El pozo CMW3, ubicado sobre la Ruta Nacional N°40 en el sector externo al campo de pozos de MAA, se observa que tiene un buen grado de ajuste entre los niveles calculados y observados, mostrando un descenso gradual en sus niveles.

El pozo CP1, es un caso especial debido a que en este se corrigió un dato ingresado en el modelo validado, lo que modifico considerablemente la escala del gráfico, permitiendo ver su

descenso de nivel a través del tiempo. Aunque se plantea la duda sobre esos niveles debido que el pozo en el año 2006 se secó.

En **Anexo IV** Modelo Actualizado: Hidrogramas de los pozos de observación, se presentan los hidrogramas de los nuevos pozos incorporados al modelo Actualizado. En ellas se observa que aunque presentan errores entre 1 m a 4 m, reproducen adecuadamente la tendencia de descenso de nivel debido previsiblemente al a depresión por el volumen de explotación.

### 6.3.4 Balance de Agua: Modelo Validado 2014 vs Modelo Actualizado 2014

Se presenta el balance del agua de los modelos Validado y Actualizado, con el objetivo de analizar los procesos simulados de entradas y salidas considerados en la cuenca de CA y la variación entre ambos modelos.

Se debe recordar que la diferencia en los volúmenes explotados se presenta en el apartado 6.3.1.4 *Actualización de la explotación por bombeo de CA*. Se presenta aquí el análisis de cómo se manifiesta en el sistema la reducción del volumen explotado en el modelo Actualizado.

Teniendo en cuenta que el proceso simulado de recarga en ambos modelos es la misma (ver la Figura 5-17), se analizan en ambos modelos las variaciones de: almacenamiento (storage); evapotranspiración (ET) y la descarga por los niveles fijos (constant head), es decir, los procesos de descarga o salidas de la cuenca.

En la Figura 6-11 correspondiente a los procesos de salida simulados en el modelo Validado se observa que: el mayor volumen de salida se realiza a través de los pozos de bombeo, presentando un pico de incremento en el día 6.900 (año 2017), para luego mantenerse con un aumento gradual. Puede inferirse tal aumento al sobre dimensionamiento de la extracción que el INA-CRAS 2010 consideró en su modelo.

El segundo proceso que extrae más volumen del sistema es la evapotranspiración.

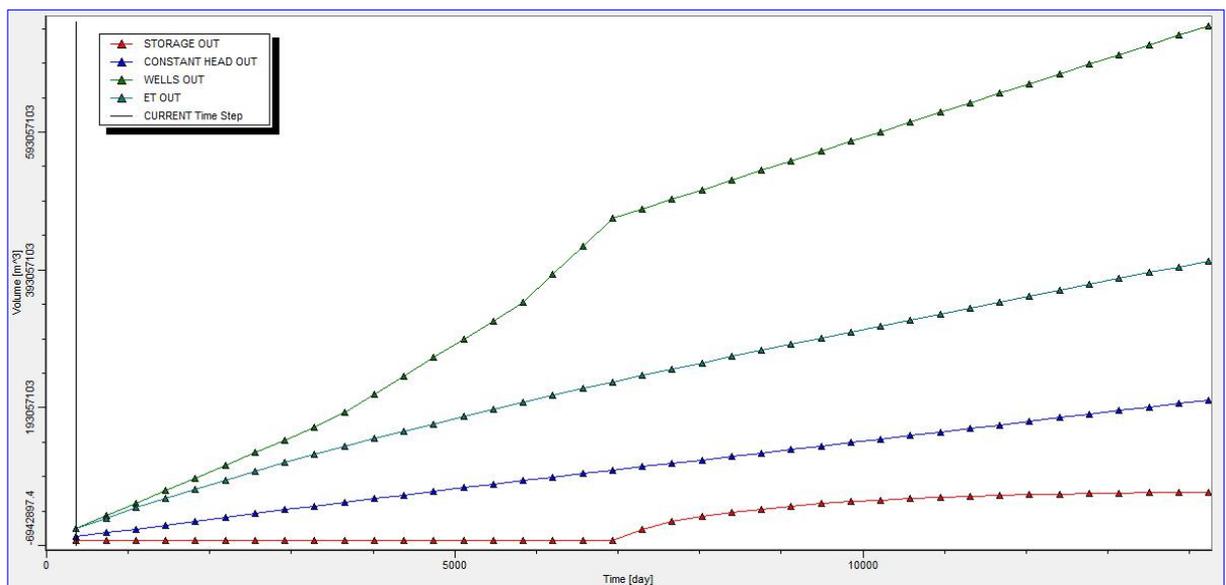


Figura 6-11: Procesos simulados de salidas o egresos del modelo INA-CRAS 2010 Validado a 2014.

Mientras que el almacenamiento se mantiene con un nivel de aumento constante hasta el día 6900 aproximadamente (año 2017) se observa un incremento de aporte al sistema, lo que puede deberse a compensar la demanda de extracción por bombeo.

La salida por descarga constante se mantiene así a través de todo el proceso de simulación como era de esperarse.

Puede afirmarse que los procesos de extracción por bombeo (Wells) y de almacenamiento (storage) están íntimamente relacionados, mientras que los procesos de evapotranspiración (ET) y el de carga constante (constant head) que obedece a la condición de límite impuesta.

En la Figura 6-12 correspondiente a los procesos de salida simulados en el modelo Actualizado se observa también que es a través de los pozos de bombeo, el principal componente de salida del sistema, En este componente se observa un aumento gradual muy inferior hasta el día 6.300 (año 2014 aprox.) comparado con el modelo Validado, este comportamiento se debe a la modificación de caudal de extracción de MAA sensiblemente inferior al presentada en el modelo previo. Puede verse además como esta variable está íntimamente relacionada con el almacenamiento al presentar este último un aumento gradual muy inferior al del modelo Validado y mantenerse así todo el periodo simulado. Se inferirse que en este modelo se realiza una disminución en las salidas del sistema debido a que el almacenamiento del acuífero realiza un aporte menor al sistema para compensar la demanda por extracción del bombeo.

En cuanto a los procesos de salida por carga constante y evapotranspiración se mantienen en forma gradual a través de todo el periodo simulado, como era previsible.

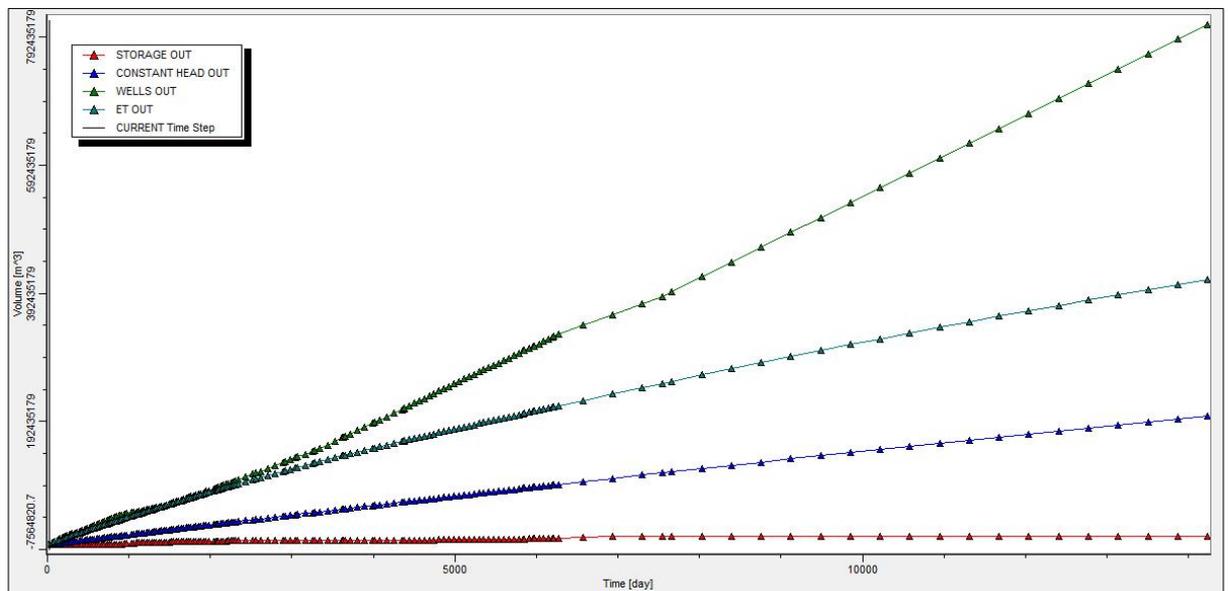


Figura 6-12: Procesos simulados de salidas o egresos del modelo Actualizado a 2014.

### 6.3.5 Análisis de las Predicciones 2014-2039

Para analizar las predicciones en el periodo 2014-2039 de los modelos Validados y Actualizado se presenta tres casos de hidrogramas correspondiente a los pozos CMW3, PZ2 – PZ2A y CMW5A.

La Figura 6-13 se observa como en el modelo Actualizado la disminución en el caudal de explotación del campo de pozos de bombeo de MAA produce que los niveles no se depriman tanto como en el modelo Validado.

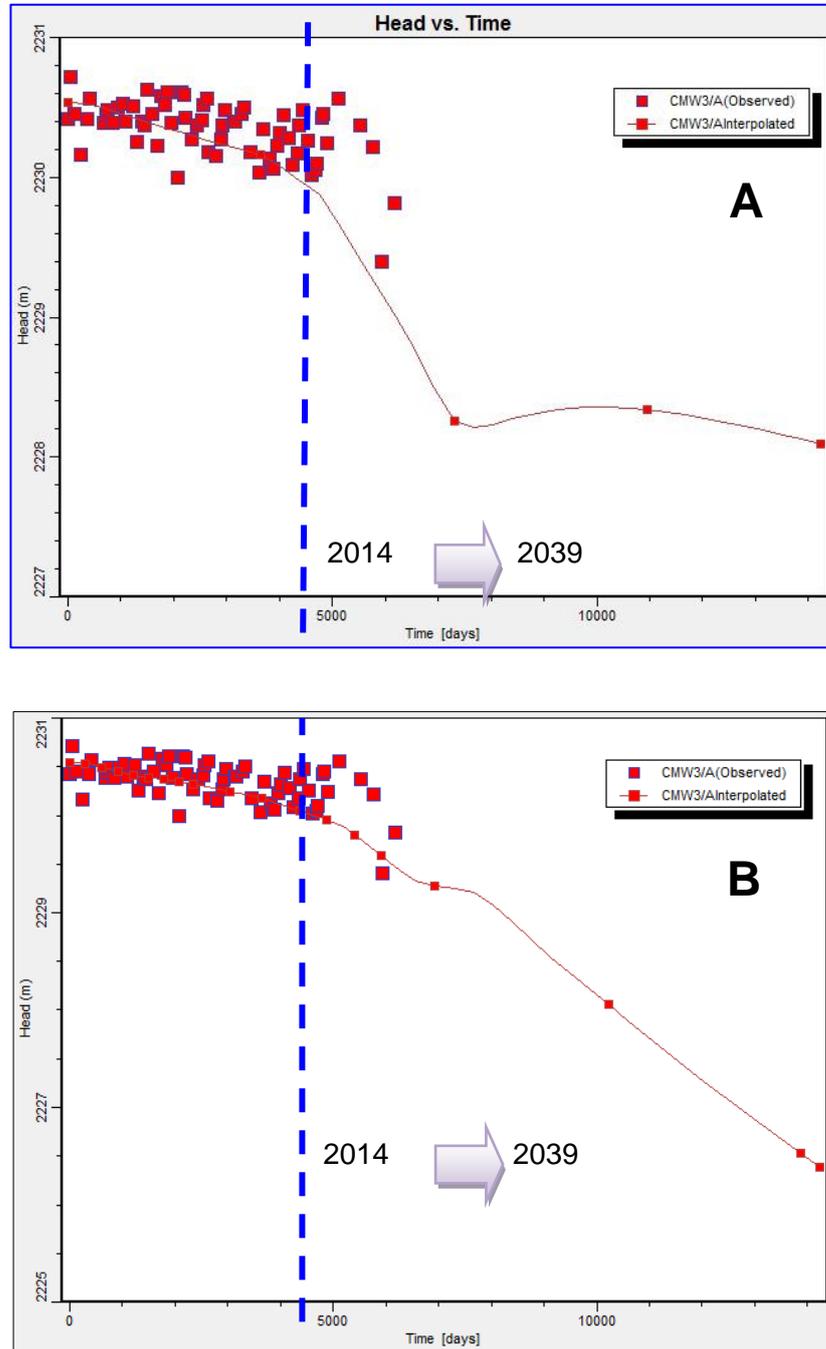


Figura 6-13: Predicción periodo 2014-2039 para el pozo CMW3: modelo Validado (A) y modelo Actualizado (B).

La Figura 6-14 se presenta el caso del pozo PZ2 que en el año 2007 se secó, en este se muestra como el modelo Actualizado reproduce con mayor grado de ajuste la evolución de los niveles y predice un descenso gradual, que es confirmado por el pozo PZ2A ubicado a

41 m de distancia hacia el Noreste. En oposición el modelo Validado no reproduce el comportamiento del nivel en ese pozo para el periodo 2014-2039.

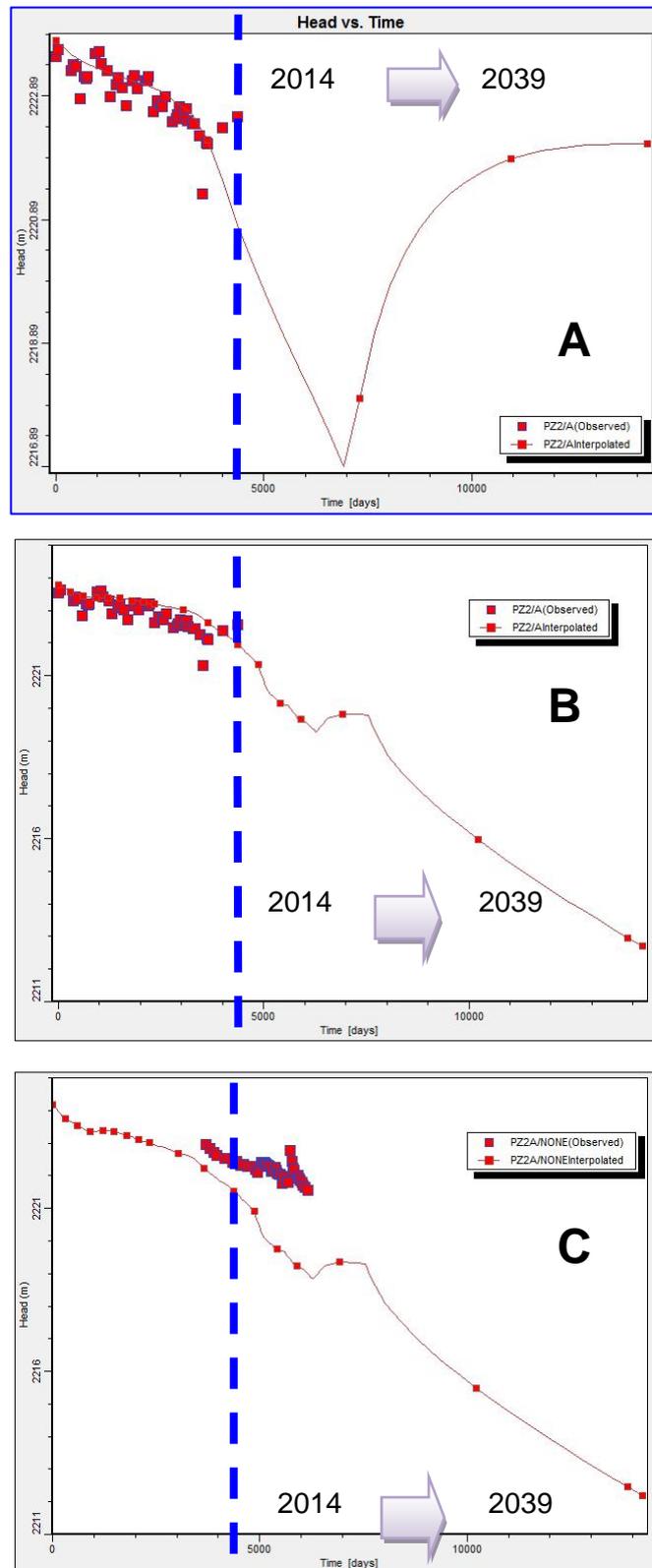


Figura 6-14: Predicción periodo 2014-2039 para el los pozos PZ2 y PZ2A: modelo Validado(A y B) y modelo Actualizado (C).

La Figura 6-15 presenta el hidrograma del pozo CMW5A que se encuentra ubicado dentro del campo de bombeo de MAA. En esta figura se observa que el modelo Actualizado reproduce con un alto grado de ajuste el comportamiento del nivel y predice un descenso gradual sostenido en el periodo simulado. En cuanto al modelo Validado se observa que este reproduce con un bajo grado de ajuste el comportamiento del nivel y predice un ascenso abrupto en el día 7.000 (año 2017 aprox.) hasta su estabilización hasta terminar la simulación.

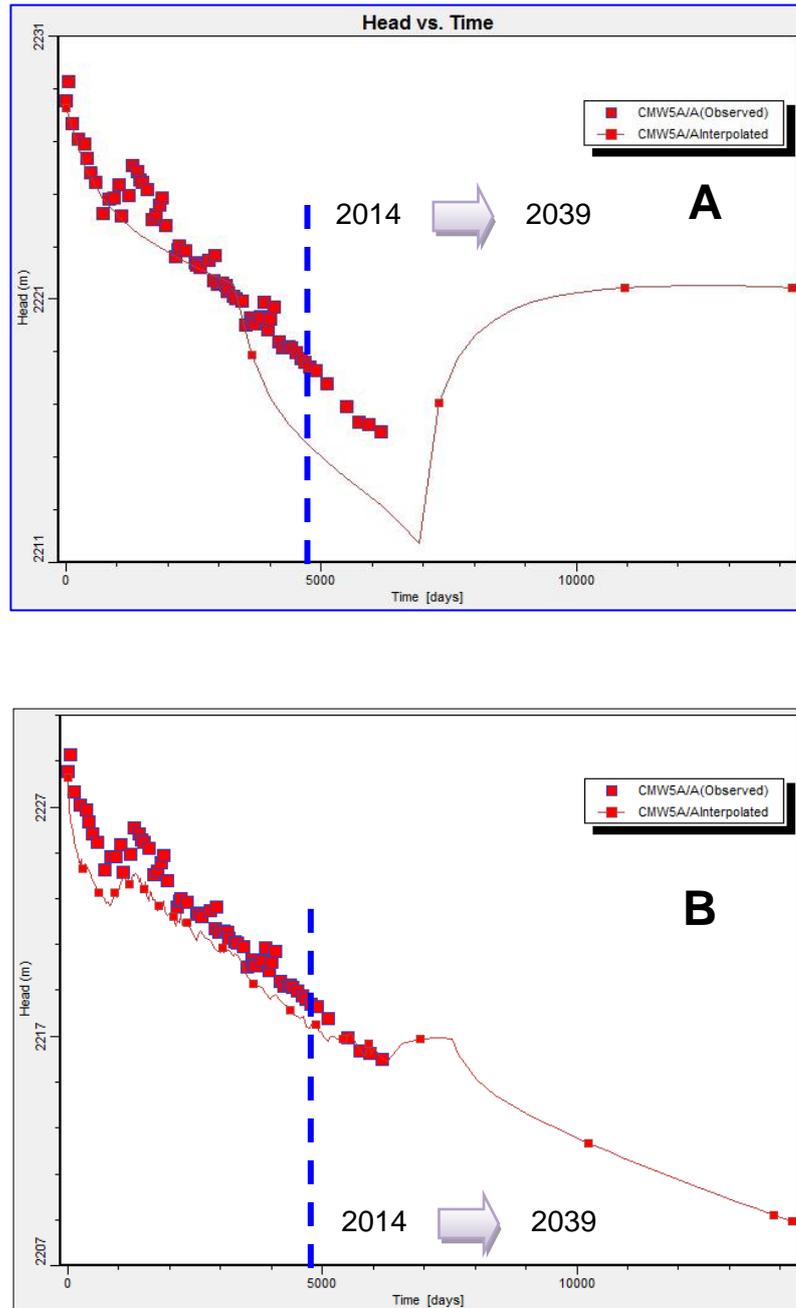


Figura 6-15: Predicción periodo 2014-2039 para el pozo CMW5A: modelo Validado (A) y modelo Actualizado (B.).

## 7 CONCLUSIONES

- Exponer las características principales de los modelos conceptuales y numéricos implementados en el área de estudio, permitió realizar una propuesta de modelo conceptual actualizado de acuíferos libres a semiconfinados con una geometría definida por controles estructurales y que abarque toda la extensión de la cuenca.
- El modelo numérico de simulación y predicción existente de agua subterránea del Campo del Arenal elaborado por el INA-CRAS en 2010 se validó y actualizó para incluir datos relevados tras la finalización del mismo, excluyendo la simulación del campo de pozos de Minera Agua Rica.
- La validación del modelo numérico del INA-CRAS 2010, demostró que no se observa un ajuste óptimo en los niveles de los pozos de observación, quedando evidenciado con mayor relevancia en el área inmediata al campo de bombeo de MAA.
- La actualización del modelo numérico del INA-CRAS 2010, incorporó información de caudales de bombeo de MAA (período 1997 a 2014), nuevas perforaciones (período 2009-2013), datos de monitoreos niveles del agua subterránea (período 2010-2014) y datos de cotas topográficas. Esta permitió concluir que:
  - \* El ajuste sobre el volumen de extracción de MAA ingresado al modelo numérico actualizado demostró que el volumen acumulado de extracción por el campo de pozos de MAA, es de 343,28 Hm<sup>3</sup> hasta noviembre de 2014, manteniéndose por debajo del volumen acumulado del modelo del INA-CRAS 2010 durante todo el periodo simulado, mientras que para este último fue de 476,20 Hm<sup>3</sup>.
  - \* La variable de bombeo fue sobredimensionada en el modelo INA-CRAS 2010 en 132,92 Hm<sup>3</sup>, siendo la extracción del modelo actualizado, la que representó con mayor fidelidad el proceso de extracción, que se observó en el ajuste de los hidrogramas.
  - \* El ajuste del modelo mejoró considerablemente la estadística de calibración al ingresar 633 datos provenientes de 17 pozos de observación, comparados con los 104 datos provenientes de 9 pozos de observación. La comparación de los siguientes resultados demuestran tal mejora: la raíz cuadrática promedio (RMS) del modelo actualizado fue de 16,90 m, en tanto que en el modelo numérico previo fue de 108,61 (m); la media residual obtenida fue de 0,94 (m) cercana al valor óptimo de una unidad, mientras que en el modelo original fue de 0,34 (m).
  - \* El modelo numérico actualizado permitió concluir que los hidrogramas resultantes evidencian dos tipos comportamientos de los niveles de agua en los pozos de observación: 1) Los pozos de monitoreo ubicados en el área de influencia directa del campo de bombeo de MAA (CMW7, PZ2A, PZ2, CMW13, CMW12, CMW10A, CMW5A y PW3), responden al mismo, al presentar fluctuaciones congruentes con la extracción del agua, observándose un muy buen ajuste, y 2) Los hidrogramas de los pozos (CA1, CMW11A, CMW2, CMW3, CMW4, CMW6A, CMW6B, PZ3A, CP1) exteriores al campo de pozos de bombeo presentan comportamientos variables según sea su área de ubicación como era previsible: Podría indicar poca o ninguna influencia del campo de pozos o estar condicionados por otros parámetros ingresados al modelo numérico como: las propiedades hidráulicas del acuífero, las

condiciones de borde impuestas; área y volumen de recarga, geometría de la capa, profundidad a la que el pozo monitorea el acuífero, o la cercanía a un curso de escurrimiento superficial.

- Las predicciones de los modelos para el periodo 2014-2039 permitieron comprobar que el modelo validado predice con alto margen de error la tendencia de la curva de descenso, mientras que el modelo actualizado predice con un mejor grado de ajuste la tendencia de la misma, particularmente dentro del campo de pozos de bombeo de MAA.
- La implementación de campañas de monitoreo para el relevamientos de datos de niveles de agua subterránea y las campañas de exploración de subsuelo son un recurso indispensable para actualizar los modelos numéricos y generar nuevos conocimientos.

## **8 RECOMENDACIONES**

Para mejorar los futuros esfuerzos de simulación de agua subterránea de la DPHyERH, se recomienda:

- \* Continuar con el programa de monitoreos de niveles, mediciones de consumo de agua realizado por MAA y la recopilación de datos adicionales de campo como por ejemplo de aforos de ríos, mediciones topográficas e instalación de una estación meteorológica para recabar datos de precipitación y evapotranspiración.
- \* Instalar data loggers de nivel en los pozos clave de monitoreo.
- \* Realizar una campaña de prospección geofísica que permita definir con mayor precisión la geometría de subsuelo.
- \* Implementar un nuevo modelo conceptual que represente con mayor fidelidad el conocimiento del sistema natural de la Cuenca de Campo del Arenal.
- \* Implementar un nuevo modelo numérico de flujo de agua subterránea que tenga en cuenta la nueva conceptualización del sistema natural de la Cuenca de Campo del Arenal.

## 9 REFERENCIAS

- Australasian Groundwater & Environmental Consultants Pty Ltd. (2013). *La Recalibración del Modelo del Campo del Arenal de MAA*. Brisbane, Queensland.
- Australasian Groundwater & Environmental Consultants Pty Ltd. (2002). *El modelo de agua subterránea del Campo del Arenal Minera Alumbrera*. Queensland.
- Betancur, T., Palacios, C. (25 de Septiembre de 2009). *bdigital Portal de Revistas UN DYNA*. Recuperado el 12 de Abril de 2016, de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/13465/14369>
- Bossi, G., Muruaga, C. (2009). Estratigrafía e Inversión Tectónica del "Rift" Neógeno en el Campo del Arenal, Catamarca, Argentina. *Andean Geology*, 36 (2), 311-341.
- Bossi, G., Palma, R. (1982). Reconsideración de la estratigrafía del Valle de Santa María, Provincia de Catamarca, Argentina. *Congreso Latinoamericano de Geología*, N°5, Actas 1, págs. 155-172. Buenos Aires.
- Bossi, G., Muruaga, C., Gavriloff, I. (1999). Ciclo Andino. Neógeno-Pleistoceno. Sedimentación. En G. González Bonorino, R. Omarini, J. Viramonte (Ed.), *Congreso Geológico Argentino N°14, Relatorio 1*, págs. 329-360. Salta.
- Bossi, G., Muruaga, C., Sanagua, J., Hernando, A., Quiroga, G., Ahumada, A., y otros. (1992). Aloestratigrafía del Neógeno del Valle del Cajón (Provincia de Catamarca). En R. A. N°4 (Ed.), *Actas 3*, págs. 137-144. San Miguel de Tucumán.
- González Bonorino, F. (1950b). Geología y petrografía de las Hojas 12d Capillitas y 13d Andalgalá. (70), 100. Buenos Aires: Boletín del Servicio Nacional Minero Geológico.
- Hydro-Geo Consultants, Inc. (1995). *Evaluación de los Recursos Hídricos Proyecto Alumbrera Minera Alumbrera*. Union Boulevard, Suit 400 Lakewood, CO 80228.
- Merea Llanos, A. (1980). Geología y Prospección Hidrogeológica de la Zona Sur del Campo del Arenal Provincia de Catamarca. *Asociación Geológica Argentina*, XXXV (4), 453-459.
- Minera Agua Rica LCC. (2007). *Proyecto Agua Rica Informe de Impacto Ambiental Volumen V*. Rescan Environmental Service Ltd.
- Muruaga, C. (2001a). Estratigrafía del Mienbro El Jarillal (Formación Chiquimil, Mioceno Superior), la Sierra de Hualfín, Catamarca. *Acta Geológica Lilloana* 18 (2), (págs. 265-280).
- Muruaga, C. (2001b). Estratigrafía y desarrollo tectosedimentario de sedimentos terciarios en los alrededores de la Sierra de Hualfín, borde suroriental de la Puna, Catamarca, Argentina. *Asociación Argentina de Sedimentología*, 8 (1), 27-50.
- Muruaga, C. (1998). Estratigrafía y Sedimentología del Terciario Superior de la Sierra de Hualfín, entre las localidades de Villa Vil y San Fernando, Provincia de Catamarca. 270. Tucumán.
- Nieto, R. (2011). *Programa de Monitoreo de Niveles (PM-N) Cuenca Campo del Arenal*. Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos, Catamarca.

Rodríguez, J. (1999). *Estudio de subsuelo en el Campo del Arenal, departamento Santa María, Provincia de Catamarca*. Documento Interno DI - 311, Instituto Nacional del Agua y del Ambiente, San Juan.

Rodríguez, J., Gianni, R. (2010). *Estudio hidrogeológico en Campo del Arenal Provincia de Catamarca. Informe final del estudio. Capítulo I: Hidrogeología general*. Informe Técnico IT 288, Instituto Nacional del Agua - Centro Regional de Agua Subterránea, San Juan.

Ubal dini, M. (2006). *Análisis: Datos de Base de los Modelos Matemáticos. Campo del Arenal*. Informe Interno, Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos.

Victoria, J., Luna, P. (2010). *Estudio hidrogeológico en Campo del Arenal, provincia de Catamarca. Informe final del estudio. Capítulo VI: Modelo Matemático de Simulación y Predicción*. Informe Técnico IT 291, Instituto Nacional del Agua - Centro Regional de Agua Subterránea., San Juan.

Victoria, J., García, E., Rodríguez, R. (1998). *Evaluación Hidrogeológica del Campo del Arenal: Hidrología subterránea y Características químicas del agua superficial y subterránea. Departamneto Santa María, Provincia de Catamarca*. Informe Técnico IT-189, Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA), San Juan.

Wang, H., Anderson, M. (1982). *Introduction to groundwater modeling. Finite Difference and Finite Element Methods*. San Francisco: AP Academic Press.

## **10 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA**

Custodio, E., Llamas, M. (1976). *Hidrología Subterránea*. Barcelona: Omega.

Cruces de Abia, J., 2006. *Modelo Modflow. Módulo I Contaminación Ambiental*. 69 pp.

Departamento de Administración de Uso del Agua y Canon, 2014. *Datos de Caudales de Extracción por bombeo de Minera Alumbreira*.

Minera Agua Rica LLC. (2015). Información de los Programas de Monitoreo en Campo Arenal y Cazadero, periodo 2010-2014: Niveles piezométricos; Caudales de ríos y Datos químicos de aguas subterránea. Andalgalá, Catamarca.

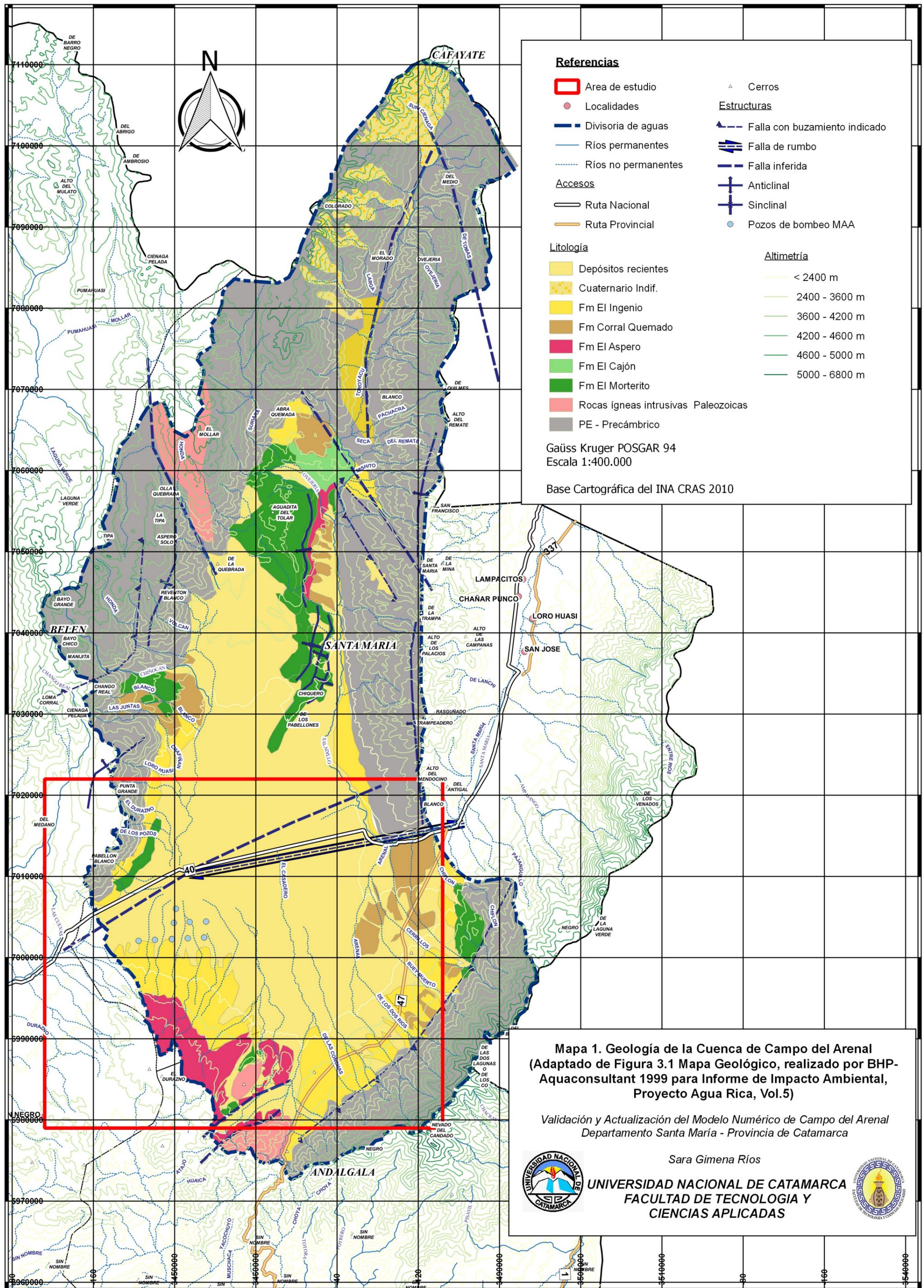
Minera Alumbreira, Ltd. (2014). *Información técnica de Pozos Campo del Arenal: Perfiles de perforaciones, Datos topográficos, Caudales de bombeo, Datos de niveles de agua, Datos de ensayos de bombeo, Datos de aforos*.

Solohaga, C. (2015). *Relevamiento Planialtimétrico en Campo del Arenal, Santa María, Catamarca*. Dirección Provincial de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos, Catamarca.

Ubal dini, M. (2007). *Análisis del Estudio de Impacto sobre el Recurso Subterráneo del Campo del Arenal MAR-WMC*. Informe Interno.

# ANEXO I

## MAPAS



**Referencias**

- Area de estudio
- Localidades
- Divisoria de aguas
- Ríos permanentes
- Ríos no permanentes
- Ruta Nacional
- Ruta Provincial
- △ Cerros
- Estructuras**
- Falla con buzamiento indicado
- Falla de rumbo
- Falla inferida
- + Anticlinal
- Sinclinal
- Pozos de bombeo MAA

**Litología**

- Depósitos recientes
- Cuaternario Indif.
- Fm El Ingenio
- Fm Corral Quemado
- Fm El Aspero
- Fm El Cajón
- Fm El Morterito
- Rocas ígneas intrusivas Paleozoicas
- PE - Precámbrico

**Altimetría**

- < 2400 m
- 2400 - 3600 m
- 3600 - 4200 m
- 4200 - 4600 m
- 4600 - 5000 m
- 5000 - 6800 m

Gaüss Kruger POSGAR 94  
Escala 1:400.000

Base Cartográfica del INA CRAS 2010

**Mapa 1. Geología de la Cuenca de Campo del Arenal (Adaptado de Figura 3.1 Mapa Geológico, realizado por BHP-Aquaconsultant 1999 para Informe de Impacto Ambiental, Proyecto Agua Rica, Vol.5)**

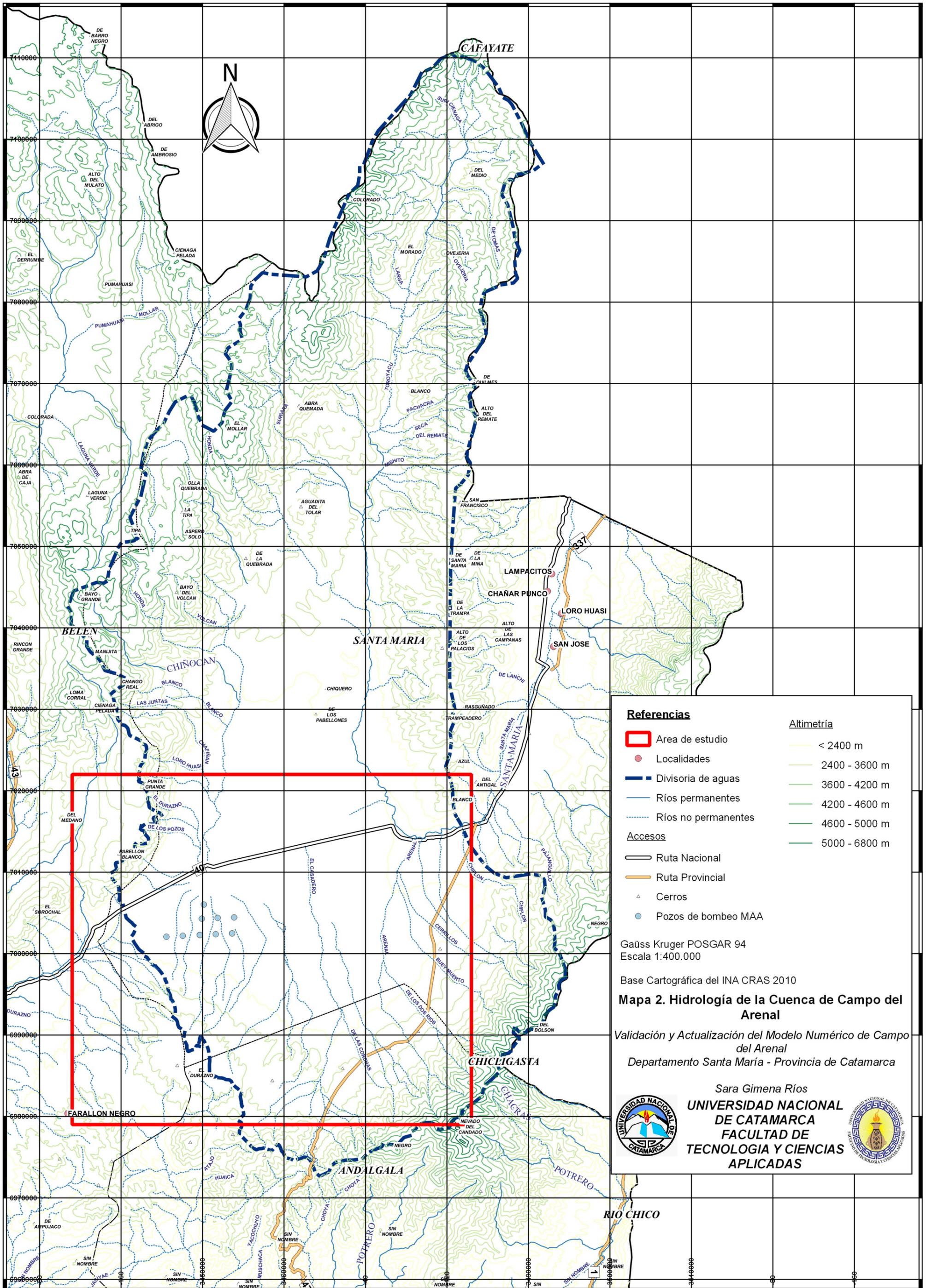
Validación y Actualización del Modelo Numérico de Campo del Arenal  
Departamento Santa María - Provincia de Catamarca

Sara Gimena Ríos



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CATAMARCA**  
FACULTAD DE TECNOLOGIA Y CIENCIAS APLICADAS





**Referencias**

- Area de estudio
- Localidades
- Divisoria de aguas
- Ríos permanentes
- Ríos no permanentes
- Accesos**
- Ruta Nacional
- Ruta Provincial
- △ Cerros
- Pozos de bombeo MAA

**Altimetría**

- < 2400 m
- 2400 - 3600 m
- 3600 - 4200 m
- 4200 - 4600 m
- 4600 - 5000 m
- 5000 - 6800 m

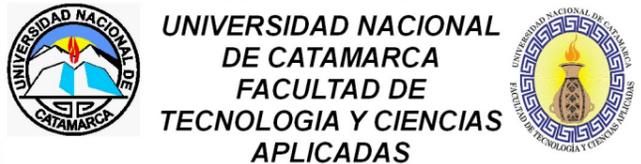
Gaüss Kruger POSGAR 94  
Escala 1:400.000

Base Cartográfica del INA CRAS 2010

**Mapa 2. Hidrología de la Cuenca de Campo del Arenal**

Validación y Actualización del Modelo Numérico de Campo del Arenal  
Departamento Santa María - Provincia de Catamarca

Sara Gimena Ríos  
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CATAMARCA**  
FACULTAD DE TECNOLOGIA Y CIENCIAS APLICADAS

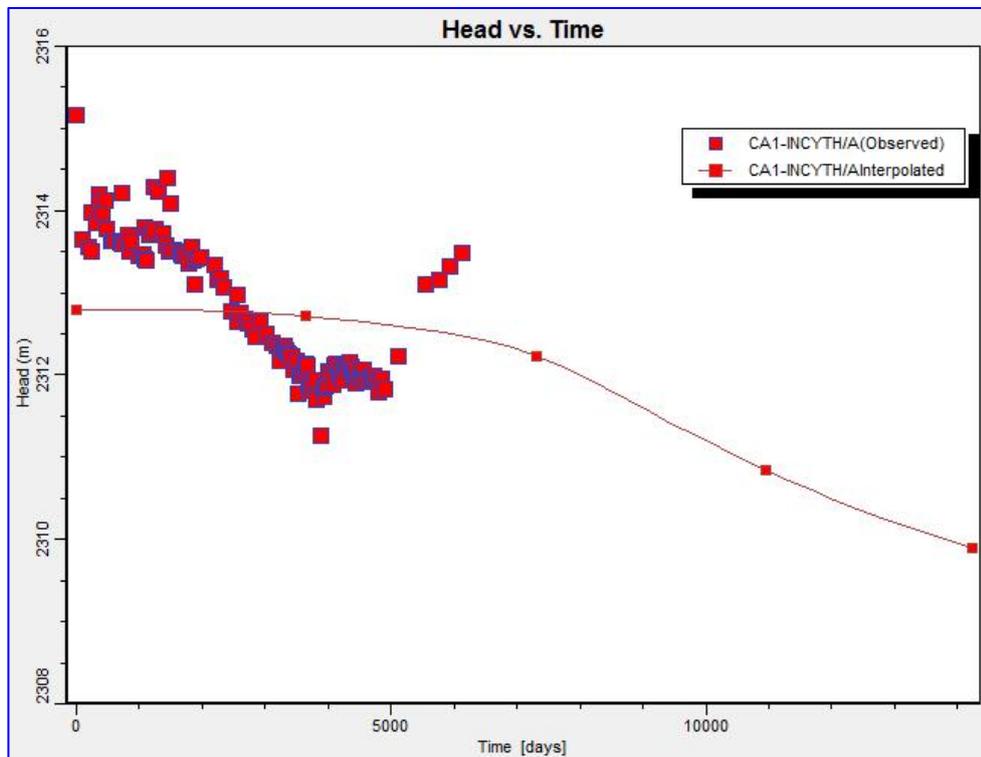
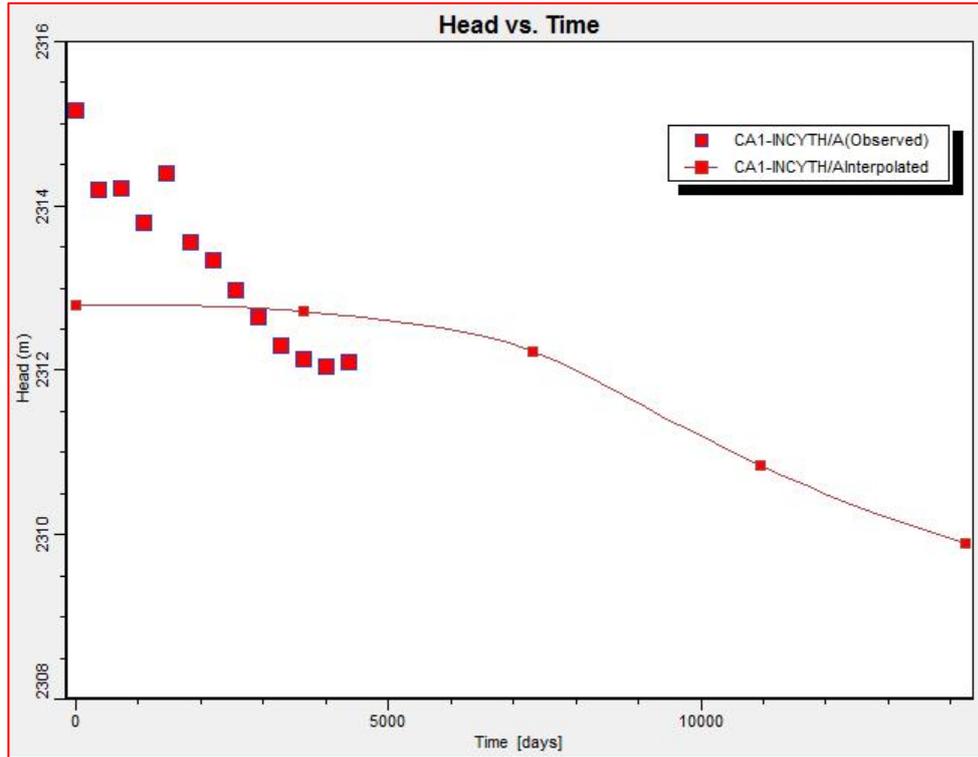


# **ANEXO II**

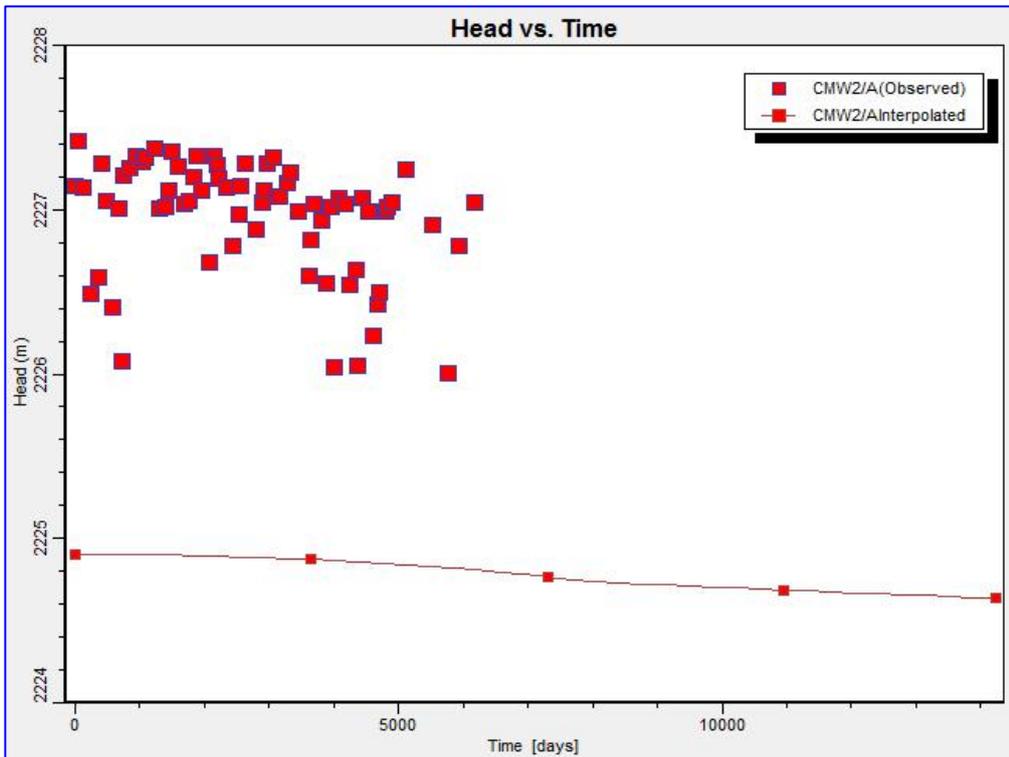
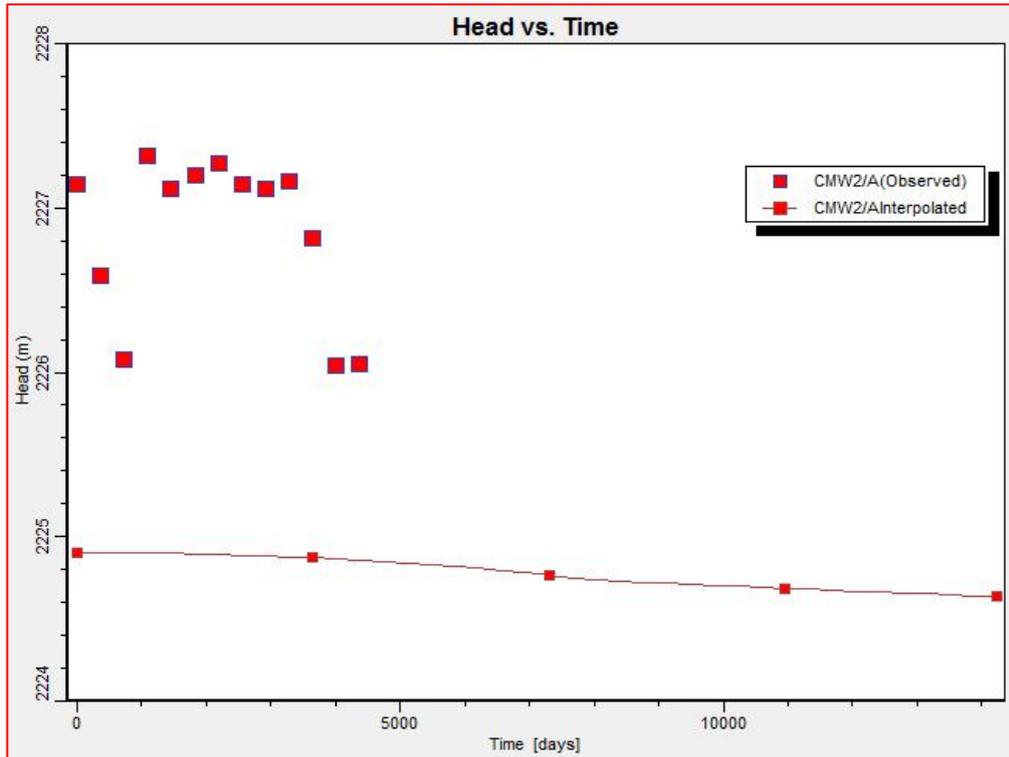
## **Modelo Validado**

### **Hidrogramas de los pozos de observación**

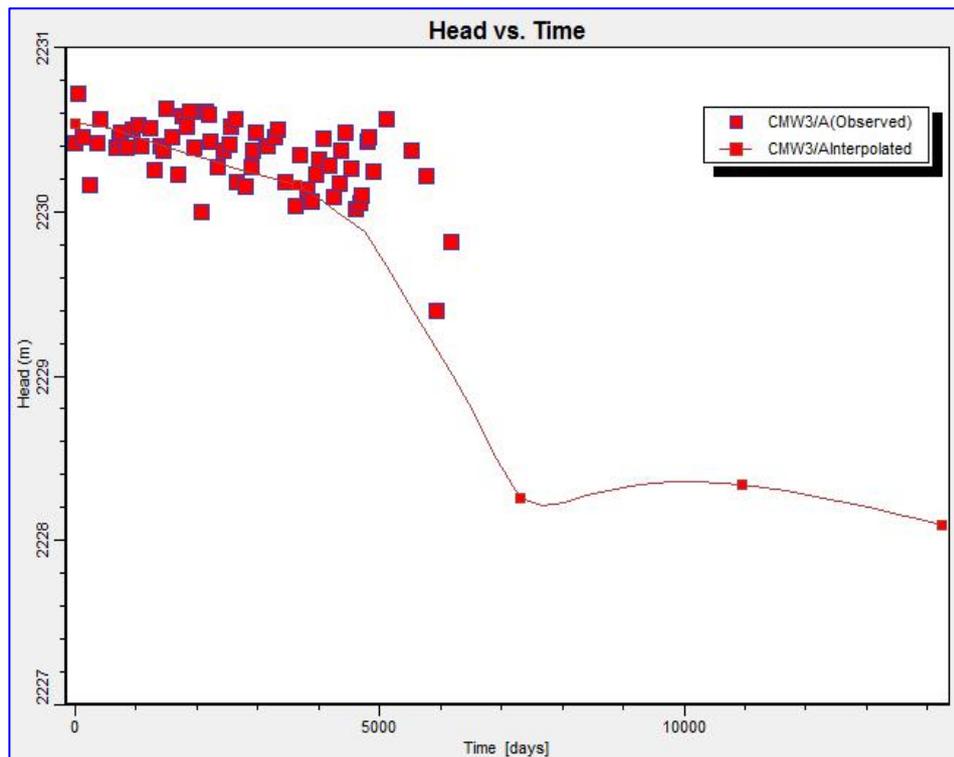
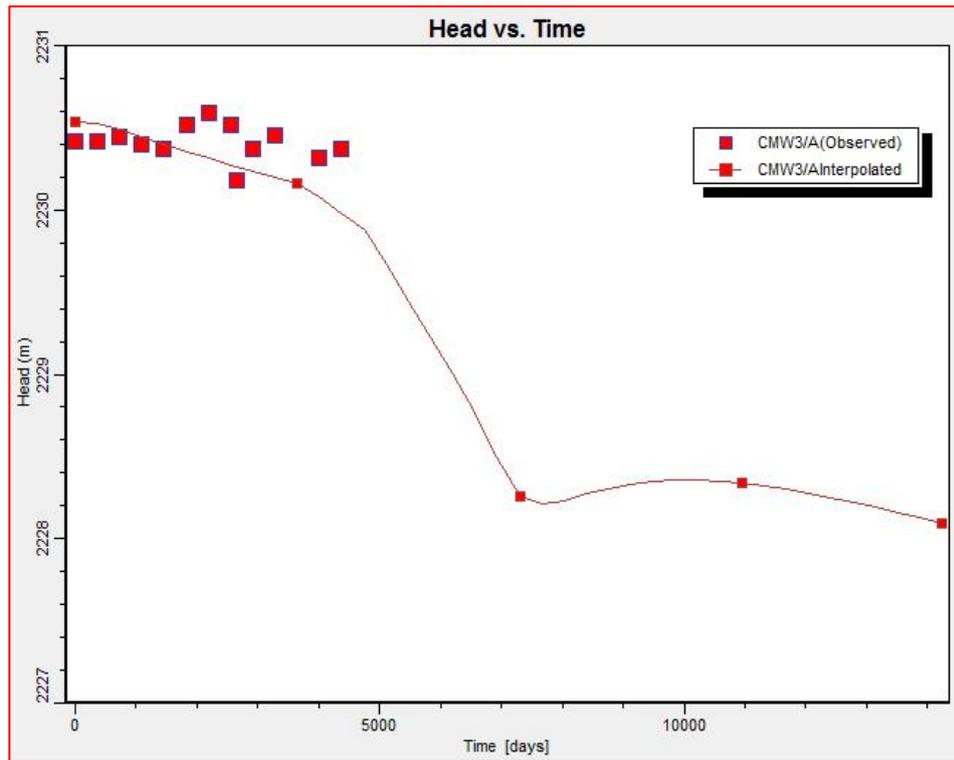
**(CA1, CMW2, CMW3, CMW4, CMW5A, CMW6A, CP1,  
PZ1 y CMW11A)**



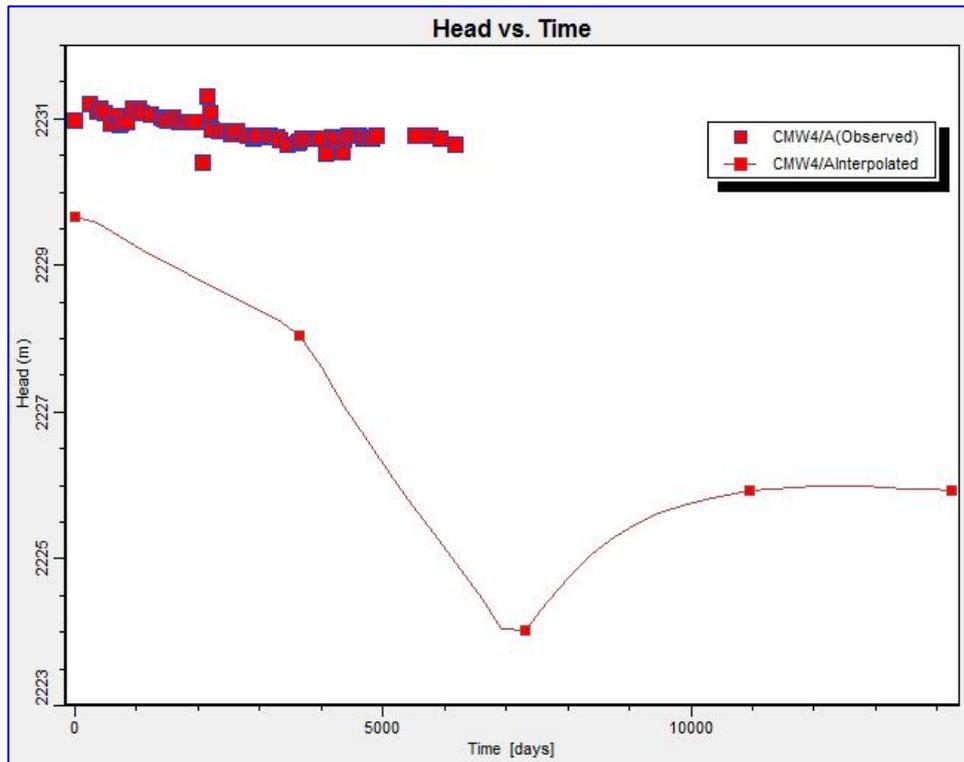
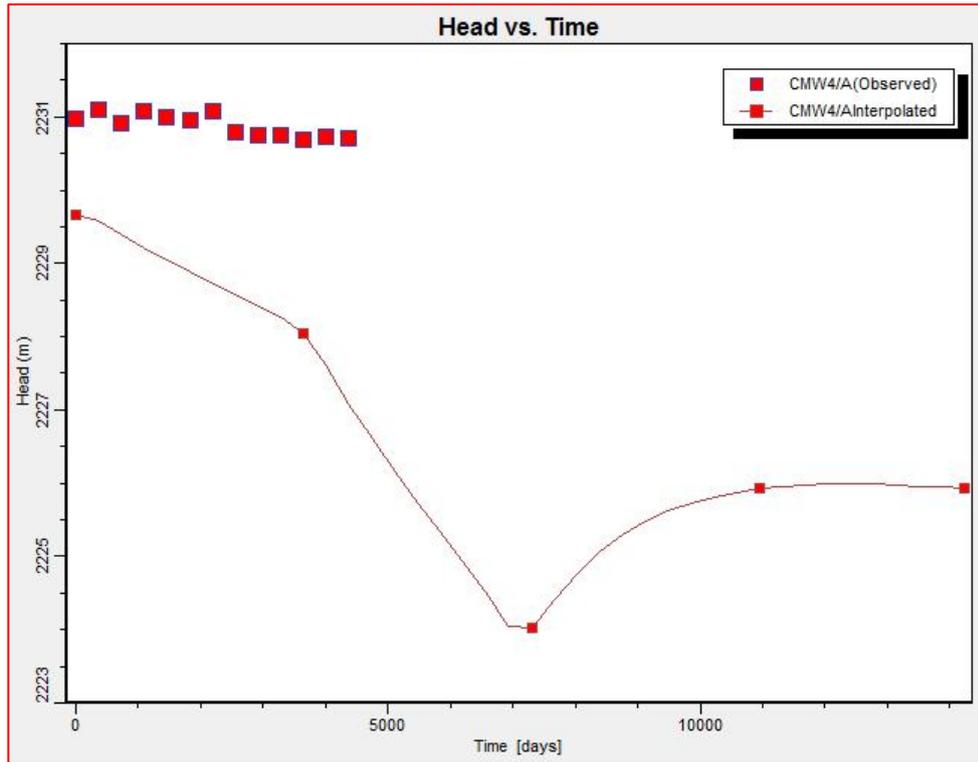
Anexo II: Hidrogramas del pozo CA1, modelo INA-CRAS 2010 (sup.) y modelo validado 2014 (inf.).



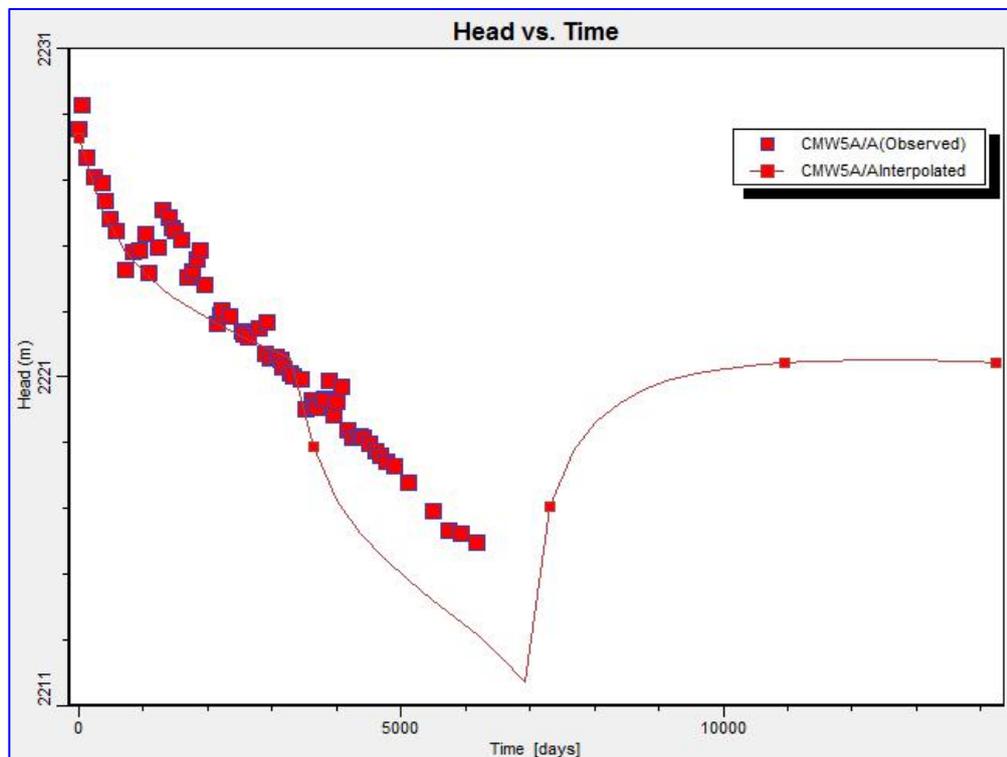
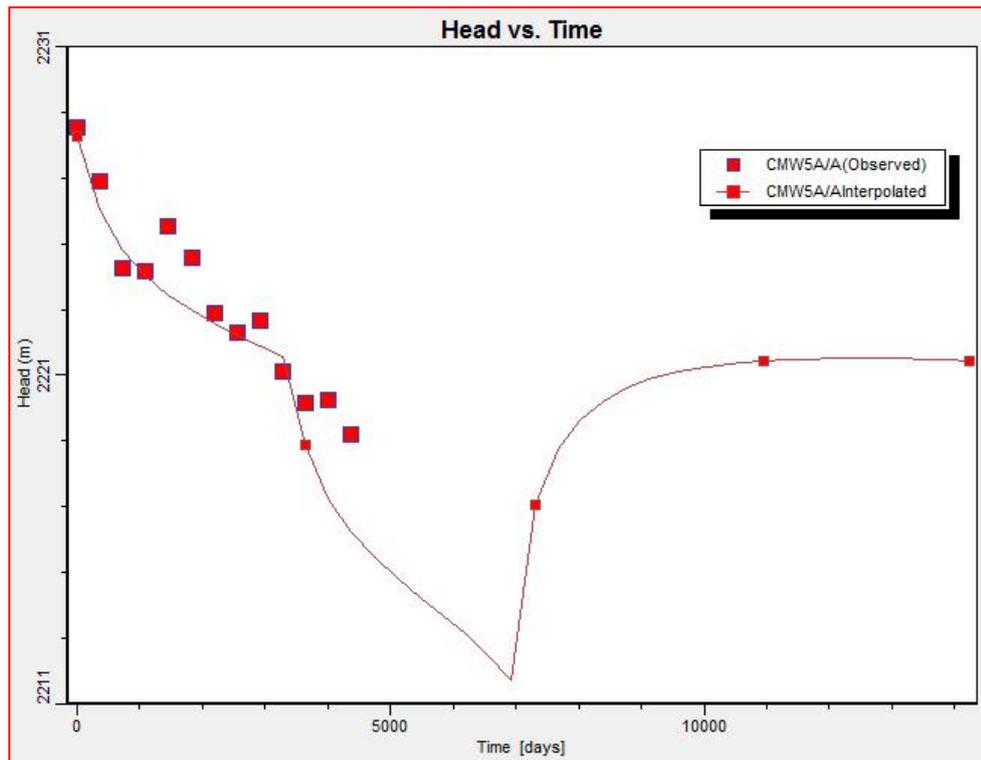
Anexo II: Hidrogramas del pozo CMW2, modelo INA-CRAS 2010 (sup.) y modelo validado 2014 (inf.).



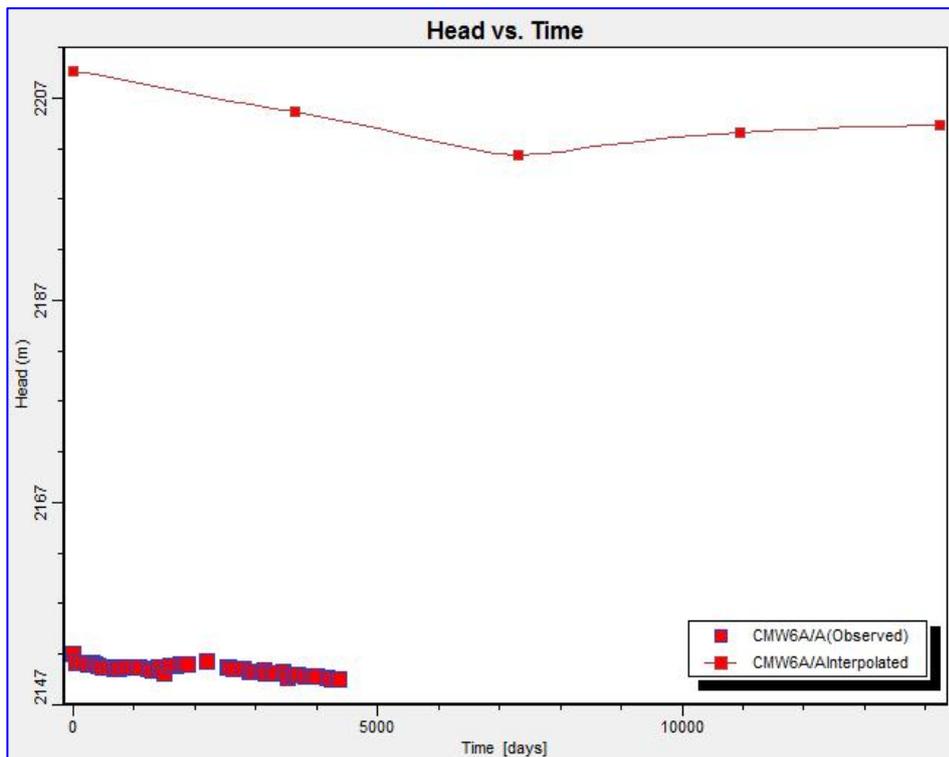
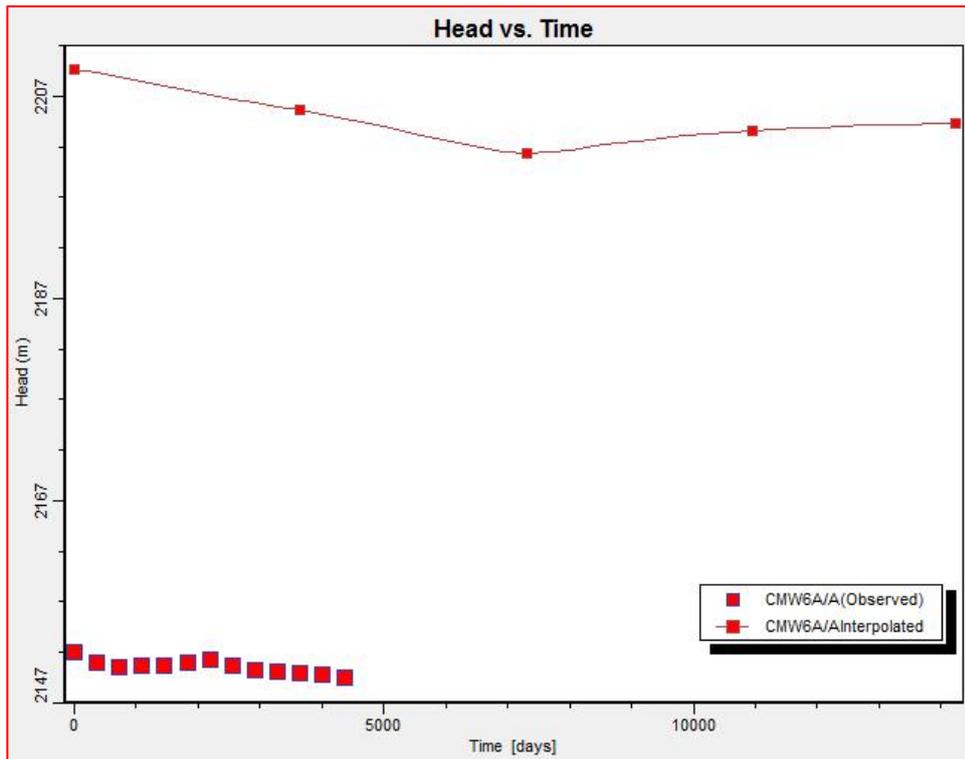
Anexo II: Hidrogramas del pozo CMW3, modelo INA-CRAS 2010 (sup.) y modelo validado 2014 (inf.).



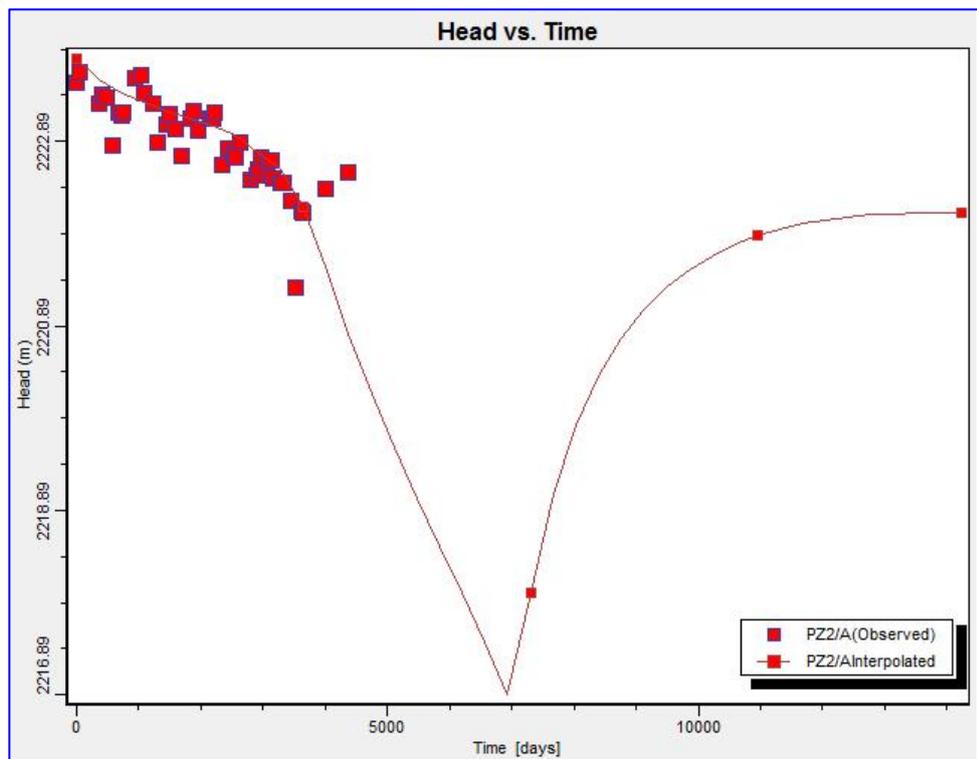
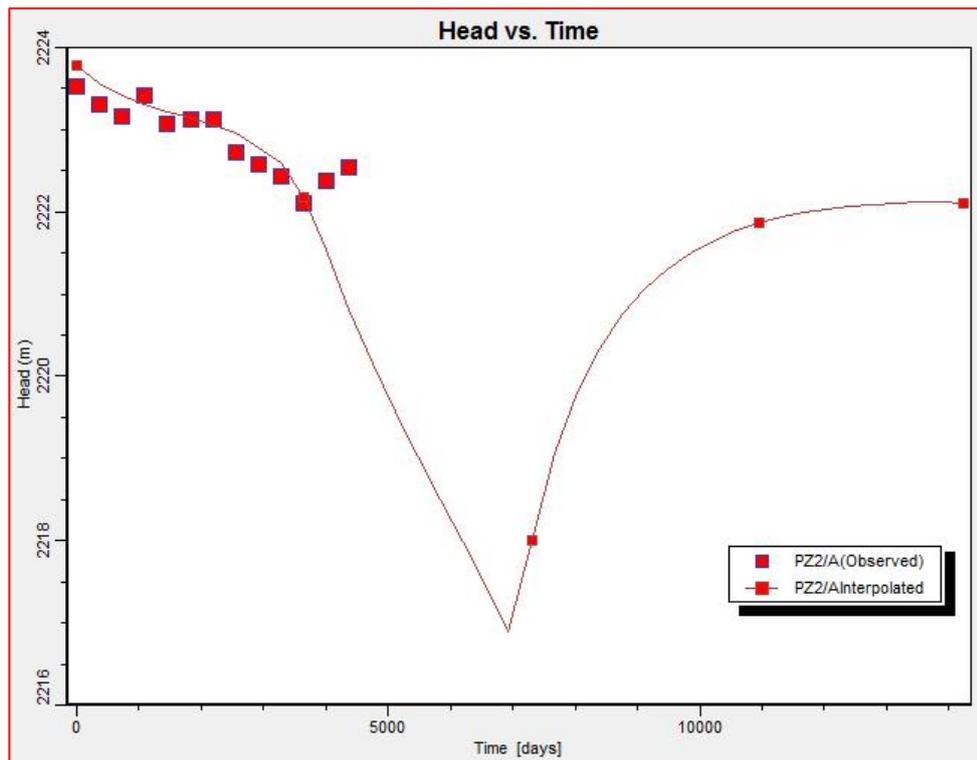
Anexo II: Hidrogramas del pozo CMW4, modelo INA-CRAS 2010 (sup.) y modelo validado 2014 (inf.).



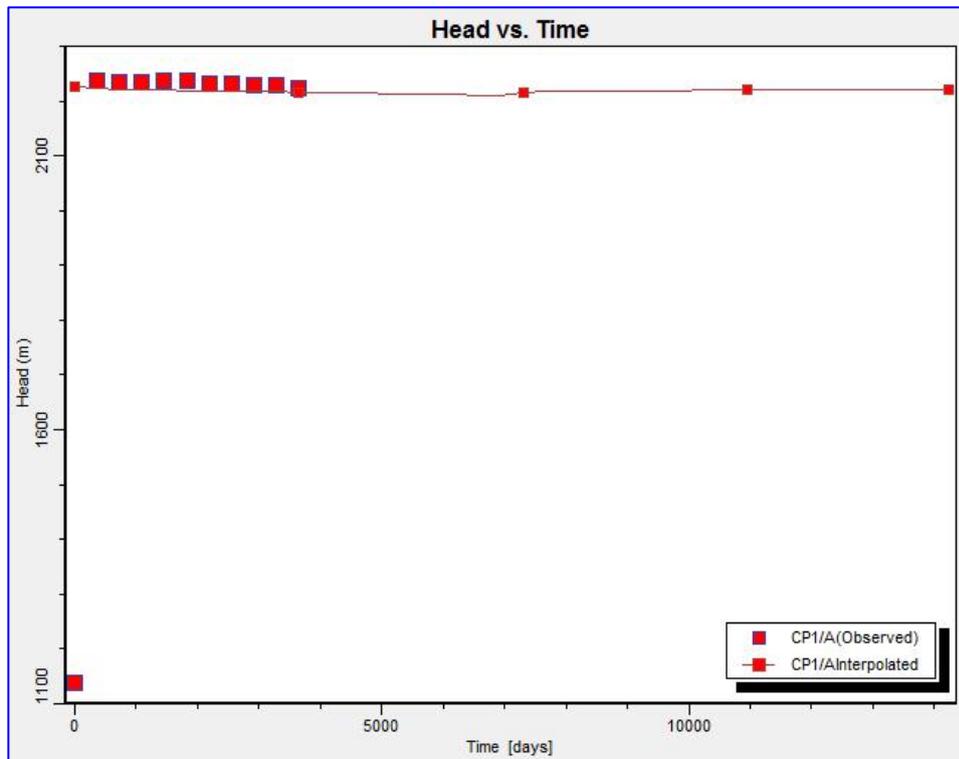
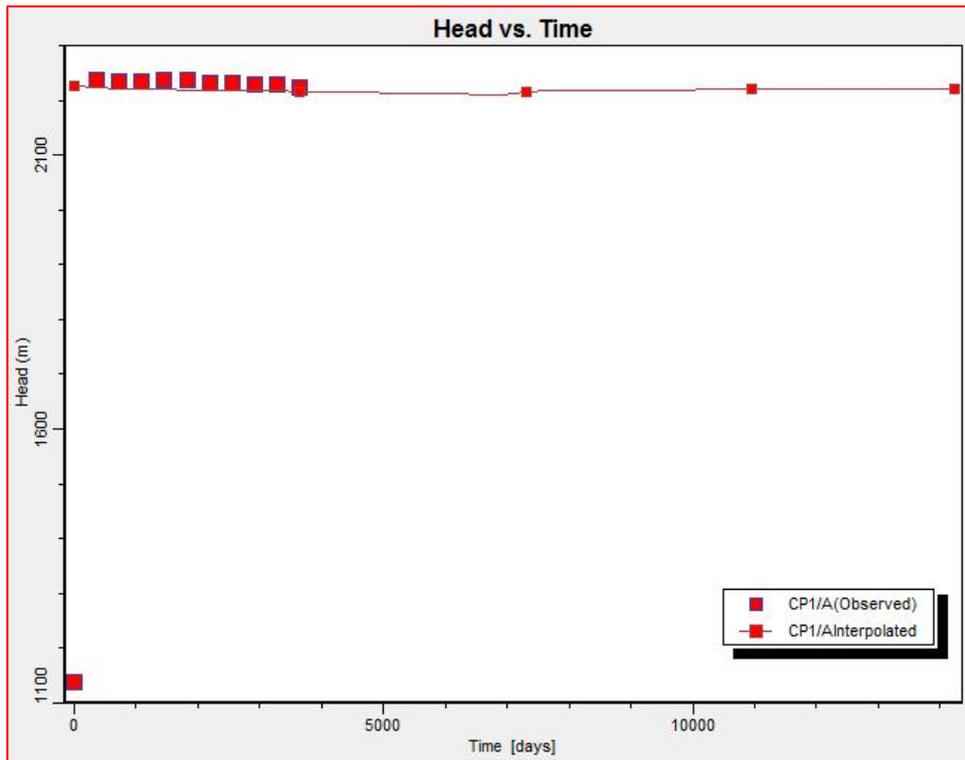
Anexo II: Hidrogramas del pozo CMW5A, modelo INA-CRAS 2010 (sup.) y modelo validado 2014 (inf.).



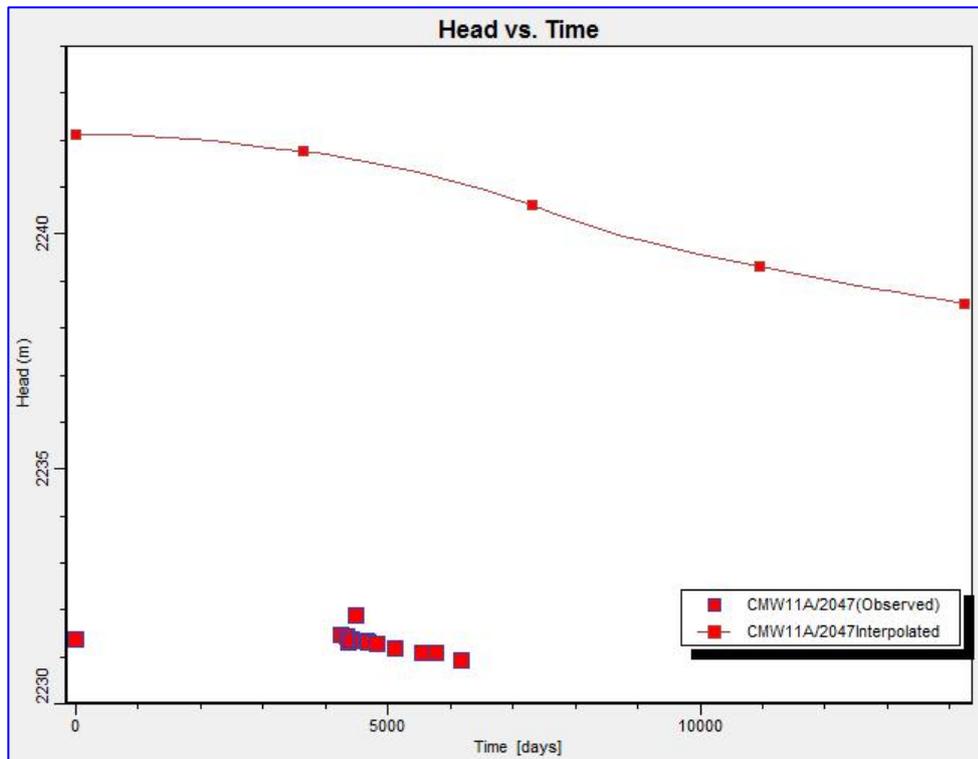
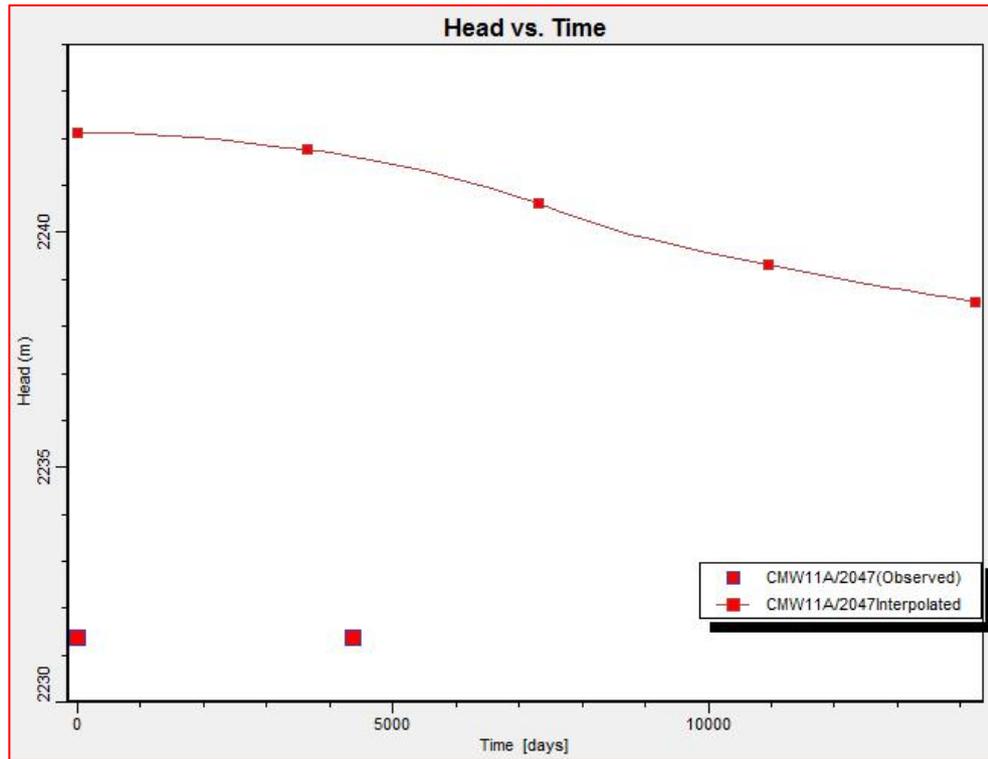
Anexo II: Hidrogramas del pozo CMW6A, modelo INA-CRAS 2010 (sup.) y modelo validado 2014 (inf.).



Anexo II: Hidrogramas del pozo PZ2, modelo INA-CRAS 2010 (sup.) y modelo validado 2014 (inf.).



Anexo II: Hidrogramas del pozo CP1, modelo INA-CRAS 2010 (sup.) y modelo validado 2014 (inf.).



Anexo II: Hidrogramas del pozo CMW11A, modelo INA-CRAS 2010 (sup.) y modelo validado 2014 (inf.).

# **ANEXO III**

## **TABLAS**

Tabla 1: Pozos Programa Monitoreo de Niveles CA "PM-N".

<b>Sector Suroeste y Oeste</b>		
<b>Pozo</b>	<b>Propietario</b>	<b>Observaciones</b>
<b>CMW 8</b>	MAA	Pozo de monitoreo, cuenca río Los Nacimientos
<b>CMW 9</b>	MAA	Pozo de monitoreo, cuenca río Los Nacimientos
<b>CMW 6A</b>	MAA	Aeropuerto, medir luego de su reparación.
<b>PW 3</b>	MAA	Pozo sin bomba.
<b>PW 1A</b>	MAA	Pozo de bombeo.
<b>PW 6</b>	MAA	Pozo de bombeo. Medición del nivel dinámico
<b>PW 7</b>	MAA	Pozo de bombeo. Medición del nivel dinámico
<b>CMW 10 A y CMW 10B</b>	MAA	Pozos de observación de PW 8, de diferentes profundidades
<b>CMW 5 A</b>	MAA	Pozo de observación de PW 7
<b>CMW 7</b>	MAA	Monitoreo. Área de Los Pozuelos
<b>Simón Marcial</b>	Doméstico	Pozo cavado
<b>ARM 8A</b>	MAR	Pozo monitoreo, acuífero profundo
<b>ARM 8B</b>	MAR	Pozo monitoreo, acuífero superior
<b>CMW 4</b>	MAA	Pozo de monitoreo
<b>ARM 9</b>	MAR	Pozo de monitoreo, acuífero profundo
<b>Paloma Yaco</b>	Doméstico	Pozo cavado. Sector Los Pozuelos
<b>Potrerosillos</b>	Doméstico	Pozo cavado. Sector los Pozuelos
<b>Sector Centro-este y Sureste</b>		
<b>CMW 3</b>	MAA	Pozo de monitoreo
<b>WEA 3</b>	MAR	Pozo surgente
<b>Santa Clara Viejo</b>	Doméstico	Pozo cavado
<b>CMW 2</b>	MAR	Pozo de monitoreo
<b>ARM 10A, 10B y 10 C</b>	MAR	Cada uno de diferente profundidad (uno de ellos surgente)
<b>CMW 1</b>	MAA	Pozo de monitoreo
<b>CMW 11A y CMW 11B</b>	MAA	Pozos de monitoreo a diferentes profundidades
<b>ARP 1 y</b>	MAR	Pozo para ensayo de bombeo
<b>ARM 1A</b>		Pozos de monitoreo, acuífero superior
<b>CA 1</b>	INCYTH	Pozo de monitoreo.
<b>WEA 4</b>	MAR	Pozo niveles profundos
<b>WMA 1</b>	MAR	Pozo niveles profundos
<b>ARM 7B</b>	MAR	Pozo de monitoreo

Tabla 2: Últimos pozos construidos en CA periodo 2009 – 2013.

Nombre Pozo	Tipo de Pozo	Norte	Este	Cota Suelo	Tramo Filtros (m)	Prof. Entubado (m)	Diám. (Pulg.)	NE Inicial (m)
<b>CMW 8</b>	Perforación	7000096.86	3435473.10	2168.73	82-136	146	6	29.50
<b>CMW 9</b>	Perforación	7002092.53	3438582.14	2231.26	101-194	202	6	87.79
<b>CMW 10A</b>	Perforación	7004478.45	3453909.13	2277.23	150-210	216	4	56.90
<b>CMW 10B</b>	Perforación	7004489.35	3453918.32	2277.15	70-100	106	4	53.48
<b>CMW 11A</b>	Perforación	7008175.93	3466763.49	2279.84	154-226	226	6	48.38
<b>CMW 11B</b>	Perforación	7008182.76	3466770.92	2279.74	164-223	229	4	48.21
<b>PZ 1A</b>	Perforación	7010262.70	3449717.82	2229.51	4-14.5	15	2	1.87
<b>PZ 2A</b>	Perforación	7008405.74	3449144.55	2227.00	4-14.5	15	2	3.20
<b>PW 1A</b>	Perforación Bombeo	7002274.28	3449669.07	2311.96	148-214	220	16-10	93.52
<b>PW 9</b>	Perforación Bombeo	7006023.21	3450159.68	2243.53	131.5-221.5	228.5	16-10	24.29
<b>CMW 12</b>	Perforación	7002892.21	3443025.52	2305.68	146-188	188	4	96.64
<b>CMW 6B</b>	Perforación	7005768.62	3440894.48	2304.81	157-189	189	4	154.00
<b>PZ 4A</b>	Perforación	7013032.21	3462473.14	2231.79	1.74-18.74	19.24	4	2.30
<b>CMW 13</b>	Perforación	7003272.88	3449733.89	2289.96	135-195	201	3	74.97
<b>PZ 3A</b>	Perforación	7011501.83	3457456.33	2234.87	38-56 74-98	101	3	1.93
<b>PW 5A</b>	Perforación Bombeo	7002478.34	3453638.43	2318.47	150.3-220.3	221.50	16-10	95.40

Tabla 3: Relevamiento Planialtimétrico de la DPHyERH.

Coordenadas de cuadrícula ajustadas (metros)			Cotas Optométricas según modelo Geoidal (metros)			
			EGM2008 *		EGM96 **	
Pozo	Norte	Este	Cota a Suelo	Cota a Boca de Pozo	Cota a Suelo	Cota a Boca de Pozo
<b>ARP 8</b>	7010540.808	3449777.410	2232.159	2232.959	2231.225	2232.025
<b>CMW 12</b>	7002892.211	3443025.515	2306.193	2306.853	2305.675	2306.335
<b>CMW 13</b>	7003272.884	3449733.893	2290.629	2291.559	2289.959	2290.889
<b>CMW6B</b>	7005768.623	3440894.480	2305.328	2306.168	2304.809	2305.649
<b>PW 1</b>	7002286.869	3449657.335	2312.577	2312.577	2311.965	2311.965
<b>PW 1A</b>	7002274.282	3449669.073	2312.576	2312.916	2311.964	2312.304
<b>PW 4</b>	7002381.168	3451620.663	2311.891	2312.331	2311.263	2311.703
<b>PW 5A</b>	7002478.339	3453638.429	2319.102	2319.377	2318.471	2318.746
<b>PW 9</b>	7006023.213	3450159.683	2244.339	2244.999	2243.531	2244.191
<b>PZ 01</b>	7010340.211	3449701.756	2230.539	2230.929	2229.613	2230.003
<b>PZ 1A</b>	7010262.701	3449717.820	2230.434	2231.184	2229.508	2230.258
<b>PZ 2A</b>	7008405.744	3449144.553	2227.858	2228.698	2226.997	2227.837
<b>PZ 3A</b>	7011501.828	3457456.325	2236.015	2237.015	2234.865	2235.865
<b>PZ 4A</b>	7013032.207	3462473.139	2232.949	2233.619	2231.785	2232.455

\* Modelo EGM2008 - Cuadrícula Ajustada para Republica Argentina - Resolución 1'x1'

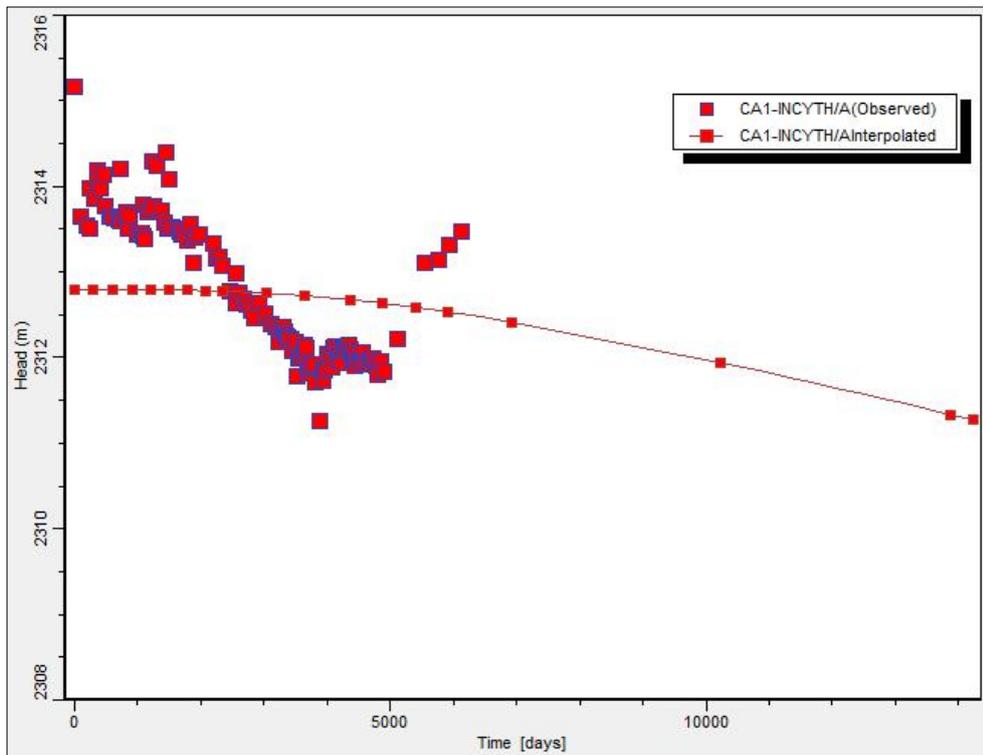
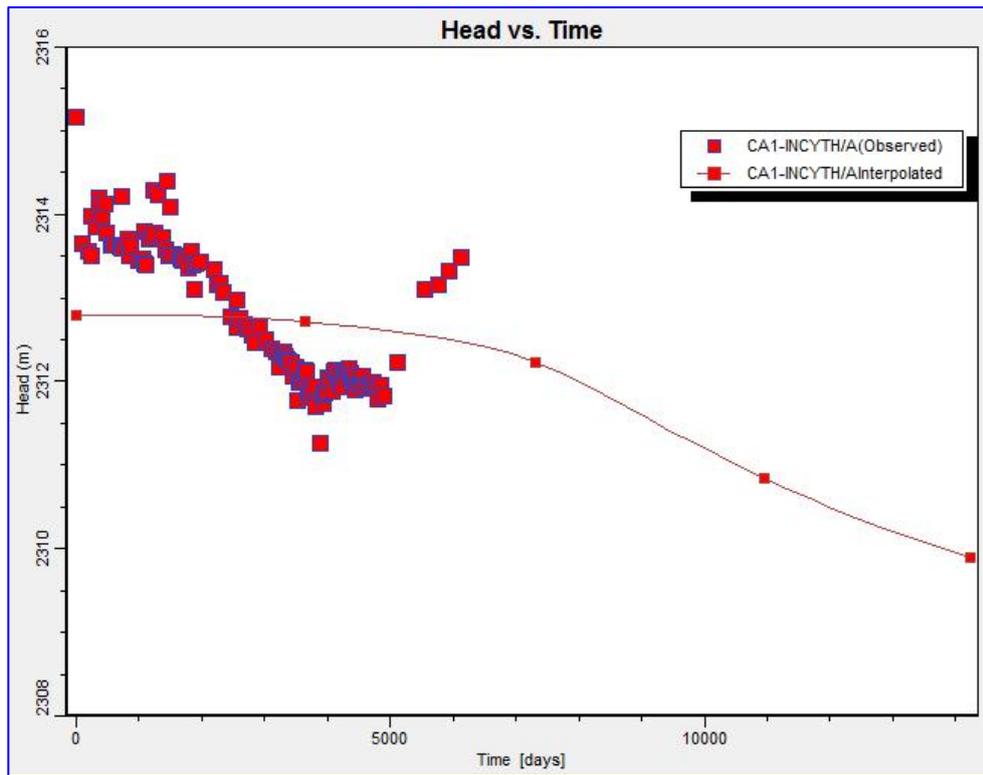
\*\* Modelo Global EGM96 - Trimble Business Center

# **ANEXO IV**

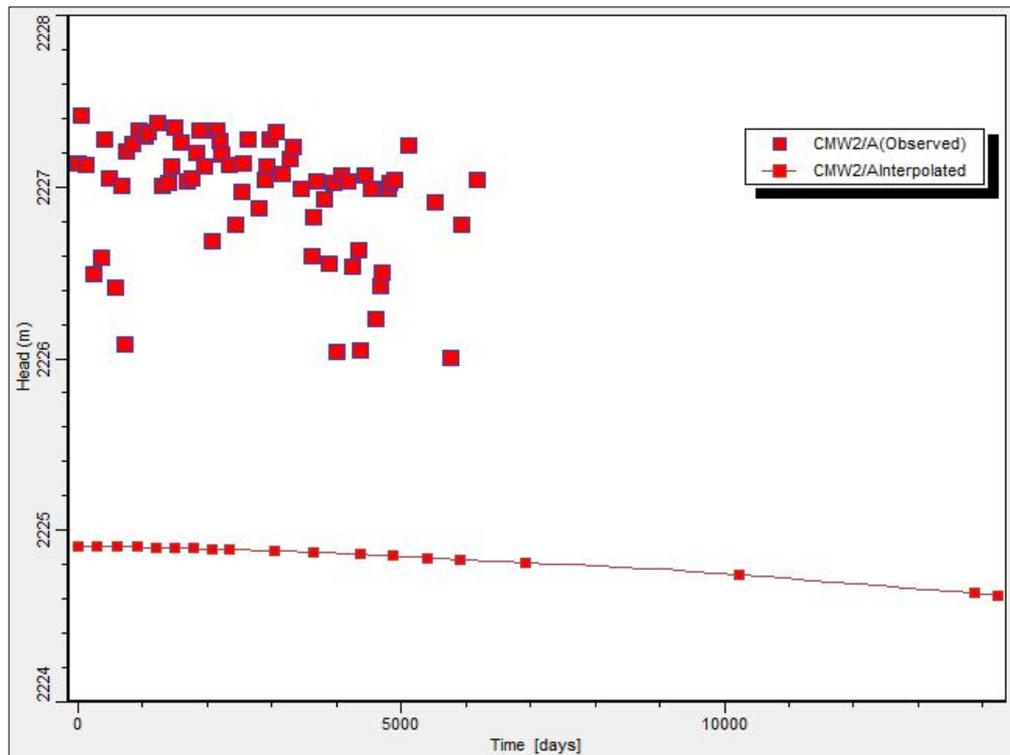
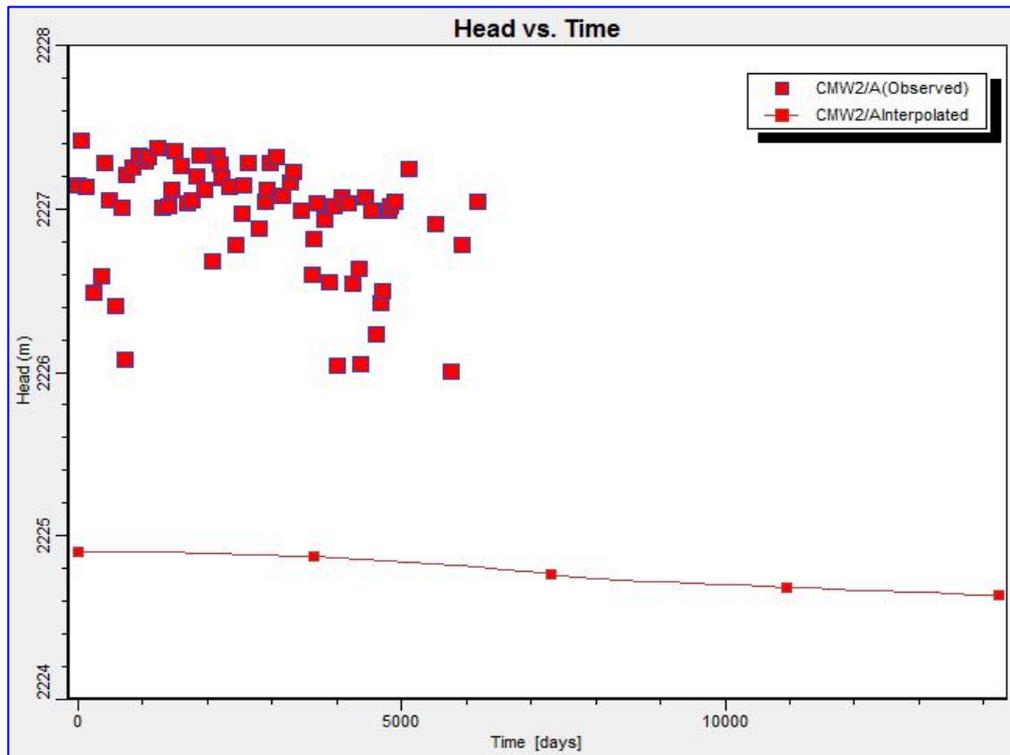
## **Modelo Actualizado**

### **Hidrogramas de los pozos de observación**

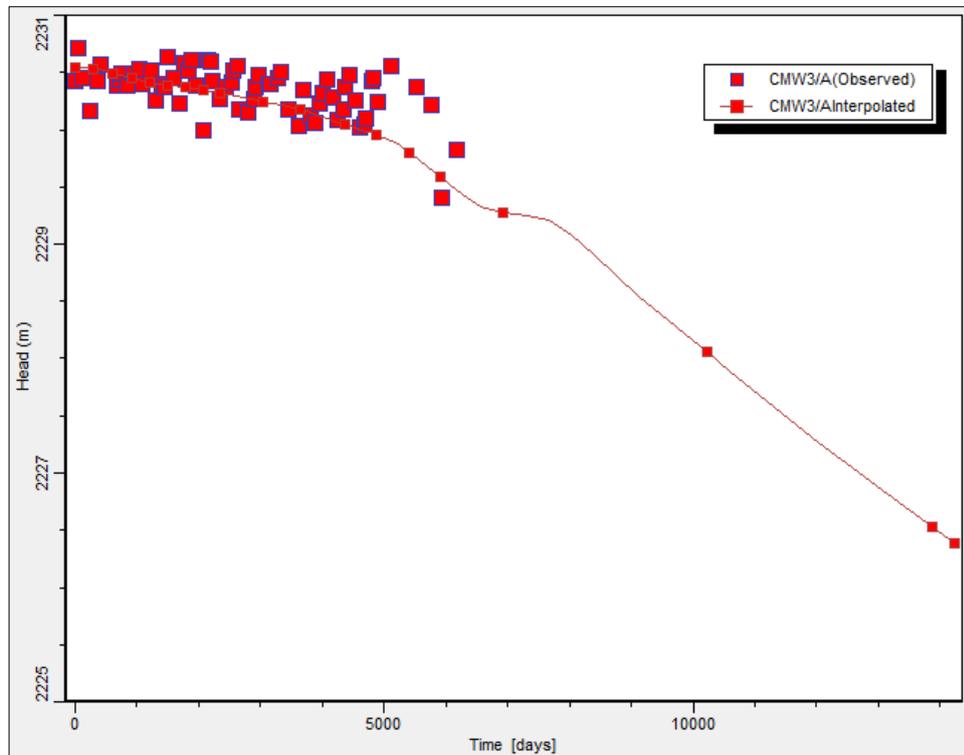
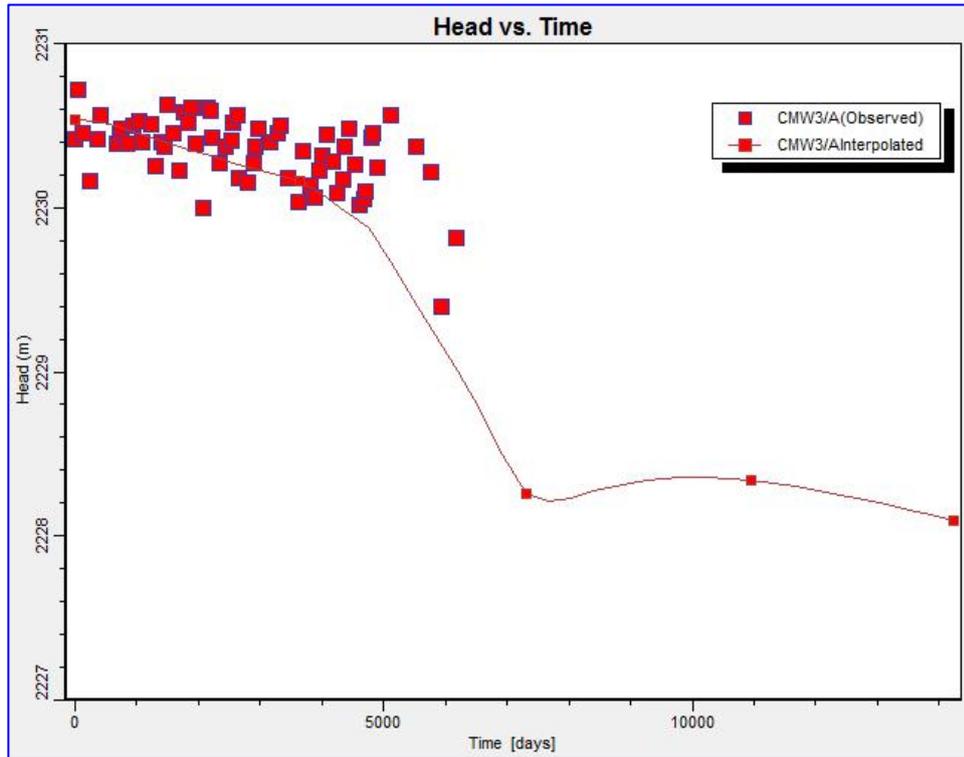
**(CA1, CMW2, CMW3, CMW4, CMW5A, CMW6A,  
CP1, PZ2, CMW11A, PZ2A, PZ3A, CMW7, CMW6B,  
CMW10A, CMW12, CMW13 y PW3)**



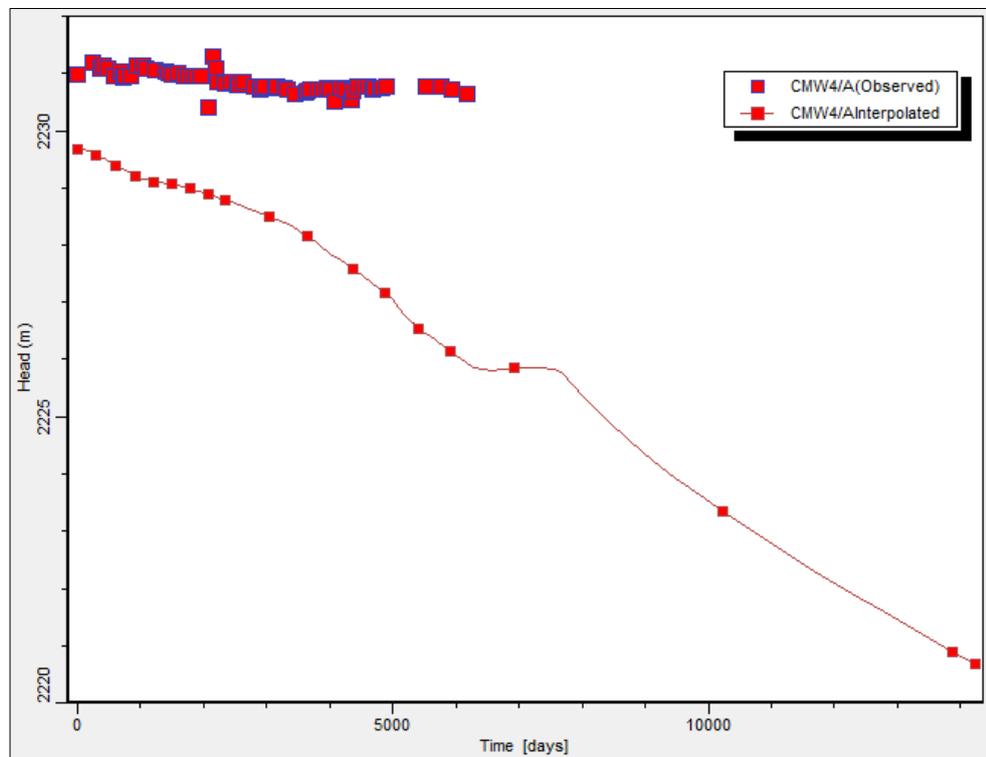
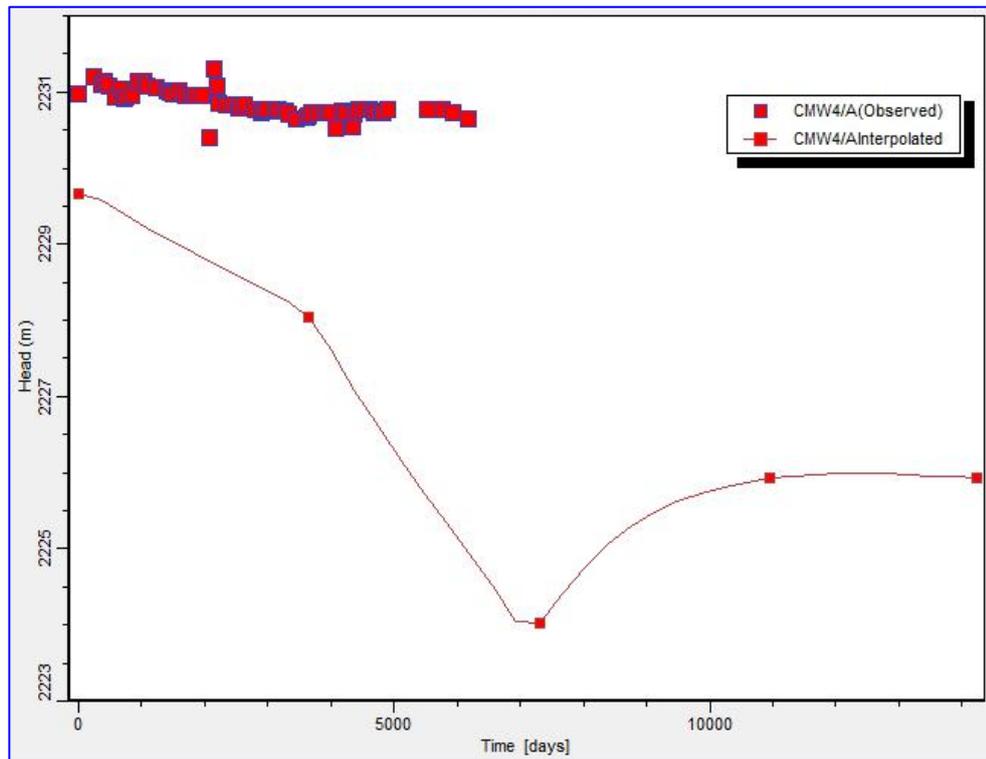
Anexo IV: Hidrogramas del pozo CA1, modelo validado (sup.) y modelo actualizado (inf.).



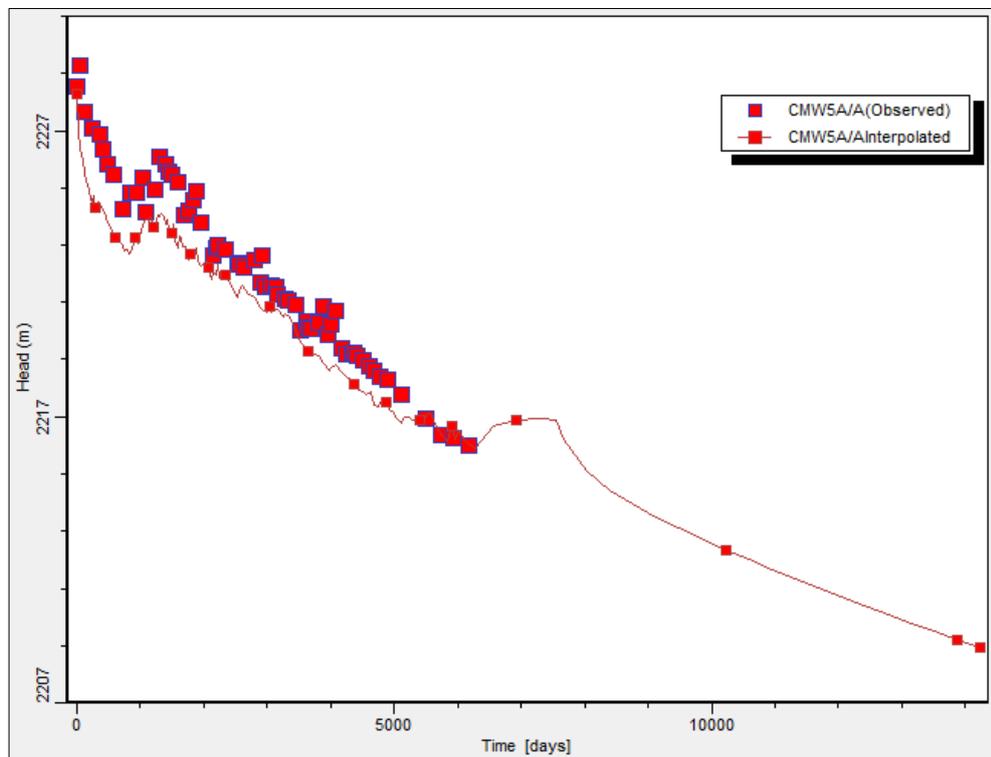
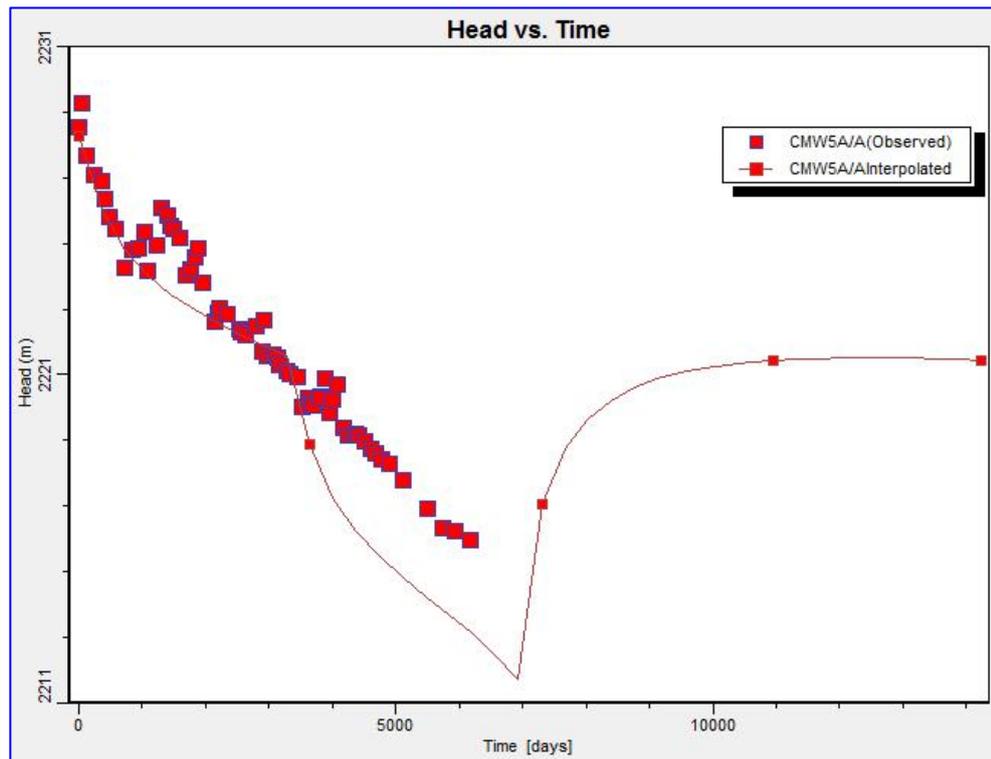
Anexo IV: Hidrogramas del pozo CMW2, modelo validado (sup.) y modelo actualizado (inf.).



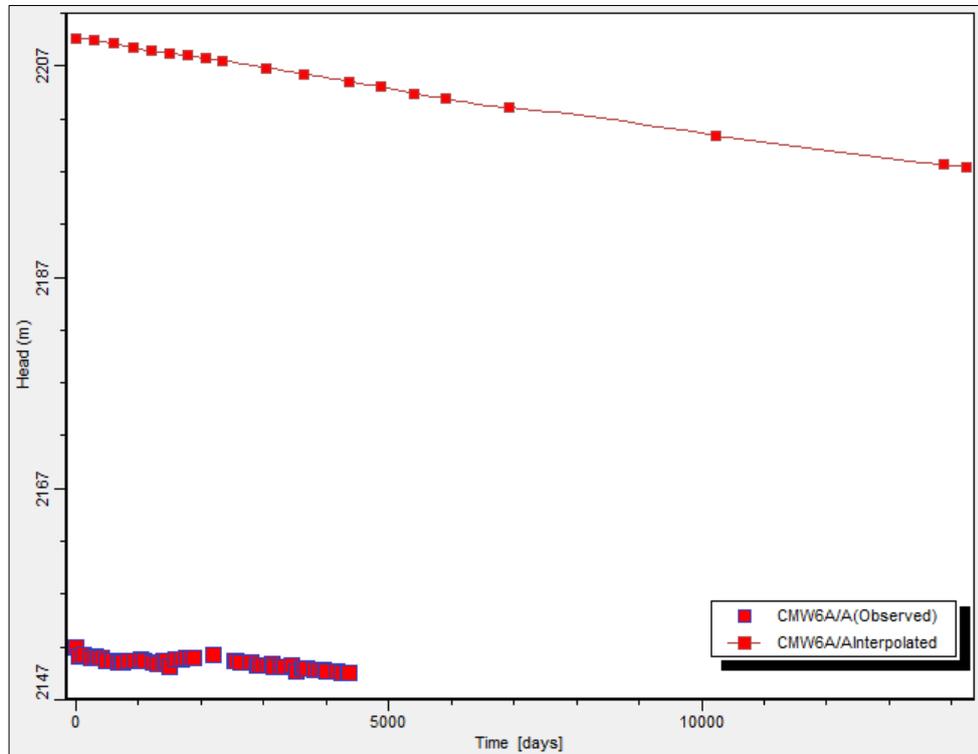
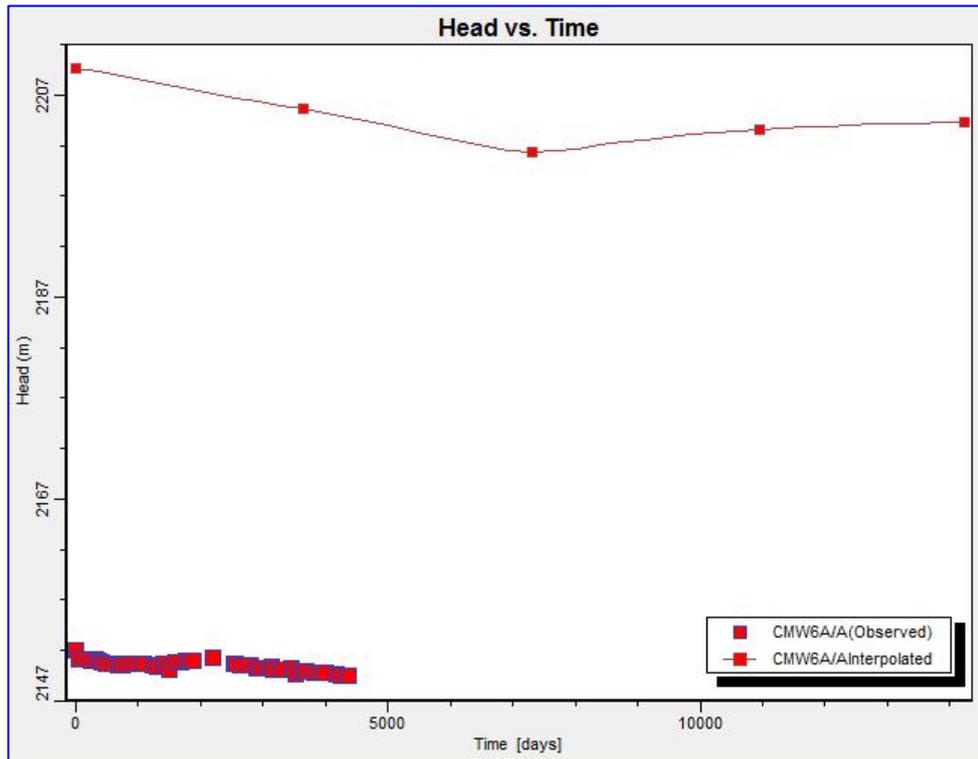
Anexo IV: Hidrogramas del pozo CMW3, modelo validado (sup.) y modelo actualizado (inf.).



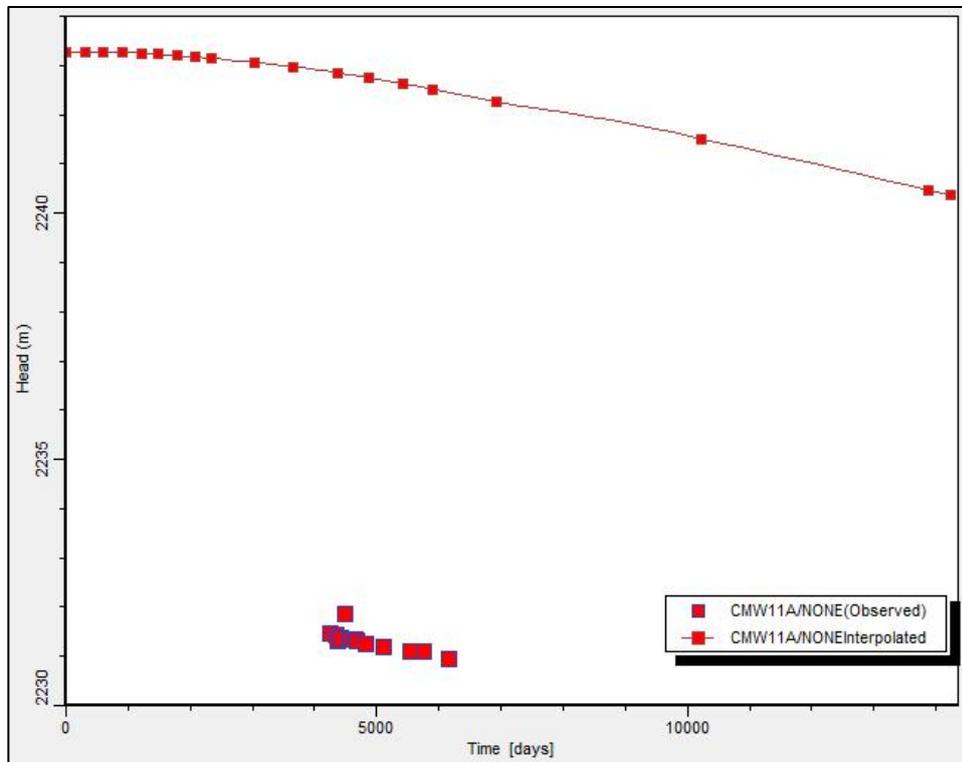
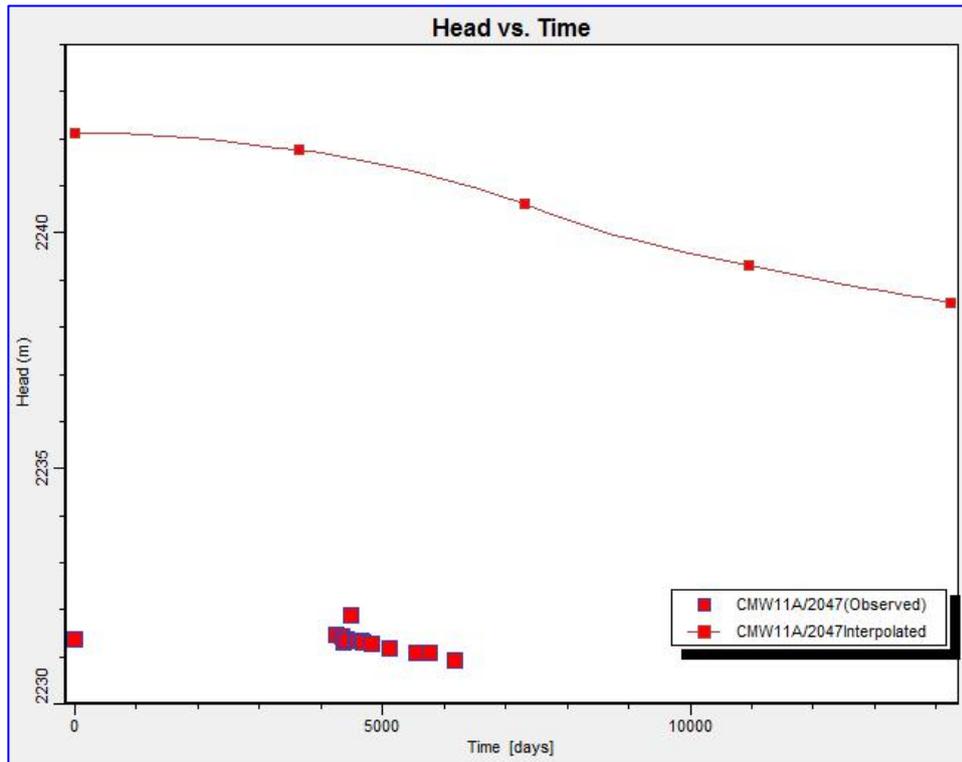
Anexo IV: Hidrogramas del pozo CMW4, modelo validado (sup.) y modelo actualizado (inf.).



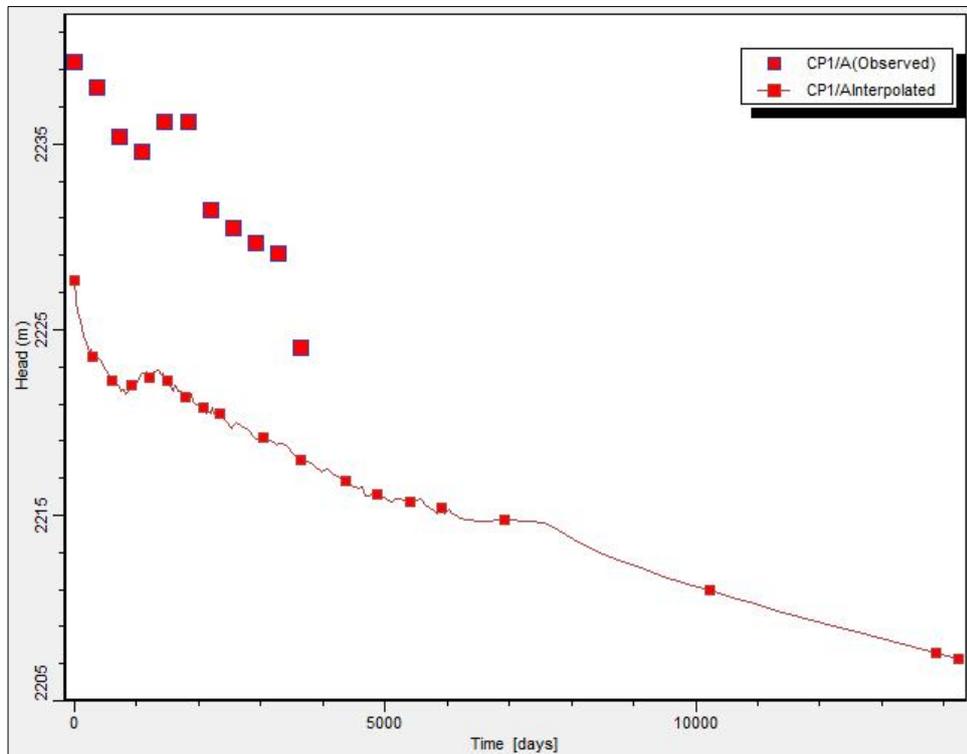
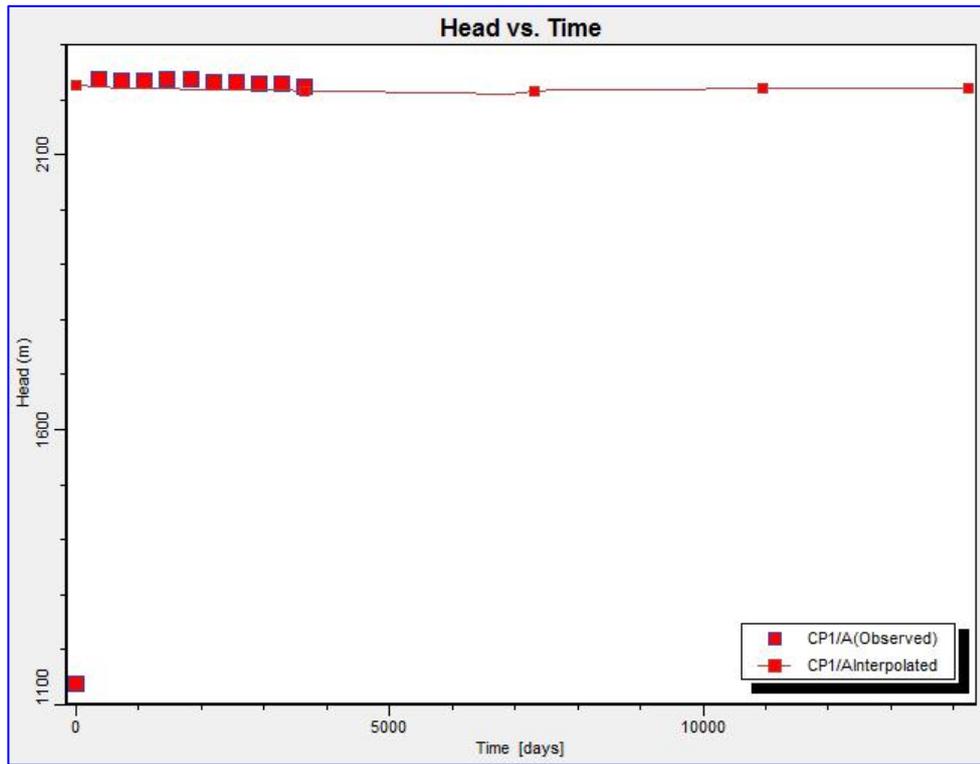
Anexo IV: Hidrogramas del pozo CMW5A, modelo validado (sup.) y modelo actualizado (inf.).



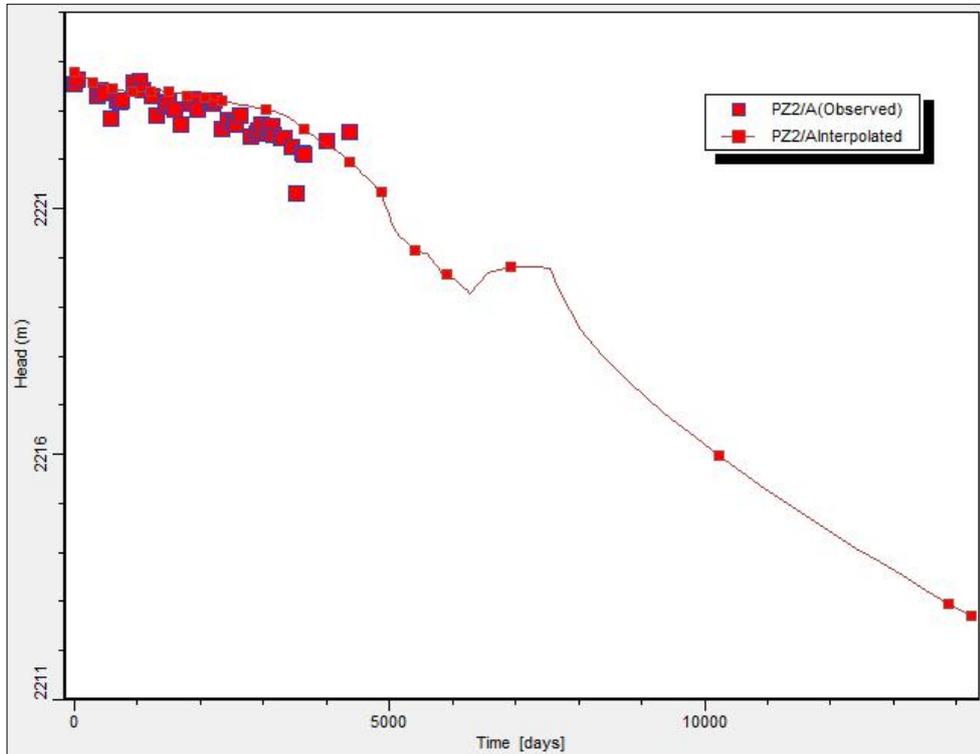
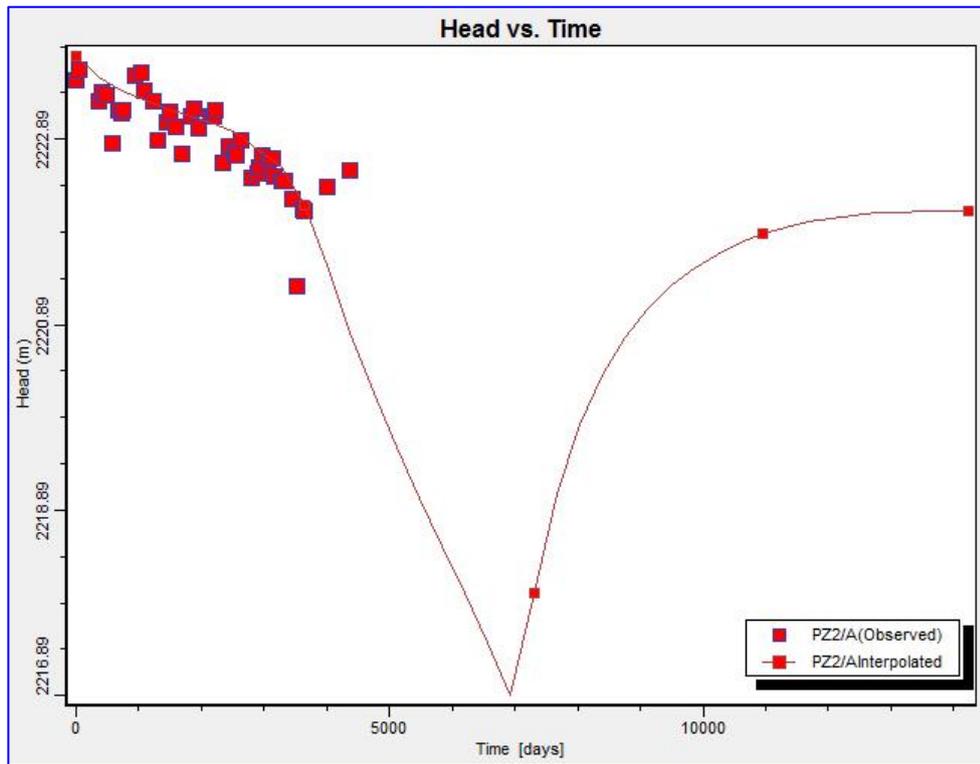
Anexo IV: Hidrogramas del pozo CMW6A, modelo validado (sup.) y modelo actualizado (inf.).



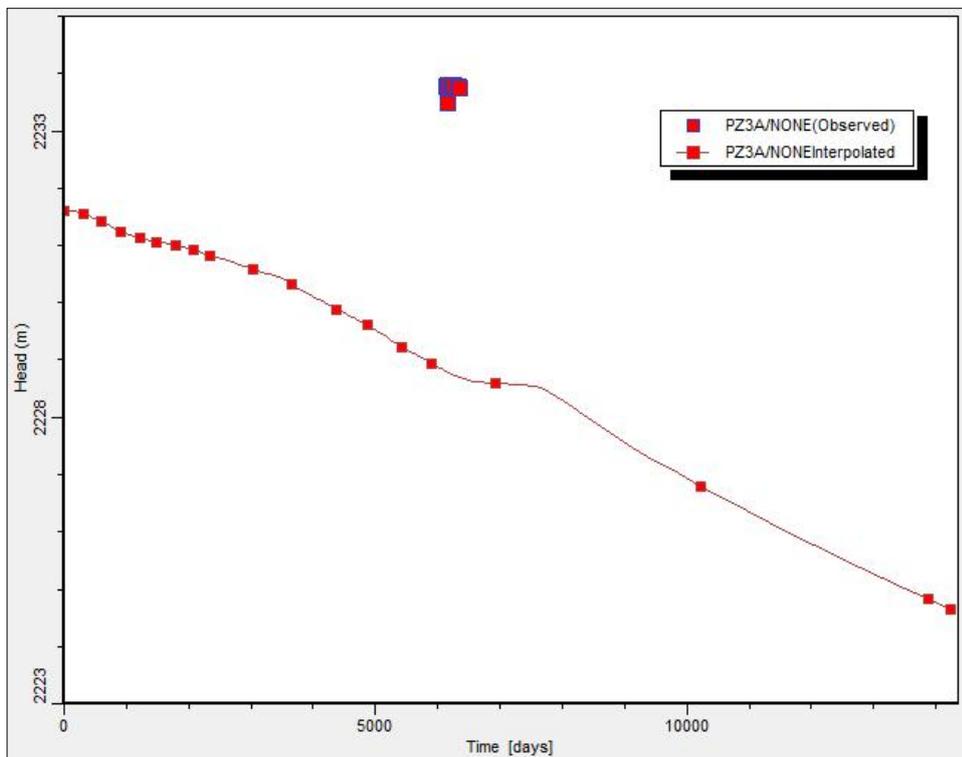
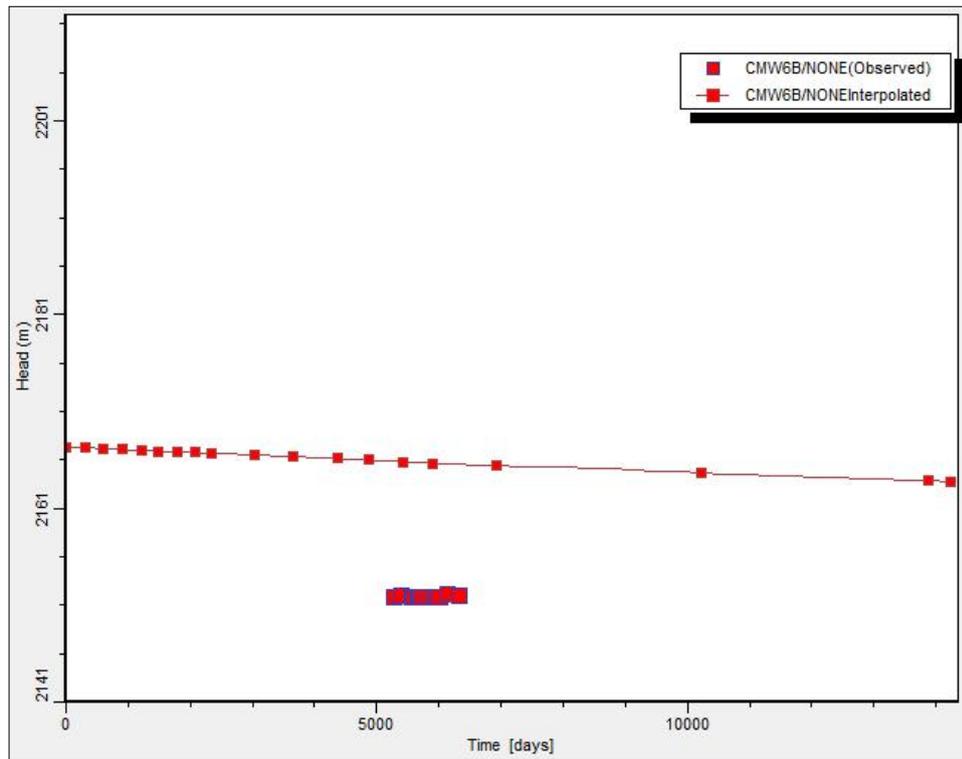
Anexo IV: Hidrogramas del pozo CMW11A, modelo validado (sup.) y modelo actualizado (inf.).



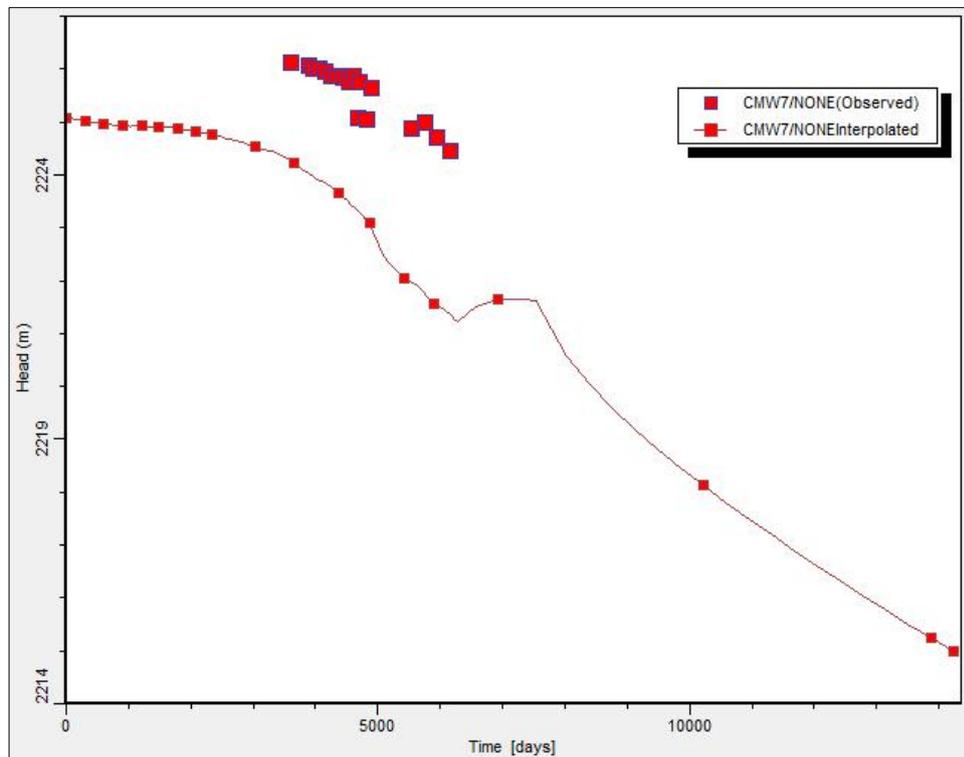
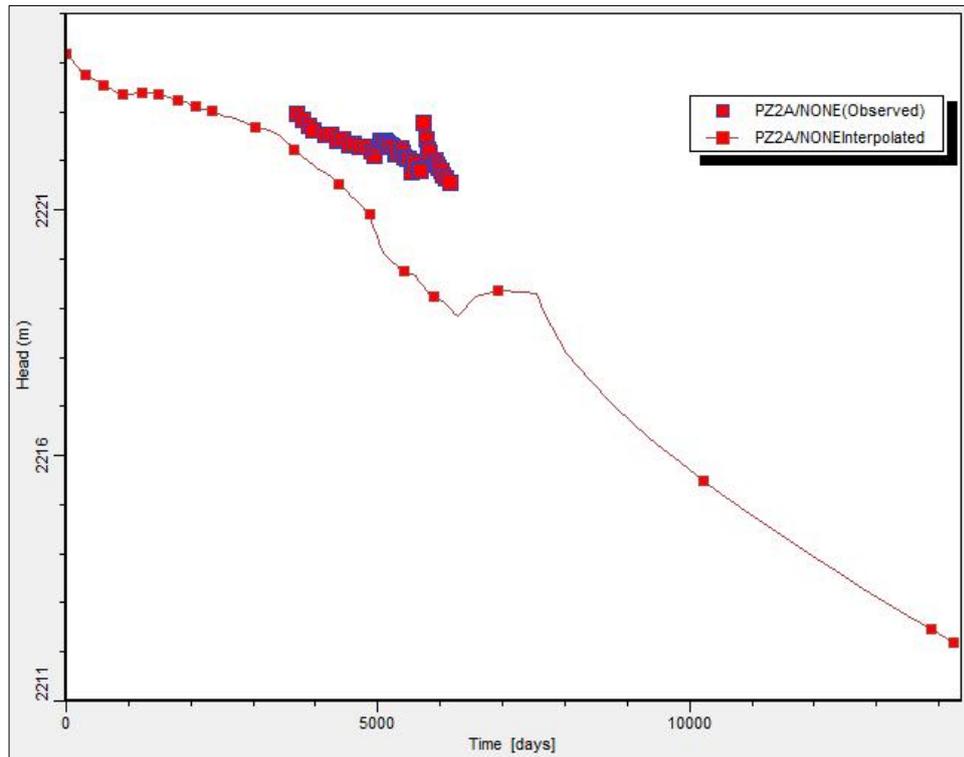
Anexo IV: Hidrogramas del pozo CP1, modelo validado (sup.) y modelo actualizado (inf.).



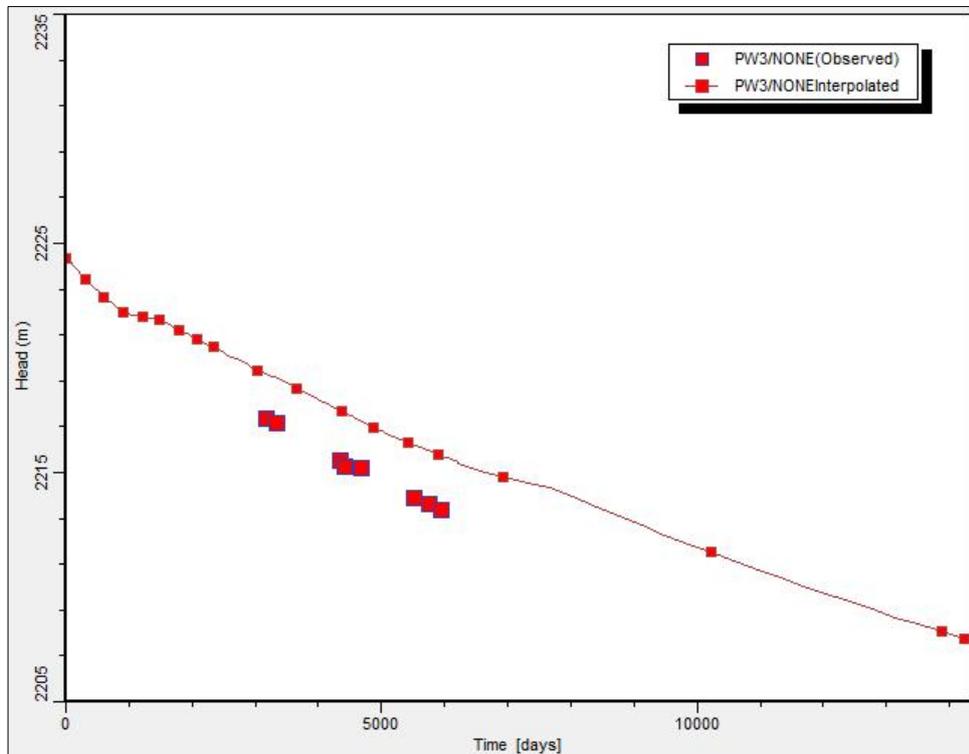
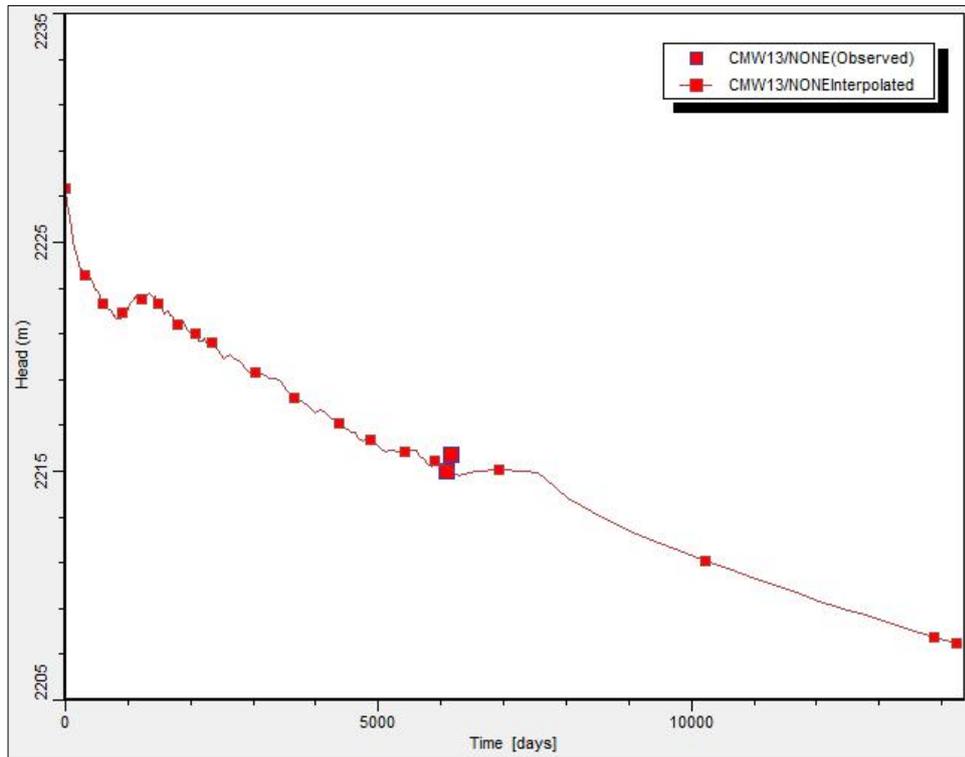
Anexo IV: Hidrogramas del pozo PZ 2, modelo validado (sup.) y modelo actualizado (inf.)



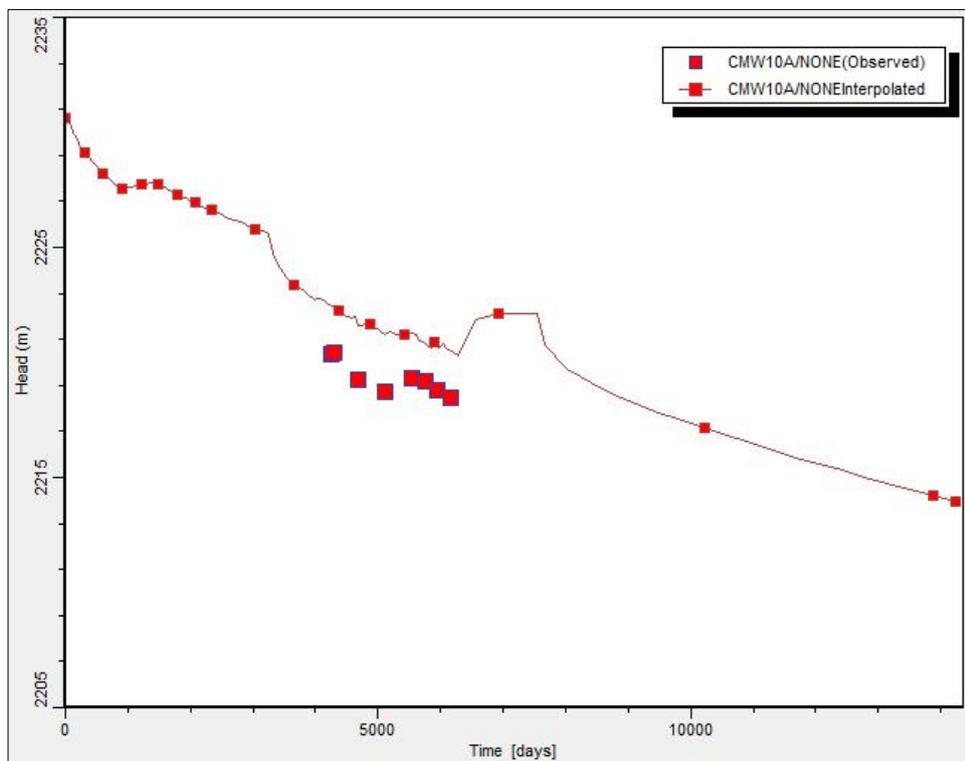
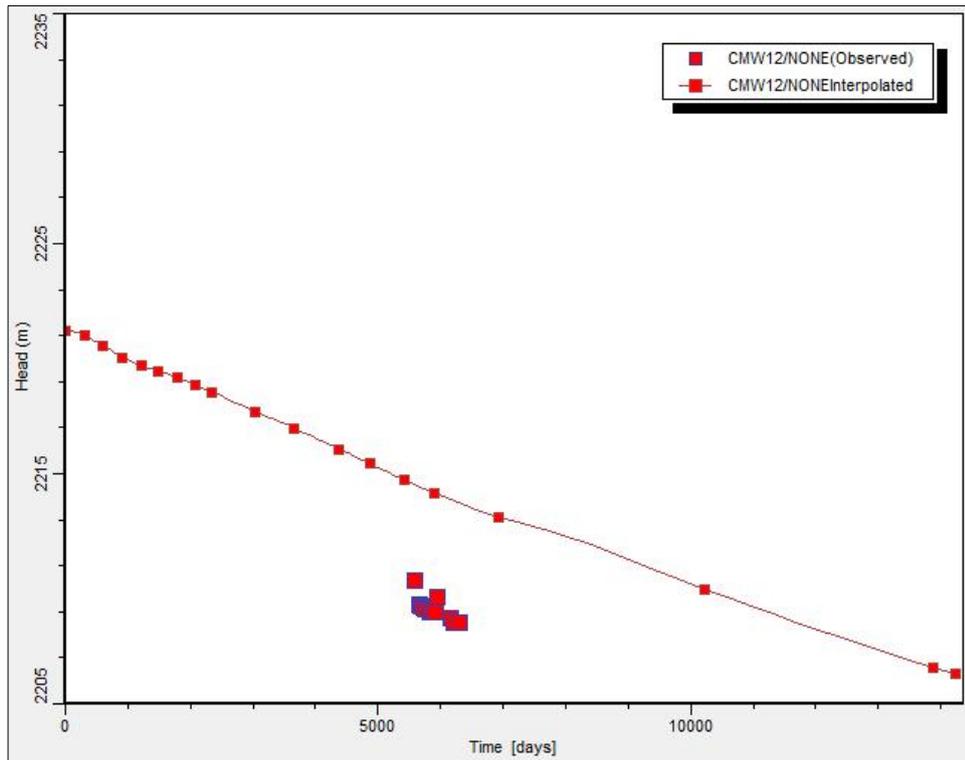
Anexo IV: Hidrogramas de los pozos CMW6B (sup.) y PZ3A (inf.) del modelo Actualizado.



Anexo IV: Hidrogramas de los pozos PZ2A (sup.) y CMW7 (inf.) del modelo Actualizado.



Anexo IV: Hidrogramas de los pozos CMW13 (sup.) y PW3 (inf.) del modelo Actualizado.



Anexo IV: Hidrogramas de los pozos CMW12 (sup.) y CMW10A (inf.) del modelo Actualizado.