



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
Programa de Doctorado Tecnologías de la
Computación e Ingeniería Ambiental

Modificaciones hidrodinámicas a largo plazo en
un acuífero multicapa con explotación intensiva.
Campo de Cartagena (SE España).

Autor:

Juan Carlos Domingo Pinillos

Director:

Dr. D. Javier Senent Aparicio

Dr. D. José Luis García Aróstegui

Dr. D. Paul Baudron

Murcia, Septiembre de 2019



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
Programa de Doctorado Tecnologías de la
Computación e Ingeniería Ambiental

Modificaciones hidrodinámicas a largo plazo en
un acuífero multicapa con explotación intensiva:
Campo de Cartagena (SE España).

Autor:

Juan Carlos Domingo Pinillos

Director:

Dr. D. Javier Senent Aparicio

Dr. D. José Luis García Aróstegui

Dr. D. Paul Baudron

Murcia, Septiembre de 2019



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS PARA SU PRESENTACIÓN

El Dr. D. Javier Senent Aparicio, el Dr. D. José Luis García Aróstegui y el Dr. D. Paul Baudron como Directores de la Tesis Doctoral titulada “Modificaciones hidrodinámicas a largo plazo en un acuífero multicapa con explotación intensiva. Campo de Cartagena (SE España).” realizada por D. Juan Carlos Domingo Pinillos en el Departamento de Ingeniería Civil, autoriza su presentación a trámite dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

Lo que firmo, para dar cumplimiento al Real Decreto 99/2011, 1393/2007, 56/2005 y 778/98, en Murcia a 20 de Septiembre de 2019.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mi director de tesis, Dr. Javier Senent Aparicio (UCAM), la confianza deposita en mi para llevar a cabo el presente trabajo y su inestimable apoyo y colaboración en todo momento.

Agradecer igualmente al Co-director Dr. José Luis García Aróstegui (IGME, Murcia), por sus consejos, apoyo y dedicación a este trabajo, así como, al Instituto Geológico y Minero de España por la puesta a disposición de su material e instalaciones, en base al convenio suscrito entre el IGME y la UCAM.

Igualmente al Co-director Dr. Paul Baudron por aportar sus conocimientos sobre Campo de Cartagena y consejos al presente trabajo, desde España y Canadá.

También quisiera expresar mi agradecimiento al Instituto Euro-Mediterráneo del Agua (IEA) y al Instituto Universitario del Agua y del Medio Ambiente (INUAMA) de la Universidad de Murcia, por la puesta a disposición de sus instalaciones para el desarrollo de partes del presente trabajo.

"A mi mujer y mis hijos, por el tiempo sustraído
para la realización de esta tesis".

"Son vanas y están plagadas de errores las ciencias que no han nacido del experimento, madre de toda incertidumbre".

Leonardo Da Vinci (1452-1519).

ÍNDICE GENERAL

AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS

AGRADECIMIENTOS

| | |
|--|----|
| ÍNDICE GENERAL..... | 11 |
| SIGLAS Y ABREVIATURAS..... | 15 |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | 17 |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | 25 |
| ÍNDICE DE ANEXOS..... | 27 |
| RESUMEN..... | 29 |
| ABSTRACT..... | 31 |
| I - INTRODUCCIÓN..... | 33 |
| II - ESTADO DEL ARTE..... | 39 |
| 2.1. ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE ACUIFEROS MULTICAPA CON EXPLOTACIÓN INTENSIVA..... | 41 |
| 2.2. ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE EL ACUÍFERO DE CAMPO DE CARTAGENA..... | 42 |
| 2.3. MODELOS DE FLUJO PARA ESTUDIOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS..... | 45 |
| 2.4. COMUNICACIÓN HIDRÁULICA A TRAVÉS DE POZOS..... | 48 |
| III – ZONA DE ESTUDIO..... | 51 |
| 3.1. DESCRIPCIÓN DEL ACUÍFERO DE CAMPO DE CARTAGENA..... | 53 |
| 3.2. GEOLOGIA DE LA ZONA DE ESTUDIO..... | 57 |
| 3.3. HIDROGEOLOGÍA..... | 61 |
| 3.4. PIEZOMETRÍA..... | 67 |
| 3.5. BALANCES HIDROLÓGICOS..... | 75 |
| 3.6. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS..... | 76 |

| | |
|--|-----|
| 3.7. ENTRADAS..... | 80 |
| 3.8. SALIDAS. EXTRACCIONES Y TRANSFERENCIAS..... | 85 |
| 3.8.1. Simplificación de la distribución espacial de la explotación por bombeo. | 86 |
| 3.8.2. Reconstrucción temporal de la explotación por bombeo. | 91 |
| IV - MATERIAL Y METODOLOGÍA | 99 |
| 4.1. CONSIDERACIONES GENERALES..... | 101 |
| 4.2. MODELIZACIÓN DE ACUÍFEROS MEDIANTE MODFLOW..... | 104 |
| 4.2.1. Objetivos del modelo y limitaciones. | 104 |
| 4.2.2. Ecuación general del flujo subterráneo. | 107 |
| 4.2.3. Procedimiento básico. | 110 |
| 4.2.4. Discretización horizontal y vertical del entorno. | 110 |
| 4.2.5. Tipos de celdas y condiciones de contorno. | 112 |
| 4.2.6. Cálculo de resultados mediante método iterativo. | 113 |
| 4.2.7. Cálculo de balances por zonas. | 115 |
| 4.3. REALIZACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL..... | 116 |
| 4.3.1. Límites del sistema. | 117 |
| 4.3.2. Dimensiones y rejilla de trabajo. | 118 |
| 4.3.3. Mecanismos de recarga y descarga. | 119 |
| 4.3.4. Condiciones de contorno. | 119 |
| 4.3.5. Patrones de variabilidad espacial. | 120 |
| 4.3.6. Patrones de variabilidad temporal. | 120 |
| 4.4. DISEÑO DEL MODELO NUMÉRICO..... | 122 |
| 4.4.1. Diseño del modelo tridimensional. | 122 |
| 4.4.2. Identificación de las capas. | 127 |
| 4.5. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO..... | 128 |
| 4.5.1. Geometría inicial del entorno de trabajo. | 128 |
| 4.5.2. Discretización del sistema. | 129 |
| 4.5.3. Entradas del modelo (Inputs) | 132 |

| | |
|---|------------|
| | 13 |
| 4.5.3.1. Importación de superficies..... | 132 |
| 4.5.3.2. Celdas inactivas..... | 137 |
| 4.5.3.3. Pozos de observación | 137 |
| 4.5.3.4. Parámetros hidrodinámicos iniciales | 139 |
| 4.5.3.5. Drenajes. | 141 |
| 4.5.3.6. Celdas de carga hidráulica constante. | 141 |
| 4.5.3.7. Datos potenciométricos. | 142 |
| 4.5.3.8. Recarga..... | 145 |
| 4.5.3.9. Extracciones | 149 |
| 4.5.4. Ejecución del modelo..... | 152 |
| 4.6. CONTAMINACIÓN CRUZADA DEL ACUÍFERO A TRAVÉS DE LOS POZOS..... | 154 |
| 4.7. DESCARGA LATERAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS..... | 155 |
| 4.8. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL MODELO | 156 |
| V - RESULTADOS | 157 |
| 5.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO..... | 159 |
| 5.2. CALIBRACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO..... | 159 |
| 5.3. CALIBRACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO..... | 161 |
| 5.4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE FLUJO..... | 165 |
| 5.5. RESULTADOS EN ESTADO ESTACIONARIO..... | 166 |
| 5.6. RESULTADOS EN ESTADO TRANSITORIO..... | 167 |
| 5.7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD..... | 173 |
| 5.7.1. Sensibilidad a la recarga. | 173 |
| 5.7.1. Sensibilidad a la ubicación de pozos dentro de la celda..... | 177 |
| VI - DISCUSIÓN | 185 |
| VII - CONCLUSIONES | 203 |
| VIII – LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN | 211 |
| IX - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 215 |
| X - ANEXOS | 231 |

| | |
|--|------------|
| ANEXO 1: DATOS DE SONDEOS DE CONTROL PIEZOMÉTRICO..... | 233 |
| ANEXO 2: GRÁFICOS Y DATOS DE EXPLOTACIÓN POR BOMBEO ... | 273 |
| ANEXO 3: GRÁFICOS DE CALIBRACIÓN..... | 286 |
| ANEJO 4: CARTOGRAFÍA HIDROGEOLÓGICA AUXILIAR..... | 295 |
| ANEXO 5: MAPAS DE UDAs..... | 300 |
| ANEXO 6: DATOS DE SALIDAS DEL MODELO. BALANCES..... | 303 |

SIGLAS Y ABREVIATURAS

| Abreviatura | Descripción |
|--------------|--|
| CHS | Confederación Hidrográfica del Segura |
| PHCS | Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura |
| TTS | Trasvase Tajo-Segura |
| IEA | Instituto Euro-Mediterráneo del Agua |
| IGME | Instituto Geológico y Minero de España |
| IMIDA | Instituto Murciano para la Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario. |
| DMA | Directiva Marco del Agua |
| CC | Campo de Cartagena |
| USGS | United States Geological Survey |
| CARM | Comunidad Autónoma de la Región de Murcia |
| ENRM | Espacios Naturales de la Región de Murcia |
| Qt | Capa Cuaternaria |
| Pt | Capa Pliocena |
| VLV | Capa Messiniense |
| ULTC | Capa Tortoniense |
| UDA | Unidad de Demanda Agrícola |
| K | Conductividad hidráulica |
| Sy | Coefficiente de almacenamiento |
| Ss | Almacenamiento específico |
| Ip | Infiltración de la precipitación |

| | |
|----------------------|--|
| Ir | Infiltración por retorno de riego |
| Mbnm | Metros bajo el nivel de mar |
| Msnm | Metros sobre el nivel del mar |
| DEM | Modelo digital de elevaciones |
| RMSE | Error cuadrático medio |
| NRMSE | Error cuadrático medio normalizado |
| R² | Coefficiente de determinación |
| SEE | Error estándar estimado |
| UTM | Universal Transversal Mercator |
| MASub | Masa de Agua Subterránea |
| SPHY | Software para modelos de hidrología superficial. |
| SUTRA | Software para modelos de hidrología subterránea. |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1. Evolución temporal de niveles piezométricos de distintas capas acuíferas de Campo de Cartagena. Registros sistemáticos de datos desde 1972..... | 45 |
| Fig. 2. Mapa de elevación del terreno de la masa de agua Campo de Cartagena. Modificado de PHCS (CHS, 2016). | 53 |
| Fig. 3. Localización de lugares singulares y límites oficiales de acuíferos CHS, (en azul), sobre la base geológica del IGME (IGME, 2017). | 55 |
| Fig. 4. Zonas de regadío en el Campo de Cartagena. Comunidad de Regantes Campo de Cartagena (CRCC). | 56 |
| Fig. 5. Mapa geológico de Campo de Cartagena y sección transversal (IGME, 1994). | 58 |
| Fig. 6. a) Corte geológico de la zona de estudio, pasando por el Horst de Cabezo Gordo y el Mar Menor. b) Principales columnas estratigráficas de la zona. (ITGE, 1997). | 59 |
| Fig. 7. Mapa geológico de la zona de estudio. Conos de deyección. (IGME, 2017). | 60 |
| Fig. 8. Mapa de isopiezas del año 1961 del acuífero Cuaternario. | 61 |
| Fig. 9. Mapa de isopiezas del año 2017 del acuífero Cuaternario. | 62 |
| Fig. 10. Corte hidrogeológico por la zona de San Javier (IGME, 1991). | 64 |
| Fig. 11. Mapa con puntos de control de la piezometría empleados en el modelo. | 67 |
| Fig. 12. Evolución a largo plazo del nivel del agua subterránea para los acuíferos Cuaternario (no confinado), Plioceno y Messiniense (confinado). Las flechas indican el sentido del gradiente hidráulico vertical y la magnitud relativa. Las líneas discontinuas indican los tramos temporales sin datos piezométricos. La línea discontinua vertical azul indica puesta en marcha del Trasvase Tajo-Segura (TTS) en 1979. | 69 |
| Fig. 13. Evolución a largo plazo del nivel piezométrico de los pozos de | |

| | |
|---|----|
| observación empleados para el acuífero del tramo Cuaternario (No confinado). Entre 1927 y 1972 los niveles son estimados. | 71 |
| Fig. 14. Evolución a largo plazo del nivel piezométrico de los pozos de observación empleados para el acuífero del tramo Plioceno (Confinado). Entre 1927 y 1973 los niveles son estimados. | 72 |
| Fig. 15. Evolución a largo plazo del nivel piezométrico de los pozos de observación empleados para el acuífero del tramo Messiniense (Confinado). Entre 1927 y 1973 el nivel es estimado. | 73 |
| Fig. 16. Evolución a largo plazo del nivel del agua subterránea para el acuífero Tortoniense (Confinado). Entre 1927 y 1975 los niveles son estimados. | 74 |
| Fig. 17. Mapa de ubicación geográfica de las zonas de riego (UDAs) en la masa de agua subterránea (070.052) Campo de Cartagena. Modificado de CHS (CHS, 2016). | 81 |
| Fig. 18. Evolución temporal de la recarga procedente de los retornos de riego y de la recarga natural (mm/año), y la superficie regada neta (ha). | 83 |
| Fig. 19. Simplificación realizada en el mapa de pozos de bombeo con celdas de 2,500x2,500 m. para el modelo de flujo. | 87 |
| Fig. 20. Vista completa del mapa de bombeo del tramo Cuaternario antes de la simplificación (Fase2) y después de la simplificación en celdas de 2,500x2,500 m (Fase 3). | 89 |
| Fig. 21 Vista parcial del mapa de bombeo después de la simplificación en celdas de 2,500x2,500 m, donde se observa la numeración de filas y columnas de la nueva retícula. | 90 |
| Fig. 22. Mapa de bombeo del tramo Messiniense antes de la simplificación (Fase2) y después de la simplificación en celdas de 2,500x2,500 m (Fase 3). | 90 |
| Fig. 23. Evolución de la superficie neta regada de Campo de Cartagena para el periodo 1925-2018. Las columnas naranjas son datos extrapolados del resto de datos obtenidos en las columnas rojas. | 91 |
| Fig. 24. Evolución histórica de la demanda bruta teórica de riego de Campo de Cartagena 1925-2018. En azul, las aguas superficiales. En rojo, las aguas subterráneas necesarias para satisfacer la demanda. Las columnas | |

| | |
|--|-----|
| naranjas están basadas en datos interpolados. | 92 |
| Fig. 25. Evolución histórica de la dotación bruta y neta de agua de riego en Campo de Cartagena 1925-2018..... | 93 |
| Fig. 26. Evolución histórica de las extracciones teóricas necesarias para satisfacer la demanda de aguas subterráneas en Campo de Cartagena 1925-2018. Las columnas naranjas están basadas en datos interpolados. La línea azul es la explotación por bombeo generada en el modelo de flujo. | 94 |
| Fig. 27. Evolución temporal teórica de las extracciones necesarias e introducidas en el modelo de Campo de Cartagena, con las cantidades a extraer de cada tramo acuífero. La línea azul de trazos, indica el momento de la puesta en marcha del TTS..... | 97 |
| Fig. 28. Evolución temporal de las extracciones en el tramo acuífero del Messiniense, en color verde. En color rojo se muestra la evolución piezométrica del sondeo de control 283810020 en la zona de San Javier. En color azul el sondeo de control 283750074 en Pilar de la Horadada..... | 98 |
| Fig. 29. Localización de los cortes hidrogeológicos en Jiménez-Martínez et al. (2012)..... | 102 |
| Fig. 30. Aspecto de la interfaz del Visual Modflow 2010. Plano de carga hidráulica con líneas equipotenciales cada 25 m, y sombreados equipotenciales en colores (DEM), con ubicación de los sondeos piezométricos y pozos de bombeo para extracción de agua..... | 106 |
| Fig. 31. Vista tridimensional del mallado del modelo de flujo (McDonald y Harbaugh, 1998). | 108 |
| Fig. 32. Esquemas de discretización vertical. b) Esquema con superposición rectilínea. c) Esquema con superposición deformada (McDonald y Harbaugh, 1998). | 111 |
| Fig. 33. Esquema del modelo conceptual..... | 117 |
| Fig. 34. Vista de la rejilla de trabajo el modelo numérico bajo la interfaz de Visual Modflow..... | 118 |
| Fig. 35. Evolución histórica de los niveles piezométricos de los acuíferos Cuaternario (Azul), Plioceno (verde) y Messiniense (Rojo), e inversión de gradiente hidráulico en tres puntos de control piezométrico de la zona de | |

| | |
|--|-----|
| San Javier..... | 121 |
| Fig. 36. Esquema del proceso de generación de la geometría de la zona de trabajo..... | 123 |
| Fig. 37. Esquema del proceso de discretización del sistema realizado..... | 123 |
| Fig. 38. Esquema del proceso de elaboración de datos de cada capa del modelo..... | 124 |
| Fig. 39. Esquema del proceso de entradas (Inputs) introducidas en el modelo..... | 124 |
| Fig. 40. Esquema del proceso de ejecución del modelo mediante motor de cálculo Modflow..... | 125 |
| Fig. 41. Esquema del proceso de salidas (Outputs) generadas por el modelo. | 125 |
| Fig. 42. Esquema del proceso de calibrado del modelo..... | 126 |
| Fig. 43. Esquema del proceso de sensibilidad del modelo..... | 126 |
| Fig. 44. Vista de las diferentes capas acuíferas incluidas en el modelo de flujo..... | 127 |
| Fig. 45. Vista de las diferentes capas acuíferas superpuestas incluidas en el modelo de flujo. Las zonas de color amarillo denominadas “contactos”, son puntos de conexión hidráulica entre los tramos acuíferos incluidos en el modelo de flujo..... | 128 |
| Fig. 46. Discretización inicial con celdas de 2,500 x 2,500 m..... | 130 |
| Fig. 47. Discretización final con malla de 500 x 500 m. En verde las celdas inactivas..... | 130 |
| Fig. 48. Sección A-A cercana a la población de San Javier, con las capas discretizadas. En verde las celdas inactivas..... | 131 |
| Fig. 49. Topografía de la zona generada con GIS para importar al modelo con sombreado de zonas y curvas de nivel cada 50 m. Superficie 0 DEM (S0)..... | 133 |
| Fig. 50. Vista en 3D de la superficie topográfica S0 generada por el modelo de flujo Modflow | 134 |
| Fig. 51. Vista en 3D de la superficie S3 generada por el modelo de flujo Modflow | 135 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 52. Vista en 3D de la superficie S5 generada por el modelo de flujo Modflow..... | 135 |
| Fig. 53. Vista en 3D de la superficie S7 generada por el modelo de flujo Modflow..... | 136 |
| Fig. 54. Borde de carga constante en color rojo entre los mares y la costa..... | 142 |
| Fig. 55. Evolución de los niveles del agua subterránea en los acuíferos Cuaternario, Plioceno y Messiniense en la zona de San Javier. Las flechas indican el sentido del gradiente hidráulico vertical. Los datos iniciales son estimados..... | 143 |
| Fig. 56. Evolución de los niveles del agua subterránea en los acuíferos Cuaternario, Plioceno y Messiniense en la zona de San Pedro del Pinatar. Las flechas indican el sentido del gradiente hidráulico vertical. Los datos iniciales son estimados. | 144 |
| Fig. 57. Mapa de recarga por UDAs. Por colores: Blanco, recarga natural; Azul, UDAs 57 y 75; verde, UDA 58. Valores medios de recarga en mm/año para el periodo 1925-2018. | 145 |
| Fig. 58. Gráfico de la evolución de recarga a lo largo del periodo de estudio. | 148 |
| Fig. 59. Mapa de pozos de bombeo de agua subterránea, con cuantificación de la extracción por tramos y para volúmenes mayores a 1,500 m ³ /día..... | 149 |
| Fig. 60. Gráfica de la evolución temporal de las extracciones de agua subterránea por bombeo y por cada tramo acuífero para el modelo calibrado, con la cuantificación de la extracción por tramos en hm ³ /año, mediante superficies superpuestas..... | 151 |
| Fig. 61. Vista del mapa generado para la carga hidráulica en la ejecución del modelo, con isopiezas y superficies DEM para un estado estacionario antes de calibrar el modelo. Las líneas isopiezas en rojo son cada 25 m..... | 153 |
| Fig. 62. Esquema de contaminación de acuíferos a través de pozos mal construidos..... | 154 |
| Fig. 63. Gráfico de la calibración del modelo en estado estacionario con las cargas hidráulicas calculadas versus observadas..... | 160 |
| Fig. 64. Resultados de la calibración de la curva de explotación por | |

| | |
|--|-----|
| bombeo, comparada con la curva del bombeo teórico necesario para satisfacer la demanda establecida..... | 163 |
| Fig. 65. Resultados de la calibración del modelo en estado transitorio, comparando la carga hidráulica observada y simulada en la zona de San Javier. a) Pozo (283810010) Tramo del acuífero Cuaternario. b) Pozo (283810021) Tramo del acuífero del Plioceno. c) Pozo (283810020) Tramo del acuífero Messiniense..... | 164 |
| Fig. 66. Gráfico de la evolución histórica de los flujos de agua subterránea entre la capa Cuaternaria (Qt) y el Mar Menor. Evolución en azul de las salidas del Cuaternario al Mar Menor, y en rojo las entradas de agua salada al interior del acuífero. | 170 |
| Fig. 67 Análisis de sensibilidad. a) Error cuadrático medio del modelo de flujo en estado estacionario. b) Variación de recarga versus variación de salidas del acuífero cuaternario en estado estacionario (%). | 175 |
| Fig. 68. c) Error cuadrático medio del modelo de flujo en estado transitorio. d) Variación de recarga versus variación de salidas del acuífero cuaternario en estado transitorio (%). | 176 |
| Fig. 69. Ubicaciones empleadas para la primera simulación con diversos escenarios en el análisis de sensibilidad realizado de distintas ubicaciones dentro de una misma celda de 500x500 m. El sondeo de observación se encuentra en la celda central. Entre paréntesis, la distancia entre el pozo de bombeo y el sondeo de observación empleado (273940021). | 179 |
| Fig. 70. Análisis de sensibilidad a la ubicación del pozo de bombeo. Error cuadrático medio estándar de cada escenario versus variación de la distancia entre el pozo de bombeo y el punto de observación (%). | 180 |
| Fig. 71. Vista de la nueva celda generada para la simplificación de 2,500x2,500 m, con las tres subdivisiones interiores realizadas..... | 181 |
| Fig. 72. Vista de la ubicación en el modelo de los pozos empleados en la simulación 2. En verde se observan las celdas donde se ubican los pozos georeferenciados inicialmente, y en el centro de las celdas verdes se ubica la celda central de color marrón que alberga el pozo alternativo sumatorio de los otros cuatro. Al Suroeste se encuentra el pozo de observación 283750001 para la capa Cuaternaria. | 182 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 73 Análisis de sensibilidad a la simplificación espacial. a) Sobre valores del RMSE en tres ámbitos. b) Sobre la variación porcentual en ambos escenarios. | 184 |
| Fig. 74 Gráfica de recuperación de niveles piezométricos. En verde la capa Cuaternaria, en azul capa Plioceno y en la capa Messiniense (Marrón, rojo y verde). | 188 |
| Fig. 75 Gráfica comparativa de la evolución de la demanda neta versus las distintas fuentes de suministro para satisfacer la demanda. Aguas subterráneas (Rojo y naranja), aguas superficiales (Azul), provenientes de EDARs, desaladoras y otros (Morado). Demanda no satisfecha (Verde). Valores negativos (exceso de extracciones con respecto a la demanda neta teórica). | 191 |
| Fig. 76 Gráfica de la evolución del flujo a través del Horst de Cabezo Gordo | 193 |
| Fig. 77 Gráfica de la evolución del almacenamiento del sistema hídrico (1925-2018)..... | 200 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Origen de las aguas en la zona de Campo de Cartagena. (CHS, 2014) | 57 |
| Tabla 2. Datos de superficie y afloramientos modelizados de las capas acuíferas de Campo de Cartagena. | 65 |
| Tabla 3. Resumen de balances de aguas subterráneas de la MASub 070.52. (CHS, 2007)..... | 76 |
| Tabla 4. Datos de la evolución de los primeros pozos artesianos y sondeos del Campo de Cartagena. (Dupuy de Lome et al., 1917; Román, 1996) | 78 |
| Tabla 5. Evolución temporal de la superficie regada en Campo de Cartagena. Evolución temporal de la demanda de riego en Campo de Cartagena. Promedio de dotaciones de riego (IGME, 1991, 1994; CARM, 2000; CHS, 1998, 2007, 2014, 2016) | 79 |
| Tabla 6. Datos sobre UDAs de la zona de Campo de Cartagena (CHS, 1998, 2014,2016). | 82 |
| Tabla 7. Comparativa de la recarga en la zona de Campo de Cartagena (hm ³ /año).. | 84 |
| Tabla 8. Pozos para extracciones mediante bombeo en la zona de Campo de Cartagena. | 87 |
| Tabla 9. Listado de pozos de observación, con denominación y coordenadas UTM..... | 138 |
| Tabla 10. Valores medios de los parámetros iniciales de entrada antes del calibrado..... | 140 |
| Tabla 11. Variables de ajuste en la calibración para el régimen estacionario..... | 161 |
| Tabla 12. Parámetros calibrados para el régimen transitorio (1925-2018)..... | 162 |
| Tabla 13. Variables de ajuste en la calibración para el régimen transitorio del periodo 1925-2005..... | 165 |
| Tabla 14. Valores medios en el periodo de validación para el régimen | |

| | |
|--|-----|
| transitorio..... | 166 |
| Tabla 15. Resultados del balance hídrico del modelo de Campo de Cartagena en estado estacionario (hm ³ /año)..... | 167 |
| Tabla 16. Resultados del balance hídrico del modelo de Campo de Cartagena en estado transitorio (1925) (hm ³ /año)..... | 168 |
| Tabla 17. Resultados del balance hídrico del modelo de Campo de Cartagena en estado transitorio (1960-2000) (hm ³ /año)..... | 169 |
| Tabla 18. Resultados del balance hídrico del modelo de Campo de Cartagena en estado transitorio (2000-2018) (hm ³ /año)..... | 171 |
| Tabla 19. Resultados para la comunicación hidráulica vertical a través de perforaciones en estado transitorio (hm ³ /año)..... | 173 |
| Tabla 20. Resultados del análisis de sensibilidad de la ubicación de los pozos dentro de las celdas del modelo. Distancia: Longitud entre el sondeo de observación y el pozo de bombeo. MC: Misma Celda. % Variación: Las celdas con valor representa el % de variación con respecto a la distancia originaria..... | 178 |
| Tabla 21. Comparativa del equilibrio hídrico del modelo en este estudio y otros similares. Estado transitorio (hm ³ /año). (Modificado del elaborado por García-Aróstegui en (Jiménez-Martínez et al., 2016))..... | 195 |
| Tabla 22. Comparativa del equilibrio hídrico del modelo de Campo de Cartagena calculado para varios periodos temporales. Estado transitorio (hm ³ /año)..... | 198 |

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.- Datos de los sondeos de control piezométrico.

Anexo 2.- Gráficos y datos de la explotación por bombeo.

Anexo 3.- Gráficos de calibración del modelo.

Anexo 3.- Cartografía hidrogeológica auxiliar.

Anexo 4.- Mapas de UDAs.

Anexo 5.- Datos de salidas del modelo. Balances.

RESUMEN

En la cuenca Mediterránea es frecuente encontrar entornos semiáridos donde los acuíferos están sometidos a explotación intensiva, generalmente para satisfacer las demandas hídricas para el riego. El acuífero del Campo de Cartagena es un claro ejemplo de acuífero en entorno semiárido, donde estos efectos hidrodinámicos despiertan gran interés científico. El objetivo principal de este estudio, es evaluar estos efectos hidrodinámicos ocurridos en el último siglo de actividad antropogénica en este sistema acuífero. Este acuífero sometido a explotación intensiva presenta claros déficits en épocas de sequía, donde la recarga por retorno de riego tiene un efecto importante en todo el sistema.

Para ello, ha sido necesario desarrollar un modelo hidrodinámico que proporcione información sobre los impactos y efectos desde el punto de vista hidrogeológico. La metodología utilizada está basada en el modelado de aguas subterráneas mediante Modflow, para reconstruir la evolución transitoria del sistema acuífero a lo largo del último siglo, generar balances hídricos entre los distintos tramos acuíferos y del sistema acuífero con su entorno, e ilustrar como la evolución del riego cambió el patrón de flujo de las aguas subterráneas en el acuífero.

Las interrelaciones entre el acuífero multicapa y la laguna del Mar Menor en particular, y con el Mar Mediterráneo como acuífero costero, proporcionan un interés científico enorme en el estudio de la hidrogeología. El riego provoca un doble efecto hidrodinámico en este acuífero multicapa: suministra agua a la capa superior aumentando sus niveles piezométricos, y extrae agua de los acuíferos confinados inferiores, disminuyendo sus niveles piezométricos. Los datos obtenidos de fuentes oficiales para las extracciones de agua y piezometrías existentes, desde que se inició la actividad extractiva de la zona hasta la actualidad, tienen grandes lagunas temporales donde no existen datos fiables, lo que arroja cierta incertidumbre que se transmite a los resultados finales obtenidos.

Los resultados muestran una comunicación hidráulica de los tramos acuíferos a través de estructuras geológicas específicas como Cabezo Gordo y otros contactos plio-cuaternarios y a través de múltiples pozos o sondeos existentes, así como, la transferencia de flujo desde el tramo Cuaternario hasta la laguna del Mar Menor y Mar Mediterráneo. Se ha evidenciado el confinamiento de los acuíferos inferiores con respecto a la laguna del Mar Menor y Mar Mediterráneo, y se ha realizado una reconstrucción de la evolución temporal de todo el sistema, mostrando una ligera recuperación global del sistema y un frágil equilibrio hídrico, sustentado por aportaciones de aguas superficiales provenientes principalmente del Trasvase Tajo-Segura.

Palabras Clave: Flujo de aguas subterráneas, Modelización numérica, Explotación intensiva, Acuífero multicapa, Campo de Cartagena.

ABSTRACT

In the Mediterranean basin it is common to find semi-arid environments where aquifers are subject to intensive exploitation, generally to meet the water demands for irrigation. The Cartagena de Campo aquifer is a clear example of an aquifer in a semi-arid environment, where these hydrodynamic effects arouse great scientific interest. The main objective of this study is to evaluate these hydrodynamic effects that occurred in the last century of anthropogenic activity in this aquifer system. This aquifer under intensive exploitation has clear deficits in times of drought, where recharge due to the return of irrigation has an important effect on the entire system.

For this, it has been necessary to develop a hydrodynamic model that provides information on impacts and effects from the hydrogeological point of view. The methodology used is based on the modeling of groundwater through Modflow, to reconstruct the transitory evolution of the aquifer system over the last century, generate water balances between the different aquifer sections and the aquifer system with its surroundings, and illustrate how the evolution of irrigation changed the flow pattern of groundwater in the aquifer.

The interrelationships between the multilayer aquifer and the Mar Menor lagoon in particular, and with the Mediterranean Sea as a coastal aquifer, provide enormous scientific interest in the study of hydrogeology. Irrigation causes a double hydrodynamic effect in this multilayer aquifer: it supplies water to the upper layer increasing its piezometric levels, and draws water from the lower confined aquifers, decreasing its piezometric levels. The data obtained from official sources for the extraction of water and existing piezometries, since the extractive activity of the area began until today, have large temporary gaps where there are no reliable data, which throws some uncertainty that is transmitted to the final results obtained.

The results show a hydraulic communication of the aquifer sections through specific geological structures such as Cabezo Gordo and other plio-quadernary contacts and through multiple existing wells or surveys, as well as the transfer of

flow from the Quaternary section to the lagoon of the Sea Minor and Mediterranean Sea. The confinement of the lower aquifers with respect to the Mar Menor lagoon and the Mediterranean Sea has been evidenced, and a reconstruction of the temporal evolution of the entire system has been carried out, showing a slight global recovery of the system and a fragile water balance, sustained for contributions of surface waters coming mainly from the Tajo-Segura Water Transfer.

Keywords: Groundwater flow, Numerical modeling, Intensive exploitation, Multilayered aquifer, Campo de Cartagena.

I - INTRODUCCIÓN

I - INTRODUCCIÓN

El cambio climático que existe actualmente produce afecciones a nivel mundial, y entre estas afecciones se encuentra la hidrodinámica del agua subterránea, siendo la antropización de los sistemas hídricos una de las principales causas que generan cambios hidrológicos. Estos cambios tienen un impacto importante sobre cualquier sistema hídrico, con especial repercusión en las aguas subterráneas y en los procesos hidrogeológicos asociados a estos sistemas. En la cuenca del Mar Mediterráneo, son frecuentes los casos de explotación intensiva de acuíferos, lo que provoca que sea complicada una gestión sostenible del medio y genera fragilidad en los recursos hídricos subterráneos del Mediterráneo (Leduc et al., 2017). El fuerte desarrollo de la agricultura en zonas semiáridas mediterráneas durante décadas, ha provocado modificaciones en sistemas hídricos subterráneos y en sus procesos hidrogeológicos. Existen estudios del impacto de las actividades antropogénicas en sistemas acuíferos semiáridos mediterráneos, que generan efectos hidrodinámicos sobre las descargas de aguas subterráneas que modifican la hidrología y el medio ambiente de zonas costeras (Moore & Arnold, 1966; Burnett et al., 2003). Estos procesos hidrodinámicos tienen una repercusión importante en todo el ámbito mediterráneo, siendo crítica la gestión de estos recursos hídricos.

Esta presión a la que está sometido el medio ambiente mediterráneo por su antropización, tiene un claro ejemplo en la zona denominada Campo de Cartagena del SE de España, con problemas similares de las regiones semiáridas de países desarrollados. Por todo ello, se hace necesario comprender mejor el funcionamiento hidrogeológico de estos acuíferos multicapa costeros y las evaluaciones cuantitativas de los flujos de agua internos para una mejor gestión sostenible de estos recursos hídricos (Baudron et al., 2013; Jiménez-Martínez et al., 2016; García-Aróstegui et al., 2016). En estos entornos, numerosos acuíferos se han visto afectados por la explotación intensiva de aguas subterráneas, con descensos piezométricos de hasta 200 m en varias décadas (Molina et al., 2010).

El acuífero multicapa de Campo de Cartagena en el SE de España, es un

caso excepcional de explotación intensiva durante décadas y un caso paradigmático a escala mediterránea (Custodio et al., 2016), que representa un ejemplo de caso extremo de actividad antropogénica en un sistema acuífero en zona semiárida (Baudron et al., 2014). Esta actividad antropogénica ha generado la existencia de incertidumbres hidrogeológicas que es necesario solucionar, entre las que destacan: La geometría hidrogeológica del sistema acuífero natural, las fuentes de recarga y su interconectividad entre el acuífero superficial y los acuíferos confinados profundos, cómo afecta al conjunto hídrico los pozos existentes, la cuantificación de la descarga de agua subterránea al Mar Menor y Mar Mediterráneo, y la evolución hídrica del todo el sistema y su sostenibilidad en el tiempo. Estas incertidumbres se convierten en oportunidades como objetivos de investigación y desafíos. En este acuífero, se han producido importantes modificaciones hidrológicas que precisan una investigación que permita conocer mejor la evolución de este sistema hídrico, con un claro interés científico y una importante relevancia socio-económica, por las interrelaciones con la agricultura y la presencia de la laguna costera del Mar Menor (Baudron et al., 2014; Baudron et al., 2015).

Con la puesta en marcha del Trasvase Tajo-Segura (TTS) en 1979, que suministra agua superficial para el riego de esta comarca con una dotación máxima de 122 hm³/año, se provoca un cambio de tendencia decreciente de los niveles piezométricos debido a la explotación intensiva. Esta situación hídrica nueva genera un doble efecto debido a los retornos de riego, que modifican los niveles piezométricos del acuífero de forma distinta según sean acuífero libre o confinado, lo que despierta un claro interés científico en su funcionamiento hidrogeológico.

Existen trabajos previos que proporcionan modelos preliminares donde sólo se estudia el acuífero Cuaternario libre, sin considerar las capas de acuíferos confinados inferiores (Senent-Alonso et al., 2009; García-Aróstegui et al., 2012). Estos modelos del tramo Cuaternario proporcionaron un avance preliminar para un régimen permanente, con incertidumbres sobre datos como la recarga o las extracciones por bombeo. Algunos investigadores han calculado la recarga del área de estudio, reduciendo la incertidumbre asociada a su cálculo (Jiménez-Martínez et al., 2009; García-Aróstegui et al., 2012; Jiménez-Martínez et al., 2012; Baudron et al., 2014; Contreras et al., 2014). Otros estudios han considerado la

evolución de la demanda agraria y su repercusión en la recarga. Pero los datos sobre extracciones por bombeo continúan generando incertidumbre y requieren un estudio más profundo, ya que transmiten parte de esa incertidumbre a los resultados obtenidos. Por ello, una de las principales cuestiones a resolver, debido a la repercusión que tiene sobre el trabajo por la escasez de datos reales, es la explotación por bombeo de todo el sistema hídrico de Campo de Cartagena. En este trabajo se han empleado cerca de 200,000 datos para realizar la explotación por bombeo introducida en el modelo de flujo, donde se ha empleado una metodología basada en datos históricos, datos recientes y análisis de la evolución de piezometrías, donde otra parte de ellos se han obtenido de fuentes oficiales y el resto por medio de interpolación de los anteriores, para conseguir curvas de explotación continuas desde 1925 hasta el año 2017 para cada tramo acuífero de este sistema multicapa. Esta explotación por bombeo propuesta para cada capa y pozo introducidos en el modelo, no ha resultado efectiva para los periodos de sequía acusada, donde ha sido preciso modificar los valores iniciales con el calibrado, mediante una reducción de los mismos.

Existen estudios recientes sobre fuentes alternativas de suministro de agua para la demanda existente, mediante plantas públicas de desalinización de agua de mar y la desalobración privada de aguas subterráneas (March et al., 2014; Aparicio et al., 2015). La reutilización de aguas residuales depuradas también ha sido reconocida como uno de los recursos adecuados para el suministro en zonas áridas y semiáridas. Recientemente se han desarrollado otros estudios sobre la sobreexplotación de acuíferos en el área de Campo de Cartagena y la cuenca del Segura (Jiménez-Martínez et al., 2016), así como, sobre la transferencia de contaminantes a través de sondeos abandonados con filtraciones y mal construidos, para aguas subterráneas con conexiones de flujo entre acuíferos libres y confinados (Lacombe et al., 1995; Timms & Acworth, 2002; Santi et al., 2006; Jiménez-Martínez et al., 2011; McMillan et al., 2014).

Los modelos de flujo en la actualidad, se han convertido en una metodología empleada por muchos autores para la investigación científica de aguas subterráneas (Khadri & Pande, 2016), y existen una gran cantidad de trabajos que basan su metodología en el modelado de flujo mediante Modflow, que resuelve la ecuación de flujo por el método de diferencias finitas (Wallis et al., 2012; Gossel, 2012; Candela et al., 2014; Mohamed et al., 2016). Existen cuestiones

aún por resolver, entre las que se encuentra el efecto hidrodinámico provocado por la fuerte antropización del medio durante décadas en acuíferos multicapa de entornos semiáridos, la inversión del gradiente hidráulico o el doble efecto de los retornos de riego, que generan la necesidad de nuevas investigaciones que permitan avanzar en el estudio hidrológico e hidrogeológico de este sistema. En estos casos, el método de modelado numérico mediante Modflow es un buen camino para obtener resultados positivos debido a la escasez de datos existente (Candela et al., 2014). Tanto el estudio del impacto antropogénico en el sistema, como el doble efecto que generan los retornos de riego, concluyen sobre la fragilidad del sistema hídrico principalmente en los acuíferos confinados; lo que genera una necesidad de estudio para este tipo de casos en entornos semiáridos.

Se ha realizado un estudio preliminar sobre la simplificación espacial de pozos realizada en el modelo mediante un análisis de sensibilidad, otro sobre la evolución de la recarga en el sistema.

El objetivo principal de esta tesis, es la elaboración de un estudio científico que evalúe estos efectos hidrodinámicos ocurridos en el último siglo de actividad antropogénica intensa en este sistema acuífero multicapa y costero. Para ello, se emplea como herramienta principal un modelo matemático multicapa, que comprende las capas existentes desde la superficie hasta el basamento mediante el empleo de Modflow. El trabajo comprende además, el estudio de los flujos de agua entre los distintos tramos acuíferos, y entre estos tramos y sus alrededores, y se reconstruye la evolución temporal en régimen transitorio desde 1925 hasta 2018, lo que nos permitirá comprender y cuantificar mejor el impacto que sobre el acuífero ha provocado la actividad antropogénica en ese período. Se incluye el desarrollo de métodos para evaluar las transferencias de flujo vertical que se producen a través de perforaciones abandonadas y con fugas, realizando una primera aproximación sobre la condición de la comunicación hidráulica entre estos tramos. También se estudian las interrelaciones del sistema hídrico con su entorno costero, con especial atención a la conexión con la laguna Mar Menor y el Mar Mediterráneo. Esto permite mejorar la comprensión del funcionamiento interno del acuífero de Campo de Cartagena y proporcionar nuevas herramientas para su caracterización y sus relaciones con el medio ambiente.

II - ESTADO DEL ARTE

II – ESTADO DEL ARTE

2.1. ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE ACUIFEROS MULTICAPA CON EXPLOTACIÓN INTENSIVA.

En todo el litoral Mediterráneo y en sureste español, se encuentran entornos semi-áridos donde las precipitaciones anuales son bajas y escasas, lo que provoca que para el sostenimiento de la agricultura principalmente se empleen aguas subterráneas como sustituto de las inexistentes o escasez de las aguas superficiales. Todo esto conlleva una explotación intensiva de acuíferos, muchas veces costeros con intrusión marina añadida, que provocan modificaciones hidrodinámicas en su interior que a su vez generan problemas medioambientales añadidos, generalmente asociados a la contaminación proveniente de los productos agroquímicos empleados en la agricultura y residuos urbanos (Pulido-Bosch et al., 1997).

En la actualidad, otro aspecto a considerar de especial importancia es el cambio climático que se sufre en todo el mundo, con las modificaciones de los periodos de lluvia y sus intensidades. Estos hechos han modificado la manera de pensar con respecto al mundo de la hidrología, y ha generado el empleo de conceptos como sostenibilidad del medio hídrico. Existen algunos trabajos como el de Pulido-Bosch (2001), donde se replantean cuestiones sobre si la sobreexplotación de acuíferos y la explotación intensiva de los mismos es compatible con la sostenibilidad del medio hídrico y el desarrollo sostenible de ciertas regiones (Custodio, 1996), en nuestro caso sería el Campo de Cartagena. Existen otros acuíferos con problemáticas similares al Campo de Cartagena, como por ejemplo, el del Campo de las Dalías en Almería, donde la sobreexplotación a la que ha sido sometido durante gran parte del siglo pasado, le ha generado problemas de contaminación de aguas y de inversión del gradiente hidráulico (Pulido-Bosch et al., 1997).

Existen otros autores sobre estudios de aguas subterráneas, que el término “sobreexplotación” lo modifican por “explotación intensiva” (Foster, 1991; Pulido-Bosch, 2001) donde se defiende la explotación racional de las aguas

subterráneas como medio para alcanzar la gestión sostenible de los recursos hídricos defendida en algunos trabajos por Custodio (1996), y analizando la problemática que supone la explotación intensiva de las aguas subterráneas sobre todo en entornos semiáridos (Custodio et al., 2005, 2016), en nuestro caso para el Campo de Cartagena. También otros autores han desarrollado aspectos y caracterizaciones de las sobreexplotaciones y explotaciones intensivas en España, desde el punto de vista hidrogeológico e hidroquímico, como el desarrollado por Custodio en el año 1991.

También desde el punto de vista legislativo, generalmente la explotación de las aguas superficiales y las subterráneas, quedan enmarcadas dentro de normas legales que hacen que las explotaciones intensivas y sobreexplotaciones de recursos hídricos sean explotaciones legales, como comentan Reverte & Pérez (1990), sobre la sobreexplotación de acuíferos con el auspicio de la Ley de Aguas española. La gestión de los recursos hídricos en entornos semiáridos tiene repercusiones socioeconómicas de gran envergadura, y generan un estrés hídrico importante fruto de las explotaciones intensivas a que son sometidos, por ello algunos autores definen la sobreexplotación como el resultado de una mala gestión de los acuíferos (Lehr, 1991).

2.2. ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE EL ACUÍFERO DE CAMPO DE CARTAGENA.

La zona denominada Campo de Cartagena perteneciente a las provincias de Murcia y Alicante del Sur-Este peninsular, es una de las zonas más secas y áridas de la Península Ibérica y de Europa; siendo una de las limitaciones más importantes de la agricultura local la disponibilidad de agua, tanto en calidad como en cantidad. Por ello, el agua tiene una gran importancia socio-económica en la región, pues genera una parte importante de la riqueza mediante los regadíos para la actual explotación agrícola.

Ante esta situación, en Septiembre de 1968 se aprobó la construcción del Trasvase Tajo-Segura (TTS) idea originaría del Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, D. Manuel Lorenzo Pardo, quien se lo propuso en el año 1933 al entonces Ministro de Obras Públicas D. Indalecio Prieto. Esta obra de ingeniería hidráulica se puso en marcha en el año 1979 siendo Ministro de Obras Públicas D. Joaquín

Garrigues Walker. Por ello, desde la puesta en marcha del TTS en 1979, empieza un incipiente interés sobre la gestión y recursos hídricos de la cuenca del Segura y más concretamente sobre la zona denominada “Campo de Cartagena”, de extensión considerable y con unos recursos hídricos subterráneos con una explotación en pleno auge.

Al inicio de los años 80 ya se habían realizado algunos estudios hidrogeológicos de la zona de cierta envergadura, estudiando las características hidrogeológicas sobre los acuíferos de Campo de Cartagena por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Con posterioridad, en el año 1983 se realizan nuevos estudios mediante la campaña de prospección geofísica en el Campo de Cartagena (Murcia) mediante sondeos eléctricos verticales, y también el Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ITGE) realiza estudios de la geometría de los acuíferos (ITGE, 1989), estudios sobre las características hidrodinámicas e hidrogeológicas sobre los acuíferos de Campo de Cartagena (IGME 1991, 1994), o estudios más modernos sobre información geológica y geofísica del subsuelo (sísmica de reflexión y sondeos) (IGME, 2005). También se empiezan a realizar por otros autores estudios más pormenorizados de tramos acuíferos como el Cuaternario (López-Bermúdez & Conesa-García, 1990).

Estos primeros estudios aportan información científica sobre diversos aspectos, todos ellos, relacionados con la hidrología e hidrogeología de Campo de Cartagena, y se empieza a poner en valor cómo gestionar los recursos hídricos de la zona, y en especial, las aguas subterráneas. Por ello, algunos trabajos estudian la gestión sostenible del sistema hídrico de Campo de Cartagena como el desarrollado por Albacete et al. (2001), o de cómo afecta la gestión de esta agua subterráneas a la red trófica de la laguna del Mar Menor (Pérez-Ruzafa & Aragón, 2003). También se realizan estudios sobre la Neotectónica y fallas en el borde costero y su implicación en las conexiones hidrogeológicas con el Mar Menor y Mar Mediterráneo, como el realizado por Rodríguez-Estrella (2004), o con Tomografía Remota Térmica (Rolandi et al., 2008), y se han realizado estudios completos sobre la gestión integrada de las aguas de Campo de Cartagena (IMIDA, 2013).

En esta búsqueda de conocimiento científico sobre funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero de Campo de Cartagena, también se realizan estudios sobre la sobreexplotación que viene sufriendo este sistema hídrico

(Senent-Alonso et al., 2009, 2015; García-Aróstegui et al., 2014, Senent-Aparicio et al., 2015) y como esta repercute en la posible intrusión marina en las zonas costeras (Mora et al., 1988; Lambán & Aragón, 2003; García-Aróstegui et al., 2003), o como las bajadas de los niveles piezométricos y los abonos agrícolas afectan a la calidad y cantidad de las aguas (García-Pintado et al., 2007; Martínez & Senent-Alonso, 2007). Por último, destacar que estos últimos años se han realizado estudios sobre el funcionamiento hidrogeológico y caracterización de los diversos tramos acuíferos mediante metodologías basadas en modelos matemáticos de diferencias finitas, como los realizados por Senent et al. (2009), sobre la modelización del acuífero Cuaternario, el realizado por García-Aróstegui et al. (2012), sobre la caracterización del acuífero Cuaternario y su contacto con el Mar Menor, o el realizado por Jiménez-Martínez et al. (2012), sobre conocimiento de las cuencas geológicas para fines hidrogeológicos con el análisis de datos para implementar modelos matemáticos.

Es interesante comentar aspectos de algunos estudios, donde la sobreexplotación de acuíferos ejerce determinada influencia sobre el medioambiente del entorno en el que se encuentra. Así por ejemplo, el realizado por Rodríguez-Estrella y López-Bermúdez (1991), comenta que la década de los años sesenta del siglo pasado fue uno de los periodos con mayor sobreexplotación del sistema de Campo de Cartagena, que propició la disminución de la descarga del acuífero Cuaternario al Mar Menor por lo que aumentó su salinidad. La entrada en funcionamiento del TTS en 1979, propició el efecto contrario, aumentando las descargas de agua dulce y reduciendo la salinidad de las aguas, provocando cambios de la flora y fauna del entorno del Mar Menor.

Debido a la escasez de recursos hídricos en esta zona, las nuevas tecnologías implementadas en las últimas décadas como la desalinización del agua salobre, hace que sea posible contar con otros recursos adicionales donde el coste-beneficio sea favorable (Aparicio et al., 2016), o la reutilización de aguas depuradas.

En la mayoría de los trabajos comentados anteriormente relacionados con el Campo de Cartagena, existen tres puntos comunes que son: Primero, la incertidumbre provocada por el desconocimiento de datos piezométricos fiables antes de 1975 y como evolucionaron los acuíferos desde su origen antes de antropizarse el medio (Fig. 1); segundo, que los trabajos recientes con

metodologías más modernas basadas en modelos matemáticos generalmente, solamente estudian el acuífero libre de la capa Cuaternaria y sus interrelaciones con el entorno, sin incorporar el resto de capas acuíferas a los modelos, lo que genera una falta de conocimiento del funcionamiento hidrodinámico de todo el conjunto del sistema acuífero; y tercero, la falta de información fiable sobre los regímenes de explotación por bombeo de cada capa, lo que genera incertidumbre a la hora de la introducción de los datos en el modelo, y traslada esa incertidumbre a la evolución de las extracciones reales en el tiempo y a la recarga real por retornos de riego que está relacionada con las extracciones de aguas subterráneas.

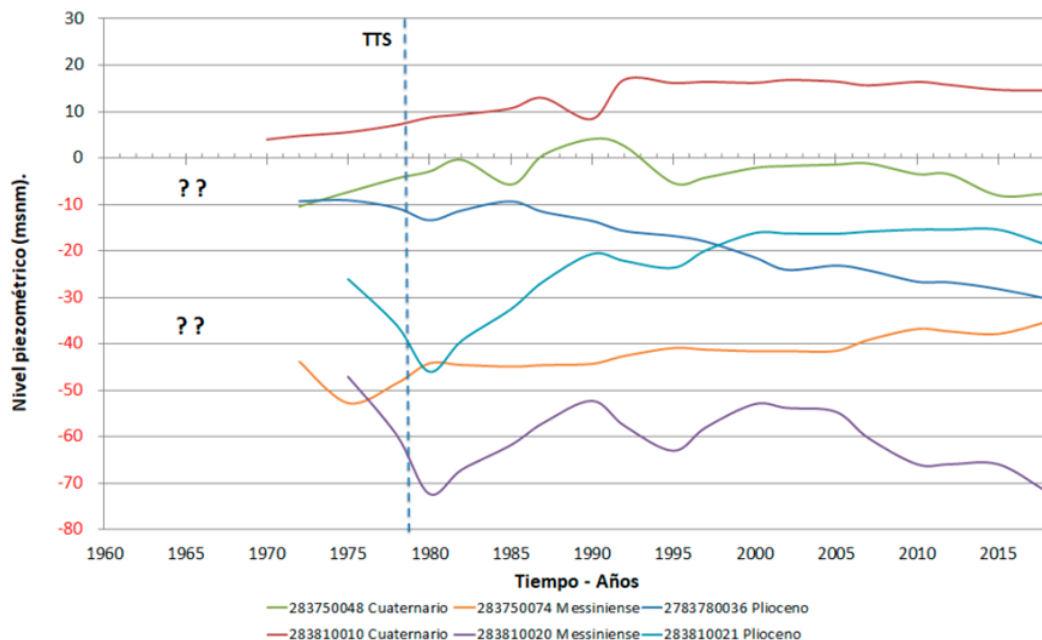


Fig. 1. Evolución temporal de niveles piezométricos de distintas capas acuíferas de Campo de Cartagena. Registros sistemáticos de datos desde 1972.

2.3. MODELOS DE FLUJO PARA ESTUDIOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

El agua subterránea en las regiones áridas y semiáridas suele ser una importante fuente de agua, por ello, el exceso de extracciones de agua subterránea en las últimas décadas ha disminuido su flujo con un descenso importante en los niveles piezométricos. Los recursos hídricos de estas regiones son de gran

importancia a todos los niveles, por ello, son frecuentes las investigaciones para generar metodologías que permitan gestionar de manera sostenible y racional estos recursos hídricos tan escasos y frágiles. Para el estudio de aguas subterráneas y la evaluación de estos recursos hídricos a medio y largo plazo de los acuíferos, está ampliamente implementado en todo el mundo la realización de modelos matemáticos numéricos de simulación por ordenador, que nos permiten obtener situaciones actuales y futuras de aguas subterráneas (Mohamed et al., 2016).

También, otras aplicaciones importantes de la modelización de flujo de aguas además de la gestión de los recursos hídricos, son la supervisión de trabajos hidráulicos, la simulación de riesgos naturales y la modelización de transporte en la contaminación de las aguas subterráneas (Knödel et al., 2007), o estudios sobre la hidrodinámica en acuíferos multicapa sobre los flujos de movimiento y transporte de contaminantes en aguas subterráneas con el realizado por Gómez-Beltrán et al. (2013).

Un modelo matemático de aguas subterráneas se puede definir como una herramienta que permite la representación aproximada de una situación real o simulación de hipótesis científicas, en definitiva, el modelo intenta simular la realidad lo más efectivamente posible. Estos modelos deben ser probados y validados mediante calibración, por ello, únicamente cuando se tiene el modelo calibrado y validado se puede decir que tenemos una herramienta útil, pero la precisión de la predicción es limitada ya que depende de la fiabilidad de la exactitud de los datos introducidos en el modelo. Los modelos de agua subterránea requieren una gran cantidad de información de campo para los datos de entrada y calibración. De hecho, uno de los principales problemas que suele encontrarse para disponer de una buena precisión sobre la predicción de la simulación, es la escasez y, a veces, poca fiabilidad de los datos con los que se trabaja en el modelo debido a las incertidumbres existentes sobre aspectos y parámetros difícilmente cuantificables. Pero aun así, se realizan modelos con escasez de datos para la gestión de recursos hídricos, donde existe un mal acceso a los datos y donde su recolección es dificultosa (Vives et al., 2001; Candela et al., 2014).

En la década de los años 60 se realizaban simulaciones electrónicas con modelos físicos mediante una red de resistencias y condensadores que simulaban distintas permeabilidades y coeficientes de almacenamiento. Eran soluciones laboriosas y limitadas. Entre los varios modelos existentes, el modelo conceptual es una hipótesis de cómo opera un sistema o proceso, y cuando esa idea se expresa cualitativamente tenemos un modelo matemático, donde las expresiones que contienen las variables, parámetros y constantes matemáticas reemplazan a objetos, fuerzas y eventos (Krumbein & Graybill, 1965), o como hay que realizar acuerdos o paradigmas establecidos para los modelos conceptuales que se vayan a utilizar en los diversos estudios científicos, cuando se está trabajando en regiones donde la escasez de datos es un punto a tener en cuenta (Barthel et al., 2008).

Posteriormente los modelos evolucionan a la vez que los computadores modernos y avances en el campo de procedimientos de cálculo numérico. Es frecuente para problemas de aguas subterráneas el empleo del método de cálculo basado en diferencias finitas, en el cual, se encuentra la situación de equilibrio para un instante de tiempo determinado, repitiendo este proceso para sucesivos intervalos de tiempo. Este método es descrito inicialmente por Todd (1959) y Walton (1970). Con posterioridad Remson et al. (1971) y Rushton y Tomlinson (2006) inician el camino de la modelización de acuíferos por métodos de diferencias finitas.

Para el estudio de la gestión de los recursos hídricos y desarrollo de acuíferos, para analizar su comportamiento en el tiempo y para poder investigar sobre las posibles causas y efectos de los flujos de aguas subterráneas, se hace preciso realizar simulaciones de esas causas y efectos, y para ello Herrera (1985), utilizó la modelización matemática por diferencia finitas para la resolución de la intrusión marina en acuíferos costeros en México, o Calvache y Pulido-Boch (1996), en acuíferos costeros del sur de España.

En esta dinámica de mejora de los modelos matemáticos McDonald y Harbaugh (1988), crearon el código matemático de diferencias finitas para aguas subterráneas denominado Modflow, que supuso un punto de inflexión en modelización matemática y se empezó a utilizar como herramienta para simular estados hipotéticos sobre las aguas subterráneas. Por ello, el desarrollo de modelos hidrodinámicos usando Modflow como herramienta para la gestión de

recursos hídricos se ha usado ampliamente en estudios científicos como Chavez et al. (2006), Bear et al. (2010), Panagopoulos (2012), Khadri y Pande (2016), o Gebreyohannes et al. (2017). Las aplicaciones prácticas tridimensionales 3D en flujos de aguas subterráneas y simulaciones de transporte de contaminantes el entorno de modelado, usan comúnmente en todo el mundo Modflow (USGS, United States Geological Survey, USA.), y su variante de post-procesado y pre-procesado Visual Modflow, donde por ejemplo, los mapas de isopiezas obtenidos permiten observar la dirección del flujo subterráneo (Rojas et al., 2004).

Las aplicaciones de los modelos numéricos para simulación de flujos de aguas subterráneas mediante modelos matemáticos basados en diferencias finitas, con motor de cálculo basado en Modflow, existen múltiples referencias a nivel internacional además de las nombradas en párrafos anteriores para aplicaciones de gestión de recursos hídricos como Gutiérrez et al. (2004), López Llompart (2009), Hernández y Llanura (2010), Cheng et al. (2010), Bustamante et al. (2012), Cox et al. (2012), Hadded et al. (2012); o para aplicaciones de intrusión marina en acuíferos como Dong et al. (2012), García Aróstegui et al. (2012), Rasmussen et al. (2013); o para aplicaciones hidráulicas como Wan Mohd-Zamri et al. (2012), Gossel (2012), o Wang et al. (2013), y para aplicaciones de calidad de aguas como Bagher y Zanzam (2011), y Wallis et al. (2012).

La relación de estudios y artículos relacionados con anterioridad, son un claro ejemplo de la tendencia actual sobre la forma de abordar diversas situaciones y simulaciones sobre flujos de aguas subterráneas, mediante metodologías basadas en la realización de modelos matemáticos de diferencias finitas, mediante modernos y potentes softwares y ordenadores que posibilitan su ejecución con relativo éxito, siempre teniendo en cuenta que la precisión de los resultados es directamente proporcional a la exactitud y bonanza de la información que se introduce en el modelo.

2.4. COMUNICACIÓN HIDRÁULICA A TRAVÉS DE POZOS.

La comunicación hidráulica a través de las distintas capas acuíferas existentes en cualquier medio subterráneo ha sido un tema de estudio desde hace muchas décadas, debido a que la comprensión y cuantificación de estos flujos de

agua subterránea sigue siendo uno de los paradigmas que existen aún hoy en día en la investigación de aguas subterráneas.

Son varios los autores que han realizado estudios sobre este tipo de cuestiones de comunicación hidráulica, entre capas y a través de sondeos abandonados o mal contruidos, como Lacombe et al. (1995), Timms y Acworth (2002), Santi et al. (2006) o Jiménez-Martínez et al. (2011), y como a través de estas comunicaciones hidráulicas de aguas subterráneas se producen contaminaciones con productos agroquímicos generalmente para la agricultura de regadío.

Entre las conclusiones de algunos de estos estudios, se comenta que el impacto potencial de las condiciones de flujo transitorio que se producen en estas condiciones, pueden evaluarse mejor a través de la modelización numérica que la tecnología actual hace posible (Timms y Acworth, 2002), ya que controlar este tipo de pozos mal contruidos y fomentar una buena práctica en la construcción de los mismos, es una manera adecuada y eficaz de realizar una gestión sostenible de estos recursos hídricos (Santi et al., 2006), y evitar las contaminaciones que se producen de este agua generalmente necesaria para el desarrollo de zonas áridas y semiáridas.

Entre los objetivos de la presente tesis doctoral, está el estudio de los efectos hidrodinámicos que ha provocado la explotación intensiva durante casi un siglo, del sistema acuífero de Campo de Cartagena en la hidrogeología del entorno, mediante la modelización con Modflow de todos los tramos acuíferos para el estudio hidrodinámico del medio. Se pueden destacar la reconstrucción de la evolución temporal de la piezometría del sistema, para poder constatar la inversión del gradiente hidráulico entre el inicio de la antropización del medio y el final del siglo XX, y como los retornos del riego han generado un doble efecto entre el aumento de los niveles de los acuíferos libres superficiales, y un descenso en los acuíferos confinados profundos generando un desequilibrio hídrico interno. También estudiar y cuantificar las descargas del acuífero Cuaternario al Mar Menor y Mar Mediterráneo, la intrusión marina que ha tenido y/o tiene el sistema con la explotación intensiva a que es sometido actualmente.

Además, el estudio de la modificación de los gradientes hidráulicos del sistema acuífero con respecto a la explotación extractiva por bombeo y la cuantificación de la comunicación hidráulica entre capas a través de la medios

porosos, con un estudio específico del Horst de Cabezo Gordo, y a través de los pozos y sondeos que atraviesan las distintas capas acuíferas, como una primera aproximación de la cuantificación del flujo a través estos pozos existentes, con una esperanza de mejora en el conocimiento sobre la hidrogeología de estos medios y sobre las incertidumbres que persisten actualmente.

III – ZONA DE ESTUDIO

CAPITULO III.- ZONA DE ESTUDIO.-

3.1. DESCRIPCIÓN DEL ACUÍFERO DE CAMPO DE CARTAGENA.

La zona denominada Campo de Cartagena ocupa un área de aproximadamente de 1,240 Km², y se caracteriza por ser una amplia llanura con una ligera pendiente hacia el sureste, en su mayoría rodeada de terreno montañoso. Por el Norte, se separa de la depresión formada por las vegas del Segura-Guadalestín, mediante una alineación montañosa cuya altura máxima se encuentra en la sierra de Carrascoy (1,065 m). Esta zona no tiene cursos de agua permanentes, como otras zonas similares en el sudeste de la Península Ibérica, sino numerosas ramblas anchas y ligeramente inclinadas que dan forma a una morfología peculiar de la zona (Fig. 2), entre las que destaca por su relevancia la Rambla del Albuñón principalmente y la Rambla de Miranda, al Sur de la primera.

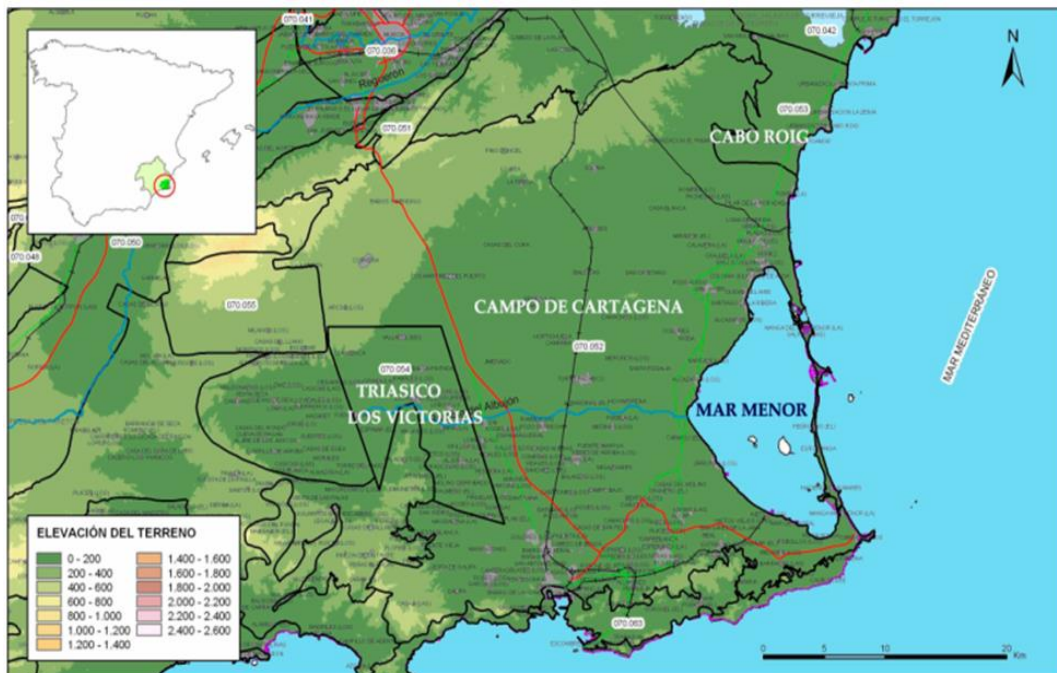


Fig. 2. Mapa de elevación del terreno de la masa de agua Campo de Cartagena. Modificado de PHCS (CHS, 2016).

La escorrentía superficial recorre distancias cortas a través de estas ramblas, que desembocan en la laguna Mar Menor y parte en el mar Mediterráneo (García-Pintado et al., 2007). La principal salida superficial de la cuenca del Campo de Cartagena es hacia la laguna hipersalina del Mar Menor (135 Km²), siendo una de las mayores de la cuenca mediterránea, con un volumen cercano a los 605 hm³ de agua salada (Jiménez-Martínez et al., 2012).

Los primeros informes que mencionan la relevancia de la zona del Campo de Cartagena desde el punto de vista hidrogeológico, datan de mediados del siglo XIX (1849), y revelan un vínculo entre la industria minera de la Sierra de Cartagena y La Unión y la agricultura de la zona, lo que explica la experiencia en perforaciones y equipos disponibles a mediados del siglo XIX, así como, las fuentes de inversión directa. En esa época del siglo XIX, ya se menciona por varios autores la existencia de una cuenca artesiana en el Campo de Cartagena (Peñuelas, 1851), e incluso informes del IGME realizados por Marín (1925), o varias publicaciones de principios del siglo XX comentan sobre las perforaciones de pozos artesianos motivados por investigaciones mineras tales como Mesa y Ramos (1909), o Guardiola (1927).

Los primeros estudios del Campo de Cartagena se realizan por Dupuy de Lome et al. (1917), y posteriormente otros similares como el realizado por Rubio (1928), donde se describe la cuenca artesiana con gran cantidad de pozos que llegan a alcanzar profundidades entre 65 y 80 metros. Se tienen datos sobre el primer pozo artesiano realizado en 1862 en Cartagena (Fig. 3), con una profundidad de 30 m y donde las aguas brotaron por encima del terreno (Mesa y Ramos, 1909).

En la cuenca baja o llanura aluvial que consiste en materiales detríticos cuaternarios no restringidos, se establece actualmente una gran área irrigada de 43,071 ha (CHS, 2016). Se pueden destacar dos subcuencas, la de San Javier y la de Torre Pacheco, donde existen datos que aseguran 3,000 m de serie miocena en algunos puntos. La precipitación promedio está en torno a 300-315 mm/año en la mayor parte de la zona, según datos recogidos de varias estaciones meteorológicas repartidas por la zona (Jiménez-Martínez et al., 2012). Las escasas precipitaciones existentes y generalmente caídas de manera torrencial, añadido a las altas temperaturas, hacen que las demandas hídricas de la toda la región sean elevadas, con un importante déficit hídrico que supera los 500 mm/año. Existen

dos elevaciones singulares en esta llanura que son Cabezo Gordo (312 m) con materiales del Pérmico-Tríasico y el cerro del Carmolí (111 m) que es un cono con materiales de procedencia volcánica junto a la población de Los Urrutias, al Sur del Mar Menor.

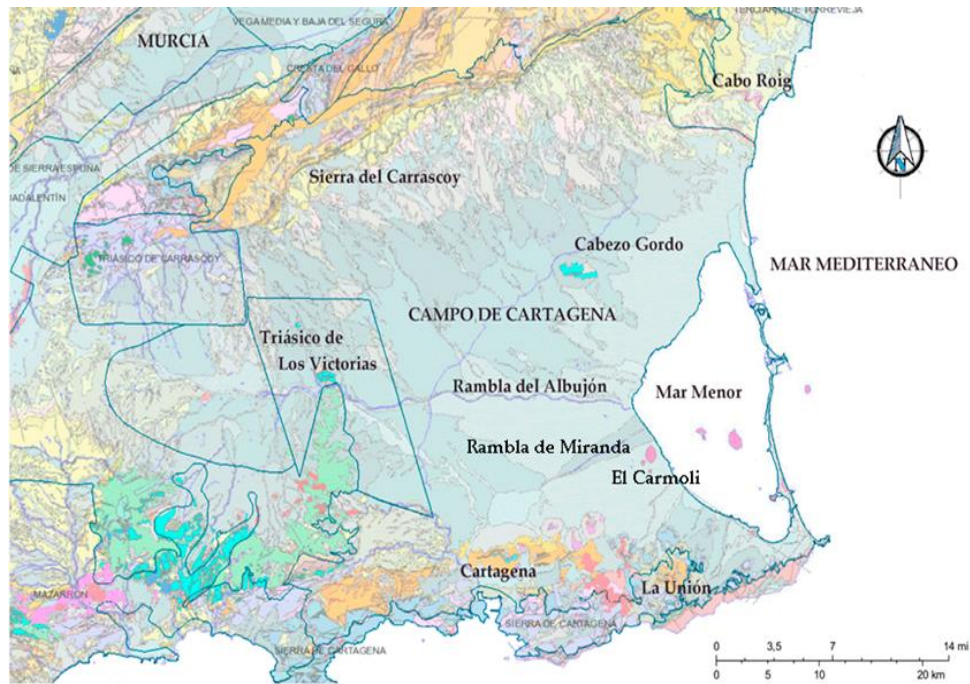


Fig. 3. Localización de lugares singulares y límites oficiales de acuíferos CHS, (en azul), sobre la base geológica del IGME (IGME, 2017).

Tanto las aguas subterráneas de este acuífero, como las de aportación, tienen especial importancia para la actividad agraria de toda la comarca, ya que las aportaciones del TTS son variables con una dotación anual máxima de 122 hm³/año y riegan solamente parte de total de la superficie regable (Fig. 4). La totalidad de la superficie regada actualmente según los datos obtenidos, es de 43,071 ha, que consumen unos 200-220 hm³/año (CARM, 2000; Albacete et al., 2001). En consecuencia, muchos acuíferos han sido sobreexplotados para satisfacer las demandas de abastecimiento y agrícola, causando importantes reducciones en los niveles piezométricos y aumento de la salinización con la consecuente degradación en la calidad del agua (Cabezas, 2009).

La actividad agropecuaria que existe actualmente el Campo de Cartagena y la actividad turística que genera la Laguna del Mar Menor, con las interrelaciones

entre ambos de importante calado medioambiental, hace que exista un interés y una transcendencia enorme para toda la comarca.

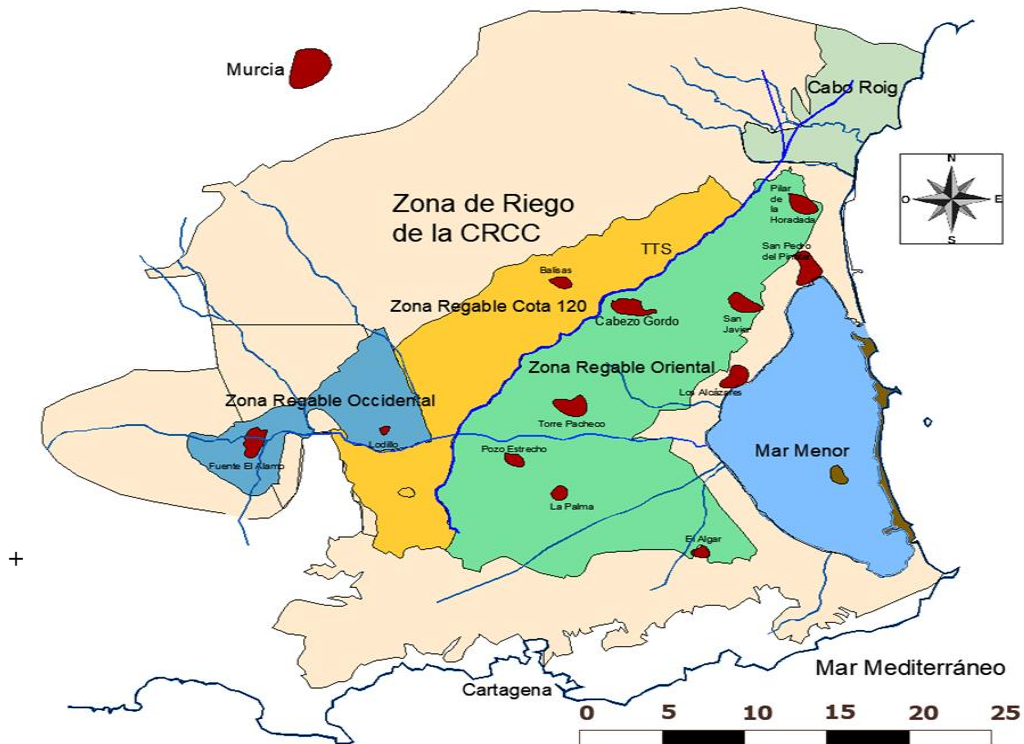


Fig. 4. Zonas de regadío en el Campo de Cartagena. Comunidad de Regantes Campo de Cartagena (CRCC).

Según la planificación hidrológica del PHCS, se definen las Unidades de Demanda Agraria (UDAs) que componen las zonas de regadíos del Campo de Cartagena. Estas UDAs han sido atendidas históricamente en gran medida con aguas subterráneas, y actualmente se complementan con aguas provenientes de otras fuentes de suministro. Estas fuentes son principalmente aguas superficiales provenientes del Trasvase Tajo-Segura, y desde finales del siglo XX, se han puesto en marcha alternativas de suministro como las aguas depuradas procedentes de las EDARs existentes en la zona, aguas precedentes de grandes desalinizadoras públicas y pequeñas privadas (desalobradoras), y aguas superficiales provenientes de los cauces naturales de la zona (Tabla 1).

Como puede observarse en la tabla 1, cada UDA tiene sus propias fuentes de suministro, ya que dependen de circunstancias que hacen que sean más o menos

viable cada uno de los suministros alternativos comentados anteriormente.

Tabla 1. Origen de las aguas en la zona de Campo de Cartagena. (CHS, 2014)

| Masa de Agua 070.052 | Agua subterráñ. del C.C. | Aguas del Traslase Tajo-Segura | Aguas Depuradas | Recupera. Desaliniza. | Agua Superficial |
|----------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------------|------------------|
| UDA 57 | Principal | -- | Si | Si | No |
| UDA 58 | Si | Principal | Si | No | No |
| UDA 59 | -- | Principal | No | No | No |
| UDA 75 | Principal | -- | Si | Si | Si |

3.2. GEOLOGIA DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El estudio de la geología del área objeto de estudio, refleja que se trata de la cuenca neógeno-cuaternaria del Mar Menor, situada sobre dominio Bético. La formación geológica de esta gran llanura es reciente, pues afloró del fondo del mar en el Mioceno superior, durante la denominada crisis salina del Messiniense en la que el Mar Mediterráneo se desecó por completo. En la etapa de distensión, la corteza se abre y el mar penetra, existiendo un relleno marino neógeno de profundidades considerables, como en la cuenca de Torre-Pacheco (Baudron et al., 2011).

La depresión interior post-tectónica que forma esta zona, tiene un relleno neógeno (aprox. 1,000 m) del período Terciario en el lecho de roca de los mármoles del Triásico, ver sección geológica (Fig. 5), con un predominio de margas alternadas con areniscas y conglomerados que forman el acuífero de Tortoniense, y junto con el tramo del Messiniense, donde se alternan las areniscas, calizas y las calcarenitas, dan forma al Mioceno superior. En los tramos anteriores, hay otro acuífero conocido como Plioceno, formado por areniscas y margas blancas. Sobre estos tramos terciarios se encuentra la capa superior del Cuaternario, que consiste en arena, limo, arcilla, conglomerado, caliche y arenisca.

En el tramo geológico que se extiende desde las estribaciones de la Sierra Carrascoy hasta el Mar Menor, la zona superior está formada por aluviones, terrazas y glaciares que conforman el relleno Cuaternario. Esta capa descansa sobre el relleno Terciario Neógeno, Mioceno superior, que conforman los tres tramos acuíferos siguientes: Plioceno, Messiniense y Tortoniense, de 700 a 800 m entre las tres secciones de grosor variable dependiendo del sitio de exploración, de acuerdo con el Instituto Geológico y Minero de España (Baudron et al., 2011).

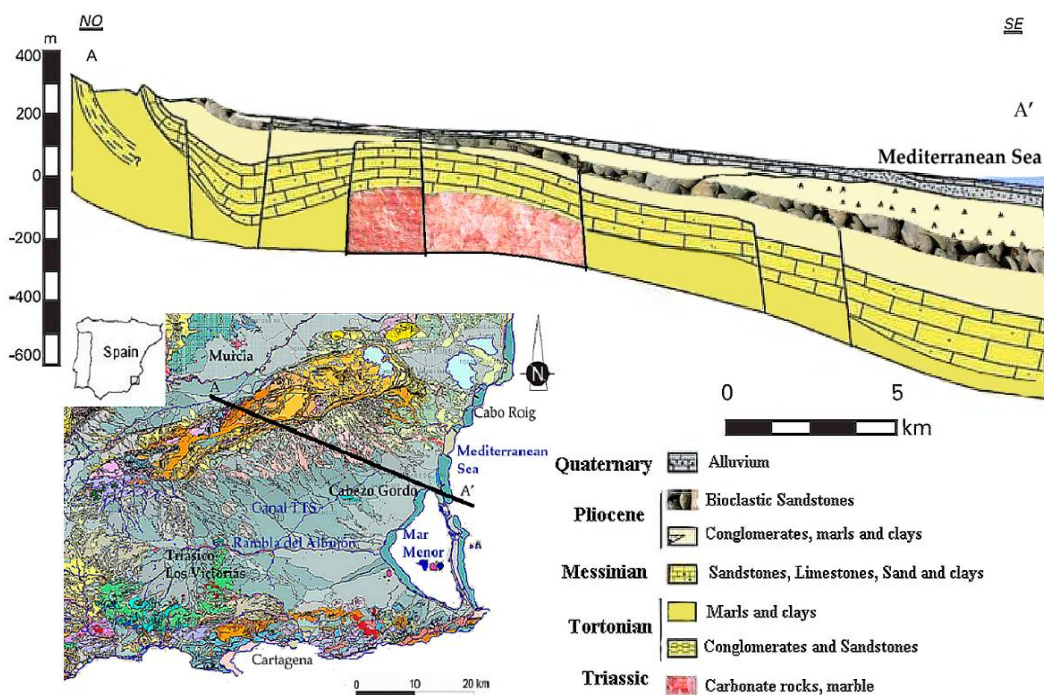


Fig. 5. Mapa geológico de Campo de Cartagena y sección transversal (IGME, 1994).

El área de estudio se sectoriza en niveles permeables de los tramos del acuífero, lo que a veces causa problemas para la continuidad hidráulica en la masa de agua subterránea. La tectónica de esta zona con barreras y divisiones, y el carácter discordante de algunas de sus formaciones también afecta esta continuidad hidráulica, dando lugar a una cierta independencia hidrogeológica local que causa heterogeneidad en general, con una variabilidad de los datos en áreas cercanas (García-Aróstegui et al., 2012), que también se transmite al modelo desarrollado. A su vez, más de 1,200 pozos privados están oficialmente censados. Muchos de ellos se exploran en varios acuíferos, lo que permite una conexión

artificial entre las diferentes tramos de agua (Jiménez-Martínez et al., 2011).

En el corte geológico entre la Sierra de Carrascoy, pasando por el horst de Cabezo Gordo, hasta el Mar Menor (Fig. 6a), se observa el relleno Cuaternario (Qt) constituido por conglomerados, areniscas y niveles intercalados de glaciares, terrazas y aluviales, con espesores comprendidos entre los 20 y 150 m dependiendo de la zona, aumentando su espesor hacia el litoral. Bajo el acuífero libre Cuaternario, se encuentra el estrato Plioceno (Lt) que está formado por margas de baja permeabilidad y areniscas, con espesores entre los 100 y 200 metros las primeras, y 10 a 110 metros las segundas según la figura 6b.

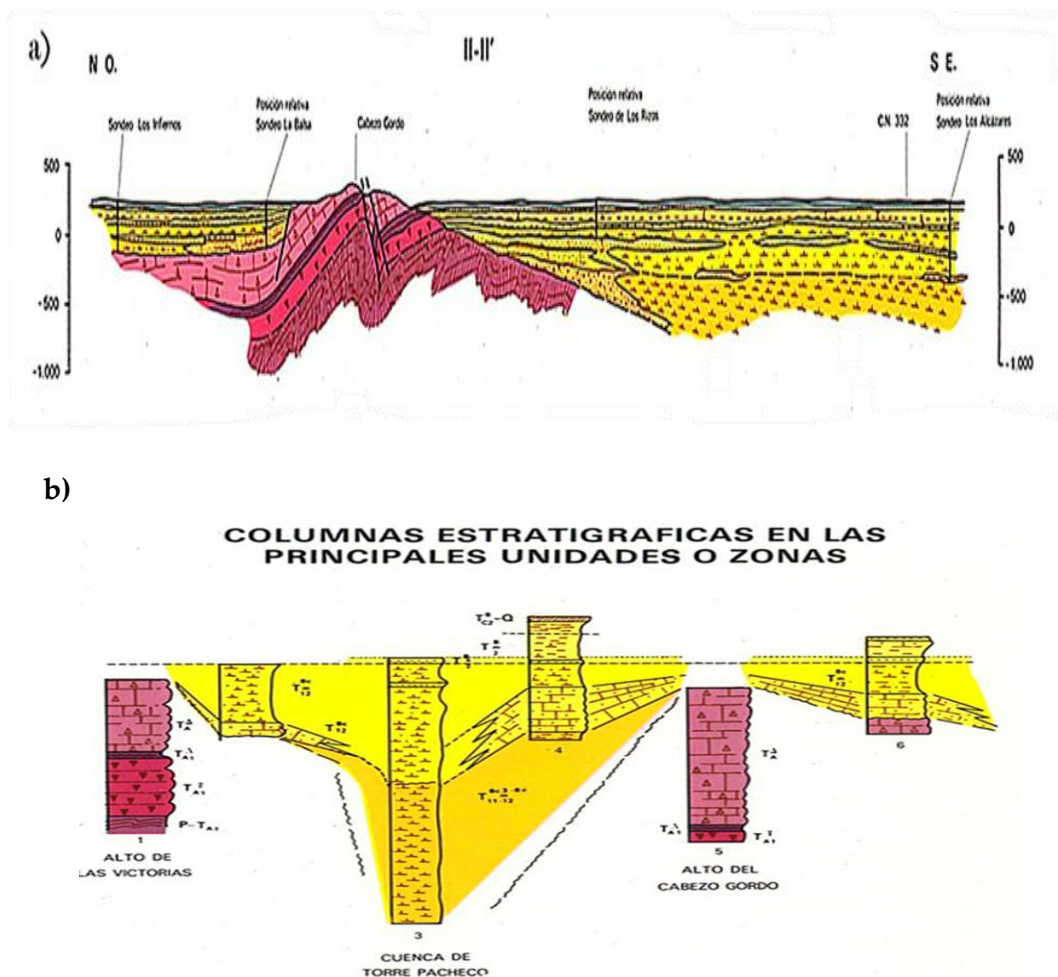


Fig. 6. a) Corte geológico de la zona de estudio, pasando por el Horst de Cabezo Gordo y el Mar Menor. b) Principales columnas estratigráficas de la zona. (ITGE, 1997).

El nivel del Mioceno superior formado por los estratos Messiniense (VLV) y Tortoniense (ULTC), formado por un paquete de calcarenitas permeables de espesores entre 50 y 250 metros. La base de estos acuíferos lo constituyen margas con lentejones discontinuos de entre 300 y 350 metros de espesor. Se pueden destacar las capas de glacia existentes que abarcan prácticamente toda la zona del Campo de Cartagena.

Los estratos del Plioceno y Messiniense tienen continuidad por debajo del Mar Menor y Mar Mediterráneo, aunque sin salida hidráulica conocida. Se trata de una formación de margas continentales del Plioceno, y sobre ellas una costra caliza que corta a bisel las margas, formando un glacis de erosión perfecto, con una altitud constante entorno a los 200 m

En el centro de la cuenca de Fuente Álamo esta formación está cubierta por los materiales almacenados por conos de deyección que provienen de la Sierra de Carrascoy (Fig. 7).

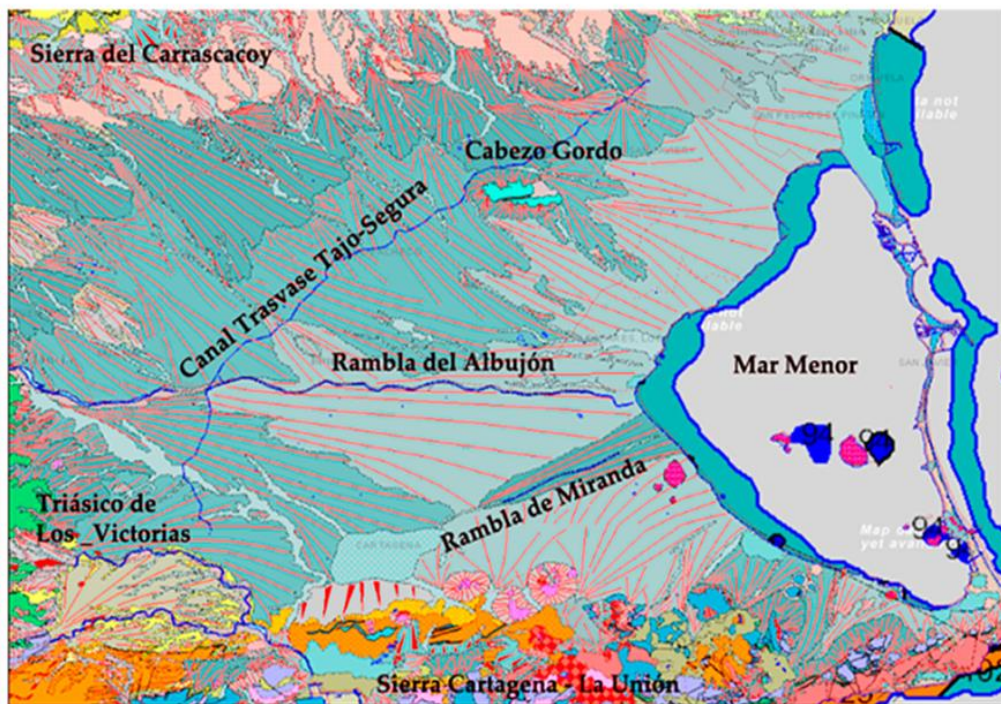


Fig. 7. Mapa geológico de la zona de estudio. Conos de deyección. (IGME, 2017).

3.3. HIDROGEOLOGÍA.

La masa de agua subterránea de Campo de Cartagena 070.052 se extiende entre las Sierras de Carrascoy y de Cartagena - La Unión. Los límites hidrogeológicos de la masa de agua subterránea al Noroeste (Sierra del Carrascoy) son del tipo cerrado y abierto, de naturaleza impermeable permotrias medio y con un sentido del flujo que varía según el tramo acuífero. Al Noreste esta Cabo Roig, es un límite cerrado con flujo nulo debido a la falla existente entre ambos ámbitos, al Este es abierto con salida hacia el Mar Menor y Mar Mediterráneo y al Sur (Sierra de Cartagena - La Unión) es similar al del Noroeste de la Sierra del Carrascoy (CHS, 2016). La mayoría de los trabajos hidrogeológicos realizados en la zona, corresponden a trabajos de investigación básicos de control y seguimiento realizados por el IGME (García-Aróstegui, 2018), con datos desde la década de los años 60 y 70 (Fig. 8).

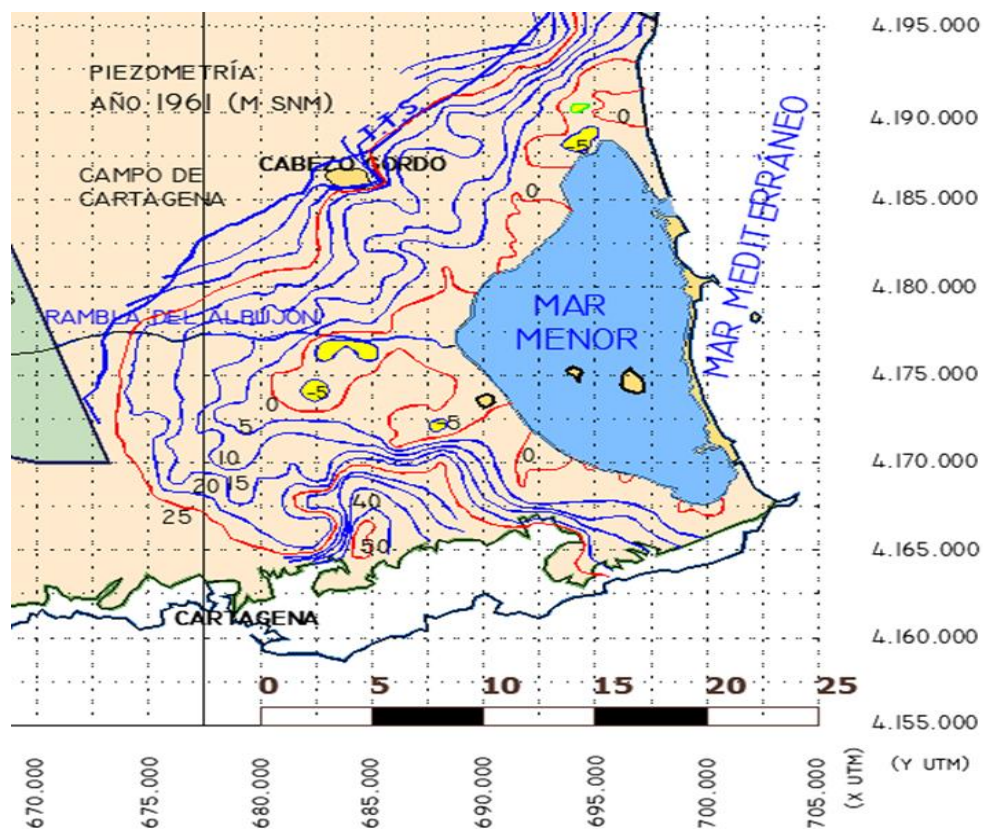


Fig. 8. Mapa de isopiezías del año 1961 del acuífero Cuaternario.

En el año 1989, el IGME realizó una primera definición precisa del denominado acuífero del Campo de Cartagena.

El movimiento del flujo subterráneo se realiza de Oeste a Este, según la información de isopiezas disponibles de varios estudios (Fig. 8 y 9), como el realizado por el IGME en 1994 o datos más recientes aportados por García-Aróstegui (2018). Se realizaron estudios similares entre los años 1988 al 1994 por el IGME y por otros autores (Mora et al., 1988; Solís et al., 1988), donde ya se refleja una clara sobreexplotación que merma las reservas. Esta situación, da lugar a una bajada continuada de los niveles piezométricos variable según las zonas, aunque desde la puesta en marcha del TTS se observaron ligeros ascensos inicialmente en la zona de San Javier, que luego se extendieron a otras zonas durante varias décadas al disminuir la explotación de estas aguas subterráneas (Fig. 9).

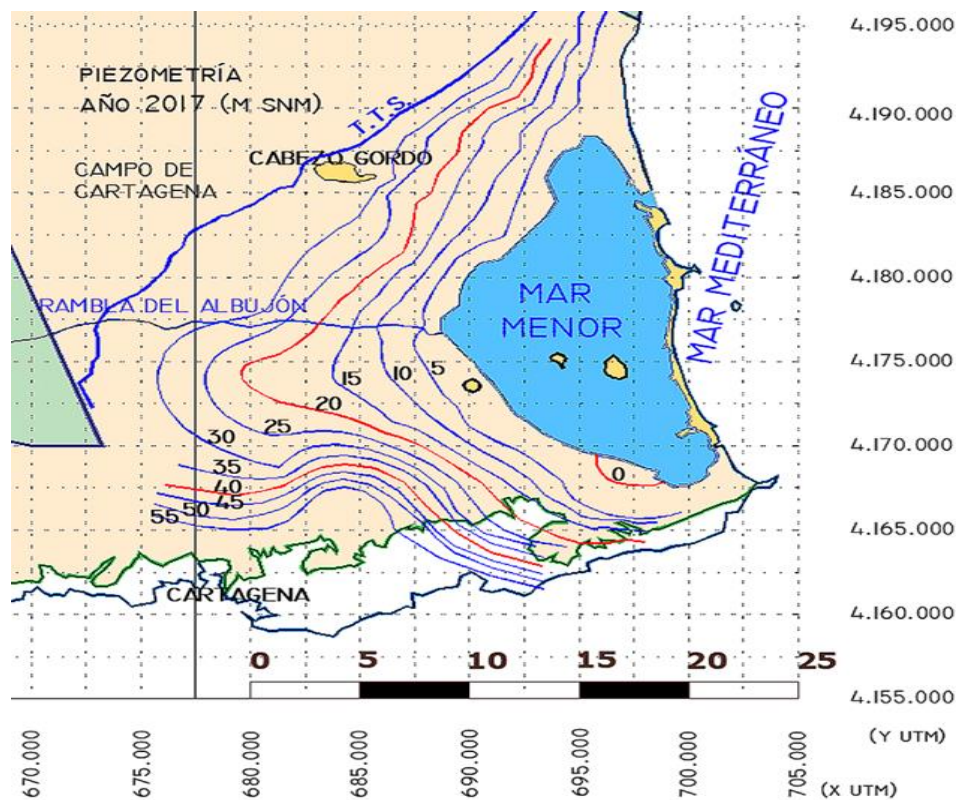


Fig. 9. Mapa de isopiezas del año 2017 del acuífero Cuaternario.

El funcionamiento hidrogeológico del todo el sistema acuífero tiene gran complejidad, debido a configuración geométrica y a su tectónica, que afecta de manera directa a la continuidad hidráulica mediante barreras y divisorias. La antropización que soporta el sistema también acrecenta los problemas hidrogeológicos. Los acuíferos confinados del sistema tienen escasa superficie de afloramiento por donde recargarse mediante la infiltración de lluvia, siendo la principal transferencia a través del acuífero superior Cuaternario.

Existen estudios de carácter hidrogeológico recientes que tratan la problemática de las aguas subterráneas del Campo de Cartagena, pero cabe destacar el realizado por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia con el objeto de establecer un plan para la gestión de las aguas subterráneas del Campo de Cartagena, el realizado por el IGME en 1991, o el realizados por CHS en su Plan Hidrológico de Cuenca 2015-2021.

Otros trabajos estudian la variación en el consumo de agua y su repercusión en la explotación del mencionado acuífero, como el realizado sobre la sostenibilidad de la gestión de aguas subterráneas basados en índices de sostenibilidad (Senent-Aparicio et al., 2015), el realizado sobre la contaminación entre capas acuíferas (Jiménez-Martínez et al., 2011), el realizado sobre la geometría y sus implicaciones en la hidrogeología de la zona (García-Aróstegui et al., 2012), o el realizado sobre la recarga del acuífero de Campo de Cartagena (Baudron et al., 2013, 2014).

En la zona del Campo de Cartagena más cercana al litoral donde se localiza la laguna del Mar Menor y el Mar Mediterráneo, únicamente aparecen los acuíferos del periodo Messiniense (Andaluciense), del periodo Plioceno y el acuífero libre del periodo Cuaternario. Por cuestiones estratigráficas y tectónicas, la relación de dichos mares con esta masa de agua subterránea se realiza principalmente a través del acuífero más superficial, es decir, del acuífero Cuaternario (Fig. 10). Por ello, el ascenso de niveles freáticos que ha sufrido paulatinamente en los últimos tiempos este acuífero, está produciendo un incremento de su descarga al Mar Menor, con el consiguiente efecto nocivo en la mayor aportación de nitratos y otros elementos procedentes de excedentes del abonado de los terrenos agrícolas (IMIDA, 2013).

Debido a las repercusiones socio-económicas que tiene en toda la zona del

Mar Menor la calidad de sus aguas, la modificación de sus parámetros ecológicos es y ha sido de gran interés, lo que ha provocado que diversos autores hayan desarrollado trabajos científicos a este respecto, principalmente hidrogeológicos.

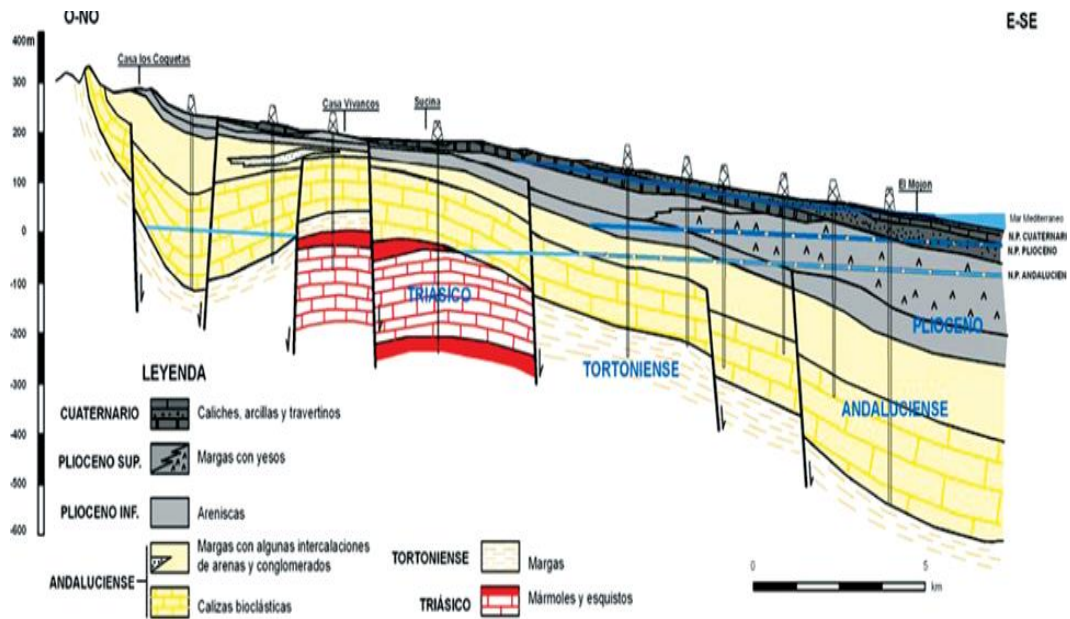


Fig. 10. Corte hidrogeológico por la zona de San Javier (IGME, 1991).

En las capas acuíferas, según aumenta su edad geológica y su profundidad con respecto a la ubicación de los estratos, disminuye su superficie de recarga. Los acuíferos confinados Plioceno y Messiniense tienen una superficie cercana al Cuaternario, debido a que disponen de una superficie considerable bajo el Mar Mediterráneo (Tabla 2). A su vez, más de 1.200 pozos privados están oficialmente censados, lo que genera un ratio de 1,2 pozos/km². Muchos de ellos se explotan en varios acuíferos, lo que genera una conexión artificial entre los diferentes flujos de agua de cada capa acuífera (Jiménez-Martínez et al., 2011).

La interconexión hidráulica entre el Campo de Cartagena y el Mar Menor y Mar Mediterráneo se efectúa a través del acuífero Cuaternario, con algunos periodos de intrusión marina en la zona costera, generados por la sobreexplotación a que ha sido sometido en determinados periodos (García-Aróstegui et al., 2003; Baudron et al., 2011).

Con respecto a la comunicación hidráulica natural entre capas acuíferas a través de contactos, discontinuidades, fallas y otros elementos geológicos de la zona, hay que tener en cuenta que los acuitardos margosos existentes entre los tramos acuíferos, tienen cierta permeabilidad debido a lentejones de evaporitas y margas existentes entre el estrato margoso (Jiménez-Martínez et al., 2011).

Tabla 2. Datos de superficie y afloramientos modelizados de las capas acuíferas de Campo de Cartagena.

| Acuífero | Unidad Hidroestrati- gráfica | Material geológico | Superficie Total (km ²) | Superficie afloramiento (km ²) |
|-------------|------------------------------------|--|---|--|
| Cuaternario | Qt | Conglomerados, Areniscas, limos y cantos. (Glacis). | 1,135 | 1,135 |
| Plioceno | LT | Areniscas | 1,105 | 86 |
| Messiniense | VLV | Areniscas, Arenas, Arcillas (norte), Calizas Bioclásticas (Sur) | 1,211 | 74 |
| Tortonense | ULTC | Conglomerados y Areniscas | 250 | 34 |

Se tiene constancia a través de estudios realizados principalmente por el IGME, que existe una comunicación hidráulica a través del Horst de Cabezo Gordo formado principalmente por materiales del Triásico, con los tramos acuíferos del Plioceno y Messiniense principalmente. Se sabe que el Messiniense recibe recarga a través del macizo de Cabezo Gordo, y también el Plioceno en esa zona (Senent-Alonso et al., 2009), aunque también se tiene conocimiento de recargas al Plioceno procedentes de la Sierra de Cartagena-La Unión con flujo en sentido Noroeste.

En la zona de El Algar, existe un área de contacto entre las capas del Cuaternario y el Plioceno de unos 45 km², donde hay una comunicación

hidráulica natural con la existencia de entradas subterráneas al Plio-cuaternario procedentes de la Sierra de Cartagena-La Unión (Senent-Alonso et al., 2009).

Los estudios precedentes sobre las descargas de aguas subterráneas al Mar Menor, se basan en la aplicación de la ley de Darcy para la realización de los cálculos, mediante valores aproximados de la transmisividad y frente de descarga al Mar Menor. Para el presente trabajo se seguirán los mismos pasos, debido a la más que comprobada validez de la mencionada fórmula para este tipo de cálculos hidrogeológicos.

La ley de Darcy define el movimiento del agua en medios porosos, y su expresión general es la siguiente:

$$Q = K \times i \times A \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde:

Q = es el caudal de descarga en (L³/T).

A = superficie que atraviesa el agua perpendicularmente al flujo (L²).

K = Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad (L/T).

i = gradiente hidráulico (adimensional).

La anterior fórmula se puede transformar en otra que contenga la transmisividad del material a atravesar y la longitud de frente en la dirección perpendicular al flujo, sabiendo que la transmisividad viene de multiplicar el espesor saturado por la permeabilidad del material quedaría la expresión anterior en:

$$Q = L \times i \times T \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde:

Q = Caudal de descarga en (L³/T).

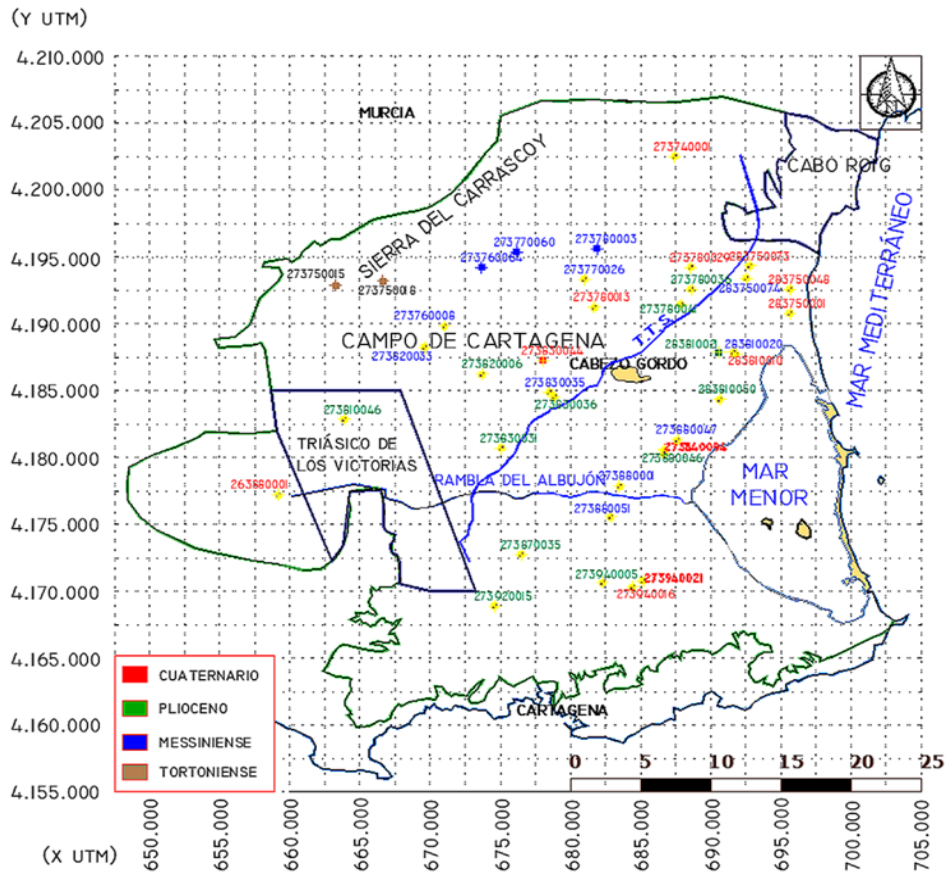
L = Longitud del frente que atraviesa perpendicularmente al flujo (L).

T = Transmisividad (L²/T).

i = Gradiente hidráulico (adimensional).

3.4. PIEZOMETRÍA.

El IGME ha estado realizando controles piezométricos y recabando datos sobre aguas subterráneas desde varias décadas, disponiendo de datos desde la década de los años 70 hasta el año 2001 aproximadamente, cuando empezó la Confederación Hidrográfica del Segura a llevar los mencionados controles de las aguas subterráneas en distintos puntos de la zona (Fig. 11). Pero la mayoría de los pozos realizados en el siglo pasado fueron perforados por particulares, lo que hace que exista falta de información técnica sobre la ejecución de los mismos, también que sea poco fiable cual es el origen o tramo acuífero al que pertenecen de las muestras, y cuáles son las mediciones de los niveles piezométricos de los sondeos estudiados.



Los datos referentes a la piezometría corresponden a varias fuentes, entre las que se encuentran la red piezométrica que gestiona la Confederación Hidrográfica del Segura, los datos piezométricos del IGME y los estudios previos sobre modelización del acuífero cuaternario realizado por Senent et al. (2009).

Poder identificar la capa acuífera que corresponde a una u otra perforación del conjunto del sistema hídrico, es una información necesaria para cualquier estudio hidrogeológico, siendo a veces una misión complicada de realizar debido a la escasa información que se dispone en algunos casos (Baudron, 2013b), lo que genera una incertidumbre difícil de resolver y de cuantificar. Para poder disponer de datos actualizados y fiables, la CHS desde el año 2008 ha estado realizando sondeos para el seguimiento y control de los acuíferos de su entorno administrativo.

La piezometría ha sido generada con información sobre pozos y perforaciones de las bases de datos e inventarios de la CHS e IGME. Los datos piezométricos del IGME, que comenzaron en la década de los años 70, muestran que la estabilidad actual está precedida de una recuperación gradual del agua subterránea, vinculada con la puesta en marcha del TTS como fuente externa de agua a finales de los años 70 (1979).

Los datos históricos obtenidos de antes de la antropización del medio, la aplicación de ecuaciones de segundo grado, y la interpolación de datos estadísticos, han servido para reconstruir el estado anterior a las mediciones del IGME. En el último tercio del siglo XIX, en general, había surgencia natural en gran parte del Campo de Cartagena, principalmente en la zona de Los Alcázares, San Javier y San Pedro del Pinatar, y también en la zona de Cartagena hasta Rambla de Miranda. A su vez, se tiene constancia que los primeros sondeos en la zona del Albuñón y Torre Pacheco no hubo surgencia natural, quedándose los niveles piezométricos a una profundidad entre 20-25 m, para las capas más superficiales que se corresponden con el acuífero libre Cuaternario (Román, 1996).

En el primer cuarto del siglo XX con el perfeccionamiento de las técnicas extractivas, se consiguen mayores profundidades y mayores caudales, lo que provoca que los niveles piezométricos del Cuaternario dejarán de tener surgencias naturales, y a su vez, se empezase a conseguir poder llegar a las capas confinadas inferiores como el Plioceno y algunos puntos del Messiniense. La carga hidráulica en esos primeros pozos del estrato Plioceno para la zona Noreste

de Campo de Cartagena, era aproximadamente 15 msnm y 25-35 msnm para el estrato Messiniense. También se observó artesianismo en las zonas cercanas a la costa en la época de los primeros pozos profundos a principios del siglo XX, y para la capa Cuaternaria, la cota piezométrica en algunas zonas estaba prácticamente a nivel de terreno, pasando a unos -10 m en la década de los años 30 (Montoya, 2007).

Se tiene constancia del uso de norias de sangre y molinos de viento en los primeros pozos artesianos en el siglo XIX e inicio del siglo XX, donde la técnica existente no permitía profundidades mayores de 10-15 m aproximadamente y dependiendo de la zona, lo que indica que en esa época los niveles piezométricos de la capa Cuaternaria estaban en torno a los 5-10 de profundidad desde el nivel del terreno (Fig. 12).

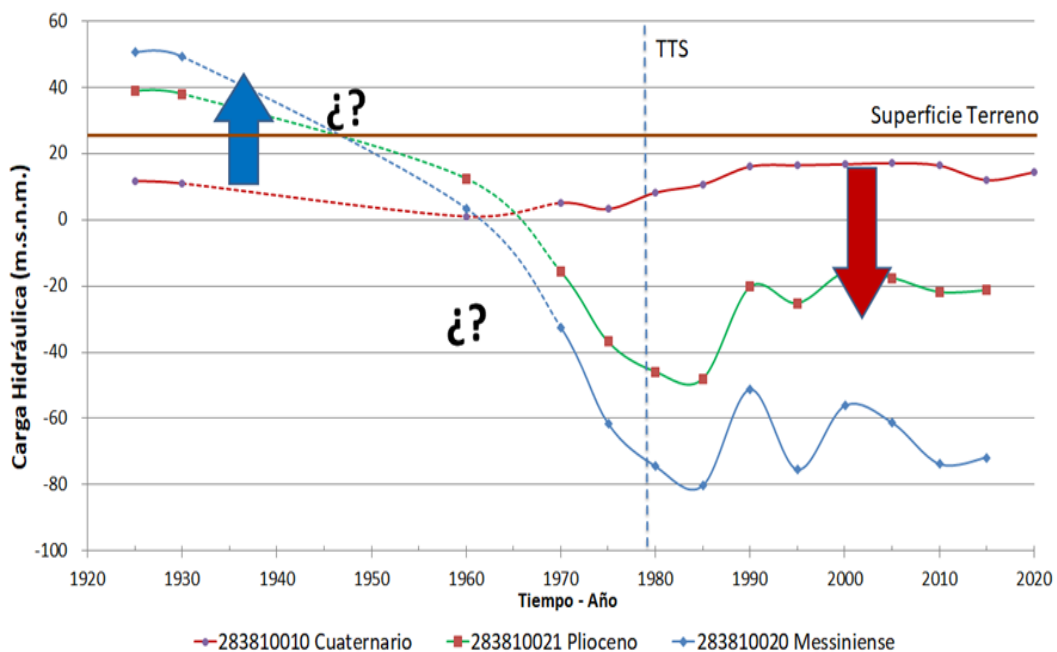


Fig. 12. Evolución a largo plazo del nivel del agua subterránea para los acuíferos Cuaternario (no confinado), Plioceno y Messiniense (confinado). Las flechas indican el sentido del gradiente hidráulico vertical y la magnitud relativa. Las líneas discontinuas indican los tramos temporales sin datos piezométricos. La línea discontinua vertical azul indica puesta en marcha del Trasvase Tajo-Segura (TTS) en 1979.

Los acuíferos superiores en la actualidad tienen cargas hidráulicas más altas

que los acuíferos más profundos, que es lo opuesto a la situación existente hace un siglo (Fig. 12). El gradiente hidráulico vertical entre las capas se ha invertido, y el flujo entre los acuíferos a través de pozos profundos puede haber discurrido en ambas direcciones (Baudron et al., 2014).

Aunque se tiene constancia de explotación del acuífero Cuaternario desde mediados del siglo XIX, el origen de la antropización del medio para la presente tesis parte de 1925, que es cuando se estima empiezan a desarrollarse técnicas en perforaciones que permitían conseguir caudales representativos para este estudio, con algunos niveles estimados basados en la información conseguida de diversos estudios de la época y algún otro más reciente (Peñuelas, 1851; Mesa, 1909; Dupuy de Lome et al., 1917; Marín, 1925; Guardiola, 1927; Rubio, 1928; Román 1996, Montoya, 2007).

Los niveles observados de 1975 a 2015 por el IGME y la CHS, se han introducido en el modelo en etapas de 1 año, para determinar el comportamiento del sistema en estado estacionario y transitorio. Durante los últimos 20 años de datos (1995-2015), los niveles de agua subterránea han sido estables con mediciones de 12-18 msnm (Cuaternario) y 15-25 mbnm (Plioceno), y con niveles irregulares pero de tendencia descendente 50-75 mbnm (Messiniense) (Fig. 12).

Los datos existentes sobre la piezometría observada en el periodo temporal objeto de estudio para la capa Cuaternaria, denotan que a partir del punto de inflexión donde los niveles eran menores y que coinciden con la década entre 1960 y 1975, se produce una recuperación hídrica que en la capa Cuaternaria genera niveles piezométricos superiores a los inicialmente establecidos para el inicio de la antropización del sistema, que como se ha comentado anteriormente se inicia en 1925 en la presente tesis.

Esta recuperación de niveles piezométricos se establece para algunos puntos de control, en torno a 15 metros hasta la estabilización de los mismos sobre 1995, y que perduran hasta la actualidad con una ligera tendencia decreciente (Fig. 13).

El modelo desarrollado en este estudio, dispone de la información necesaria para observar una evolución generalizada de estos tramos acuíferos a partir del año 1975 hacia una recuperación de niveles piezométricos. La capa de edad Tortoniense es la que dispone de menos información piezométrica, con apenas dos puntos y un tramo temporal corto.

Para la capa de edad Cuaternaria, se ha obtenido información de varios sondeos repartidos por todo el área de Campo de Cartagena, pero la mayoría de puntos de observación están por debajo de la cota 120, como puede observarse en la gráfica de la figura 13, donde en general todos los puntos de comportan de manera similar, con un periodo de descenso de niveles desde el inicio en 1925 hasta finales de la década de los años 70 algunos, y de los años 80 otros cuantos, con una recuperación paulatina y estable hasta la actualidad.

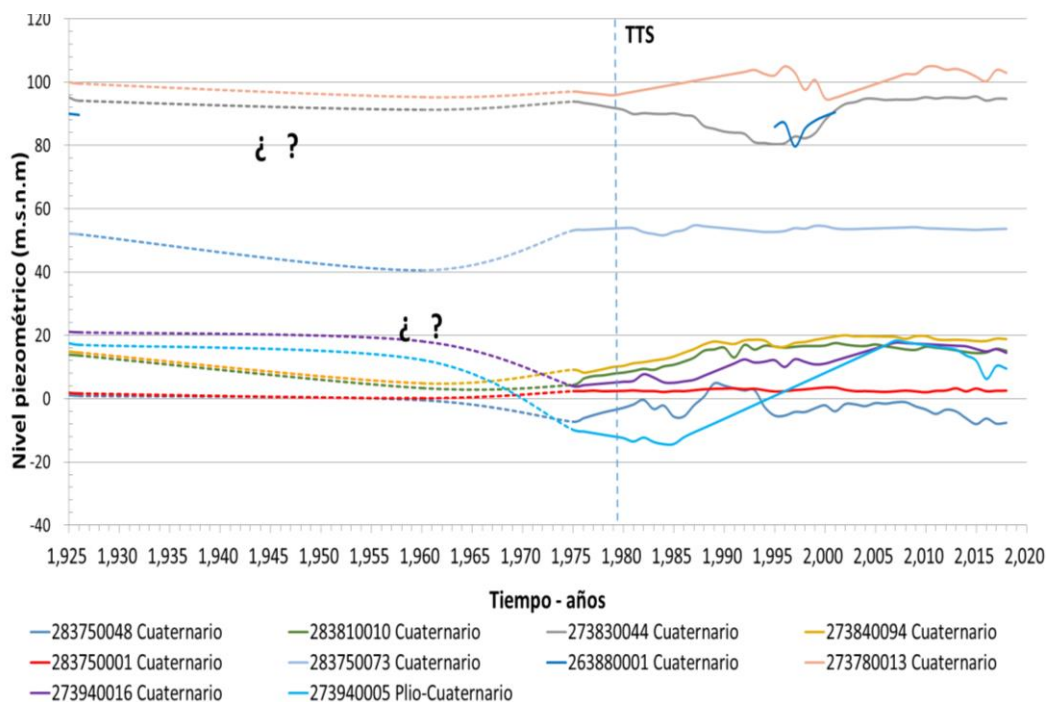


Fig. 13. Evolución a largo plazo del nivel piezométrico de los pozos de observación empleados para el acuífero del tramo Cuaternario (No confinado). Entre 1927 y 1972 los niveles son estimados.

En general, del estudio de las gráficas de las piezometrías obtenidas de los datos oficiales de la CHS y del IGME para todas las capas acuíferas, se puede observar una zona temporal coincidente con los niveles más bajos entre 1975 y 1985, a partir de la cual todas las capas acuíferas experimentan una recuperación general y paulatina coincidente con la puesta en marcha del Trasvase Tajo-Segura. También existen dos zonas temporales donde las piezometrías experimentan un descenso generalizado, que coinciden con los periodos de

sequía que se produjeron uno en 1995 y otro en 2005 (Fig. 14).

Para los tramos acuíferos confinados como el Plioceno y Messiniense, las recuperaciones piezométricas fueron menos fuertes y con sentido distinto según la zona de Campo de Cartagena en que nos encontremos, ya que no tuvieron el mismo comportamiento la subcuenca de Torre Pacheco que la de San Javier.

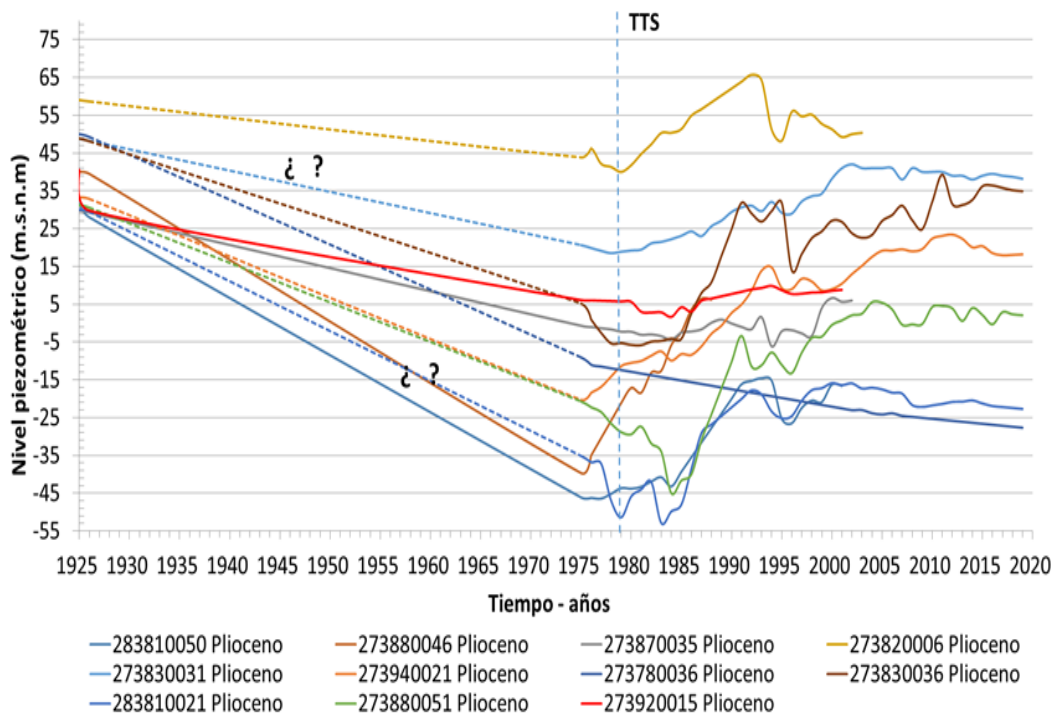


Fig. 14. Evolución a largo plazo del nivel piezométrico de los pozos de observación empleados para el acuífero del tramo Plioceno (Confinado). Entre 1927 y 1973 los niveles son estimados.

Por ejemplo, para la subcuenca de Torre Pacheco la recuperación de niveles es clara y notoria con una línea de tendencia ascendente y más horizontal en los últimos 10-15 años, y para la subcuenca de San Javier la recuperación ha sido muy suave e incluso en algunas zonas inapreciable, con puntos decrecientes en los últimos años, por lo que no se consolida la recuperación hídrica.

Para el acuífero de edad Plioceno, el descenso de niveles hasta la década de los años 70 es muy acusado, con valores entre los 50 a 70 metros, siendo los valores mayores los concernientes a los sondeos de observación más cercanos a la

costa de la laguna del Mar Menor, y los cercamos a Cabo Roig.

También, en algunas zonas del Noroeste del Campo de Cartagena, las piezometrías observadas en algunos pozos de control y seguimiento de la capa acuífera de edad Messiniense, siguen siendo descendentes incluso con posterioridad a la puesta en marcha del Trasvase Tajo-Segura, como en varios casos. Estas zonas son coincidentes con las que tienen una elevación topográfica mayor para capa acuífera de edad Messiniense (Fig. 15). En otros casos, se produce una ligera recuperación que no se termina de consolidar, con subidas y bajadas coincidentes con los periodos de sequía sufridos en los últimos 50 años. Se estiman descensos entre 1925 y la década de los años 80, de 120 metros.

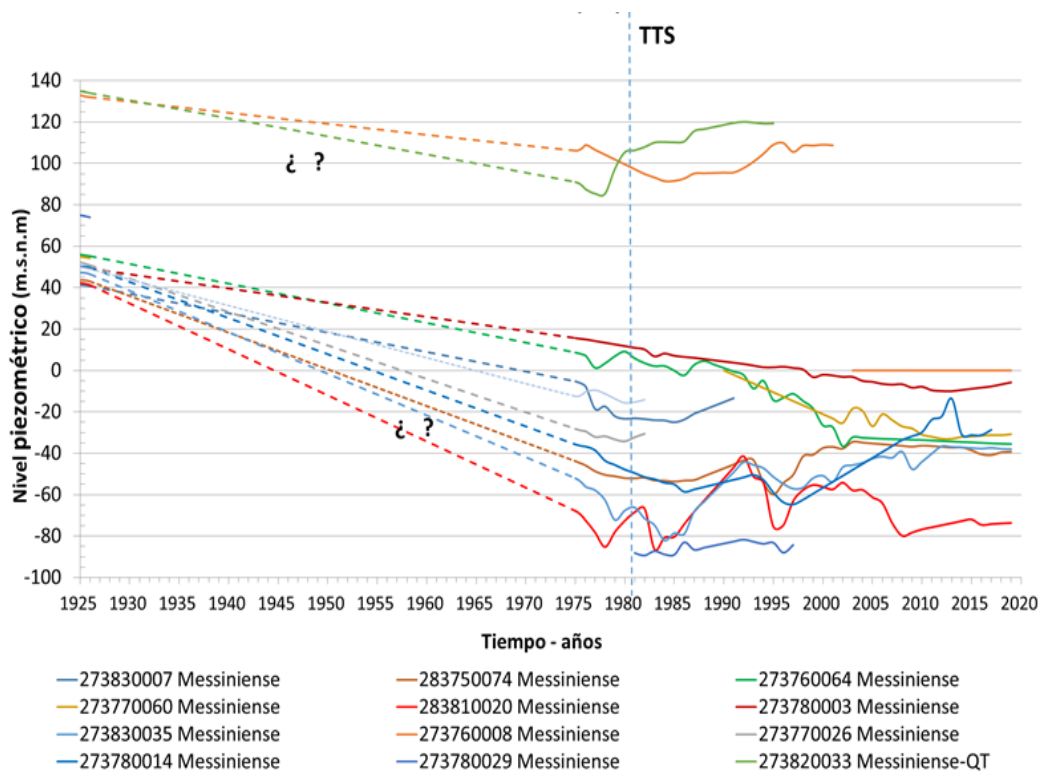


Fig. 15. Evolución a largo plazo del nivel piezométrico de los pozos de observación empleados para el acuífero del tramo Messiniense (Confinado). Entre 1927 y 1973 el nivel es estimado.

Para el tramo Tortoniense, la información piezométrica muy es escasa, siendo un acuífero confinado con escasa conexión hidrogeológica con el resto de

tramos acuíferos, que se resumen en conexiones a través de pozos y a través de los contactos, discontinuidades y fallas, teniendo un claro descenso en la época de 1980, y una clara recuperación en nuestros días (Fig. 16). Es el acuífero que tiene la mejor calidad de agua de todos los contenidos en este estudio, empleando sus aguas además de para riego, para abastecimiento de poblaciones.

Para introducir los datos de recarga en el modelo de flujo realizado, se han realizado mapas de recarga zonificados principalmente por UDAs y tipo de cultivo; para las extracciones a través de pozos de bombeo se ha llevado a cabo una simplificación de zonificación preservando los flujos globales, debido a la gran cantidad de pozos existentes (2,000 ud), aunque todavía existe cierta incertidumbre sobre la cantidad, ubicación y flujos extractivos reales.

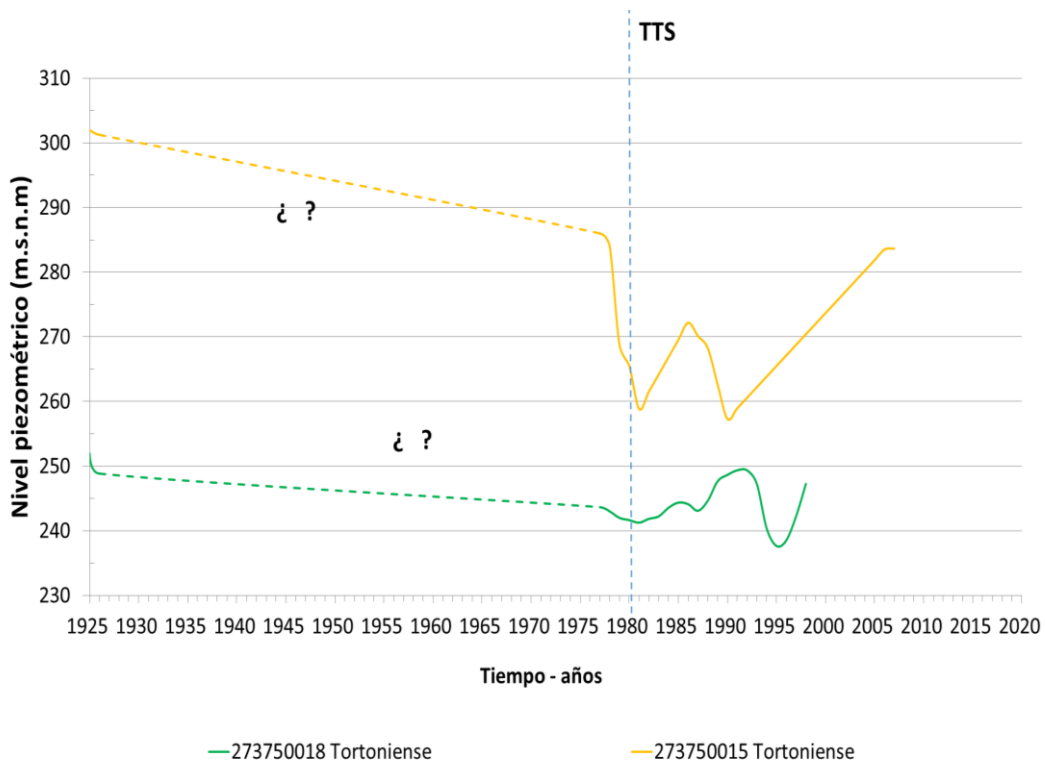


Fig. 16. Evolución a largo plazo del nivel del agua subterránea para el acuífero Tortoniense (Confinado). Entre 1927 y 1975 los niveles son estimados.

Sobre este tema de los sondeos existentes, extracciones y evoluciones piezométricas, cabe comentar que en algunos estudios recientes se ha podido

constatar que los datos y evoluciones piezométricas de un considerable número de los pozos existentes, han podido ser malinterpretados en estudios anteriores debido a la escasa información disponible, estando el 48 % del total de los pozos inventariados (744 ud) comunicados en varios niveles acuíferos o tienen su origen desconocido (PIAS, 1975). Entre estos pozos de bombeo, existen pozos antiguos e inactivos, generalmente deficientemente construidos, que generan comunicación hidráulica entre las secciones del acuífero, causando a veces contaminación del agua de un acuífero a otro (Lacombe et al., 1995; Jiménez-Martínez et al., 2011).

La mayoría de los estudios hidrogeológicos del área de estudio, corresponden a investigaciones básicas sobre monitoreo y control emprendidas por el IGME con datos de la década de los 70. En 1989, el IGME hizo una primera definición precisa del llamado Acuífero Campo de Cartagena, donde comenzó a abordarse la intrusión marina en el acuífero de la laguna Mar Menor. Estudios similares se llevaron a cabo entre 1988 y 1994 por el IGME.

3.5. BALANCES HIDROLÓGICOS.

Para la generación de este tipo de balances, se ha empleado dos fuentes de datos: hidrológicos e hidro-meteorológicos, que permitirán establecer los balances hídricos y evaluar los recursos existentes en la masa de agua subterránea objeto de estudio.

Según el Plan de Actuación en situaciones de alerta y eventual sequía de la Confederación Hidrográfica del Segura de 2007, una fuente de datos es el Plan Hidrológico de Cuenca del Segura de 1990 y su actualización del año 2001, y la otra fuente más recientemente es el Informe de los Artículos 5, 6 y 7 de la Directiva Marco de las Aguas (2005). En el primer caso, el balance se ha detallado a nivel de acuífero, mientras que en el segundo, se ha realizado a nivel de masa de agua. Se ha incorporado en ambos casos una síntesis de los factores utilizados en cada uno de ellos. (Tabla 3).

Dentro de las entradas o inputs al sistema, se han discriminado entre las entradas por infiltración de lluvia, las correspondientes a la infiltración de retornos de riego, las de infiltración a partir de cauces, las entradas por infiltración de embalses y, por último, las producidas desde otros acuíferos. Las salidas o outputs del sistema se encuentran discriminadas entre las salidas a

partir de manantiales, las correspondientes a extracciones por bombeo, la cesión a otros acuíferos y las salidas al mar. Se entenderá como coeficiente de explotación de la masa de agua subterránea estudiada, a la relación entre las extracciones totales y los recursos disponibles en esa unidad. En general, los datos obtenidos de fuentes oficiales determinan un balance negativo para todo el conjunto hídrico de la zona del Campo de Cartagena, con entradas y recursos disponibles inferiores a las demandas existentes y a las extracciones por bombeo de aguas subterráneas de $68.30 + 5.00 = 72.30 \text{ hm}^3/\text{año}$. El balance resultante del presente trabajo es similar al establecido en el Plan Hidrológico de Cuenca, aunque las cifras manejadas son distintas, en general, superiores a las contenidas en la siguiente tabla 3.

Tabla 3. Resumen de balances de aguas subterráneas de la MASub 070.52. (CHS, 2007)

| | | Balance Directiva Marco del Agua | | | | | |
|---|--|--|--|--|---|--|--|
| <i>Entradas totales ($\text{hm}^3/\text{año}$)</i> | <i>Salidas totales ($\text{hm}^3/\text{año}$)</i> | <i>Balance ($\text{hm}^3/\text{año}$)</i> | <i>Surgencia natural ($\text{hm}^3/\text{año}$)</i> | <i>Demanda ambiental ($\text{hm}^3/\text{año}$)</i> | <i>Entradas totales ($\text{hm}^3/\text{año}$)</i> | <i>Recurso disponible (R.D.) ($\text{hm}^3/\text{año}$)</i> | <i>Extracción total (E.T.) ($\text{hm}^3/\text{año}$)</i> |
| 67.40 | 73.30 | -5.90 | 52.00 | 15.60 | 67.20 | 51.60 | 68.30 |
| <i>Piezometría</i> | | | <i>Recurso explotable (R.E.) ($\text{hm}^3/\text{año}$)</i> | <i>Balance (RE - ET) ($\text{hm}^3/\text{año}$)</i> | <i>K' (ET/RD)</i> | <i>Explotación por encima de los recursos disponibles</i> | |
| Tendencia al aumento moderado de niveles. | | | | | | | |
| Extremo nor-occidental con descenso muy acusado. | | | 15.20 | -53.10 | 4.493 | Toda la Unidad. | |
| Flujo del norte y noreste al centro. | | | | | | P.H.C. y D.M.A. | |

3.6. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS ACTIVIDADES ANTROPOGÉNICAS.

La ausencia de ríos y arroyos permanentes, y la baja pluviometría de la zona ($310 \text{ mm}/\text{año}$), hicieron que la única alternativa para el desarrollo del regadío

fuesen las aguas subterráneas. A mediados del siglo XIX, varios autores mencionan la existencia de una cuenca artesiana en el Campo de Cartagena, e incluso varias publicaciones de principios del siglo XX comentaban diversos aspectos sobre la perforación de pozos artesianos, motivados por la investigación minera (Mesa, 1909).

Existen algunos estudios hidrogeológicos recientes que abordan los problemas de agua subterránea de Campo de Cartagena, pero caben destacarse, el realizado por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM, 2000), que estudia la variación en el consumo de agua y su repercusión en la explotación del mencionado acuífero, también el realizado sobre la gestión sostenible de las aguas subterráneas y sobre la base de índices de sostenibilidad de Senent-Aparicio et al. (2015), el de contaminación entre capas acuíferas de Jiménez-Martínez et al. (2011), y el de la recarga del acuífero de Baudron et al. (2014).

A finales del siglo XIX e inicio del siglo XX existían varias alternativas para extraer el agua del subsuelo, entre las que destacaban, la noria impulsada con motor animal y los molinos de viento hidráulicos. Ambas, debido a la tecnología poco avanzada en ese momento, sólo eran capaces de bombear aguas subterráneas de los estratos más superficiales, en nuestro caso, del acuífero libre edad Cuaternaria; con profundidades escasas para la noria (5-10 m), y algo mayores para los molinos de viento (10-15 m). En el primer tercio del siglo XX como consecuencia de la expansión de los pozos artesianos, se empezaron a emplear combustibles como la gasolina y el gasoil, aunque los niveles alcanzados por estos sondeos seguían siendo pequeños (Tabla 4). En la mitad del siglo XX, entre las década entre 1940 a 1970 emergió con pujanza la electricidad, como energía predominante para las extracciones de agua subterránea (Román, 1996).

El agua subterránea de este sistema acuífero, es de especial importancia para la actividad agraria de toda la región, con un volumen extractivo variable de 80 a 190 hm³/año en los últimos 70 años, y contribuciones del trasvase Tajo-Segura con una dotación anual máxima de 122 hm³/año, junto otras aportaciones más recientes con 4.2 hm³/año provenientes de la cuenca del Segura, 13.2 hm³/año de la reutilización de aguas depuradas y 2.2 hm³/año de la desaladora de Mojón (CHS, 2016).

Tabla 4. Datos de la evolución de los primeros pozos artesianos y sondeos del Campo de Cartagena. (Dupuy de Lome et al., 1917; Román, 1996)

| Acuífero | Año | Procedimiento | Prof. pozo (m) | Prof. agua (m) |
|------------------|------|---------------|----------------|----------------|
| Cuaternario | --- | Artesiano | 30 | +1 |
| Plio-Cuaternario | 1911 | Artesiano | 65 | 0 |
| Plioceno | 1920 | Mecánico | 75 | -25 |
| Messiniense | 1974 | electrobomba | 205 | +12 |

La evolución temporal de la demanda bruta de riego ha tenido un crecimiento continuado a lo largo del tiempo, con una línea claramente creciente y un importante aumento a mediados del siglo XX, pero se ha estabilizado en los últimos 30 años con un ligero decremento provocado por la mayor eficiencia y tecnificación de los sistema de riego, siguiendo patrones similares al desarrollo de la superficie regable en las UDAs que componen el Campo de Cartagena.

La superficie irrigada con aguas subterráneas más las irrigadas por otras fuentes en esta zona, suman un área regada neta de 43,071 ha, y se establece una demanda bruta de 258 hm³/año para una dotación de 6,000 m³/ha/año, de acuerdo con el Plan Hidrológico de la Cuenca del Río Segura en el periodo 2015-2021 (CHS, 2016). Esta demanda ha estado creciendo paulatinamente durante casi todo el siglo XX. En el siglo XXI, el aumento del área irrigada se ralentiza y se estabiliza en la última década, con previsiones similares hasta el año horizonte 2033, como lo indican los datos obtenidos de diversas fuentes oficiales como el IGME o los Planes Hidrológicos de los años 1998, 2010-2015 y 2015-2021, de la Confederación Hidrográfica del Segura.

La demanda de riego y el suministro medio de agua para cada UDA que depende de su tipo de cultivo, han evolucionado con la entrada al mercado de sistemas de riego más eficientes que han permitido la optimización de los

recursos, e incluso, reducir las dotaciones brutas por hectárea y año, aumentando así la superficie irrigada localizada hasta el 98% en la actualidad (Alcón et al, 2011). Estudios recientes determinan que la zona de Campo de Cartagena dispone de un índice de eficiencia entre la superficie regada y el sistema de riego existente entre el 86-89 % (Grindlay & Lizárraga, 2012; CHS, 2016), lo que ha permitido reducir la dotación bruta en los últimos años (Tabla 5).

El Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura 2015-2021, calcula la demanda bruta de hectáreas irrigadas reduciendo la dotación media para Campo de Cartagena establecida en estudios anteriores, y se establece para este periodo en 6,000 m³/ha/año. Estos valores se han cuantificado por los consumos en algunas comunidades de regantes, con valores cercanos a 5,800 m³/ha/año, aunque persiste una incertumbre sobre los consumos reales de aguas subterráneas en algunas zonas con captaciones privadas, donde es más complicado realizar inventarios con históricos de consumos reales.

Tabla 5. Evolución temporal de la superficie regada en Campo de Cartagena. Evolución temporal de la demanda de riego en Campo de Cartagena. Promedio de dotaciones de riego (IGME, 1991, 1994; CARM, 2000; CHS, 1998, 2007, 2014, 2016).

| Descripción | 1975 | 1991 | 1998 | 2004 | 2010-2015 | 2015-2021 |
|---|--------|--------|--------|--------|-----------|-----------|
| Hectáreas regadas (ha) | 19,521 | 28,597 | 34,328 | 37,628 | 42,253 | 43,071 |
| Demanda bruta de riego (hm ³ /año) | 132.74 | 194.46 | 223.13 | 237.06 | 264.80 | 258.50 |
| Dotación bruta media (m ³ /ha/año) | 6,800 | 6,800 | 6,500 | 6,300 | 6,300 | 6,000 |

Los valores de la demanda de riego utilizados en los estudios llevados a cabo en 1998, 2010 y 2015 por la CHS y el IGME (PIAS, 1975; CHS, 1998, 2007), están entre 225 y 265 hm³/año, con datos de recursos disponibles renovables en torno a 89 hm³/año (CHS, 2014). Desde el comienzo del trasvase Tajo-Segura, la

tendencia decreciente del bombeo ha sufrido dos picos, coincidiendo con períodos de sequía en 1995 y 2005, donde las contribuciones del TTS tenían valores mínimos.

A principios del siglo XX, sobre 1930 se tiene constancia de que la superficie de regadío era aproximadamente unas 3,000 ha con una extracciones estimadas de unos 20 hm³/año. En 1976 se tenía 20,009 ha de cultivos regables, y una explotación total de aguas subterráneas de 116 hm³/año (PIAS, 1975), de los cuales una distribución aproximada sería de 20 % Cuaternario, 20 % del Plioceno y 60 % del Messiniense.

En el estudio realizado para la presente tesis, se ha podido comprobar como los valores de datos históricos de la explotación por bombeo que se han conseguido, debido a la escasa información fiable existente para épocas anteriores a 1985, en casi todos los casos, son inferiores a los valores extractivos necesarios para conseguir la calibración del modelo realizado según las piezometrías existentes en cada momento temporal estudiado.

3.7. ENTRADAS

En este sistema acuífero existen entradas al sistema provenientes de varios puntos o fuentes. En primer lugar se tiene las entradas provenientes de infiltración, que pueden dividirse en función del origen de su procedencia. Así tenemos las generadas de la precipitación de lluvia (Ip), y las procedentes de la recarga por retorno de los riegos (Ir). Las otras entradas a considerar en los balances, son las entradas provenientes de otros acuíferos colindantes, ya sea en vertical o por transferencia lateral entre acuíferos.

En relación con la infiltración proveniente de la precipitación de agua de lluvia (Ip), no existen grandes diferencias entre las fuentes consultadas, disponiendo de una pluviometría media anual en la zona entre 300 y 313 mm/año (Jiménez-Martínez et al., 2012; CARM, 2000), lo que proporciona una infiltración útil que varía entre 17 mm/año propuesta por Baudron (2014), 50 mm/año propuesto en estudios del IGME y definido como la primera estimación de recarga moderna para el acuífero Cuaternario y los 66 mm/año del PHCS para el periodo 2015-21 de la CHS, con un volumen estimado de 77 hm³/año. En este trabajo se propone un valor de 34 mm/año, que está en torno al 11 % del valor

promedio anual de pluviometría, y un 70 % sobre el valor propuesto por el IGME para esta infiltración por lluvia, más cercano al valor propuesto por Alcalá y Custodio en otros estudios realizados para esta zona para la infiltración efectiva (Alcalá & Custodio, 2014, 2015).

Según el estudio realizado por Baudron en su tesis doctoral (Baudron, 2013), se comenta que antes del desarrollo industrial de la agricultura, el régimen pre-antrópico de los acuíferos estudiados tenían unos valores de recarga de 23 mm/año para los afloramientos del Plioceno y Messiniense y de 15 mm/año para el acuífero Cuaternario superficial, siendo la recarga media por lluvia de 17 mm/año cuando el Campo de Cartagena era prácticamente una zona semi-árida con huertos artesanales para subsistencia.

Gracias a la explotación de las aguas subterráneas se pudo ir transformando esa zona semi-árida, en zonas de regadío divididas en UDAs según la figura 17, donde la agricultura empezaba a tener una relevancia socio-económica importante en el conjunto de sociedad murciana de la época.

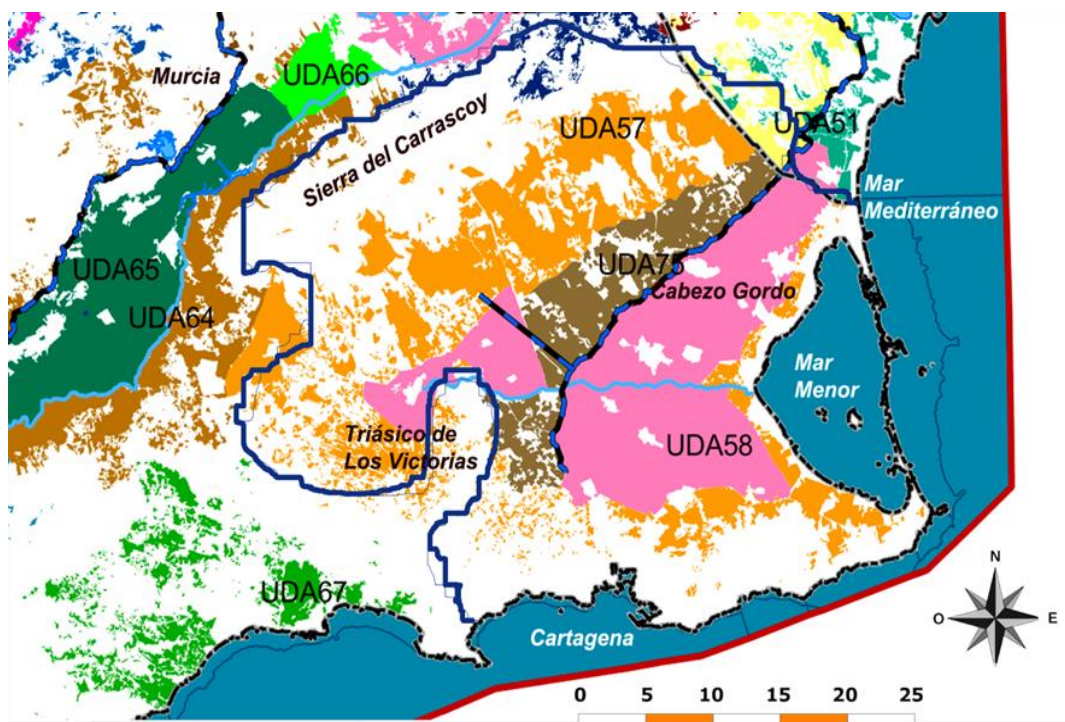


Fig. 17. Mapa de ubicación geográfica de las zonas de riego (UDAs) en la masa de agua subterránea (070.052) Campo de Cartagena. Modificado de CHS (CHS, 2016).

Con respecto al otro parámetro (Ir) para las aguas procedentes del retorno de riego, la variación de los valores manejados es bastante mayor. Existen estudios realizados por el IGME en 1991, donde se comenta que con una demanda anual de riego de 120 hm³/año se establece una tasa de retorno del 20%, lo que genera unos retornos de regadío que serían de 24 mm/año.

Según la Confederación Hidrográfica del Segura en sus Planes Hidrológicos de Cuenca (CHS, 1998, 2014, 2016), no existen datos medidos de la cuantía real de los retornos de riego, y establece unos porcentajes de retorno de riego en función de la demanda bruta de acuerdo con la Instrucción de Planificación Hidrológica vigente. Por ello, para las dotaciones brutas medias de la zona de Campo de Cartagena, le corresponde un porcentaje que se estima entre el 5 y el 10 %. El estudio se resuelve con valores medios entre 8-9 % sobre la demanda neta de las UDAs, con un retorno de regadío dependiente por UDAs según la tabla 6.

Tabla 6. Datos sobre UDAs de la zona de Campo de Cartagena (CHS, 1998, 2014, 2016).

| Descripción | 1998 Demanda Neta (hm ³ /año) | 2010-2015 Demanda Neta (hm ³ /año) | 2015-2021 Demanda Neta (hm ³ /año) | 1998 Retorno Riego (hm ³ /año) | 2010-2015 Retorno Riego (hm ³ /año) | 2015-2021 Retorno Riego (hm ³ /año) |
|-------------|---|--|--|--|---|---|
| UDA 57 | 41.71 | 47.20 | 72.80 | 3.28 | 2.65 | 3.72 |
| UDA 58 | 87.93 | 144.40 | 107.10 | 7.05 | 14.69 | 12.15 |
| UDA 59 | 71.18 | 4.60 | - | 6.43 | 0.32 | - |
| UDA 75 | - | 25.30 | 33.20 | - | 2.31 | 1.76 |
| Σ | 200.82 | 221.50 | 213.10 | 16.76 | 19.97 | 17.63 |

Estos valores incluidos en la tabla 5 arrojan unos índices de infiltración por retorno de riego medio (Ir) de 46.37 mm/año y máximo de 55 mm/año.

Algunos autores como Jiménez-Martínez et al. (2009), utilizando el modelado de la zona combinado con estudios posteriores sobre balances de agua

en zonas saturadas y no saturadas, obtuvieron un valor promedio de retorno de riego local en torno a los 210 mm/año, que para todo el área de estudio supone un valor de tasa de recarga 80 mm/año (Jiménez-Martínez et al., 2009; CHS, 2014; Alcalá y Custodio, 2015). Otros estudios recientes establecen tasas medias de recarga de 73 mm/año para todo ámbito del estudio, como el realizado por Alcolea et al. (2019). También en otro artículo de Jiménez-Martínez et al. (2016), se establecen valores de retorno de 156 mm/año, y otros como el realizado por García-Aróstegui et al. (2012), se relacionan los retornos de riego con el tipo de cultivo de una zona determinada. Otros trabajos para cultivos hortícolas anuales, establecen una tasa de retorno local para cultivos perennes de 201 mm/año y para cultivos de frutales de 194 mm/año, e incluso se considera el tipo de modalidad de riego instalado (aspersión, goteo, riego por inundación, etc.).

En la figura 18 se observa la evolución temporal introducida en el modelo, con un valor de tasa media de recarga para el todo el periodo de estudio de 80 mm/año, y para el periodo 2000-18 de 88 mm/año.

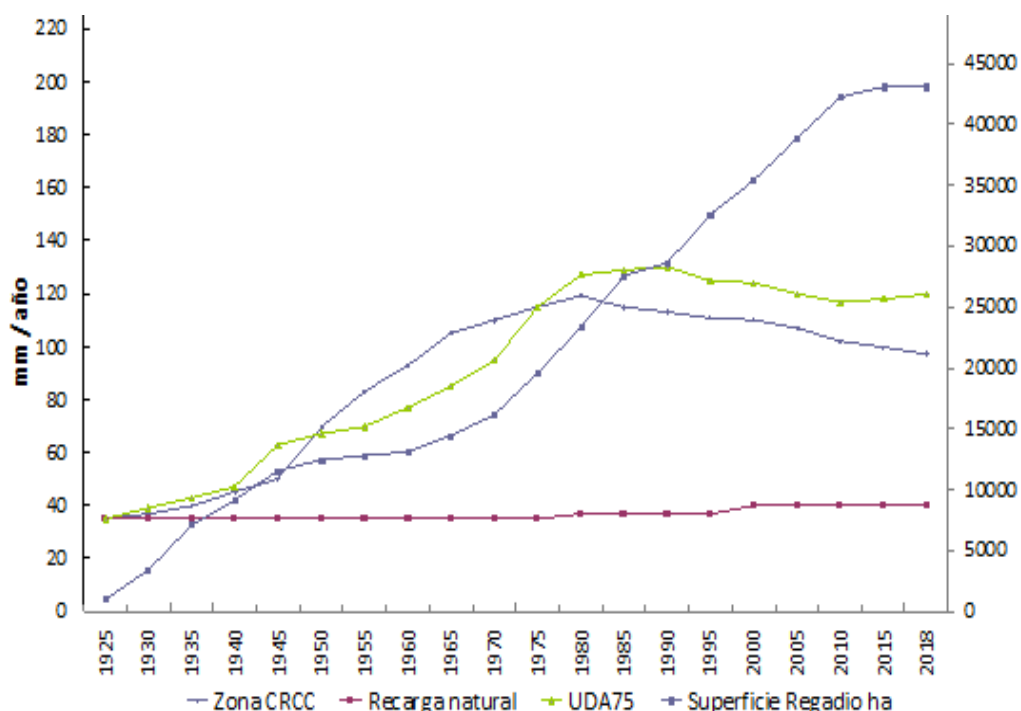


Fig. 18. Evolución temporal de la recarga procedente de los retornos de riego y de la recarga natural (mm/año), y la superficie regada neta (ha).

Los valores medios introducidos en el modelo para el retorno de riego local para la zona denominada CRCC UDA 58 (Fig. 17) han sido de 95 mm/año para todo el periodo de estudio y de 126 mm/año para el periodo 2000-18. Para las zonas denominadas UDAs 57 y 75, los valores han sido de 100 y 140 mm/año respectivamente.

De la observación de la figura 18, se puede apreciar como a partir de los años 80 se suaviza su crecimiento con la implantación de nuevos sistemas de riego que mejoran su eficiencia, manteniendo sus valores e incluso decreciendo, aunque la superficie de regadío sigue creciendo progresivamente. También se aprecia la evolución de la superficie de regadío y como sigue unas pautas similares a las recargas durante un tiempo, a partir del cual, sobre 1990 los índices de recarga se relajan en contraposición con el incremento continuado de la superficie regada.

En la tabla 7 se ha dispuesto una comparativa de la recarga de diversos trabajos y fuentes oficiales, separando la recarga de lluvia, la de retorno de riego y la total.

Tabla 7. Comparativa de la recarga en la zona de Campo de Cartagena ($\text{hm}^3/\text{año}$).

| Recarga | 1991 (IGME) | 1998 (PHCS) | 2010- 2015 (PHCS) | 2015- 2021 (PHCS) | 2000-2016 (Jiménez- Martínez et al., 2016) | 2000- 2018 (Tesis) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------------------|---|--------------------------|
| Recarga Lluvia | 46.00 | 52.00 | 78.20 | 78.20 | 46.00 | 51.00 |
| Recarga Riego | 23.00 | 17.00 | 20.00 | 18.00 | 66.00 | 66.00 |
| Recarga Total | 69.00 | 69.00 | 98.20 | 96.20 | 112.00 | 117.00 |

3.8. SALIDAS. EXTRACCIONES Y TRANSFERENCIAS.

Las salidas del sistema se producen principalmente a través de las extracciones por bombeo, descarga subterránea al Mar Menor y Mar Mediterráneo, drenaje en el tramo final de algunas ramblas, infiltración hacia los acuíferos inferiores a través de los sondeos, y por infiltraciones entre acuíferos a través de comunicaciones naturales geológicas como Cabezo Gordo, y contactos entre capas.

La cuantificación de las extracciones por bombeo es una de las mayores incertidumbres que siguen existiendo sobre esta zona, ya que no se dispone de evaluaciones recientes completas que permitan cuantificar este dato fundamental para el desarrollo de este y otros estudios sobre Campo de Cartagena. Recientemente se han publicado algunos datos de extra. El inventario de puntos de agua del IGME en la zona cuenta con unos 2,000 pozos, pero los datos no están actualizados y proceden de fechas muy diversas. Por otro lado, algunas informaciones periodísticas han indicado la existencia de un número muy superior (2,000 a 2,300 pozos, más otros 1,000 pozos de menor profundidad provenientes de desaladoras privadas del Cuaternario), pero tales datos no han sido contrastados ni tienen validez a los efectos técnico-científicos. Tampoco se ha podido disponer del inventario detallado de pozos inscritos en el registro y catálogo del organismo de cuenca, al ser esta una información compleja en su tratamiento por la diversidad de datos existentes y la verificación en campo de los mismos.

Teniendo en cuenta la escasa información disponible sobre la cuantificación de las extracciones de agua subterránea mediante bombeo en la zona de Campo de Cartagena, y la incertidumbre respecto de la evolución espacio-temporal de esta explotación de recursos subterráneos, se ha diseñado una metodología para el mapeado del bombeo al objeto de su introducción en el modelo de flujo, basada en la simplificación espacial del entorno de modelado. Resulta evidente, que la actualización en campo del inventario de captaciones y análisis de la explotación por bombeo, es una ardua y costosa tarea técnica que excede a esta investigación.

Para el presente estudio se ha dispuesto de información sobre una cantidad inicial de 2,102 pozos (según inventario del IGME), de los cuales, una vez revisados y filtrados los datos obtenidos, se ha generado un listado inicial para el

modelado de 650 pozos georeferenciados para la zona de Campo de Cartagena, con datos sobre sus características como profundidad, caudal aforado, profundidad de bomba y otros menos significativos, con un caudal extractivo inicial de 112.43 hm³/año. Es importante señalar, que existen problemas de ubicación real de los puntos del inventario del IGME, al estar algunos puntos con coordenadas UTM en sistema ED50 y otros en ERTS89.

3.8.1. Simplificación de la distribución espacial de la explotación por bombeo.

Con respecto a la información geo-referenciada obtenida de los puntos de extracción, se ha dividido la zona de actuación en cuadrículas de 2,50 x 2,50 km, (en el modelo de flujo las celdas son de 500x500 m. lo que genera cuadrículas de bombeo de 25 celdas) en las que se han agrupado los volúmenes de bombeo de las captaciones ubicadas en su interior y se ha reasignado al centro de la celda central de cada cuadrícula. El procedimiento para ubicar geográficamente los pozos de bombeo dentro del modelo se ha realizado en tres fases (Tabla 8).

En la primera fase, se han revisado la totalidad de los pozos y se han ubicado según sus coordenadas UTM, donde se observa como una cierta cantidad quedaban fuera de la zona objeto de estudio en el modelo. Este hecho ha promovido la eliminación estos pozos externos, dejando solamente los que quedaban dentro del ámbito del modelo, reduciendo así su cantidad a 594 pozos.

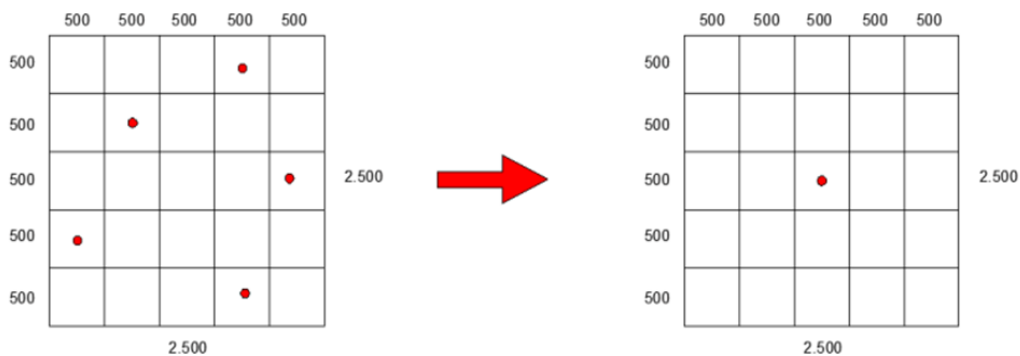
En una segunda fase se han estudiado y seleccionado los 594 pozos restantes, asignando a cada uno de ellos un tramo acuífero del modelo según la profundidad del sondeo y de la bomba. Para este caso se ha asignado al tramo Cuaternario los sondeos realizados con una profundidad igual o inferior a 50 metros, para el tramo Plioceno con un profundidad entre 50 y 150 m, y para el tramo Messiniense con una profundidad mayor de 150 metros. Con posterioridad se han ajustado los tramos de rejilla de cada sondeo a la zona asignada anteriormente.

En tercera fase, debido a la gran cantidad de pozos introducidos en el modelo y a la dificultad que eso genera a la hora de manejar los datos estadísticos y temporales de las funciones de explotación de cada pozo, se ha procedido a realizar una simplificación del mapa de bombeo mediante la generación de una nueva rejilla de 2,500x2,500 m.

Tabla 8. Pozos para extracciones mediante bombeo en la zona de Campo de Cartagena.

| Tramo Acuífero | Fase 1 (geo-referencia) | Fase 2 (sin agrupar) | Fase 3 (Agrupados) |
|----------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Cuaternario | 242 | 202 | 96 |
| Plioceno | 142 | 133 | 64 |
| Messiniense | 266 | 259 | 82 |
| Σ | 650 | 594 | 242 |

De esta forma, se agrupan los pozos que quedan dentro de cada nueva celda en un único pozo con valor sumatorio de los pozos contenidos en la celda y ubicado en el centro geográfico de la misma (Fig. 19).

**Fig. 19.** Simplificación realizada en el mapa de pozos de bombeo con celdas de 2,500x2,500 m. para el modelo de flujo.

Esta simplificación se realizará únicamente cuando en una nueva celda de 2,500x2,500 m, existan más de un pozo de bombeo. Cuando exista únicamente un pozo, se dejará en la ubicación exacta que tenga dentro de la nueva celda, para que la simplificación tenga la menor distorsión posible sobre el modelo. En la figura 20, puede observarse la transformación del mapa inicial de pozos de la capa Cuaternaria según su ubicación real geo-referenciada (Fase 2), y su simplificación en la nueva distribución espacial de celdas (Fase 3).

Esta misma operación se ha realizado para los pozos de la capa de edad Plioceno con su ubicación espacial original, y como queda después de la simplificación en las nuevas celdas según la figura 21. Se puede comprobar como en las celdas que tenían inicialmente más de un pozo de bombeo en la fase 2, quedan simplificadas con un único pozo ubicado en el centro de la cuadrícula de 2,500x2,500 m. En el caso de que coincida en una nueva celda únicamente un pozo de bombeo, se dejará en su lugar original, con el fin de preservar en lo posible ubicaciones no modificadas.

En la confección de la nueva retícula y para una mejor comprensión y definición de los nuevos pozos, se ha numerado cada fila y cada columna como pueda observarse en el figura 21, de forma que la nueva denominación del pozo reubicado llevará en primer lugar el número de fila en la que se encuentra y después el número de columna. De esta manera, a la hora de manejar la información de los pozos o de trabajar con ellos en el modelo, tendremos una ubicación aproximada del lugar donde se encuentre el nuevo pozo.

Con posterioridad se colocará dos letras que definirán el tramo acuífero de donde bombea el agua. A modo de ejemplo, el pozo denominado 6-20Qt, será el pozo que agrupa a los pozos contenidos en la celda de la fila 6 y de la columna 20 para la capa Cuaternaria, y el 8-14Ms, será para la fila 8 y columna 14 para la capa Messiniense.

Todos los pozos de cada tramo, en la simplificación quedan dentro del área o superficie definida por los límites del acuífero sombreado en color amarillo, en este caso el tramo Messiniense (Fig. 22). En el inventario de pozos manejado, existen algunos que tienen profundidades mayores a los 250 m cercanos al borde exterior del estrato Messiniense, lo que evidencia que en esa zona concreta se tiene un borde ligeramente mayor al grafiado para el Messiniense, o que el estrato Plioceno tiene espesores elevados. Se ha optado por agregar esos pozos al estrato Messiniense por ser la opción más plausible. El valor del caudal de extracción de estos nuevos pozos de bombeo, será la sumatoria de los caudales de los pozos contenidos en la mencionada celda para cada capa acuífera.

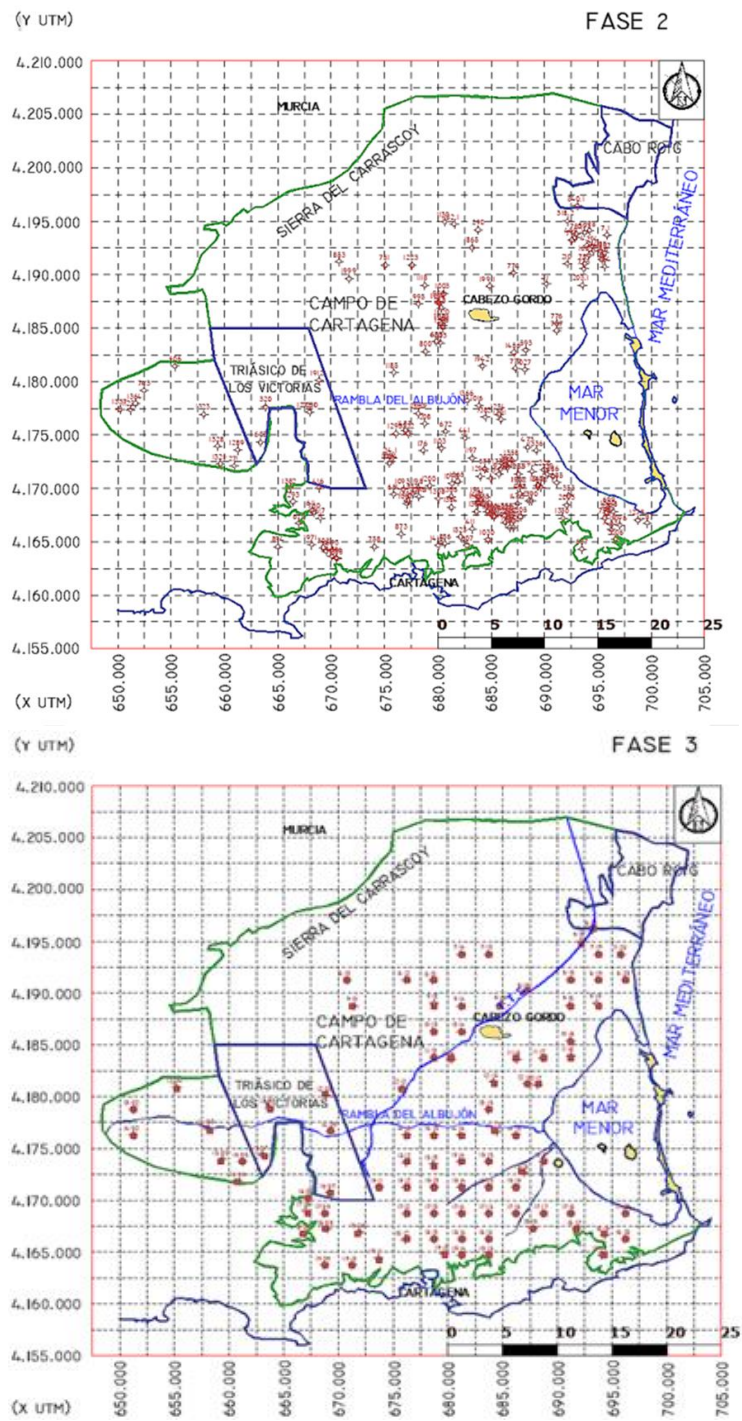


Fig. 20. Vista completa del mapa de bombeo del tramo Cuaternario antes de la simplificación (Fase2) y después de la simplificación en celdas de 2,500x2,500 m (Fase 3).

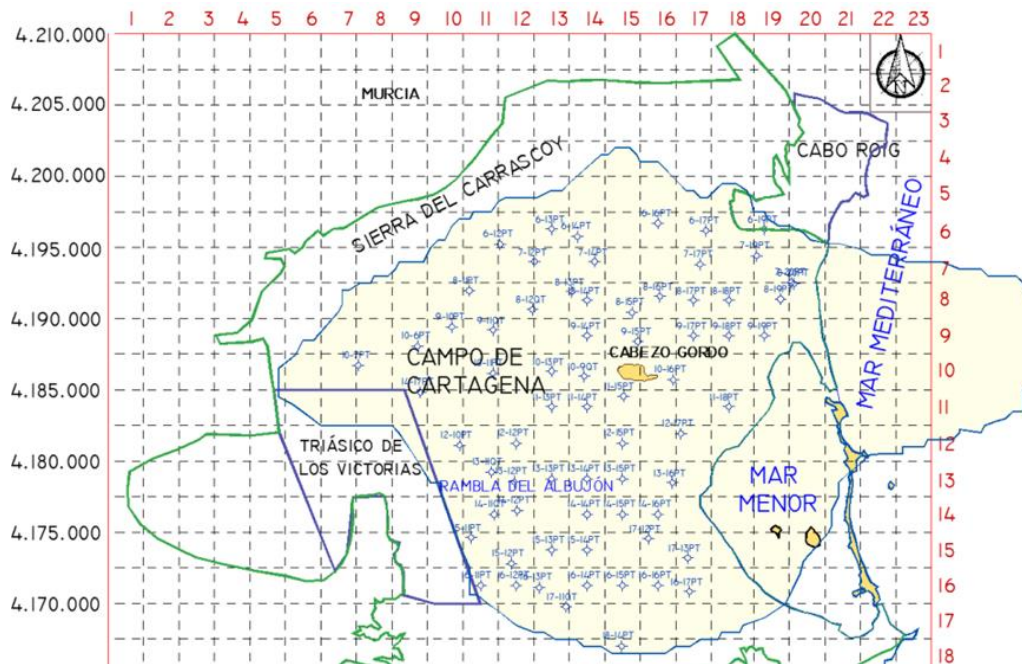


Fig. 21 Vista parcial del mapa de bombeo después de la simplificación en celdas de 2,500x2,500 m, donde se observa la numeración de filas y columnas de la nueva retícula.

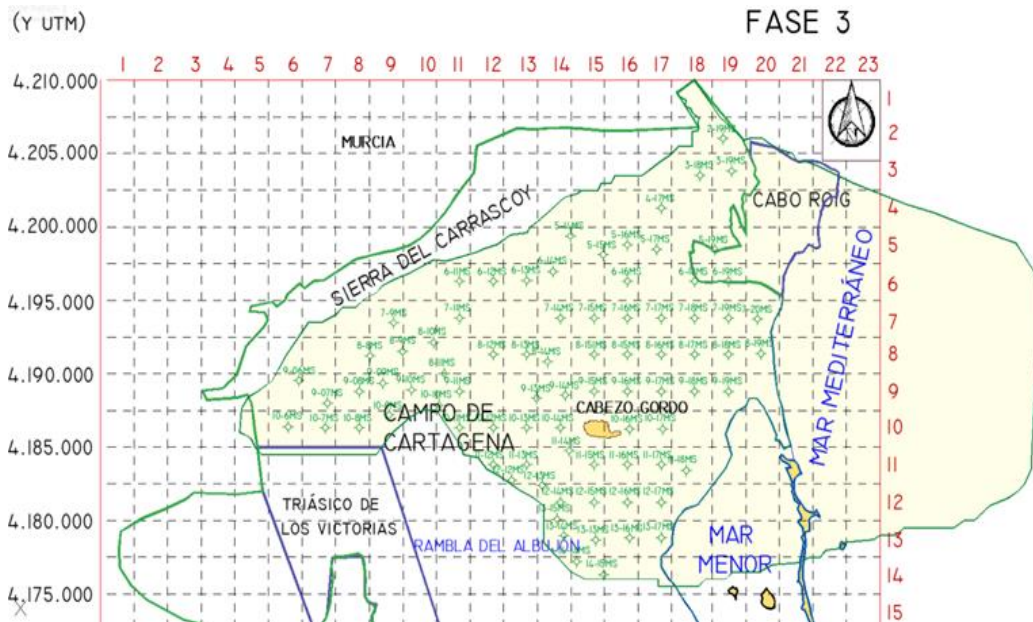


Fig. 22. Mapa de bombeo del tramo Messiniense antes de la simplificación (Fase2) y después de la simplificación en celdas de 2,500x2,500 m (Fase 3).

3.8.2. Reconstrucción temporal de la explotación por bombeo.

Al no disponer de información precisa de la piezometría entre el inicio temporal del estudio en 1925 y el inicio de toma de datos en la década de los años 70, se complica enormemente la introducción de los datos extractivos a lo largo del periodo objeto de estudio. En consecuencia, para la generación de la explotación temporal se ha tenido en cuenta varios parámetros objetivos de los cuales sí se dispone de información en determinados tramos temporales.

En la generación de la explotación por bombeo histórico realizada, se ha considerado la evolución de la recarga por retornos de riego (Fig. 18), la evolución de la superficie de riego en Campo de Cartagena (Fig. 23), la evolución de la demanda bruta teórica de agua para riego y de las entradas históricas de agua procedentes del Trasvase Tajo-Segura a través de datos procedentes de CHS y de CRCC (Fig. 24). Asimismo, se han considerado las dotaciones para regadío establecidas para Campo de Cartagena por la C.H.S. y el IGME, y dotaciones reales para algunas UDAs con datos de la CRCC (Fig. 25).

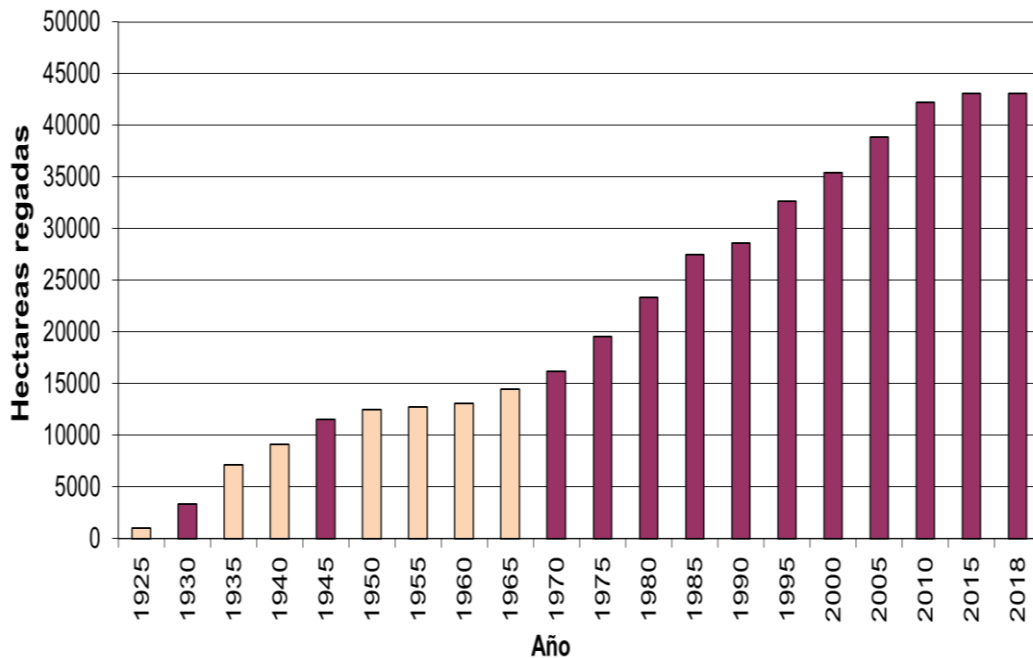


Fig. 23. Evolución de la superficie neta regada de Campo de Cartagena para el periodo 1925-2018. Las columnas naranjas son datos extrapolados del resto de datos obtenidos en las columnas rojas.

Con esta información proveniente principalmente de los PHCS (1998, 2007, 2014, 2016) de la Confederación Hidrográfica del Segura, de estudios del IGME (1975, 1989, 1991, 1994), de datos estadísticos de la CRCC y otros datos históricos contenidos en diversas fuentes (Peñuelas, 1851; Mesa, 1909; Dupuy de Lome et al., 1917; Marín, 1925; Guardiola, 1927; Rubio, 1928; Román 1996, Montoya, 2007), se ha conseguido confeccionar un histórico de consumos anuales de aguas subterráneas (Fig. 26).

Las aguas subterráneas de esta zona son generalmente de peor calidad que las aguas superficiales provenientes del TTS debido a su alta salinidad, excepto las aguas del tramo confinado del Tortoniense que se usan para abastecer de agua potable a algunos núcleos de población. En este caso, la peor calidad no va ligada a los costes de extracción, pues muchas veces es más cara el agua subterránea que el agua superficial. El uso de ambas aguas se hace combinadamente por los usuarios regantes, ejerciendo mayor presión cuando la dotación de aguas provenientes del TTS decrece en épocas de sequía, como puede observarse en la gráfica evolutiva de la figura 24.

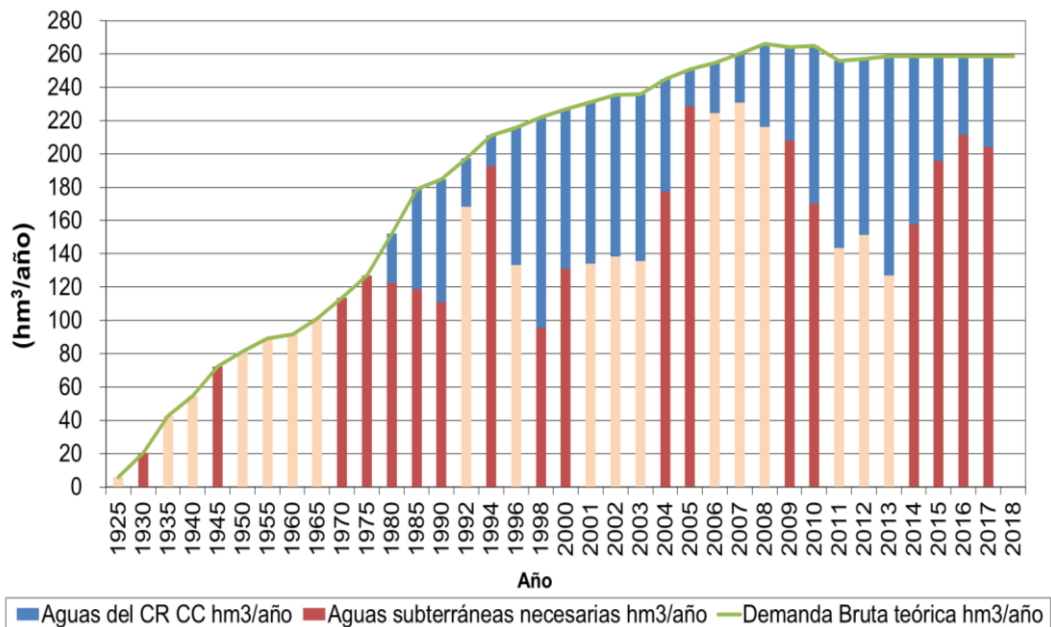


Fig. 24. Evolución histórica de la demanda bruta teórica de riego de Campo de Cartagena 1925-2018. En azul, las aguas superficiales. En rojo, las aguas subterráneas necesarias para satisfacer la demanda. Las columnas naranjas están basadas en datos interpolados.

Las aguas subterráneas necesarias teóricas de la figura 24, son volúmenes obtenidos como consecuencia de la diferencia de la demanda bruta teórica, menos las aguas superficiales de la CRCC. En la figura anterior, se observa claramente varios momentos temporales donde hubo intervalos de sequía como en 1995 o 2005 y en los últimos años. Según el estudio hidrogeológico de la cuenca baja del Segura, del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas de 1976, a la demanda bruta teórica habrá que introducirle un coeficiente corrector para tener en cuenta la eficiencia del riego (PIAS, 1975), que en el caso de las demanda anteriores a 1985, quedan incrementadas hasta un 30 %, y a partir de 1990, con los avances tecnológicos en eficiencia, se van rebajando paulatinamente, como puede apreciarse en la figura 25.

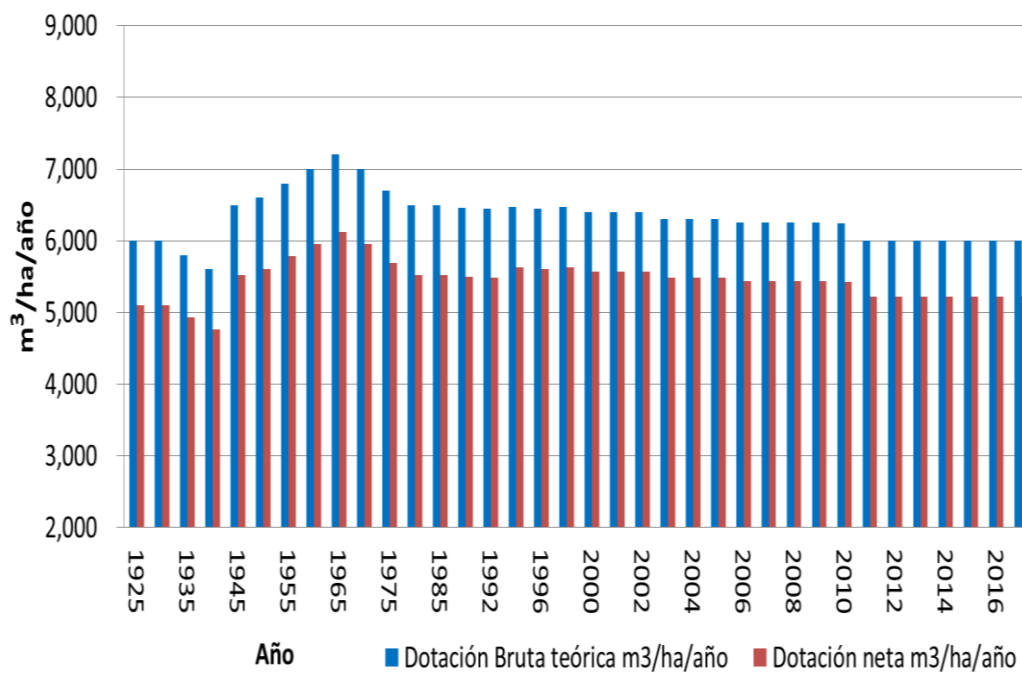


Fig. 25. Evolución histórica de la dotación bruta y neta de agua de riego en Campo de Cartagena 1925-2018.

Para la confección de las evoluciones históricas de dotaciones satisfechas y extracciones anuales, se han dispuesto de datos obtenidos de varias fuentes oficiales, y para el resto de periodos de tiempo, ha sido necesario interpolar para

generar una línea continua temporal. Al no disponer de todos los datos reales de los consumos de los puntos extractivos existentes (en torno a los 2,0 00 pozos), se ha llegado a los valores extractivos necesarios para satisfacer la demanda de la figura 26, a través de los consumos de aguas superficiales del TTS, de demandas netas y brutas de aguas de riego, de la evolución de las superficies de riego en el tiempo, de la evolución de los sistemas de perforación para discernir cuando se empezó a extraer agua del acuífero Plioceno, y cuando del Messiniense y Tortoniense.

En definitiva, de cualquier dato real e histórico que pueda aportar información para generar puntos temporales, todo ello asociado a la incertidumbre intrínseca generada, y desde los cuales, intentar conseguir la evolución anual de volúmenes resultantes de la manera más fiable posible.

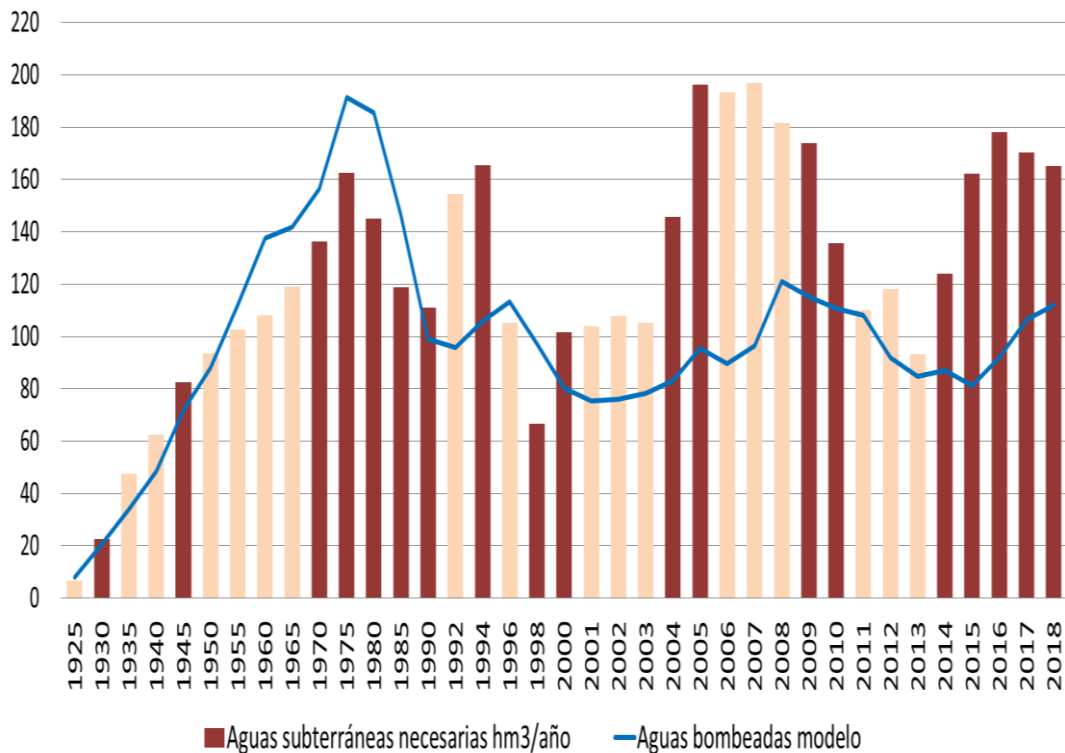


Fig. 26. Evolución histórica de las extracciones teóricas necesarias para satisfacer la demanda de aguas subterráneas en Campo de Cartagena 1925-2018. Las columnas naranjas están basadas en datos interpolados. La línea azul es la explotación por bombeo generada en el modelo de flujo.

Los pasos de la metodología empleada se pueden resumir en:

Paso 1.- Evolución de la superficie de riego.

Paso 2.- Evolución de la demanda bruta de agua para riego.

Paso 3.- Evolución del consumo de agua trasvasada TTS.

Paso 4.- Comprobación en algunos puntos temporales si la demanda teórica de agua se corresponde con el consumo de agua.

Paso 5.- Comprobación de grado de eficiencia en el riego para corrección de demanda neta a bruta.

Paso 6.- Corrección de la demanda bruta con pasos 4 y 5 (demanda reducida).

Paso 7.- Interpolación de valores en algunas zonas.

Paso 8.- Resultados de los volúmenes históricos de aguas subterráneas necesarios para satisfacer la demanda, deduciendo el consumo total del agua aportada superficialmente.

Una vez llegado a este punto, hay que discernir que parte del consumo anual de aguas subterráneas es del acuífero libre Cuaternario y que parte es de los confinados Plioceno, Messiniense y Tortoniense, así como, si la demanda bruta fue o no satisfecha en su totalidad o parcialmente.

Para ello, se tomó un punto de referencia basado en el Estudio Hidrogeológico de la Cuenca Baja del Segura. Informe Técnico nº 8. El Campo de Cartagena. 1972/75. Publicado por el IGME en 1976, donde se establece un valor de extracción de aguas subterránea cifrado en 116 hm³/año. Según otros trabajos sobre los inicios de las perforaciones en esa zona de finales del siglo XIX y principios del siglo XX, se establecen criterios para estimar de manera aproximada cuando se inician las extracciones de cada tramo acuífero.

Así, para el año 1976, se establecen unos porcentajes iniciales de: Cuaternario 15 %, Plioceno 20 % Messiniense 63 % y Tortoniense 3 %. El Ratio establecido para este año será 1,00.

Para establecer la demanda real satisfecha y los volúmenes extraídos del sistema acuífero de Campo de Cartagena se ha establecido un axioma sobre el

porcentaje medio de demanda satisfecha. Este porcentaje medio de demanda satisfecha se establece en el 85 %.

Paso 9.- Se realiza cuadro temporal sobre los porcentajes de agua que se extrae de cada tramo acuífero en cada año objeto de estudio.

Paso 10.- Establecimiento de un ratio anual para el bombeo en ese año, tomando como base 1.00, los 116 hm³/año del año 1976.

Paso 11.- Realización del regimen de explotación para el periodo de estudio de todos los pozos de bombeo que se implementarán en el modelo de flujo.

Para la realización de esta parte del estudio sobre la explotación por bombeo, se han empleado un número aproximado de 200,000 datos.

Existen estudios realizados por organismos como el IGME (1991), donde se incluyen datos de explotación por bombeo de 21 hm³/año. Otros posteriores como el realizado por la CHS en su Plan Hidrológico de Cuenca para el periodo 2015-2021 incluyen volúmenes extractivos en torno a los 89 hm³/año, o el realizado por Jiménez-Martínez et al. (2016), donde manejan valores extractivos de 104 hm³/año incluyendo los bombeos del Triásico de los Victorias, que al estar en torno a 10 hm³/año sus extracciones (CHS, 2016), quedaría un resultante de 94 hm³/año. En la figura 27 se puede observar la evolución temporal de los bombeos teóricos introducidos en el modelo antes de calibrar para cada tramo acuífero, y como estos aumentan gradualmente como conjunto hasta la puesta en marcha del TTS.

La extracción en el Cuaternario aumenta hasta los años 50, donde las nuevas tecnologías permiten mayores profundidades y empiezan a bombearse del Plioceno y Messiniense principalmente, decreciendo el bombeo de la capa Cuaternaria, excepto en varios periodos de sequía posteriores.

Las aguas subterráneas de esta capa Cuaternaria son generalmente de peor calidad que las aguas superficiales o las provenientes del TTS y, en este caso, la peor calidad no va ligada a los costes de extracción, pues muchas veces es más cara el agua subterránea que el agua superficial, ya que dependen de factores y variables que pueden elevar el coste considerablemente.

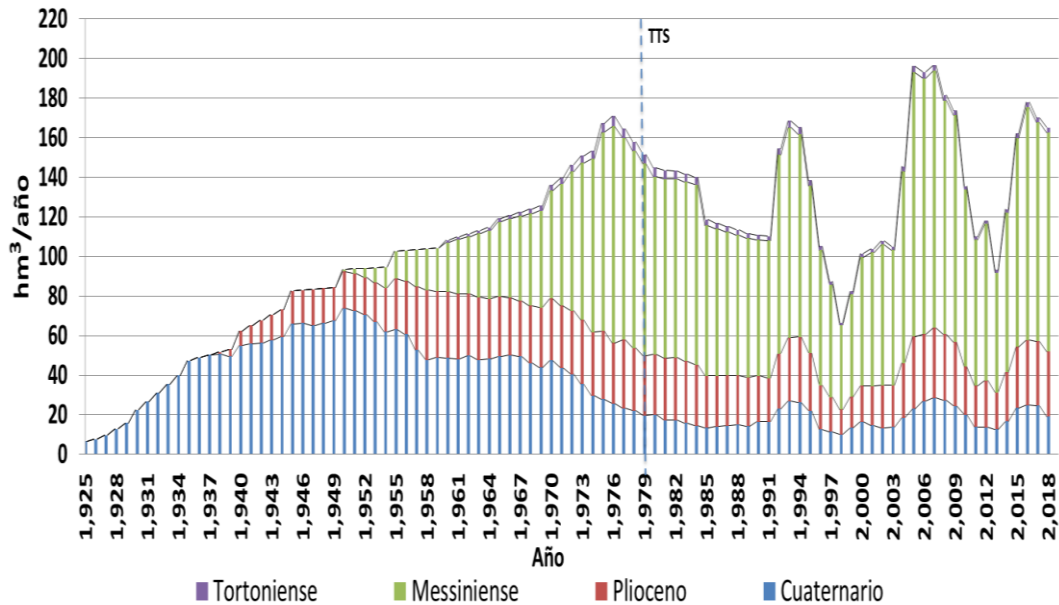


Fig. 27. Evolución temporal teórica de las extracciones necesarias e introducidas en el modelo de Campo de Cartagena, con las cantidades a extraer de cada tramo acuífero. La línea azul de trazos, indica el momento de la puesta en marcha del TTS.

El uso de ambas aguas se hace combinadamente por los usuarios regantes, ejerciendo mayor presión cuando la dotación de aguas provenientes del TTS decrece en épocas de sequía, como puede observarse en la figura 27. Existe un consumo creciente y continuado hasta la puesta en marcha del Trasvase Tajo-Segura en el año 1979, donde se produce un descenso acusado hasta las sequías de 1995, 2005 y 2015-16, donde se producen picos producidos por las bajas aportaciones de aguas procedentes del TTS.

Existe una relación directa entre la explotación por bombeo, con sus máximos y mínimos a lo largo del periodo de estudio, y las variaciones piezométricas observadas en los puntos de control, como puede apreciarse en la figura 28. Son coincidentes los descensos en los niveles piezométricos, con los aumentos en las extracciones de aguas subterráneas, sobre todo en la cuenca de San Javier.

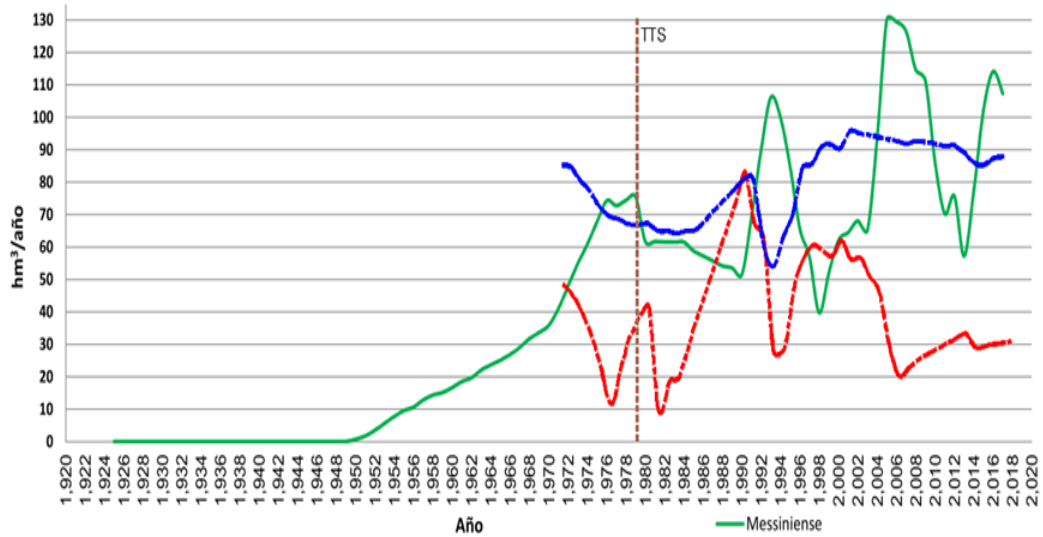


Fig. 28. Evolución temporal de las extracciones en el tramo acuífero del Messiniense, en color verde. En color rojo se muestra la evolución piezométrica del sondeo de control 283810020 en la zona de San Javier. En color azul el sondeo de control 283750074 en Pilar de la Horadada.

IV - MATERIAL Y METODOLOGÍA

CAPITULO IV.- MATERIAL Y MÉTODO.-

4.1. CONSIDERACIONES GENERALES.

Una herramienta comúnmente utilizada en la investigación hidrogeológica son los modelos de flujo de agua subterránea, que proporcionan un modelado adecuado de la mayoría de los problemas hidrogeológicos encontrados en situaciones reales. Por lo tanto, el modelado numérico se ha convertido en un método importante y válido en la investigación de aguas subterráneas (Khadri y Pande, 2016). El método aplicado a la resolución del modelo se basa en un código numérico que resuelve la ecuación del flujo subterráneo a través de diferencias finitas 3D. También discretiza el entorno de modelado en bloques (Calvache y Pulido-Bosch, 1996) siendo de libre acceso y de gran difusión, con múltiples ejemplos de uso (Bear et al., 2010; Candela et al., 2014), lo que le otorga un alto grado de aceptación para la investigación científica en el agua subterránea cuando existen escasez de datos. Para los casos de estudios con escasez de datos e incertidumbre en sus fuentes, el programa Visual Modflow con motor Modflow 2005 ha resultado ser una herramienta adecuada contrastada en otros estudios similares, que permite la simulación de comportamiento bajo un régimen constante y transitorio. (Ebrahimi et al., 2016).

El modelo preliminar realizado en el año 2009 por el Instituto EuroMediterráneo del Agua y el IGME (Senent-Alonso et al., 2009), modeliza el acuífero cuaternario sin profundizar en el estudio de las capas inferiores y realiza una primera aproximación al cálculo de los flujos entre la masa de agua de la masa de agua subterránea 070.052 y sus posibles transferencias al Mar Menor, Mar Mediterráneo y a otros acuíferos.

Este modelo se realizó como inicio y avance preliminar para futuras investigaciones, para un régimen permanente y para el acuífero libre superior de edad Cuaternaria, en el cual, se establecían varias incertidumbres que aún persisten en desigual medida y que se centraban en tres aspectos básicos:

- El estudio de la recarga.
- La red foronómica en los cauces y drenajes.
- El cálculo de la explotación por bombeo.

Con posterioridad Jiménez et al. (2012), desarrolla un nuevo modelo que permite conocer con mayor exactitud los espesores y geometría de las diversas capas de estratos acuíferos y acuitardos existentes en la zona del Campo de Cartagena, generando una serie de secciones transversales en varias direcciones según la figura 29 que permiten visionar en alzado la geometría modelizada.

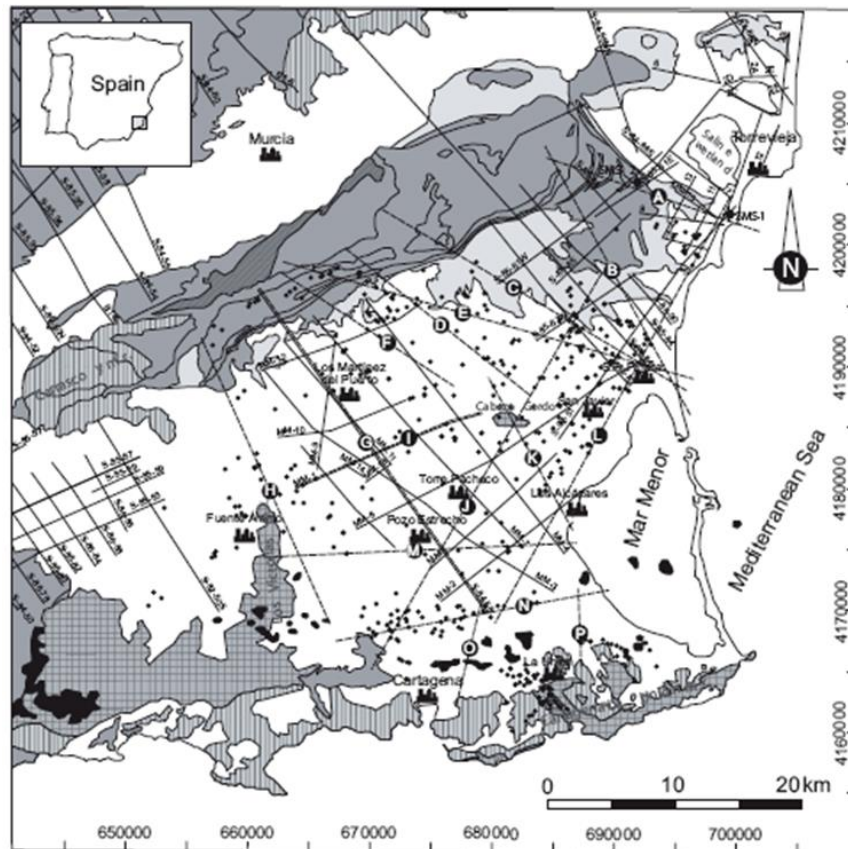


Fig. 29. Localización de los cortes hidrogeológicos en Jiménez-Martínez et al. (2012).

Asimismo, limitan espacialmente la superficie de cada tramo acuífero conteniendo el Cuaternario, Plioceno, Andaluciense y Tortoniense, hasta el basamento impermeable inferior. En definitiva, mejora la geometría existente de la zona incluyendo las capas permeables e impermeables aportando mayor y

mejor información sobre la misma, pero no resuelve las incertidumbres existentes comentadas anteriormente y donde sería muy interesante profundizar.

Otros estudios como Baudron et al. (2011), profundizan sobre la reinterpretación de datos históricos de diferente índole para reconstruir la evolución reciente del sistema hídrico, en particular sobre la recarga de acuíferos y la descarga submarina del acuífero al Mar Menor teniendo en consideración únicamente al acuífero cuaternario.

También Baudron et al. (2013), mediante la recopilación de datos bibliográficos, pudo reconstituir parcialmente la evolución de sistema de acuífero multicapa, donde se evidenció la inversión del gradiente hidráulico en los tres primeros acuíferos (Cuaternario, Plioceno y Messiniense) desde la década de 1920 hasta finales de la década de 1970 cuando se pone en marcha el Trasvase Tajo-Segura, hecho este de especial relevancia que inició la recuperación de niveles en todas las capas. No se tiene constancia de modelos numéricos similares que hayan incluido todas las capas como el realizado en el presente trabajo.

Por todo ello, existe un especial interés científico en el desarrollo de un modelo numérico multicapa fuese capaz de simular el fenómeno de inversión hidráulica generada por la explotación intensiva de los acuíferos del Campo de Cartagena desde el inicio de la antropización del medio que se estima sobre la década de 1920-30, hasta nuestros días.

Para poder calibrar y generar adecuadamente cualquier modelo numérico de aguas subterráneas, es preciso tener una estimación precisa de la recarga, ya que resulta esencial para la gestión sostenible de los escasos recursos hídricos de la zona, así como, para evaluar con éxito la vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación por agroquímicos según el estudio realizado por Jiménez-Martínez et al. (2010), donde desarrolla un estudio sobre las recargas generadas por retornos de riegos y discretiza diferentes recargas por retornos a los acuíferos, dependiendo del tipo de cultivo de la zona y de la cantidad de agua que necesita para su desarrollo.

No se han podido conseguir todos los datos suficientes para el periodo temporal estudiado, para las evoluciones piezométricas existentes y sobre todo, para las extracciones realizadas de los tramos acuíferos, por lo que se han

definido criterios de convergencia e iteración, estimando por interpolación algunos datos fundamentados en la información disponible sobre los volúmenes totales extraídos, y en la zonificación de cultivos en diversas áreas de las unidades de demanda agrícola que forman el Campo de Cartagena.

Se ha considerado como inicio del periodo de tiempo objeto de estudio, el momento donde la masa de agua no tenía una explotación intensiva o esta empezaba a tener cierta importancia con la mejora de la técnica en perforaciones, para poder observar así su evolución a lo largo del tiempo en estado estacionario y transitorio. El año de inicio se ha establecido en 1925 y el final del estudio en el año 2017, aunque se han dispuesto de algunos datos de CHS sobre piezometrías hasta el año 2018.

4.2. MODELIZACIÓN DE ACUÍFEROS MEDIANTE MODFLOW.

4.2.1. Objetivos del modelo y limitaciones.

El modelo de flujo de aguas subterráneas desarrollado en el presente trabajo, pretende representar mediante ecuaciones matemáticas basadas en elementos finitos y usando herramientas de computación informatizada, el comportamiento de un acuífero sometido a las acciones que normalmente pueda tener. Por ello, con un modelo adecuado y calibrado, se pueden predecir futuros y antiguos comportamientos del acuífero a partir de las variables que nos permitan simular estados del mismo y su variación temporal.

El método elegido para la resolución del modelo realizado ha sido el basado en el código numérico desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos MODFLOW 2005 (McDonald y Harbaugh, 1998) de libre acceso y de enorme difusión a nivel mundial, usado múltiples estudios hidrogeológicos como por ejemplo, en el programa de desarrollos hidrodinámicos para acuíferos desarrollado por el Doctor en Hidrología por la Universidad de Arizona USA, Dr. Adolfo Chávez Rodríguez (Chávez et al., 2006), o la modelación de acuíferos realizada por la Universidad Nacional de Colombia mediante Visual Modflow realizado por el profesor Hernán Rojas Palacios (Rojas et al., 2004), o la modelización de acuíferos en las provincias de Málaga y Granada realizado por la Universidad de Granada (Calvache y Pulido-Bosch, 1996), o Panagopoulos (2012),

Candela et al. (2014), o Khadri y Pande (2016), lo que le confiere un alto grado de aceptación a nivel mundial para las investigaciones científicas en aguas subterráneas.

Este código en el que se basa ModFlow, resuelve las ecuaciones del flujo de aguas subterráneas por el método de diferencias finitas en donde, el sistema continuo descrito por la ecuación resolutoria del flujo es sustituido por un conjunto finito de puntos discretos en el espacio y tiempo y las derivadas parciales son sustituidas por valores calculados a partir de las diferencias finitas en los valores de carga en esos puntos. Es un programa potente y eficaz, lo que ha sido aval para su empleo, pero contiene alguna limitación, como se irá desarrollando a lo largo del presente capítulo.

Así se puede concretar, que el modelo tendrá como objetivo principal la aportación de información hidrogeológica sobre el acuífero en distintos posibles estados o simulaciones, que nos aporten información sobre los niveles piezométricos existentes y durante el periodo de estudio, así como, la información sobre los balances hídricos del acuífero correspondiente a los flujos de entrada y salida del mismo.

El modelo realizado intenta ser una réplica lo más fidedigna posible del acuífero multicapa, pero inevitablemente, esa exactitud dependerá del grado de fiabilidad que tengan los datos que se introduzcan en el modelo, por lo que la complejidad del sistema, la posible heterogeneidad del mismo y la escasez de información fiable, hace a veces que las calibraciones que se realicen tenga un mayor o menor grado de aproximación dependiendo de porcentaje de exactitud de los mismos. Hay que recordar que el modelo es una simplificación de la realidad del acuífero, por lo que de cuanta mayor y mejor información dispongamos, mayor grado de aproximación a la realidad tendremos en el modelo, y mejor servirá para la consecución de los objetivos perseguidos en cualquier modelización de aguas subterráneas.

Debido a ciertas limitaciones del código Modflow original, como la incapacidad para evaluar los mecanismos de transporte de contaminantes o de interfaz del Modflow original (Model Muse, USGS) y de aspectos de visualizaciones de las zonas objeto de estudio como la visión tridimensional 3D, se ha empleado para el desarrollo de la presente tesis de investigación una variante del ModFlow denominada Visual Modflow 2010, (Schlumberger Water

Services. Canadá), por su mayor versatilidad y facilidad de manejo de la interfaz bajo sistema Windows. Durante el desarrollo del trabajo, el secado de celdas que producen los fuertes gradientes ha provocado que se hayan tenido que realizar ajustes porque el programa no reconoce los valores de las celdas secas, aunque se dispone de la función rewetting que minimiza las celdas secas en la ejecución del modelo, pero que no siempre genera resultados favorables.

Este nuevo software, no es más que una interfaz más cómoda de trabajo con el motor de cálculo original Modflow 2005, sin las limitaciones comentadas anteriormente (Fig. 30).

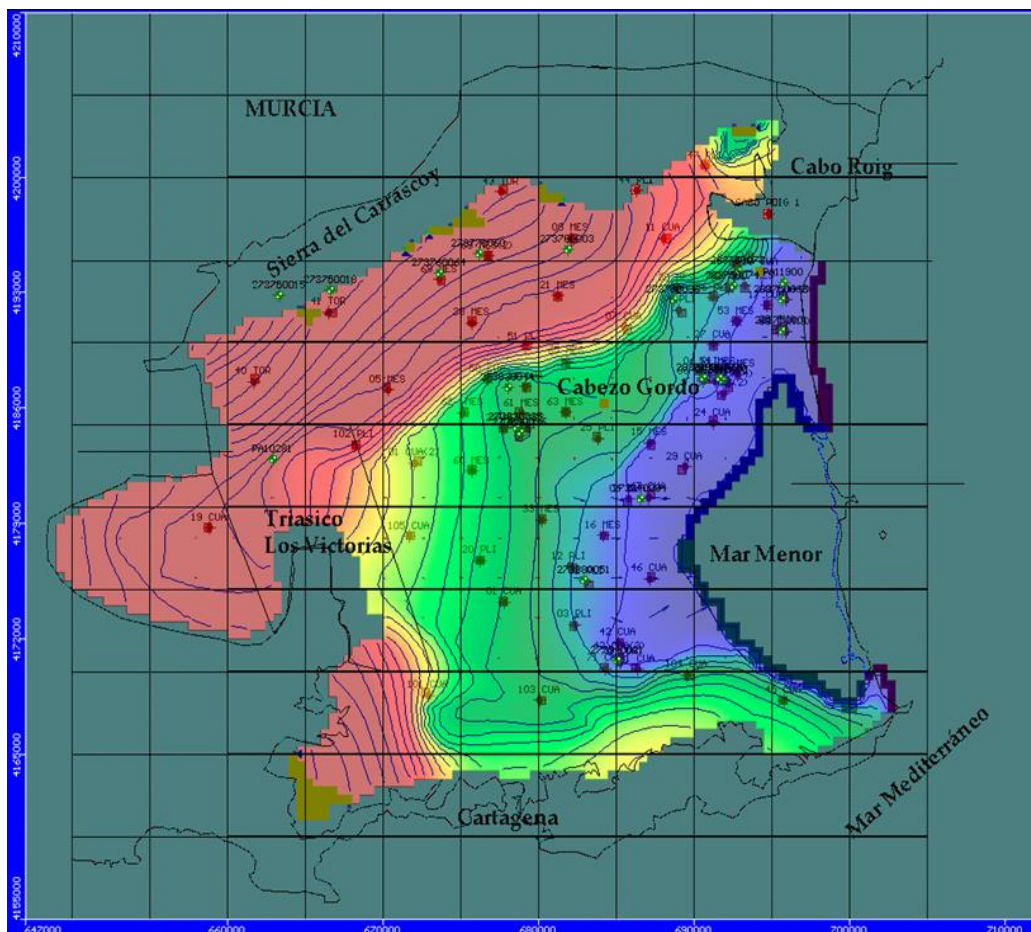


Fig. 30. Aspecto de la interfaz del Visual Modflow 2010. Plano de carga hidráulica con líneas equipotenciales cada 25 m, y sombreados equipotenciales en colores (DEM), con ubicación de los sondeos piezométricos y pozos de bombeo para extracción de agua.

Visual Modflow es un entorno de modelado tridimensional para aplicaciones prácticas de aguas subterráneas del flujo y transporte de contaminantes como se puede observar en la figura 30, que realiza simulaciones con el motor de Modflow 2005 original del USGS.

4.2.2. Ecuación general del flujo subterráneo.

El movimiento del agua subterránea a través de materiales porosos de densidad constante, puede describirse tridimensionalmente mediante la ecuación general de flujo de agua subterránea basada en la ley de Darcy:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) + W(x,y,z) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

(Ecuación 3)

Esta ecuación también se puede representarla como:

$$\nabla(K\nabla h) + W(x,y,z) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

(Ecuación 4)

Donde ∇ simboliza los gradientes en las tres direcciones del espacio, y K_{xx} , K_{yy} , y K_{zz} , son valores de conductividad hidráulica a lo largo de los ejes de coordenadas X , Y , y Z , lo que se supone que son paralelos a los ejes principales de conductividad hidráulica (L/T), h es la carga potenciométrica (L), W es un flujo volumétrico por unidad de volumen que representan las fuentes o sumideros de agua, con $W < 0$ para salidas de flujo del sistema de aguas subterráneas, y $W > 0$ para entradas de flujo en el sistema (T^{-1}), S_s es el almacenamiento específico del material poroso (L^{-1}), y t es el tiempo (T).

En general, S_s , K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} pueden ser funciones del espacio ($S_s = S_s(x, y, z)$, $K_{xx} = K_{xx}(x, y, z)$, y así sucesivamente) y W puede ser una función del tiempo y el espacio ($W = W(x,y,z,t)$). En la figura 31 se puede observar un mallado tridimensional del modelo de flujo multicapa.

La ecuación diferencial 3, tiene solución sujeta a las condiciones límites de Dirichlet, donde se conoce el valor de la variable h , como la carga hidráulica

inicial, lo que supone que $h_i(x,y,z,t) = h_i(x,y,z,0)$ será determinada por el nivel piezométrico del acuífero (Anderson & Woessner, 1992). Existen otros límites donde se tienen valores constantes de carga hidráulica, y en estos puntos se conoce con certeza los valores del flujo del agua, es decir, que ∂n es constante (Condición de Newman).

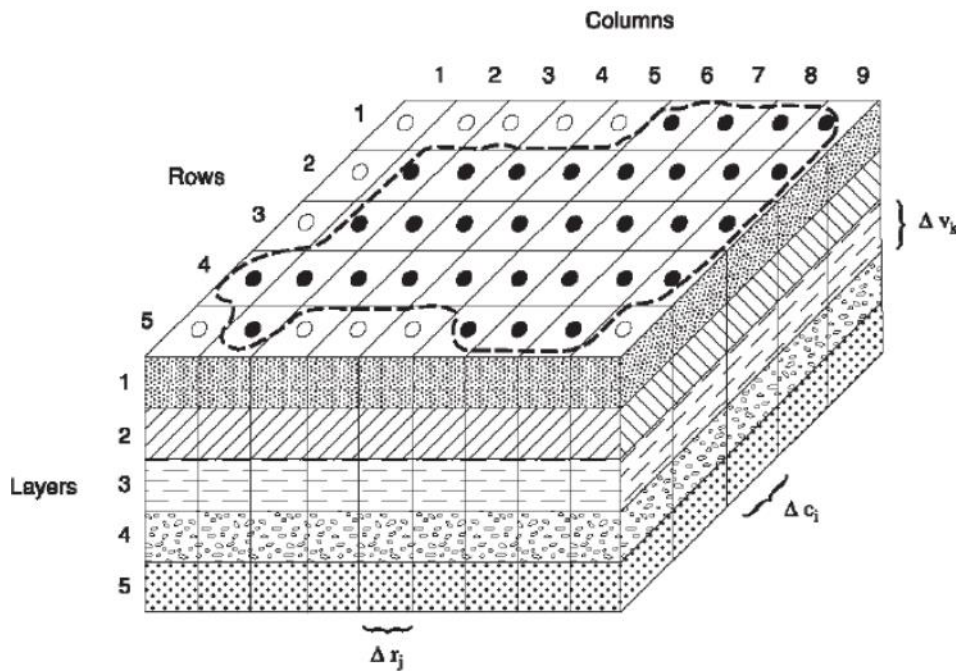


Fig. 31. Vista tridimensional del mallado del modelo de flujo (McDonald y Harbaugh, 1998).

Por ello, la ecuación 3 describe el flujo de aguas subterráneas bajo ciertas condiciones en un medio heterogéneo y anisotrópico, y proporciona una alineación para los ejes principales de conductividad hidráulica y las direcciones de las coordenadas. La ecuación 3, junto con la carga hidráulica en los límites de un sistema acuífero y la especificación las condiciones iniciales de esa carga, constituyen la representación matemática de un sistema de flujo de aguas subterráneas. Pero solamente en sistemas muy simples, las soluciones analíticas de la ecuación diferencial 3 son pocas veces viables, por ello, los métodos de variables numéricas deben ser empleados para obtener soluciones aproximadas a la misma.

Una de las alternativas para su solución es el método de diferencias finitas, en donde el sistema descrito por la ecuación diferencial 3 se sustituye por un conjunto finito de puntos discretizados en el espacio y tiempo, y mediante derivación se consiguen valores en los puntos calculados a partir de las diferencias finitas de los valores de carga en cada punto, siendo h (la carga), en la función a derivar de la mencionada ecuación. Con este método de diferencias finitas, un medio continuo tridimensional como un acuífero, se discretiza o dividimos en elementos finitos, o sea, con dimensión real y concreta (las celdas) ya sea en planta como en alzado, con lo que en realidad se hacen cubos de dimensión conocida cuando trabajamos en 3D.

Entonces mediante la ecuación diferencial 3, donde se tiene derivadas parciales en las tres direcciones X, Y, Z , y conductividades hidráulicas en las tres direcciones principales que son las K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} , h es la carga en esa celda y W son las entradas y salidas por unidad de volumen, en nuestro caso la celda o cubo, todo ello es igual al S_s , almacenamiento específico de esa celda en el tiempo.

Por ello, con la ecuación general del flujo subterráneo de Darcy que maneja Modflow, se consigue saber cuál es el flujo de agua que se mueve a través de la celda en la dirección X, Y y Z , y cómo varía este en el periodo de tiempo objeto de estudio. También se ha de saber cuál es la cantidad de agua W , que entra o sale de la celda (recargas o extracciones) en la misma cantidad de tiempo objeto de estudio, y que la suma de los términos de este lado de la ecuación son iguales al almacenamiento específico de esa celda durante ese periodo de tiempo de estudio. El almacenamiento específico de la celda, S_s inicial, es el agua que tiene almacenada antes del inicio del periodo objeto de estudio, o sea, al comienzo del mismo, y S_s final será como queda la celda al final del periodo de estudio en relación con el inicio, o sea, si tiene más o menos agua que al inicio.

Este proceso conduce a sistemas de ecuaciones diferenciales simultáneas de álgebra lineal, y su solución produce valores de carga en puntos y tiempos específicos. Estos valores, constituyen una aproximación a la distribución de carga que varía con el tiempo y dará por una solución analítica a la ecuación diferencial parcial del flujo.

4.2.3. Procedimiento básico.

Para la realización de un modelo numérico de aguas subterráneas mediante la herramienta del código Modflow vs. 2005, e interfaz Visual Modflow 2010 empleada en esta tesis doctoral, se seguirán una serie de pasos que servirán para el modelado de cualquier acuífero.

Los modelos necesitan una serie de datos de entrada (inputs) para poder generar los cálculos de flujo, calibración y validación del modelo, y aportarán otra serie de datos de salida (outputs) que serán los resultados, mediante gráficos y balances de masas de aguas del entorno a estudiar. Para las entradas, primero es necesario realizar una definición del contorno con la importación de la geometría de las distintas capas a modelizar y con los espesores de cada una de ellas, para seguidamente proseguir con la generación de la rejilla y discretización del mismo.

Una vez se dispone del entorno discretizado se procede a definición de las zonas activas, que será donde se realizarán los cálculos de flujos, y desactivando las zonas no activas que no tienen interés dentro del área de estudio. También se establecerán las propiedades hidrogeológicas de cada capa, como piezometrías, las condiciones de contorno, coeficientes de almacenamiento, porosidad, la recarga y el periodo de tiempo para el cual se realizarán los cálculos de flujo.

4.2.4. Discretización horizontal y vertical del entorno.

En la realización de la modelización matemática de acuíferos con Modflow se manejan dos tipos de discretización espacial: Una en el plano horizontal con ejes X e Y, mediante el número de filas y columnas, y otra discretización espacial o 3D, en el sentido vertical o eje Z, mediante el número de capas que se utilizarán en el modelo y generando las elevaciones superiores (techo) e inferiores (muro base) de cada celda en cada capa.

La discretización horizontal se hace mediante la división de la zona de estudio en filas y columnas, generando una rejilla de este espacio de trabajo con los límites del acuífero. Esta rejilla empleada en el modelo se puede refinar en las proximidades de las zonas donde se necesite más precisión, y se hace más grosera o con dimensiones mayores, en regiones alejadas de la zona de interés. El tamaño de las celdas queda así definido celda a celda.

Con respecto a la discretización vertical se suele tener dos puntos de vista. Uno primero en el que se observa la extensión de la discretización real del proceso, con cierta arbitrariedad, y donde se divide el entorno modelizado en fragmentos de diversas dimensiones verticales para conseguir una resolución adecuada para el objetivo propuesto. Este primer punto de vista coincide generalmente con la realización de la superposición tridimensional del sistema hidrogeológico, y con una cierta correspondencia grosera entre las capas hidrogeológicas a introducir el modelo. En definitiva, en este primer caso, la malla tridimensional en sentido vertical no queda ajustada a la variabilidad de materiales y espesores de cada capa.

Existe otra segunda forma para introducir la representación de zonas acuíferas o zonas permeables por capas individuales dentro modelo. En esta segunda manera, los espesores de capa se consideran variables simulando los espesores variables de las capas hidrogeológicas del terreno. Esto conduce a un efecto de mallado vertical deformado que se ajusta más a la realidad de las capas, como podemos observar en la figura 32.

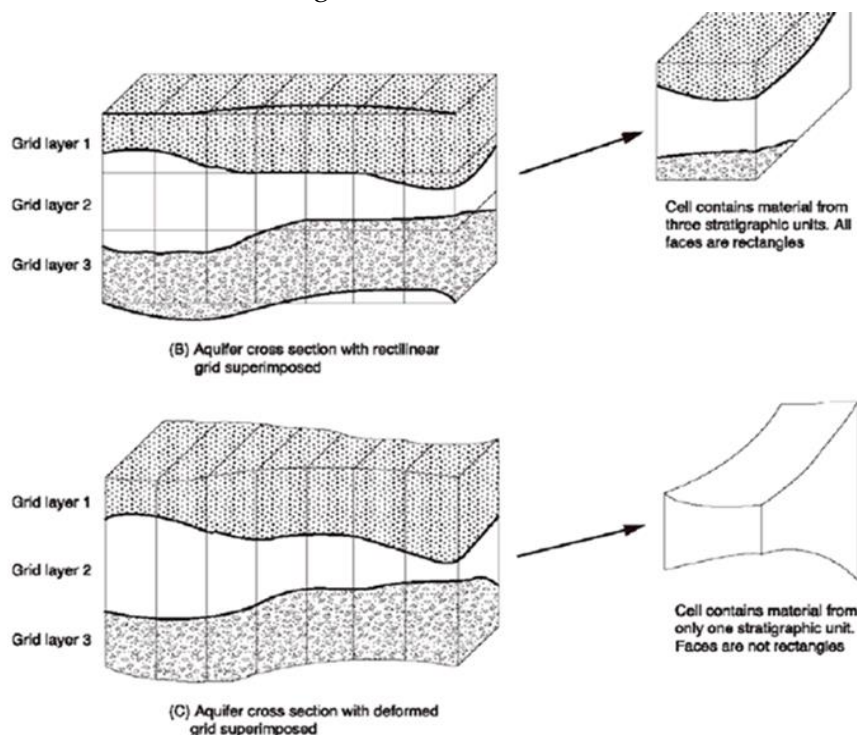


Fig. 32. Esquemas de discretización vertical. b) Esquema con superposición rectilínea. c) Esquema con superposición deformada (McDonald y Harbaugh, 1998).

Cada uno de estos dos métodos de discretización vertical tiene sus ventajas e inconvenientes. Las ecuaciones que gobiernan el modelo desarrollado, están basadas en una uniformidad de propiedades hidráulicas uniformes, con una unidad básica de medida que es la celda, o por lo menos, que esas propiedades de cada celda sean un promedio significativos. Estas condiciones serán más fácilmente conseguibles cuando utilizamos el modelo de la superposición deformada de espesores variables. A su vez, también se conseguirá mayor precisión cuando las capas del modelo se discretizan con intervalos donde la pérdida de carga vertical es pequeña. Esto suele conseguirse más fácilmente con una configuración de celdas que contengan material de una sola unidad estratigráfica, donde los materiales suelen ser más homogéneos con caras irregulares como en la figura 32.c. En la opción de la figura 32.b se observa una celda con tres tipos de materiales distintos, lo que complica el cálculo con pérdida de precisión.

Como contrapartida, la malla deformada propuesta en la figura 32.c, que será la que se emplee en la presente tesis, no se ajustará a los supuestos estrictos en los que se basan las ecuaciones del modelo desarrollado; ya que las celdas no tienen caras paralelepípedas y los ejes principales de la conductividad hidráulica no están alineados con los ejes de la rejilla del modelo. Esto provoca ciertos errores en las salidas de datos y resultados que hay que asumir.

Por todo ello, en la práctica muchos de los esquemas de discretización vertical que se realizan actualmente, suelen ser resultado de la combinación de los dos puntos de vista o métodos de discretización comentados anteriormente. Para ello, donde los bordes de la capa a discretizar se ajustan aproximadamente a los de la masa de agua subterránea, parece sensato utilizar una sola capa rectangular y no parece necesario tener que recurrir el método de rejilla variable, si no es para requerir mayor exactitud de resultados. Las diferencias entre estos enfoques se presentan en el desarrollo de las conductancias, en las formulaciones de las condiciones de almacenamiento y, en general, en el número de ecuaciones que resuelve cada uno y la exactitud de los resultados.

4.2.5. Tipos de celdas y condiciones de contorno.

En el modelo propuesto no habrá que formular una ecuación diferencial para cada celda, porque la información de ciertas celdas se introduce inicialmente

para simular ciertas condiciones de borde para el problema que se plantea. Por ello, para modelizar un acuífero mediante MODFLOW, hay que dividir la zona a estudiar en celdas que se utilizarán para simular las condiciones de contorno o borde de la zona, y se agruparán en tres categorías: Celdas de carga constante "constant head", celdas de carga variable "variable head" y celdas sin flujo o secas "no-flow".

Las celdas de carga constante son aquellas en las que la carga hidráulica se especifica para cada periodo de tiempo y esta no varía con la aplicación de la resolución de las ecuaciones de flujo. Las celdas secas son aquellas en las que no se produce flujo de entrada o salida, o está por debajo de ciertos valores establecidos en el modelo. El resto de celdas de la zona objeto de estudio las denominaremos celdas de carga variable, y se caracterizan por las cargas no especificadas que pueden variar con el tiempo, que son la mayoría.

Se emplearán celdas de carga constante para los límites hidrológicos que conformen el mallado del modelo de la zona objeto de estudio, cuando estén en contacto con masas de agua superficial como pueden ser los mares en acuíferos costeros. Normalmente, los acuíferos tienen forma irregular, mientras que los mallados generados por el modelo serán de forma rectangular en su contorno. En las zonas donde el acuífero coincide con el borde o límite exterior del mallado no será necesario una designación especial de celda para indicar que en esa zona no existe flujo debido a que Modflow no computará flujo a través de los bordes exteriores del mallado incluyendo la zona techo y la zona inferior o suelo de la misma. Dentro de la cuadrícula, se han utilizado celdas inactivas para eliminar la parte de la malla que queda fuera del límite del acuífero. También se han utilizado celdas de carga constante a lo largo de una sección de borde, donde el acuífero está en contacto directo con los principales elementos de aguas superficiales como Mar Menor y Mar Mediterráneo.

4.2.6. Cálculo de resultados mediante método iterativo.

Para el cálculo de los resultados, MODFLOW utiliza métodos basados en interacciones que obtienen secuencialmente soluciones para el sistema de ecuaciones diferenciales de diferencias finitas, para cada intervalo de tiempo predefinido inicialmente. Con este método iterativo, se calculan los valores de

carga hidráulica para el final del periodo de tiempo asignado, que inicialmente son establecidos con valores de la carga estimados para cada nodo al final del periodo estudiado.

Posteriormente, se inicia un nuevo procedimiento de cálculo alterando estos valores de carga que se estimaron inicialmente y que producen un nuevo conjunto de valores, que estarán más cercanos a la solución exacta según el sistema de ecuaciones planteado. Estos nuevos valores de carga hidráulica tomarán entonces el lugar de las cargas inicialmente establecidas, y repitiendo así el procedimiento de cálculo, se producirá un nuevo conjunto de valores. Este procedimiento se repetirá sucesivamente para cada etapa, y generará un nuevo grupo de valores de cargas hidráulicas que se ajustarán mejor al sistema de ecuaciones. Cada repetición de este cálculo se denomina una "iteración". Por ello, en el proceso de aproximación de las cargas hidráulicas a los valores que satisfagan al sistema de ecuaciones planteado, los cambios que se producen para solucionar el sistema de ecuaciones terminan siendo mínimos. Habrá entonces que establecer un valor mínimo que determine cuándo debe finalizar la iteración de cálculo.

En general, en una sucesión de iteraciones se debe especificar cuando queremos que se deje de iteracionar, que normalmente será cuando las cargas calculadas están convenientemente cercanas a la solución exacta. Esto es debido a que la solución real y exacta suele ser desconocida, pero se puede utilizar un método indirecto para especificar cuándo debe parar las iteraciones. Un método válido será cuando se concretan los cambios en el cálculo de cargas que ocurren de una iteración al nivel siguiente, y se establece que deberán ser menores que una cierta cantidad, que será denominada criterio de cierre, y será especificado para el cálculo previsto.

Después de cada iteración, los valores calculados de las cargas computadas en esa iteración, se examinarán para todos los nodos del mallado del área activa de trabajo. Será el valor mayor de estos valores absolutos de carga, el que se comparará con el criterio de cierre. Cuando este valor mayor supera el criterio de cierre establecido, la iteración continuará; si este valor es menor que el criterio de cierre, la iteración se dice que converge y parará el proceso para ese periodo del tiempo. Es recomendable, usar un valor de cierre en un orden de magnitud menor que el nivel de precisión que se quiera establecer para los resultados a obtener.

MODFLOW incorpora en su cálculo, el establecimiento de un número máximo de iteraciones para el periodo del tiempo objeto de estudio. Cuando no se cierra el cálculo dentro de este número máximo de iteraciones, entonces se concluye el proceso iterativo con un mensaje de advertencia.

Los métodos iterativos han sido discutidos por varios autores como Peaceman (1977), o Crichlow (1977), sobre la base matemática de estos métodos.

Un procedimiento iterativo produce solamente una aproximación a la solución del sistema de ecuaciones planteado, y la precisión de esta aproximación dependerá de varios factores, incluyendo el criterio de cierre que se emplea. En los cálculos realizados en la presente tesis, se han obtenido soluciones “exactas” que han convergido o cerrado para las ecuaciones de diferencias finitas empleadas. Pero estas soluciones “exactas”, serían sólo una aproximación a la solución de la ecuación diferencial del flujo (Ecuación 1).

4.2.7. Cálculo de balances por zonas.

El cálculo del balance general volumétrico se lleva a cabo en dos partes: Un primer cálculo del balance individual de cada entrada y un segundo cálculo del balance de la suma de todas las entradas. Estos cálculos se hacen para cada periodo de tiempo y para cada capa generada en la geometría inicial. Las entradas que corresponden a las componentes individuales del flujo se calculan en los paquetes hidrológicos y quedan almacenadas en el sistema. MODFLOW genera además un resumen de todas las entradas y salidas de agua de los límites de zona modelada para cada capa, y también genera un balance de entradas y salidas de las zonas de transferencia en que se haya dividido cada capa (Zone Budget), que nos permitirá observar los movimientos internos de flujo de una zona a otra o también, como el balance hídrico independiente por zonas de transferencia. Estos serán datos de salida del cálculo de flujo realizado por Modflow como balance hídrico de agua del modelo.

También debe existir continuidad para el total de flujos que entran y salen del modelo, es decir, la diferencia entre las entradas totales y las salidas totales, debe ser igual al total del cambio de almacenamiento hídrico del sistema. En el programa de modelado, se calcula el balance hídrico de agua independientemente

de la solución procesada de la ecuación empleada y en este sentido, pueden proporcionar evidencia independiente de una solución válida.

4.3. REALIZACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL.

En la realización de modelos numéricos complejos a nivel regional, es necesario realizar simplificaciones de la zona a modelar y también realizar ciertas suposiciones (Gebreyohanes et al., 2017). Esta simplificación de la realidad se ha introducido en el modelo de la siguiente manera: Aunque los tramos del modelo están formados por rocas en las que existe heterogeneidad intrínseca con fracturas y fallas, y se han tomado estos tramos como medio poroso de densidad constante donde la conductividad hidráulica es anisotrópica respecto a la dirección vertical y horizontal, y heterogénea según el tipo de material para aplicar la ley de Darcy para aguas subterráneas. Existe una ligera incertidumbre sobre alguna zona del límite del dominio y su coincidencia con el límite exacto de la cuenca subterránea, por lo que se decidió delimitar esa región del modelo con un límite de flujo nulo.

El modelo conceptual realizado recogerá todos estos aspectos relacionados de una manera hidrogeológica. En la construcción del modelo conceptual es necesario identificar los límites del dominio y las secciones del acuífero a modelizar. En los modelos de flujo se deberá incluir información sobre la geología e hidrogeología de la zona objeto de estudio, registros de pozos, bombes, piezometría, parametrización con datos hidrogeológicos y geometría de los tramos (Mohamed et al., 2016). Además para este trabajo, se han requerido y manejado unos 200,000 datos sobre las extracciones mediante la explotación por bombeo y la recarga por precipitaciones y retornos de riego, considerando una especial afección hidráulica e hidrogeológica sobre el conjunto al macizo de Cabezo Gordo, con comunicación vertical y lateral con los tramos acuíferos que componen el Campo de Cartagena.

Una vez diseñado el modelo conceptual, se ha generado un modelo de flujo de agua subterránea a escala regional usando Visual ModFlow con motor Modflow-2005, como se puede observar en la figura 33, como metodología apropiada y validada en múltiples trabajos en todo el mundo (Yao et al., 2015).

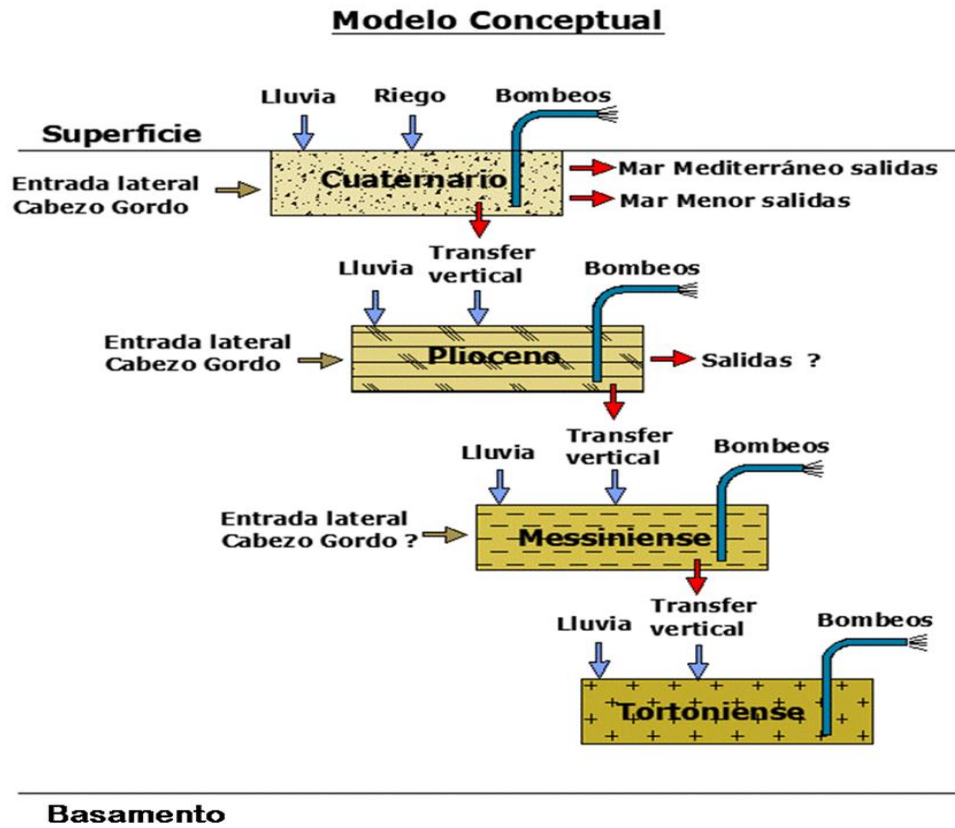


Fig. 33. Esquema del modelo conceptual.

Una vez diseñado el modelo conceptual, se ha generado un modelo de flujo de agua subterránea a escala regional usando Visual ModFlow con motor Modflow-2005, como metodología apropiada y validada en múltiples trabajos en todo el mundo (Yao et al., 2015).

4.3.1. Límites del sistema.

La zona denominada Campo de Cartagena ocupa una extensión de aproximadamente 1,240 km², y se caracteriza por ser una amplia llanura con pequeña inclinación hacia el Sudeste rodeada en gran parte de su contorno por elevaciones montañosas. Por el Norte se encuentra el Acuífero de Cabo Roig que se une al noroeste con una alineación montañosa en la sierra de Carrascoy (1,065m). Al Este se encuentra Laguna del Mar Menor y un brazo de tierra

denominado La Manga del Mar Menor, colindante con el Mar Mediterráneo, y al Sur está la Sierra de Cartagena – La Unión.

4.3.2. Dimensiones y rejilla de trabajo.

La rejilla de trabajo tiene una superficie de 4.015 km² con 73 km en la dirección X y 55 km en la dirección Y. Las coordenadas en sistema UTM son X (647,000 , 720,000) ; Y (4,155,000 , 4,210,000). La zona objeto de estudio que se realizó para el presente trabajo, es menor que la rejilla de trabajo generada, formada por nueve capas o unidades de espesor variable representadas en unidades localizadas del área de estudio (Fig. 34).

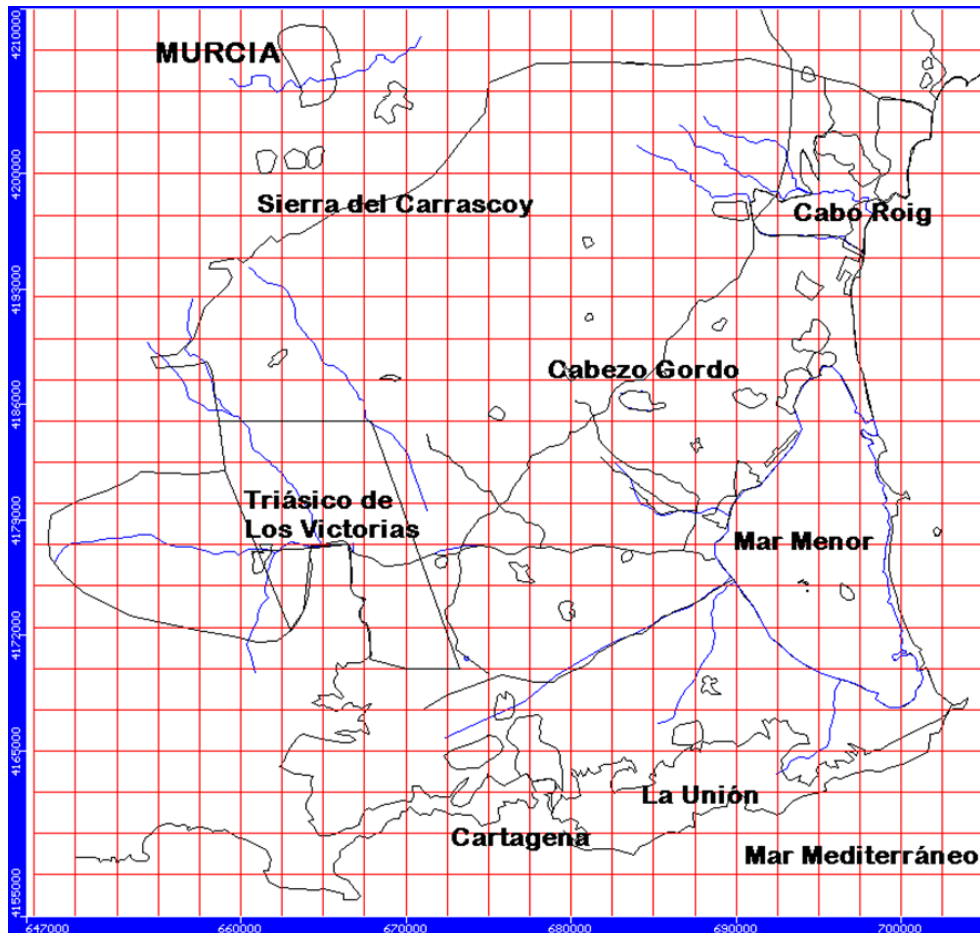


Fig. 34. Vista de la rejilla de trabajo el modelo numérico bajo la interfaz de Visual Modflow.

Para la discretización realizada se ha creado una malla o rejilla de matriz (110x146), lo que genera 16.060 celdas para cada una de las 9 capas con las que se ha trabajado, lo que arroja un total de celdas incluidas en el modelo de 144,540 unidades de espesor variable, lo que ha provocado haber tenido que refinar algunos espesores que inicialmente en el modelo daban errores.

En un primer paso se creó una rejilla básica de 5,000 x 5,000 metros. Con posterioridad, para conseguir una mayor definición del modelo, sobre todo en la zona costera, se redujo en una segunda fase la rejilla a celdas de 500 x 500 metros, con un espesor variable en función de la capa o tramo del acuífero multicapa de la que se trate.

4.3.3. Mecanismos de recarga y descarga.

La recarga se produce principalmente por precipitación de lluvia y por retornos de riego, que dependerá de la superficie de afloramiento de cada capa por donde pueda infiltrarse la lluvia, y de la posible recarga mediante la entrada de agua desde acuíferos superiores y laterales. Se han introducido los datos de recarga de manera homogénea en mm/año para todo el modelo, y se ha dividido por zonas coincidentes sensiblemente según las UDAs expuestas con anterioridad, considerando además el tipo de cultivo predominante que se tenga en la zona objeto de estudio.

Las descargas laterales del tramo superior del modelo, están definidas al Mar Mediterráneo y al Mar Menor que actúan como receptores, así como, los otros tipos de descargas laterales y a otros acuíferos inferiores principalmente. Estos caudales se han sometido a un proceso de ajuste que permitió expresarlos en caudales homogéneos, generalmente $\text{hm}^3/\text{año}$, considerando los períodos de cálculo para cada uno de ellos.

4.3.4. Condiciones de contorno.

La zona incluida en el modelo está acotada al Oeste por la Sierra del Carrascoy y al Sur por la Sierra de Cartagena. Al Norte tenemos la zona de Cabo Roig y al Este tenemos el Mar Menor y Mar Mediterráneo. La zona Este del acuífero en contacto con estos mares, será tomada como condición de frontera de

Carga Constante a nivel 0 (Constant Head). El resto de límites de la zona de estudio son zonas de bordes, y como tales, no es necesario definirlos con condiciones de frontera. Además, coincidirán con zonas de celdas inactivas.

Otra condición de contorno que se suele introducir en este tipo de modelos, será la inclusión de drenajes superficiales que recojan la relación entre los cauces superficiales de las ramblas más importantes existentes, como la Rambla del Albuñón, y los acuíferos. Esta condición de contorno se establecerá mediante los parámetros corriente (Stream) y drenaje (Drain).

Debido a que el estudio se realiza en una zona semi-árida del Sur-Este de España, donde los cauces superficiales y las ramblas están secos prácticamente todo el año, estas dos condiciones no se tendrán en cuenta en el modelo realizado.

4.3.5. Patrones de variabilidad espacial.

Las capas se consideraron individualmente como medios isotrópicos para los ejes X e Y. Para el eje Z en sentido vertical, los valores tomados son un orden de magnitud menor.

4.3.6. Patrones de variabilidad temporal.

Según la evaluación de los datos de niveles piezométricos obtenidos desde 1973 hasta nuestros días, se cuenta inicialmente con registros suficientes para poder determinar un comportamiento del sistema subterráneo en régimen permanente o estacionario, con un sentido de flujo en dirección Oeste - Este.

Pero desde que se tiene información documentada del inicio de las extracciones de agua de los acuíferos, a través de revistas mineras y de geología principalmente sobre la década de 1920, hasta el inicio de datos obtenidos de fuentes oficiales sobre 1973, no se dispone de información suficiente y datos fiables para poder encajar unas líneas temporales de los niveles piezométricos que se tenían en esa época. Existen documentos gráficos al inicio del siglo XX y entre las décadas de 1910 y 1920, sobre la existencia de pozos de agua con surgencia natural y pozos artesianos. Este es un primer enigma o cuestión a resolver en el presente estudio o tesis, que será objeto de modelización para poder completar

una evolución temporal sobre las variaciones de niveles piezométricos en el sistema acuífero a lo largo del último siglo.

Además de lo comentado anteriormente sobre la piezometría, también se tienen indicios documentados que durante ese periodo de tiempo se produce una inversión en el gradiente hidráulico, sobre todo en los niveles piezométricos de los acuíferos confinados del Plioceno y Messiniense, pero aún se mantiene cierto desconocimiento sobre cómo afectaron a este cambio piezométrico las extracciones (bombeos) que fueron incrementándose paulatinamente durante décadas con el desarrollo industrial y agrícola en los campos de regadío en el Campo de Cartagena. En esta tesis, uno de sus principales objetivos es precisamente esclarecer la evolución y cuantificación de los bombeos durante el periodo de estudio, y cómo esto afectó a la inversión del gradiente hidráulico de los acuíferos confinado (Fig. 35).

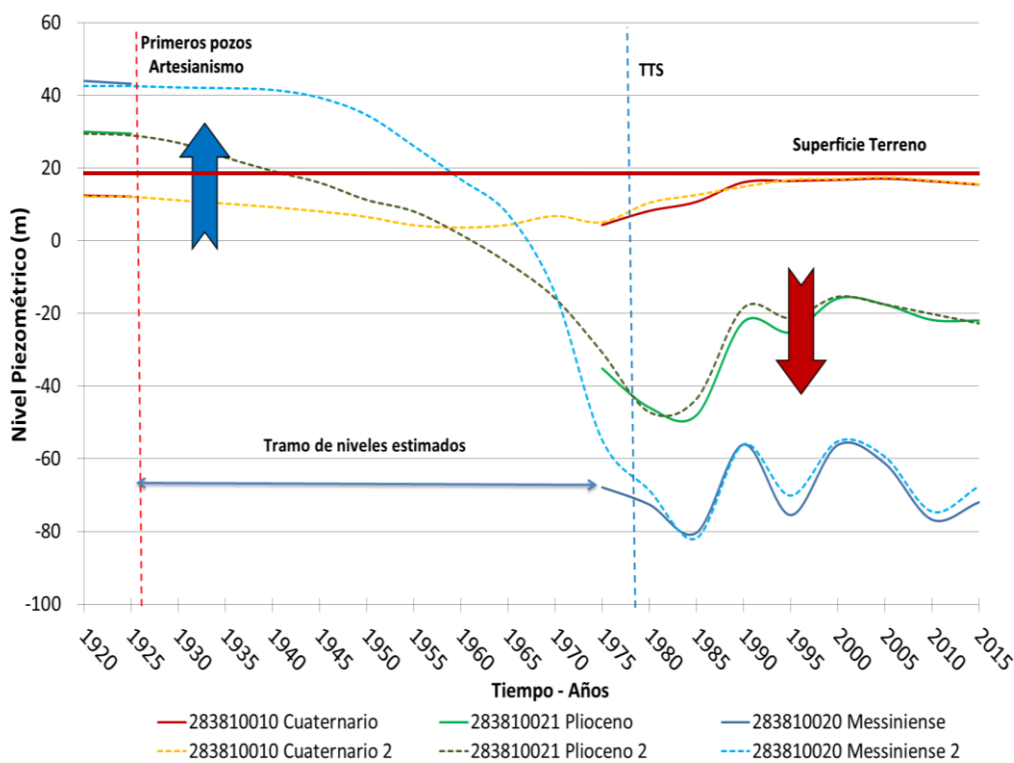


Fig. 35. Evolución histórica de los niveles piezométricos de los acuíferos Cuaternario (Azul), Plioceno (verde) y Messiniense (Rojo), e inversión de gradiente hidráulico en tres puntos de control piezométrico de la zona de San Javier.

También a su vez, cómo en el acuífero libre superior la recuperación de niveles piezométricos ha evolucionado por un camino distinto a lo sucedido en los tramos inferiores confinados, con una recuperación clara y constante.

A partir de la entrada en funcionamiento del trasvase Tajo-Segura en 1979, los niveles piezométricos de todos los tramos acuíferos se empiezan a recuperar como se refleja en la figura 30, incluso con niveles superiores en la actualidad a los que se estiman para el inicio del tramo temporal objeto de estudio al inicio de siglo, como ocurre para la capa Cuaternaria, aunque con posterioridad los tramos confinados tienen variaciones más significativas que incluso decrecen para algunos tramos temporales.

4.4. DISEÑO DEL MODELO NUMÉRICO

4.4.1. Diseño del modelo tridimensional.

Para la realización del modelo de flujo diseñado como herramienta fundamental para la realización de esta tesis, basado en el motor de cálculo Modflow vs. 2005 y con una interfaz de usuario basada en Visual Modflow 2010, ha sido preciso la ejecución de una serie de etapas que se presentan a continuación, mediante una serie de gráficos jerárquicos horizontalmente para una mejor comprensión de los mismos.

Estos gráficos jerarquizados realizados para cada etapa, a su vez de subdividen en subetapas, que contienen las acciones a realizar en cada una de ellas, y que se relacionan a continuación:

Etapa 1.- Geometría inicial del entorno de trabajo. (Figura 36)

Etapa 2.- Discretización del sistema. (Figura 37)

Etapa 3.- Datos característicos de cada capa del modelo. (Figura 38)

Etapa 4.- Entradas generales del modelo (Inputs). (Figura 39)

Etapa 5.- Ejecución de modelo (Run). (Figura 40)

Etapa 6.- Salidas de resultados del modelo (Output). (Figura 41)

Etapa 7.- Calibrado del modelo. (Figura 42)

Etapa 8.- Sensibilidad del sistema. (Figura 43)

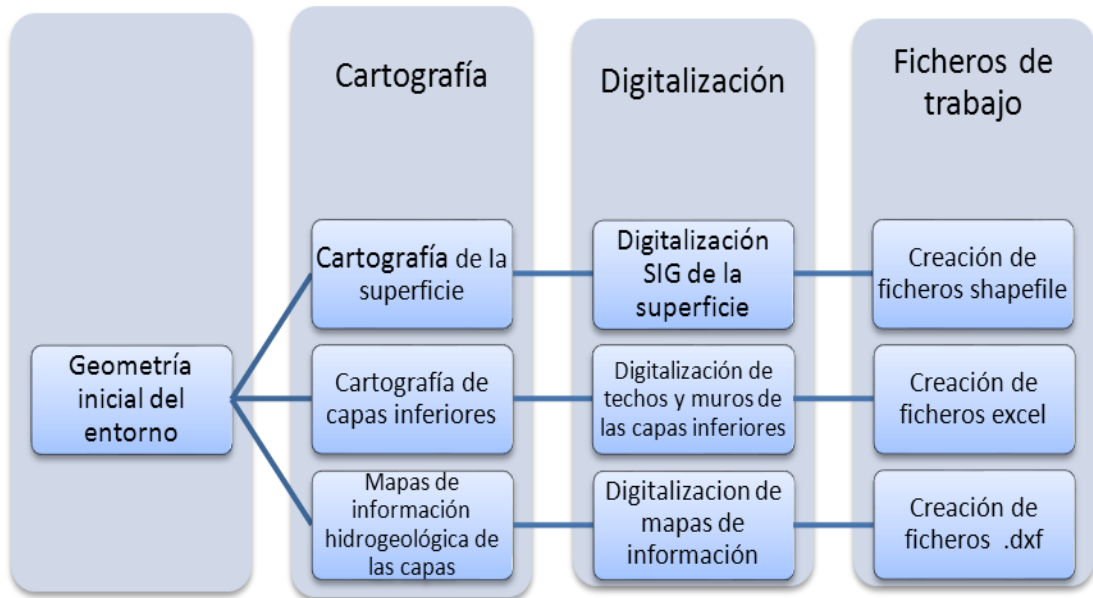


Fig. 36. Esquema del proceso de generación de la geometría de la zona de trabajo.

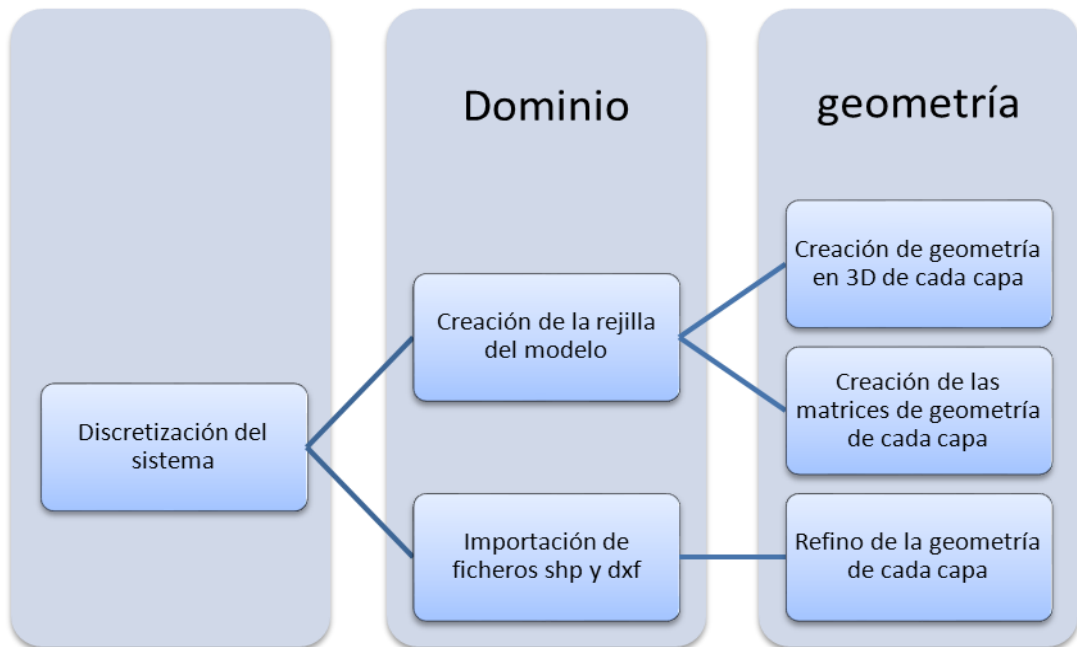


Fig. 37. Esquema del proceso de discretización del sistema realizado.

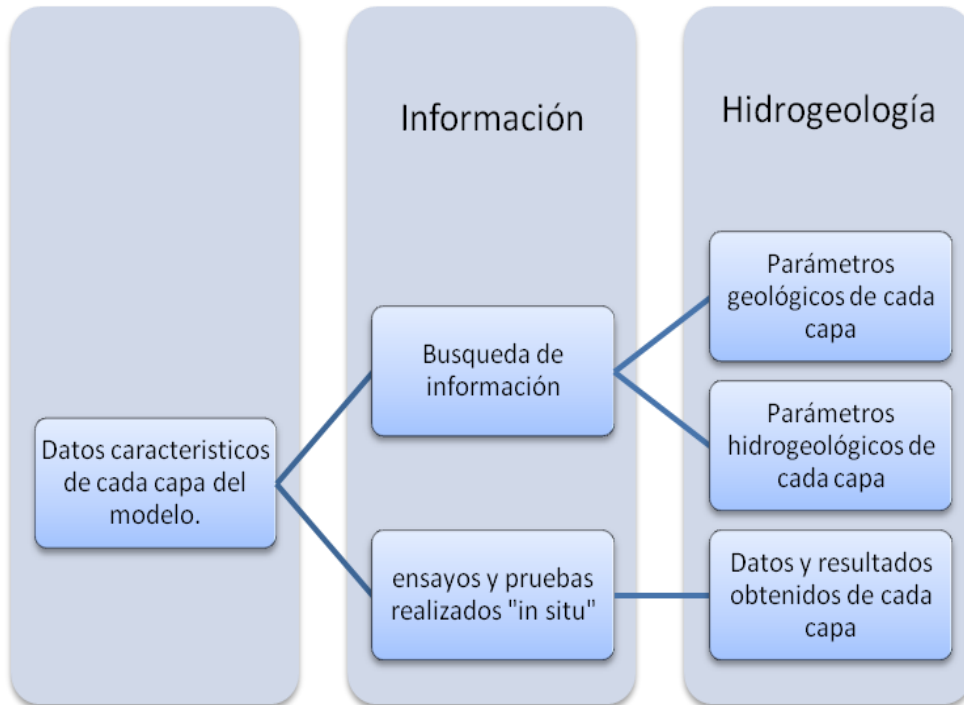


Fig. 38. Esquema del proceso de elaboración de datos de cada capa del modelo.

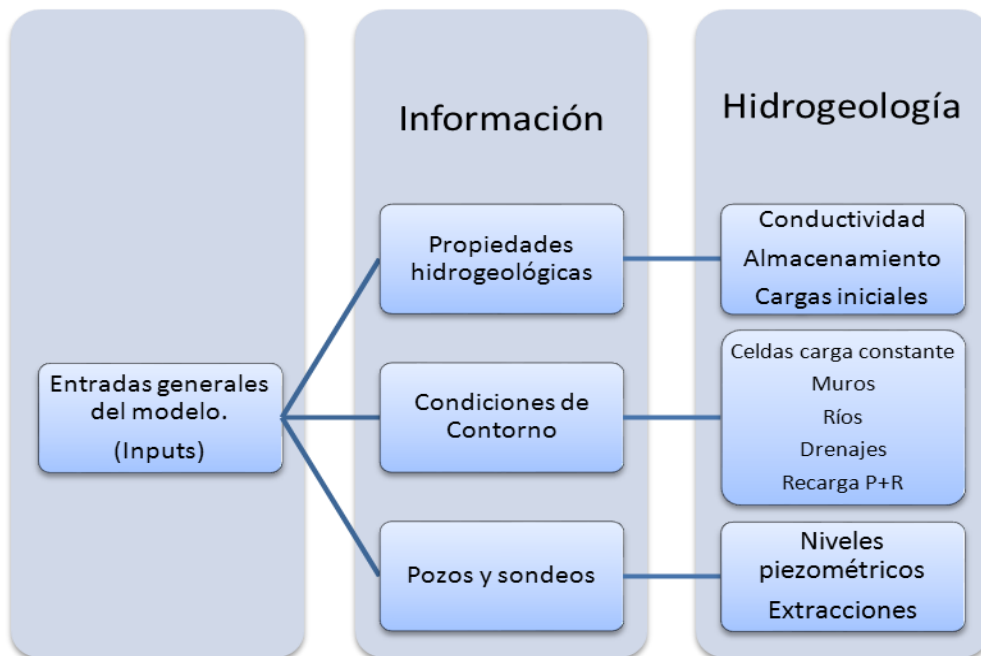


Fig. 39. Esquema del proceso de entradas (Inputs) introducidas en el modelo.

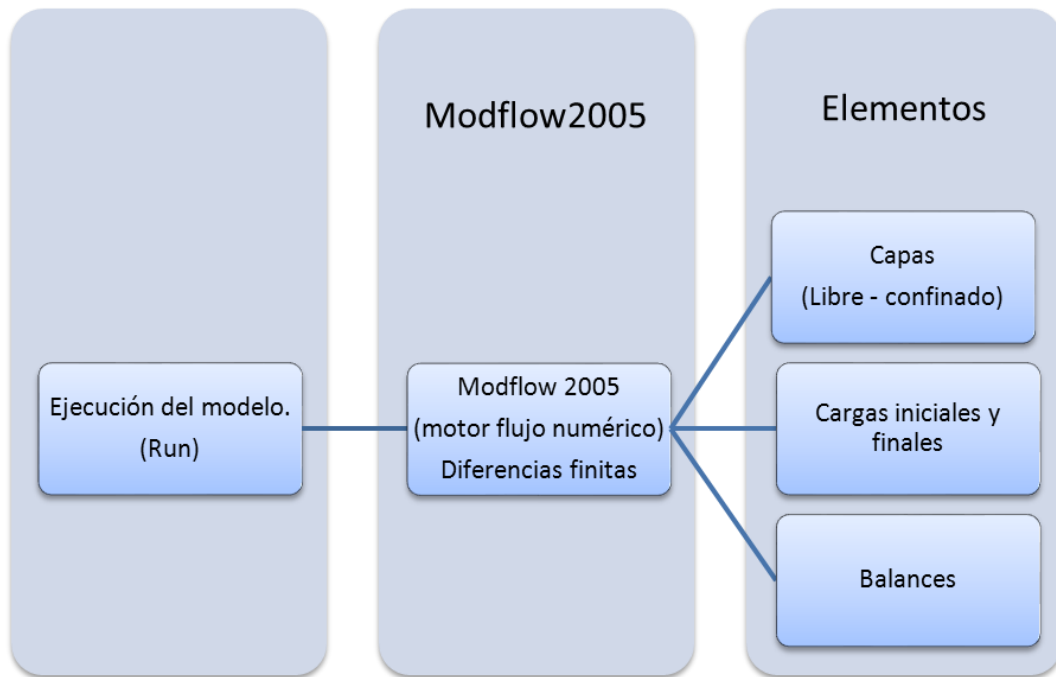


Fig. 40. Esquema del proceso de ejecución del modelo mediante motor de cálculo Modflow.

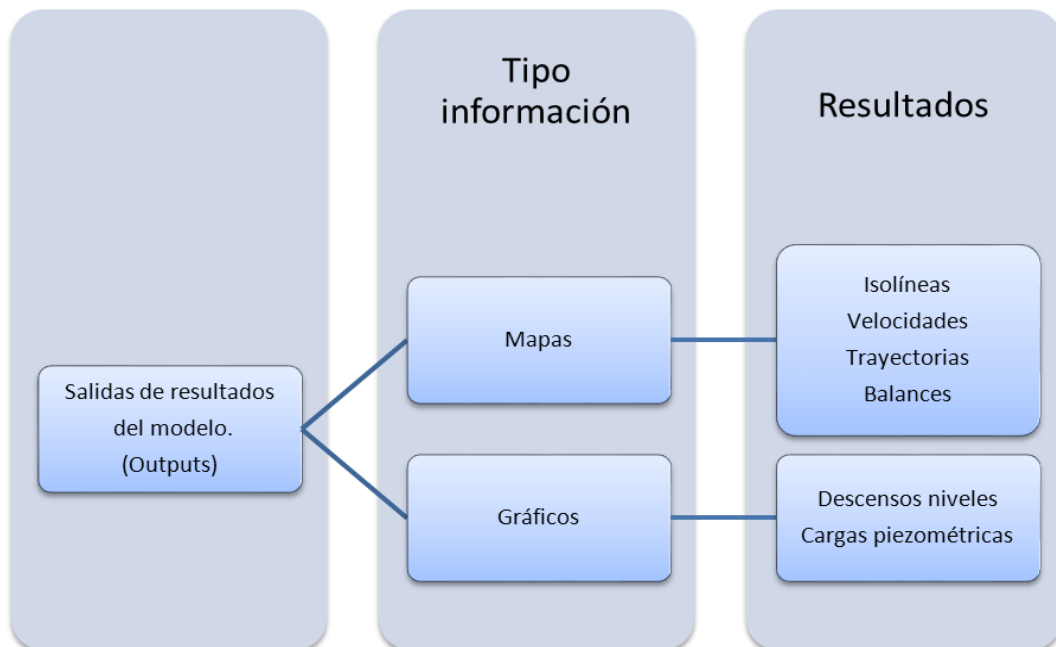


Fig. 41. Esquema del proceso de salidas (Outputs) generadas por el modelo.

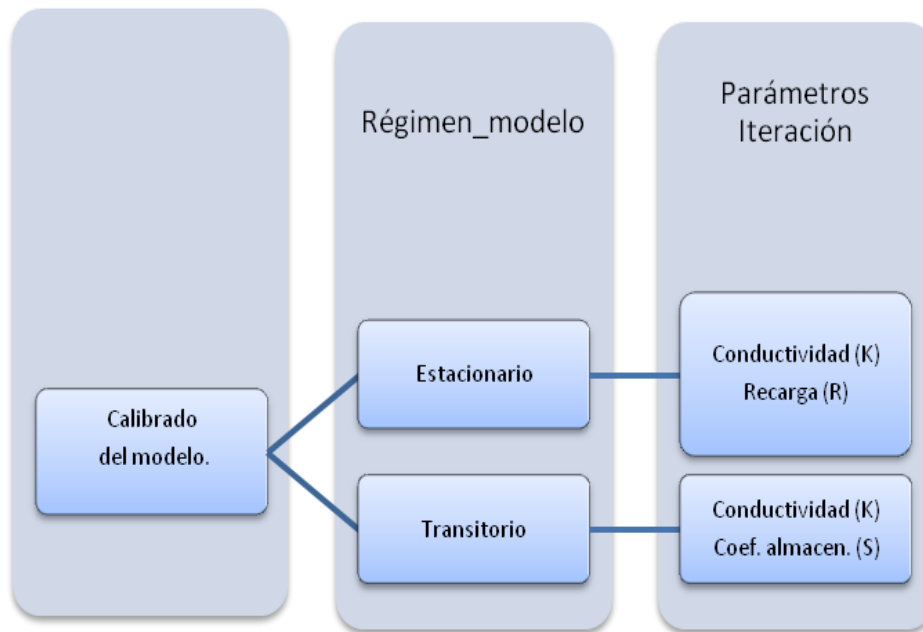


Fig. 42. Esquema del proceso de calibrado del modelo.

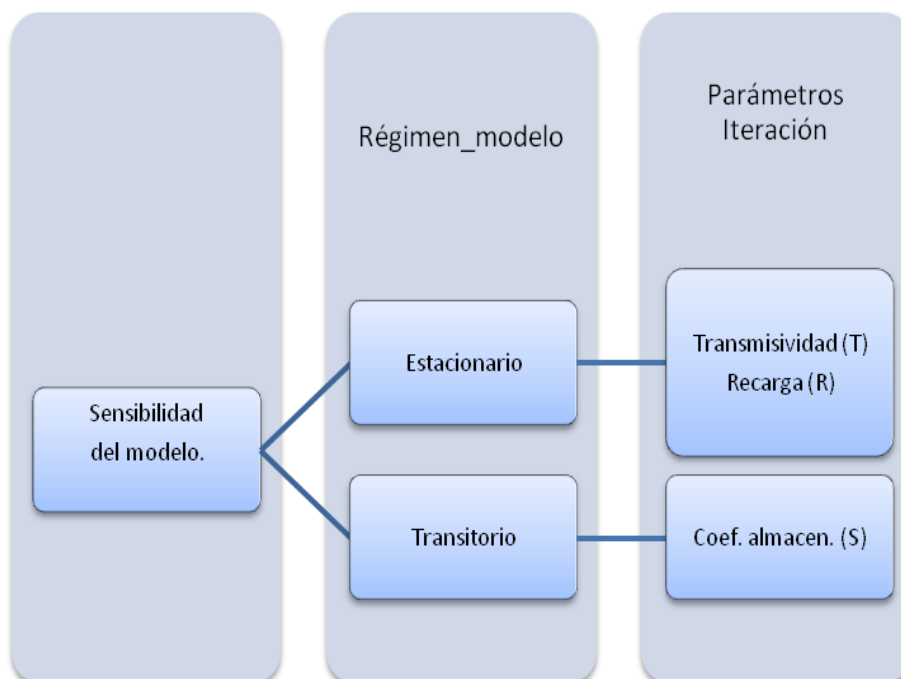


Fig. 43. Esquema del proceso de sensibilidad del modelo.

4.4.2. Identificación de las capas.

Para la confección del modelo de flujo utilizado en este estudio, se han considerado las nueve capas existentes en el Campo de Cartagena, donde se han modelizado tanto los tramos acuíferos, como los acuitardos intermedios. Para ello, habrá que identificar los cuatro tramos acuíferos principales, (existe un quinto, con materiales carbonatados del Pérmico-Triásico en el fondo del sistema) y los cuatro tramos acuitardos, que quedan intercalados entre las de las nueve capas a modelizar. En este estudio nos referiremos a capas o tramos indistintamente, y a superficies.

Los tramos acuíferos identificados son el acuífero libre superior o Cuaternario (Capa 1), las areniscas del Plioceno medio (Capa 3), el tramo Messiniense (Capa 5), formada principalmente por margas con lentejones de areniscas y calcarenitas, al igual que el Tortoniense (Capa 7), conformando estos dos tramos últimos del Mioceno superior (Fig. 44).

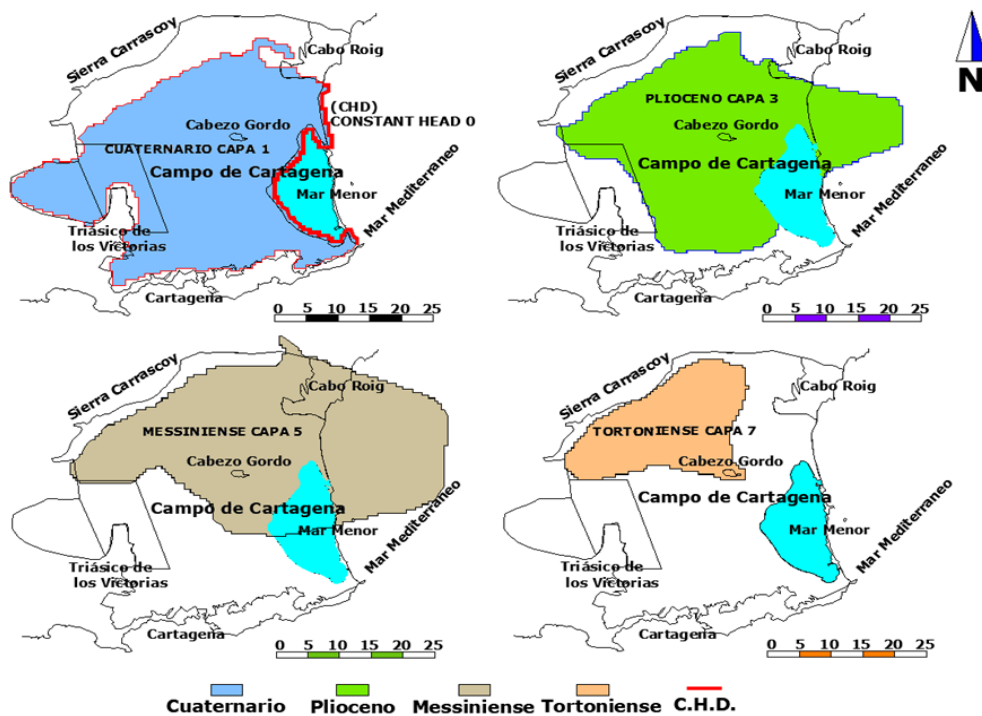


Fig. 44. Vista de las diferentes capas acuíferas incluidas en el modelo de flujo.

4.5. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.

4.5.1. Geometría inicial del entorno de trabajo.

En la elaboración del presente modelo se han utilizado datos de varias fuentes. La generación de la geometría de las superficies y capas del modelo, se han obtenido de datos facilitados por el IGME, y los parámetros hidrogeológicos iniciales se han obtenido a partir de ensayos de campo realizados in situ por el IGME y de otros estudios (Senent-Alonso, 2009; García-Aróstegui et al., 2012; Jiménez-Martínez et al., 2011, 2012, 2016). Los valores de los niveles piezométricos de los puntos de observación se obtuvieron de la CHS e IGME, datos de lluvia de la Agencia Meteorológica del Estado (AEMET) y datos de recarga de varios estudios (Baudron et al., 2013; Baudron, 2013b; García-Aróstegui et al., 2012; Jiménez-Martínez et al., 2012, Alcalá y Custodio, 2014).

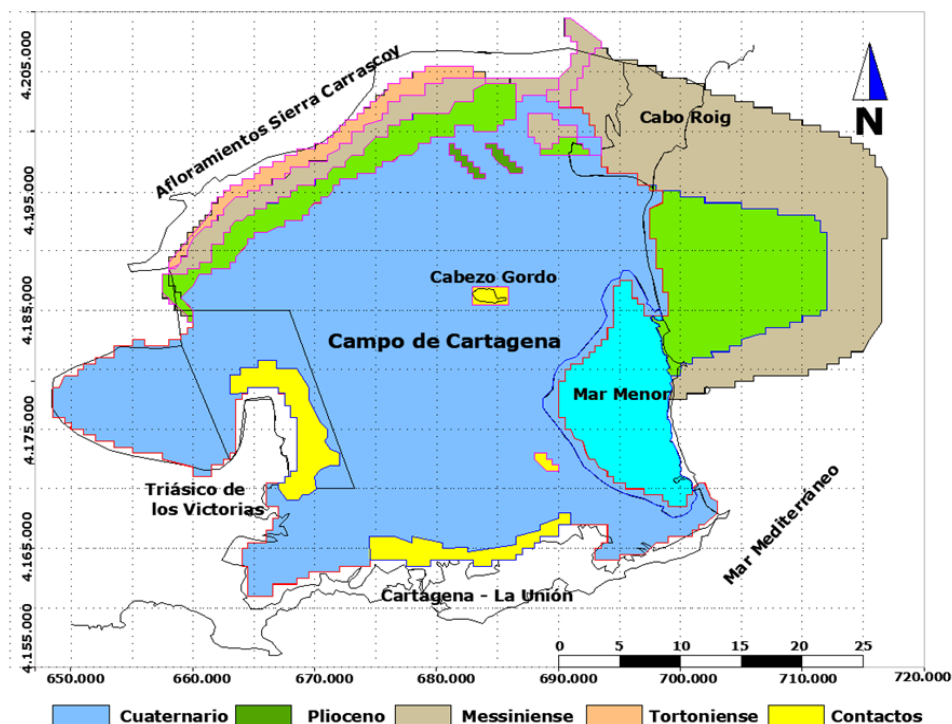


Fig. 45. Vista de las diferentes capas acuíferas superpuestas incluidas en el modelo de flujo. Las zonas de color amarillo denominadas “contactos”, son puntos de conexión hidráulica entre los tramos acuíferos incluidos en el modelo de flujo.

La capa 1 del acuífero representa el acuífero Cuaternario (Qt) en toda su extensión, entre los afloramientos de la Sierra Carrascoy y la laguna Mar Menor y el Mar Mediterráneo (Fig. 44 y 45). Las capas 2, 4, 6 y 8 son acuitardos generalmente formados por margas y arcillas, y la capa 9 se ha completado en el modelo a -2,500 m, que es el fondo o basamento. La tercera capa o Plioceno (Lt) consiste principalmente de areniscas, la quinta capa o Messiniense (VLV) está compuesta de conglomerados, con intercalaciones de arena y marga y caliza bioclástica, y la séptima capa o Tortoniense (UItc) consiste en margas, arena y areniscas.

4.5.2. Discretización del sistema.

Dependiendo del grado de definición y error que se quiera tener en una zona concreta a estudiar, así deberemos realizar la discretización de esa zona, puesto que el error que se comete en cualquier punto será pequeño si el tamaño de la celda también es pequeño. Si se tiene en cuenta este punto de vista anterior, como soporte o plano base para poder trabajar con él sobre la interfaz de Visual ModFlow 2010, se ha importado un fichero .dxf con la información cartográfica a escala real del contorno de la masa de agua subteránea 07.052. Se ha generado además, una malla preliminar de 5,000x5,000 metros que sirve de soporte inicial para la malla definitiva de la discretización en el plano horizontal con la que trabajará el modelo, y que tendrá celdas de 500x500 m en todo el entorno de trabajo.

En la figura 46 se puede observar como se ha realizado una primer aproximación con malla de 5,000x5,000 m. donde ya se han sombreado las celdas inactivas en verde, las cuales, el modelo no tiene que tener en cuenta a la hora de calcular flujos y otros elementos a obtener. En la figura 47 se observa la rejilla discretizada en celdas de 500x500 m de la malla definitiva.

Con la reducción de rejilla realizada, se consigue una mayor definición del modelo igualando en toda la malla los ejes X e Y, debido a la anisotropía homogénea que se quería conseguir con la rejilla con celdas de 500x500 m. No se estima necesario con estas dimensiones de rejilla, reducir aún más la dimensión en el sentido del eje Y, principalmente junto a la línea de costa del Mar Menor o Mar Mediterráneo, o en los alrededores del Horst de Cabezo Gordo.

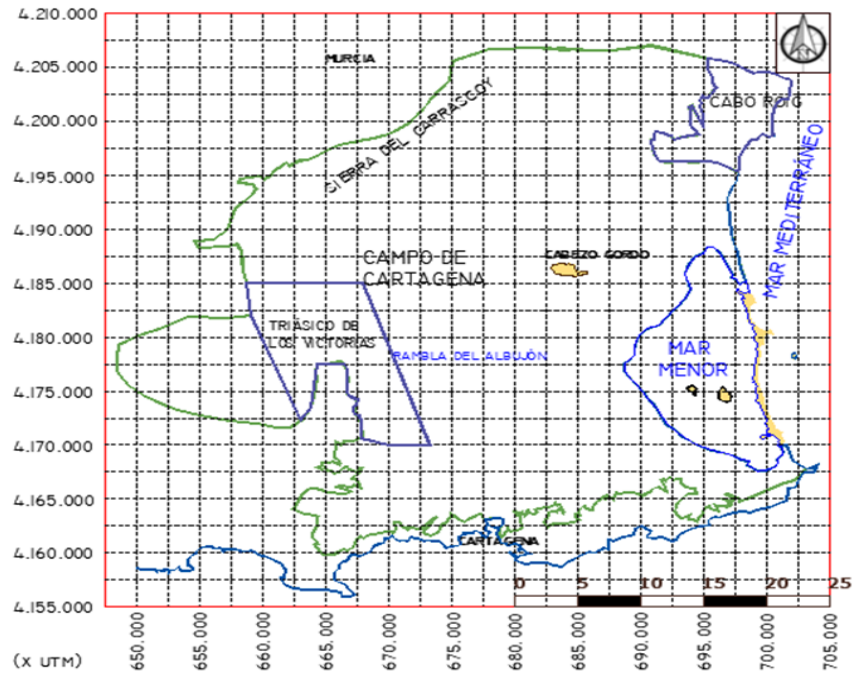


Fig. 46. Discretización inicial con celdas de 2,500 x 2,500 m.

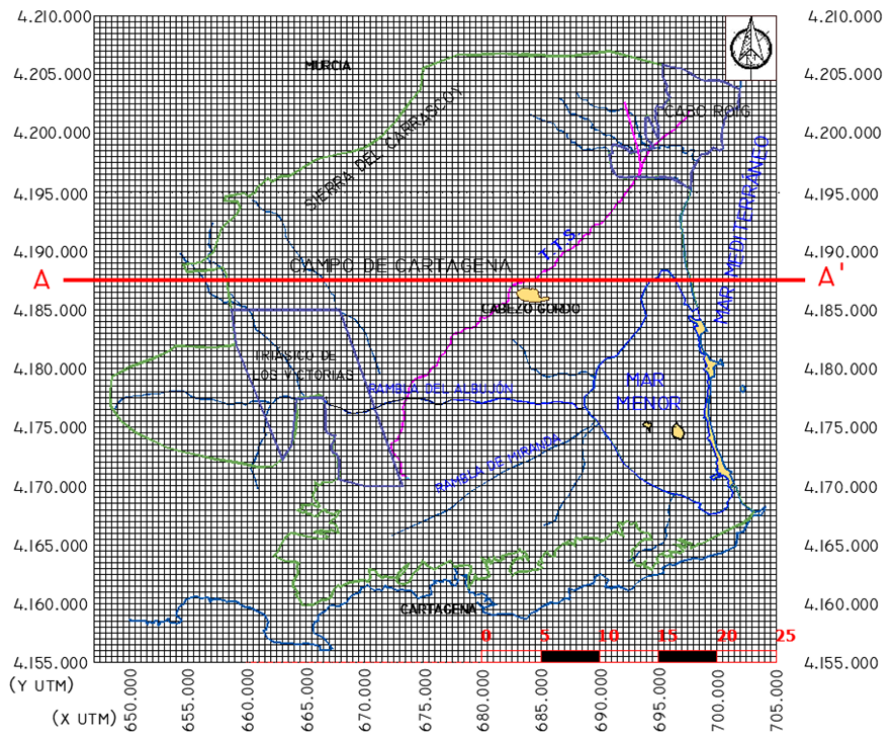


Fig. 47. Discretización final con malla de 500 x 500 m. En verde las celdas inactivas.

La discretización vertical se ha llevado a cabo mediante la división de la zona de estudio en nueve capas, desde una primera superficie topográfica del terreno denominada S0, una segunda superficie denominada “muro del cuaternario” S1 en el contacto entre este con el acuitardo margoso del Plioceno, una tercera superficie denominada “Muro del acuitardo Plioceno” S2 en contacto con las areniscas del Plioceno, y una cuarta superficie denominada “Muro del acuífero Plioceno” S3 en contacto del otro acuitardo del Andaluciense Superior, y así, sucesivamente hasta el basamento de la zona (Fig. 48)

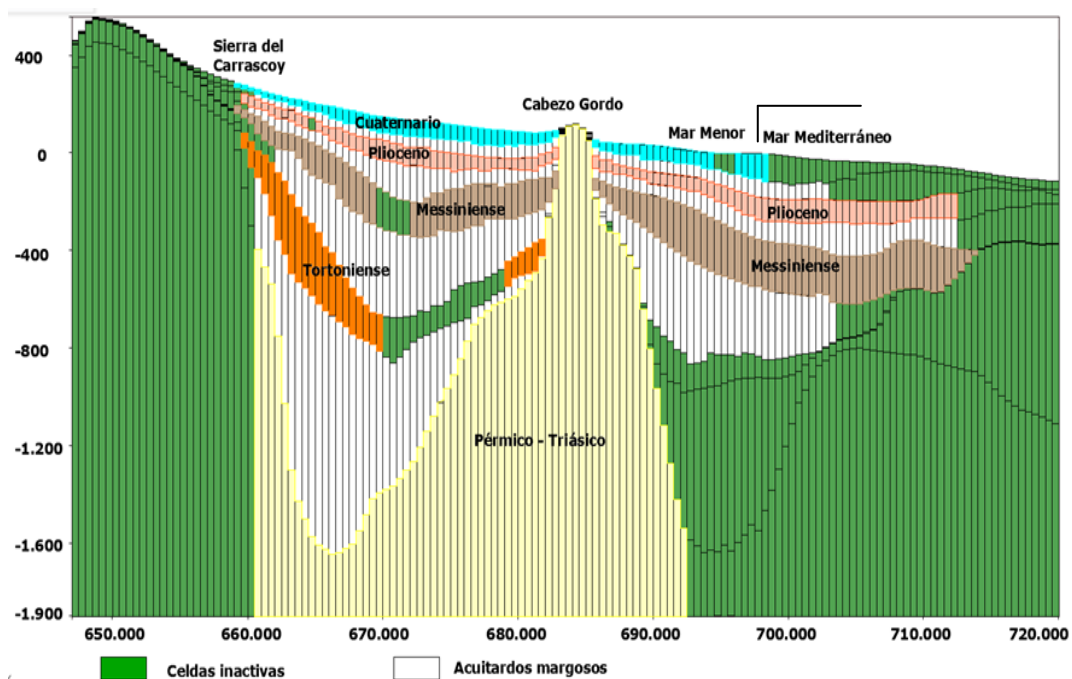


Fig. 48. Sección A-A cercana a la población de San Javier, con las capas discretizadas. En verde las celdas inactivas.

En la figura 48 se puede observar que existe una zona en la que apenas hay espesor en las capas activas del modelo. En esa zona aflora un macizo tectónico denominado Cabezo Gordo mediante la acción de fallas. Es un Horst formado por rocas marmóreas permeables del Triásico-Pérmico, con una conexión hidráulica inicial con el Cuaternario, Plioceno y Messiniense que se ha considerado en un primer avance de modelo, que será objeto de estudio para resolver una primera aproximación cuantitativa de las conexiones hidráulicas entre esta formación y los tramos acuíferos que quedan interseccionados por este macizo tectónico.

Otras zonas donde los espesores de los acuitardos decrecen considerablemente, son el Triásico de Los Victorias y el pie de Sierra de Cartagena-La Unión, donde existen áreas que se han denominado en la figura 35 “contactos”, que al igual que pasa con el Horst de Cabezo Gordo, se tiene constancia de contactos entre capas acuíferas que generan una cierta comunicación hidráulica entre estos tramos, pero de difícil cuantificación.

Uno de los objetivos de esta tesis, es cuantificar esa comunicación hidráulica entre estas capas acuíferas, intentando dislumbrar el movimiento del flujo en la actualidad y a lo largo de periodo objeto de estudio, y ver como la explotación intensiva del sistema hídrico se ha visto alterado o modificada por la antropización del medio.

4.5.3. Entradas del modelo (Inputs)

4.5.3.1. Importación de superficies

Una vez identificadas las unidades a emplear en el modelo numérico, se trabajará con ocho tramos o capas para esta tesis doctoral. Estas capas están formadas por mallas (superficie de elevación, muros y techos) que limitarán los materiales geológicos de la zona del Campo de Cartagena.

La primera capa denominada, Capa 1 (**C1**), corresponde al acuífero libre Cuaternario y dispondrá de dos superficies a introducir en el modelo. Una primera superficie topográfica del terreno (**S0**) (Fig. 49), que será extraída de mapas cartográficos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de la serie MTN 50, transformados mediante CAD y GIS a cartografía digital y a modelo digital del terreno. Con posterioridad, para poder importarlo a matrices de datos georeferenciados para Visual Modflow 2010, se utilizarán archivos shapefiles y *.xls, que permiten generar datos 3D como en la figura 50.

Una segunda superficie (**S1**) que será el muro de la capa 1 y el techo de la capa 2, que se obtendrá restando a la cota de la superficie, el espesor del acuífero Cuaternario. Esta operación habrá que realizarla sucesivamente para ir generando celdas y tramos acuíferos sobre toda la superficie que se pretenda modelizar, para el entorno de trabajo objeto de estudio dentro de los límites establecidos para la cuadrícula resultante del dimensionamiento inicial. Con la generación de estas capas tridimensionales, se podrá observar y analizar posibles irregularidades.

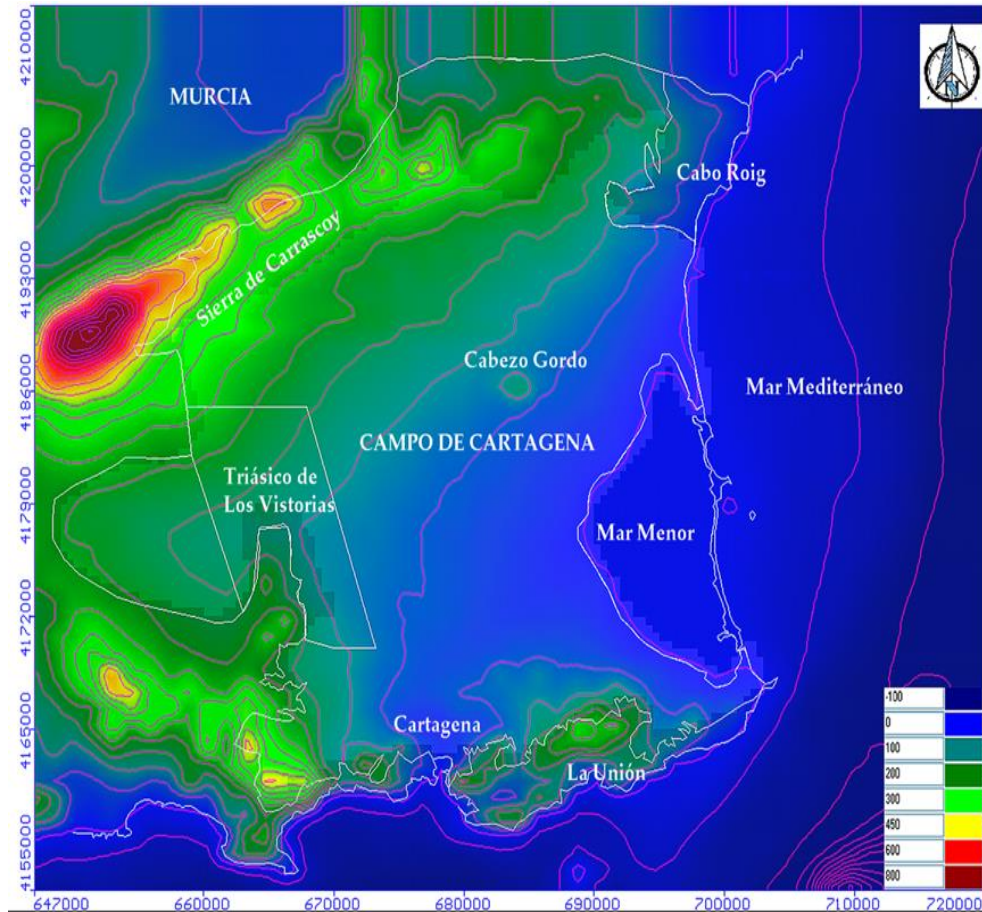


Fig. 49. Topografía de la zona generada con GIS para importar al modelo con sombreado de zonas y curvas de nivel cada 50 m. Superficie 0 DEM (S0).

En las fases del modelado del entorno objeto de estudio, se trabaja con mapas donde se obtienen curvas de nivel o también es posible trabajar con modelo digital de elevaciones (DEM) o también denominado ráster DEM en el que cada píxel almacena la elevación. Esta forma de trabajar con superficies de colores ayuda a visualizar mejor algunas de las superficies continuas del terreno, cuando en un entorno topográfico no es necesaria una definición precisa del relieve. Al trabajar en entornos 3D, según vayamos introduciendo información celda a celda, se irán generando superficies tridimensionales que son posible visionar mediante herramientas propias de Modflow, como se puede observar en las figuras 50 a 53.

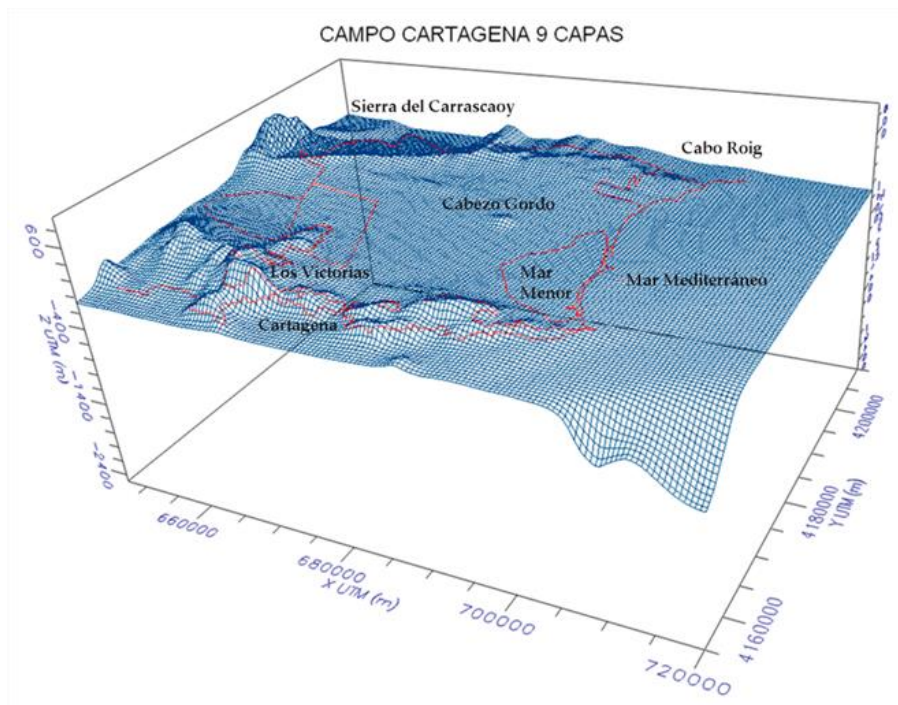


Fig. 50. Vista en 3D de la superficie topográfica S0 generada por el modelo de flujo Modflow .

Una segunda capa, o Capa 2 (C2) que será el acuitardo margoso superior del Plioceno que al igual que la capa 1, que se definirá mediante dos superficies. Una superior o techo de la capa, que coincide con la superficie inferior del cuaternario y una segunda superficie (S2), que será el muro de este acuitardo y quedará definido por la diferencia de las cotas de la superficie 2 menos las de la superficie 1. La tercera capa es el Plioceno (C3) con una superficie inferior denominada (S3). (Fig 51)

La capa del tramo acuífero del Plioceno, al igual que las capas anteriores, se definirá mediante dos superficies. Una primera superior o techo de la capa, coincide con la superficie inferior del acuitardo superior del Plioceno o muro del mismo y una segunda superficie (S3) según figura 52, que será el muro de este acuífero del Plioceno y quedará definido por la diferencia de las cotas de la superficie 3 menos el espesor de este acuífero de areniscas del Plioceno. En la vista 3D se aprecian espesores depresiones bajo el Mar Menor y Mediterráneo.

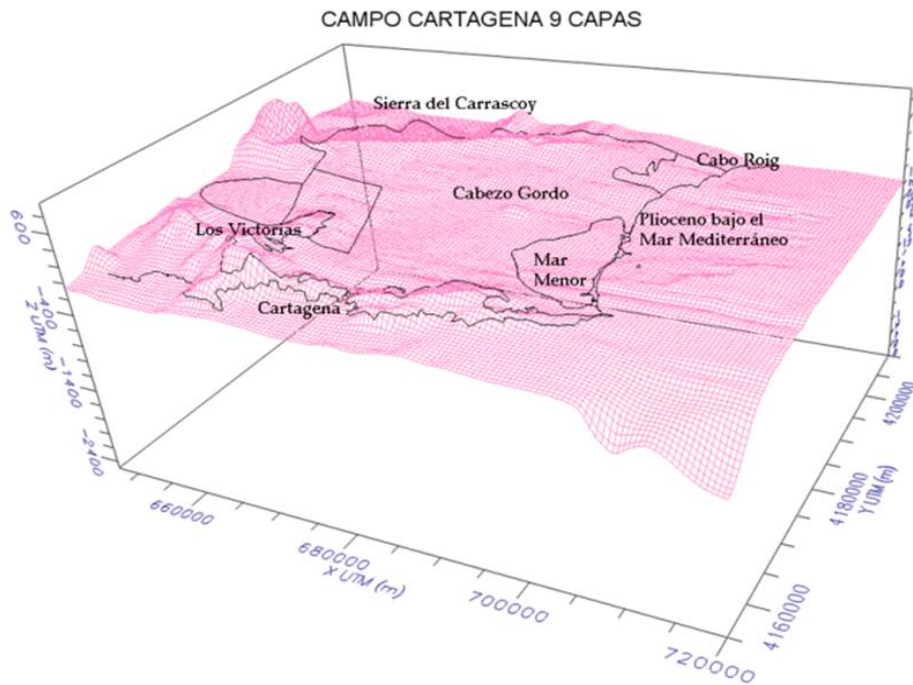


Fig. 51. Vista en 3D de la superficie S3 generada por el modelo de flujo Modflow .

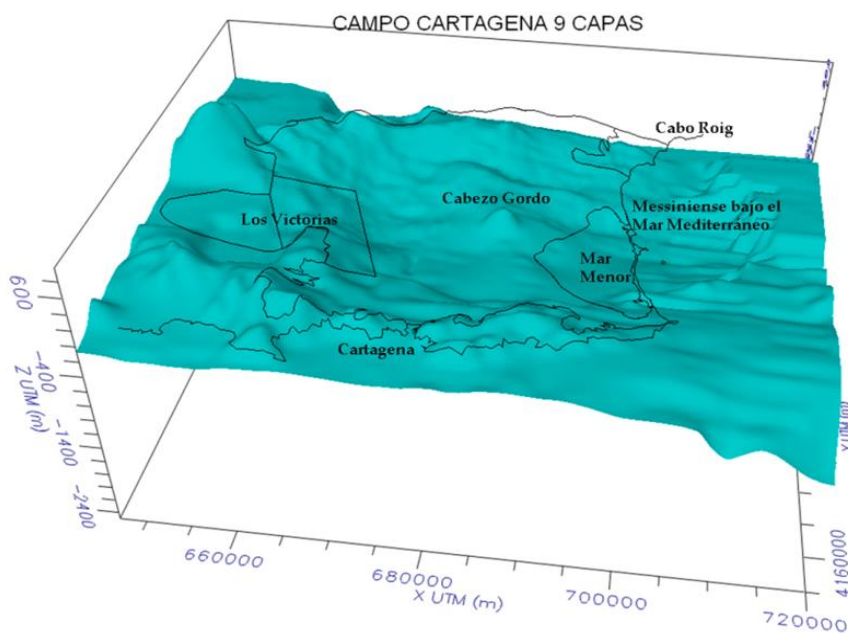


Fig. 52. Vista en 3D de la superficie S5 generada por el modelo de flujo Modflow.

De la misma manera se van generando hasta 9 capas, siendo las más interesantes objeto de estudio, los tramos acuíferos denominados Capas 1, 3, 5 y 7. En la siguiente figura 3D denominada figura 53, podemos observar como el relieve de espesores de cierta consideración también se introducen bajo el Mar Mediterráneo en la capa del tramo Messiniense. En este caso se ha empleado una superficie sólida en vez de superficie mediante mallado como en las dos figuras anteriores.

El último tramo acuífero a introducir en el modelo será el tramo Tortoniense, denominado Capa 7 (C7), que como en ocasiones anteriores, quedará definido por dos superficies, la S-6 y la S-7, (Fig. 53).

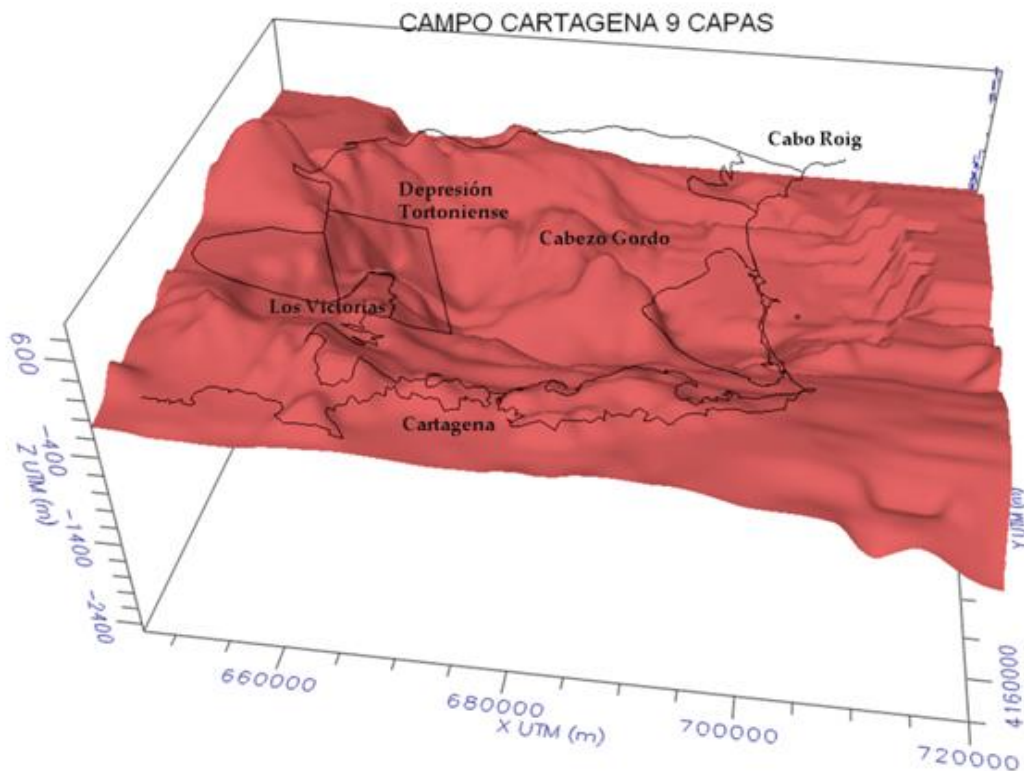


Fig. 53. Vista en 3D de la superficie S7 generada por el modelo de flujo Modflow.

Por debajo de este tramo acuífero se introducirán las capas inferiores en el modelo, pero aunque con escaso o ningún interés hidrogeológico, se ha querido modelizar la totalidad de las capas hasta el basamento. Puede observarse en el

centro de la zona grandes depresiones o depocentros, con el macizo de Cabezo Gordo en el centro generando dos subcuencas, la de Torre-Pacheco y la de San Javier.

La dispersión y escasez de algunos datos, genera incertidumbre asociada a los modelos de flujo en la homogeneidad y en los resultados obtenidos. La combinación de diferentes parámetros hidrogeológicos definidos sobre una base litológica y el corte geológico, se han interpolado para el refinamiento de la geometría y los mapas de conductividad hidráulica.

4.5.3.2. Celdas inactivas

Como se puede observar en las figuras 39 y 40, las celdas sombreadas de verdes son celdas inactivas, que formando parte del modelo, no generan resultados, y por tanto, el modelo no las considerará en los cálculos. Cada capa tendrá una serie de celdas inactivas que habrán sido desactivadas en función de sus características propias y del ámbito de estudio.

4.5.3.3. Pozos de observación

Los pozos de observación son elementos necesarios para la calibración del modelo de flujo de aguas subterráneas. A través de estos puntos de observación, se dispondrá de la información piezométrica de una determinada capa o tramo acuífero durante un periodo determinado. En la presente tesis doctoral, se han empleado 37 puntos de observación repartidos por toda la zona objeto de estudio, como puede observarse en la figura 11. La mayoría se emplearán en la calibración del modelo, y el resto serán para la validación del mismo.

La ubicación de estos pozos de observación, se corresponde con la ubicación exacta en coordenadas UTM con los 37 pozos existentes controlados por la Confederación Hidrográfica del Segura y el Instituto Geológico y Minero de España en Murcia. La denominación o nomenclatura con la que se nombrado cada pozo de observación coincide con la nomenclatura empleada por el IGME.

En los 37 pozos de observación empleados, solamente se dispone de piezometría desde la década de los años 70 del siglo pasado hasta nuestros días, no disponiendo de datos fiables entre el inicio de la antropización e inicio del presente estudio hasta ese momento de la década de los años 70. Para el inicio de

la antropización se han estimado valores aproximados, obtenidos de publicaciones y trabajos sobre los inicios de las explotaciones de aguas subterráneas en Campo de Cartagena.

Tabla 9 Listado de pozos de observación, con denominación y coordenadas UTM.

| Nº Orden | Capa | Nº Pozo | X (m) | Y (m) |
|----------|-------------|-----------|---------|-----------|
| 1 | Cuaternario | 283750048 | 695,685 | 4,192,583 |
| 2 | Cuaternario | 283810010 | 691,810 | 4,187,714 |
| 3 | Cuaternario | 273830044 | 678,098 | 4,187,234 |
| 4 | Cuaternario | 273840094 | 686,694 | 4,180,555 |
| 5 | Cuaternario | 273780013 | 681,725 | 4,191,184 |
| 6 | Cuaternario | 283750001 | 695,688 | 4,190,701 |
| 7 | Cuaternario | 283750073 | 692,872 | 4,194,341 |
| 8 | Cuaternario | 273940016 | 684,492 | 4,170,270 |
| 9 | Plioceno | 273940005 | 682,304 | 4,170,639 |
| 10 | Plioceno | 273780036 | 688,704 | 4,192,588 |
| 11 | Plioceno | 273830036 | 678,878 | 4,184,529 |
| 12 | Plioceno | 283810021 | 690,611 | 4,187,816 |
| 13 | Plioceno | 273880051 | 682,948 | 4,175,536 |
| 14 | Plioceno | 273830031 | 675,140 | 4,180,707 |
| 15 | Plioceno | 283810050 | 690,729 | 4,184,322 |
| 16 | Plioceno | 273940021 | 685,257 | 4,170,763 |
| 17 | Plioceno | 273870035 | 676,495 | 4,172,716 |
| 18 | Plioceno | 273880046 | 686,671 | 4,180,255 |
| 19 | Plioceno | 273920015 | 674,635 | 4,168,856 |
| 20 | Plioceno | 273820006 | 673,787 | 4,186,221 |
| 21 | Messiniense | 273830007 | 680,659 | 4,183,771 |
| 22 | Messiniense | 283750074 | 692,558 | 4,193,384 |
| 23 | Messiniense | 273760064 | 673,657 | 4,194,177 |
| 24 | Messiniense | 273770060 | 676,218 | 4,195,352 |
| 25 | Messiniense | 283810020 | 691,611 | 4,187,816 |
| 26 | Messiniense | 273780003 | 681,914 | 4,195,625 |
| 27 | Messiniense | 273830035 | 678,578 | 4,184,829 |
| 28 | Messiniense | 273760008 | 671,048 | 4,189,817 |

| | | | | |
|----|-------------|-----------|---------|-----------|
| 29 | Messiniense | 273770026 | 681,023 | 4,193,272 |
| 30 | Messiniense | 273780014 | 681,879 | 4,190,503 |
| 31 | Messiniense | 273780029 | 688,590 | 4,194,196 |
| 32 | Messiniense | 273820033 | 669,634 | 4,188,389 |
| 33 | Messiniense | 273880001 | 683,568 | 4,177,831 |
| 34 | Messiniense | 273880047 | 687,671 | 4,181,255 |
| 35 | Tortoniense | 273830011 | 675,216 | 4,185,087 |
| 36 | Tortoniense | 273750015 | 663,316 | 4,192,817 |
| 37 | Tortoniense | 273750018 | 666,645 | 4,193,147 |

4.5.3.4. *Parámetros hidrodinámicos iniciales*

En el presente estudio sobre los efectos hidrodinámicos que han ocurrido en el acuífero multicapa de Campo de Cartagena, es necesario manejar información hidrogeológica sobre parámetros hidrodinámicos como la transmisividad del terreno, su conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento específico de los estratos existentes, o la porosidad del material objeto de estudio. Con esta información de cada capa se procederá a su introducirán en el modelo de flujo como parámetros iniciales antes del calibrado del modelo.

Los datos de los parámetros hidrodinámicos proceden de varias fuentes (PIAS, 1975; Freeze & Cherry, 1979; Smith & Weathcraft, 1993; Sanders, 1998; Domenico & Schwartz, 1998; Senent et al., 2009). Para la capa Cuaternaria, la conductividad hidráulica media (K) está en torno a los 1.70 – 2.55 m/día para conductividades horizontales. En el caso de los acuitardos margosos, la conductividad hidráulica media está en torno a los 1×10^{-6} m/día y para la arenisca del Plioceno, la conductividad hidráulica media tiene un valor aproximado a los 1.30 – 2.00 m/día para conductividades horizontales. Con respecto a los tramos acuíferos del Messiniense y Tortoniense, para las calizas bioclásticas, areniscas y arenas del Messiniense los valores de K medios están en torno a 1.00 m/día y para las areniscas y conglomerados del Tortoniense los valores de K medios están en torno a 1.20 m/día.

La conductividad hidráulica vertical se ha considerado, como suele ser habitual para este tipo de estudios, un orden de magnitud inferior a la horizontal. También se han considerado los datos aportados por otros estudios, como el

realizado por Senent et al. (2009), y García Aróstegui et al. (2012), han quedado reflejados en los valores paramétricos incluidos en la tabla 10, para las entradas antes del calibrado del modelo de flujo.

En lo que concierne a la transmisividad del cuaternario, según el ensayo realizado en 2008, (Senent-Alonso et al., 2009; García Aróstegui, 2018) el valor es de 102 m²/día, para espesores medios entre 45 y 60 m. Otros ensayos de bombeo recientes realizados cercanos a la costa del Mar Menor, arrojan valores medios entre 670 a 960 m²/día para espesores cercanos a los 125-150 m de profundidad (CHS, 2014). Para el acuitardo del Plioceno margoso, la transmisividad para un espesor medio de capa saturada de 60 metros tiene un valor de 1.2×10^{-4} m²/día. Para el acuífero de areniscas del Plioceno, la transmisividad para un espesor medio de capa saturada de 55 metros tiene un valor de 80 m²/día (IGME, 1991; PIAS, 1975; CHS, 1998, 2007; Alcón et al., 2011).

Tabla 10. Valores medios de los parámetros iniciales de entrada antes del calibrado.

| Capa | K _{x,y} (m/día) | S _s (1/m) | S _y (m/m) | Por. Efec | Por. Total |
|----------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|------------|
| Cuaternario | 2.10 | 4.33×10 ⁻³ | 0.20 | 0.10 | 0.20 |
| Margas | 1.20×10 ⁻⁶ | 1.00×10 ⁻⁷ | 6.00×10 ⁻⁵ | 0.0025 | 0.005 |
| Plioceno | 1.45 | 4.40×10 ⁻⁵ | 0.0043 | 0.079 | 0.16 |
| Margas | 1.20×10 ⁻⁶ | 1.00×10 ⁻⁷ | 6.00×10 ⁻⁵ | 0.0025 | 0.005 |
| Messiniense | 1.00 | 2.50×10 ⁻⁵ | 0.0055 | 0.0625 | 0.15 |
| Margas | 1.00×10 ⁻⁶ | 1.00×10 ⁻⁷ | 6.00×10 ⁻⁵ | 0.0025 | 0.005 |
| Tortonense | 1.20 | 2.25×10 ⁻⁴ | 0.004 | 0.058 | 0.14 |
| Muro inferior | 0.50 | 1.00×10 ⁻⁵ | 2.00×10 ⁻³ | 0.035 | 0.07 |

El valor del coeficiente de almacenamiento específico medio (S_s) del Cuaternario está en entre los valores 3.63 - 5.00 × 10⁻³. Para el acuitardo de margas

del Plioceno este valor será 1×10^{-7} y para las areniscas del Plioceno Ss valdrá 4.4×10^{-5} , (Senent-Alonso et al., 2009; García Aróstegui et al., 2012). Para el tramo Messiniense el Sy los valores medios serán inferiores a 7×10^{-3} (CHS, 2014).

Asimismo, otros parámetros hidrodinámicos como la porosidad del medio efectiva y total se han consultado de publicaciones y otros trabajos (Smith & Weathcraft, 1993; Sanders, 1998; Domenico & Schwartz, 1998). La carga hidráulica inicial se ha establecido en función de la topografía de la zona antes de la antropización del medio, por lo que se ha establecido a través de un mapa zonal de carga variable.

4.5.3.5. *Drenajes.*

Debido a la problemática existente en algunas zonas junto al litoral, generalmente en zonas bajas, en relación con la subida del nivel piezométrico de las aguas del tramo cuaternario, se ha generado un problema para la agricultura con niveles excesivamente altos del agua anegando la zona edáfica, y no dejando respirar bien a las plantas y provocando problemas en las mismas. Además el problema se agrava debido a la contaminación existente en este tramo de acuífero libre de productos y derivados agroquímicos.

Para paliar estos efectos se han construido drenajes en algunas ramblas como la del Abujón y zonas limitrofes, pero que no generan aporte de agua a los cauces superficiales estando secos casi todo el año, excepto en cortos episodios de fuertes tormentas. Al estar los cauces secos sin aportar agua drenando la misma a los acuíferos inferiores, se han eliminado del modelo preliminar los posibles drenes existentes en la Rambla del Albuñón y de Miranda.

4.5.3.6. *Celdas de carga hidráulica constante.*

Como condiciones de contorno, se establece una primera condición en función de los límites hidrogeológicos establecidos para la zona de estudio, se ha generado una línea o borde de celdas de carga hidráulica constante, coincidente con el borde este entre los Mares Mediterráneo y Menor con la costa de Campo de Cartagena, según puede apreciarse en la figura 54.

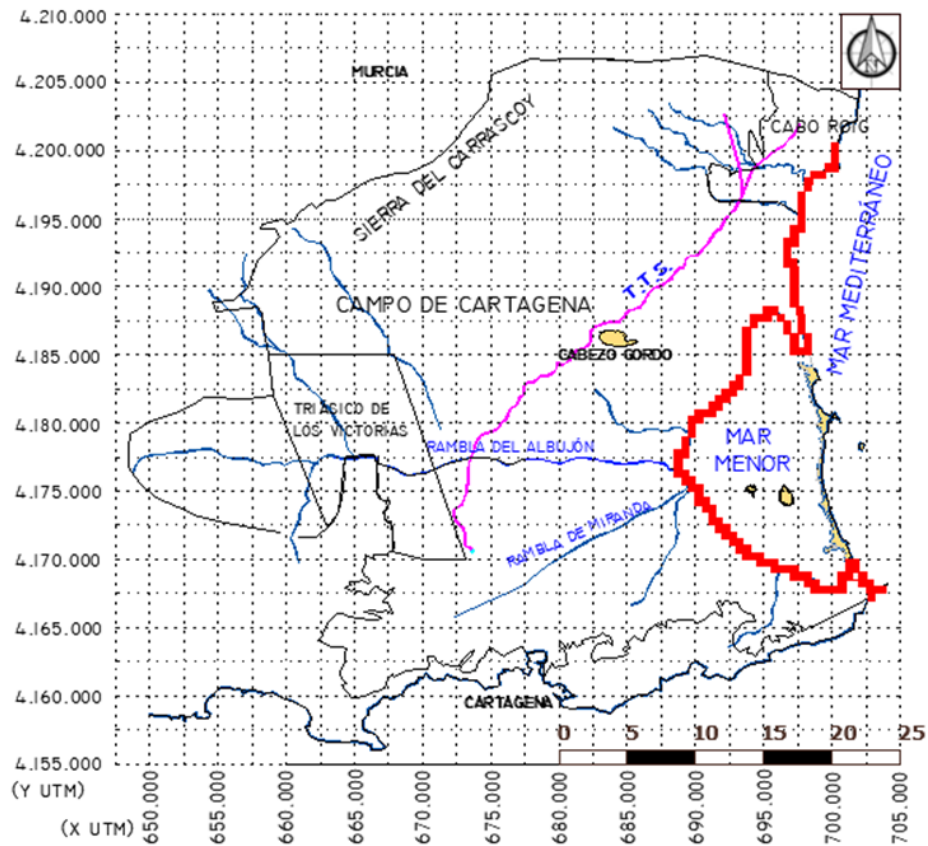


Fig. 54. Borde de carga constante en color rojo entre los mares y la costa.

4.5.3.7. Datos potenciométricos.

La piezometría ha sido realizada a partir de datos provenientes de los pozos de observación incluidos en las bases de datos e inventarios de la CHS y del IGME. Las medidas piezométricas del IGME, que comenzaron a mediados de los años 70 del siglo pasado, muestran que la estabilidad actual está precedida de una recuperación gradual del agua subterránea, vinculada con la puesta en marcha del Trasvase Tajo-Segura como fuente externa de agua desde el año 1979. Además, existen datos históricos disponibles, que ayudan a conocer de forma aproximada, el estado anterior a las mediciones del IGME.

Las cargas hidráulicas de agua subterránea fueron en su inicio de 0-15 msnm en el acuífero Plioceno y 20-40 msnm en el acuífero Messiniense en la cuenca de San Javier. Para la cuenca de Torre-Pacheco los niveles fueron inferiores, con poca o ninguna surgencia natural, y decreciente según se avanza

desde la costa al interior. A partir de esta información documentada en revistas de la época sobre el inicio de extracciones de agua, los niveles piezométricos que existían en ese momento llevaron a la existencia de pozos artesianos (Román, 1996).

Desde esa época de la década de 1920 hasta el comienzo de los datos estadísticos en 1973 aproximadamente (Fig. 25), existe una franja de tiempo en la que se desconoce la evolución exacta de los niveles piezométricos de Campo de Cartagena, por lo que ha habido que estimar e interpolar con los datos obtenidos.

Para encajar una posible evolución piezométrica de Campo de Cartagena durante todo el periodo de estudio, se ha pensado en la posibilidad de emplear una metodología basada en la interpolación de funciones no lineales de segundo orden para el periodo comprendido entre 1925 y 1975, tomando como referencia los datos del artesianismo en 1920-25 y los datos observados en 1961 y entre 1975-1980 por el IGME y la CHS. Pero al final se ha optado por dejar sin datos piezométricos esa franja de tiempo, y aportar la información piezométrica que genera el modelo basado en los datos introducidos de explotación por bombeo y recarga, además de la información hidrogeológica propia del mismo (Fig. 55).

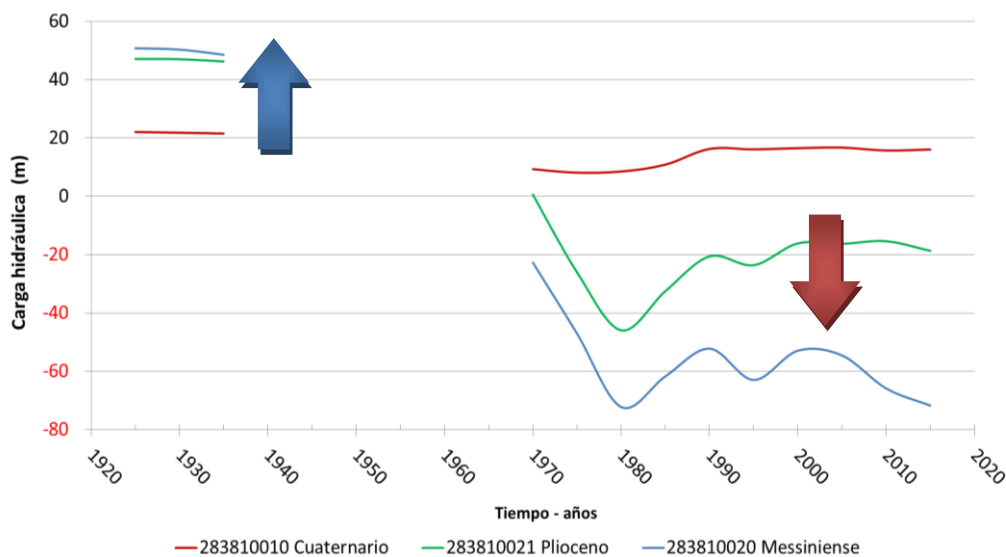


Fig. 55. Evolución de los niveles del agua subterránea en los acuíferos Cuaternario, Plioceno y Messiniense en la zona de San Javier. Las flechas indican el sentido del gradiente hidráulico vertical. Los datos iniciales son estimados.

Antes de la introducción de los valores se ha procedido a realizar un breve chequeo de posibles valores erróneos e incoherencias. Una vez terminada esta fase de corrección, se han introducido en el modelo etapas o pasos de **1 año**, para determinar el comportamiento del sistema en estado estacionario y transitorio.

Las capas acuíferas superiores de edad Cuaternaria en la actualidad, tienen cargas hidráulicas más elevadas que los estratos acuíferos más profundos, que es una situación lógica para un acuífero sometido a explotación intensiva, pero opuesta con la situación que se tenía hace un siglo.

Se observa una inversión del gradiente hidráulico vertical entre las capas, siendo cambiante la dirección del flujo entre los acuíferos a través de pozos profundos, hacia abajo o hacia arriba, correspondiente a cada una de estas dos fases opuestas. Durante los últimos 20 años de datos (1995-2015), los niveles de agua subterránea se pueden considerar estables con mediciones de 10-15 msnm (Cuaternario) y 15-25 mbnm (Plioceno), y con niveles irregulares pero de tendencia descendente 55-80 mbnm (Messiniense) (Fig. 56).

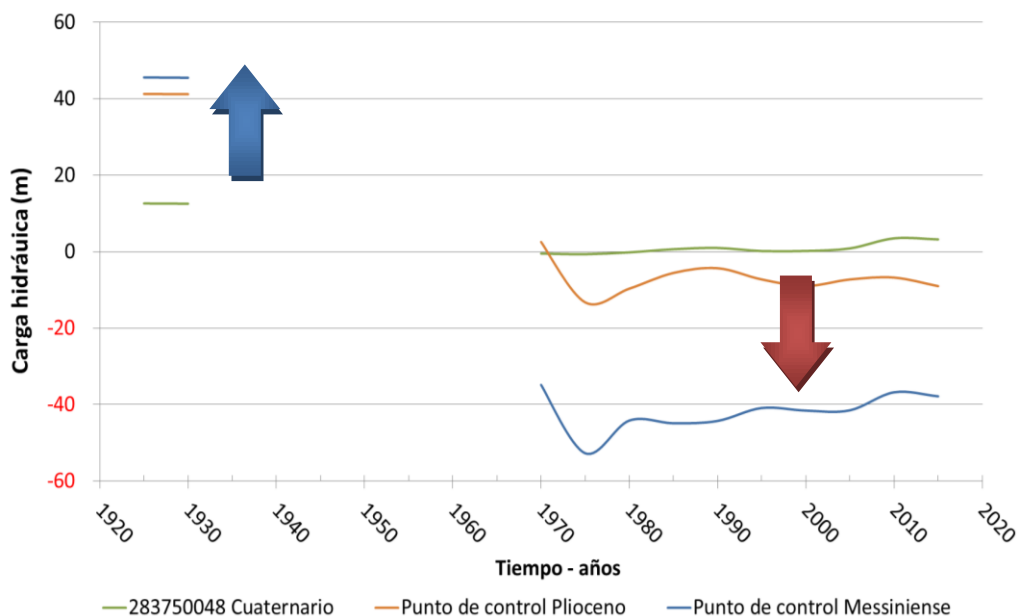


Fig. 56. Evolución de los niveles del agua subterránea en los acuíferos Cuaternario, Plioceno y Messiniense en la zona de San Pedro del Pinatar. Las flechas indican el sentido del gradiente hidráulico vertical. Los datos iniciales son estimados.

A pesar de las bajas cargas de los niveles confinados, no hay evidencia de intrusión de agua de mar a tener en cuenta (Baudron et al., 2014). En la figura 56 puede observarse también la inversión del gradiente hidráulico en la zona Noreste del Campo de Cartagena, pero con evoluciones algo distintas que las contenidas en la figura 55.

4.5.3.8. Recarga

Para introducir los datos de recarga en el modelo de flujo, se han realizado mapas zonificación por UDAs y tipo de cultivo. En este mapa se han diferenciado tres zonas distintas: La primera con recarga natural procedente de precipitaciones de lluvia, una segunda procedente de recarga por retornos de riego para cultivos hortícolas procedentes de la UDA 58, y otra tercera similar para cultivos perennes y frutales procedente de las UDAs 57 y 75 (Fig. 57).

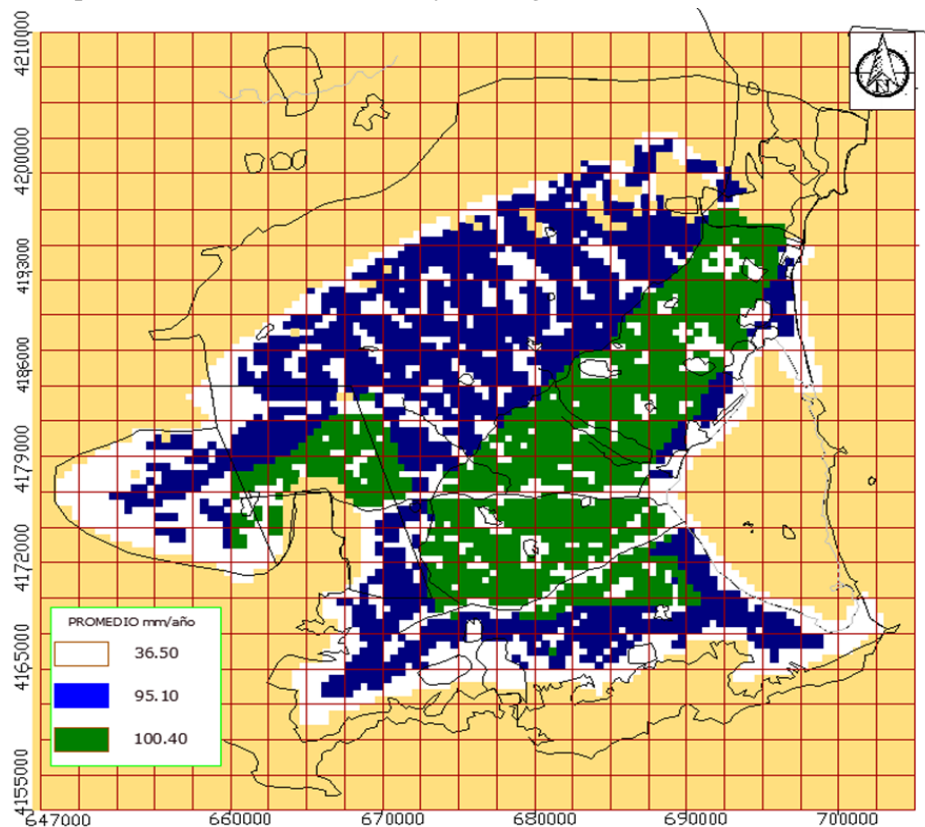


Fig. 57. Mapa de recarga por UDAs. Por colores: Blanco, recarga natural; Azul, UDAs 57 y 75; verde, UDA 58. Valores medios de recarga en mm/año para el periodo 1925-2018.

Esta zonificación representa el tipo de cultivo preferente, lo que significa que puede haber otro tipo de cultivo en una determinada zona que no sea el preferente, pero por homogeneizar y simplificar a la hora de introducir datos en el modelo, se han seleccionado únicamente dos zonas de cultivos preferentes y otra tercera, preferentemente sin cultivos.

Para el cálculo de la recarga, se ha partido de un valor de índice de precipitación anual media de 310 mm/año (Jiménez-Martínez et al., 2012), que proporciona una infiltración útil que varía entre 17 mm/año (Baudron et al., 2014), y 50 mm/año propuesto por estudios del IGME (IGME, 1991), y definidos como la primera estimación de recarga moderna para el acuífero Cuaternario

La recarga natural procedente de la precipitación (I_p) será de 34 mm/año, algo inferior a los 50 mm/año que propone el IGME en sus estudios iniciales de finales del siglo XX (IGME, 1991), debido a que consideraciones posteriores aconsejan rebajar esa cifra debido al actual cambio climático tendente a la reducción de lluvias en España, más acusado en zonas semiáridas (Alcalá & Custodio, 2015). También, otros estudios consideran que al cambiar el régimen de precipitación generalmente con lluvias torrenciales, se están obteniendo datos recientes donde los valores de precipitación anual están superando la media establecida en 310 mm/año, por lo que se considera que para periodos recientes del siglo XXI, debiera de elevarse en cierta medida el valor de recarga natural a establecer en estudios hidrogeológicos de esta zona. Por todo ello, en el presente estudio se establece una recarga natural variable y ascendente, con un valor inicial de 34 mm/año en 1925 y un valor final para 2018 de 38 mm/año.

En el modelo de flujo realizado se ha introducido una recarga por precipitación (I_p) promedio de 36.50 mm/año, lo que supone una reducción de la tasa de retorno de lluvia establecida por otros estudios, y en la línea argumental de trabajos que rebajan esas cifras iniciales de 50 mm/año, como el realizado por Baudron et al. (2014), Jiménez Martínez et al. (2012), o sobre la infiltración efectiva de Alcalá y Custodio (2014, 2015).

Para capas inferiores al Cuaternario, la recarga procedente de la precipitación (I_p) será también de 36.50 mm/año, y se realizará a través de sus afloramientos según el IGME (IGME, 1991). Según otros estudios, la recarga procedente de la precipitación (I_p) para los afloramientos de tramos acuíferos

inferiores semi-confinados y que están formados por areniscas principalmente, será de 23 mm/año, según Jiménez-Martínez et al. (2012). En la presente tesis doctoral, la recarga procedente de precipitación (I_p) será variable en el tiempo, desde 34 a 38 mm/año, y tendrá el mismo valor asignado para los afloramientos de cualquier tramo acuífero incluido en los límites del área de trabajo.

Para la introducción de la recarga procedente del retorno de riego (I_r) debido a que la dispersión de valores existentes, se ha realizado un estudio previo más exhaustivo y se ha examinado documentación sobre los diferentes estudios a este respecto, sobre todo con los datos más recientes de los últimos 40 años. El IGME argumentaba que el valor estaba en torno a los 25 mm/año (IGME, 1991-1994), y la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) según un estudio realizado por UDAs donde el valor medio era de 50 mm/año (Tabla 5).

Según argumenta Baudron (2011, 2013), el (I_r) vendrá dado según varios parámetros, como las UDAs y el tipo de cultivo que tengamos en esa zona. También García Aróstegui et al. (2012), promueve una solución similar a la determinada por Baudron (2013), sobre la zonificación por tipo de cultivos

También otros estudios estiman un valor promedio de 210 mm/año para la recarga de los retornos de riego locales (Jiménez-Martínez et al., 2009; Alcolea et al., 2019), que generan un tasa de recarga para toda la zona estudiada de 80 mm/año. Otros estudios como el realizado por García-Aróstegui et al. (2012), aportan datos de índices de recarga locales para cultivos hortícolas de $I_r = 397$ mm/año, para cultivos perennes de 201 mm/año y para árboles frutales de 194 mm/año. Para la generación del mapa de recarga expuesto en la figura 57 se han utilizado diferentes índices locales según el tipo de cultivo predominante, con un valor promedio de recarga local por retornos de riego (I_r) empleados para la zona regable CRCC (UDA 58) de 64 mm/año para el periodo 1925-2018 y 100 mm/año para el periodo 1975-2018, y para las UDAs 57 y 75, valores de 59 y 90 mm/año respectivamente. El valor promedio de recarga total local será de 95 mm/año para el periodo completo de estudio (1925-2018) para la zona regable CRCC (UDA 58), y de 100 mm/año para las UDAs 57 y 75, excepto en el caso de cultivos agrícolas regados por lluvia, donde sólo habrá recarga natural pluviométrica (Fig. 57).

En la figura 58 puede observarse como ha evolucionado la recarga por retornos de riego a lo largo del periodo de estudio, con una cierta proporcionalidad con la evolución de la superficie de regadío (Fig. 18), y con una

estabilización y ligero descenso en sus valores en los últimos 30 años, fruto de las mejoras tecnológicas en los sistemas de riego fundamentalmente.

Para el valor promedio aplicado en el modelo de recarga natural ha sido de 36.50 mm/año, y el volumen de recarga anual por lluvia obtenido por el modelo es de 47.00 hm³/año. La demanda bruta del estudio varía según el periodo temporal, así para el tramo 2000-2018, se ha considerado 5,800 m³/ha/año para una zona de cultivo neto de 43,071 ha, ligeramente inferior a 6,500 m³/ha/año (Rubio, 1928; CHS, 2014), o 6,000 m³/ha/año (CHS, 2016). Otros estudios y revisiones sobre consumos como la Comunidad de Regantes de Campo de Cartagena (CRCC) aconsejan reducir la demanda entre 5,500-5,700 m³/ha/año. El volumen anual total de recarga es de 117.05 hm³/año (88 mm/año) para el periodo 2000-18, y 112.50 hm³/año (84 mm/año) para el periodo 1925-2018, valores en torno al 5 % superiores a los proporcionados en modelos similares (84 mm/año en Senent et al., 2009), y a valores obtenidos por otras metodologías (80 mm/año en Baudron et al., 2013).

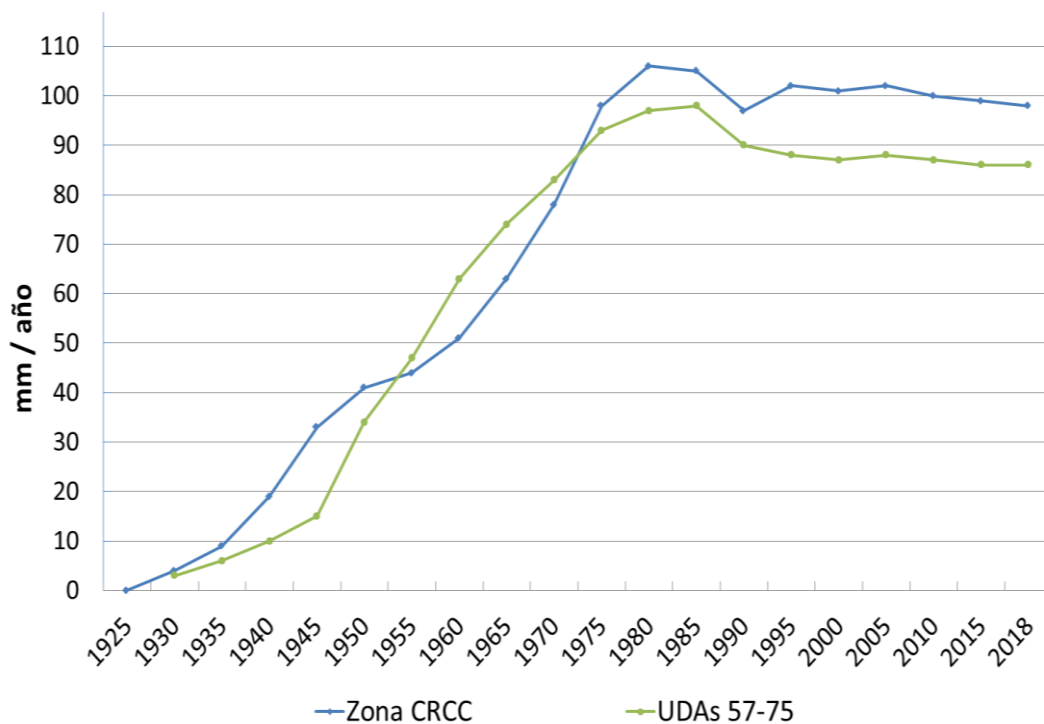


Fig. 58. Gráfico de la evolución de recarga a lo largo del periodo de estudio.

4.5.3.9. Extracciones

Debido a la existencia de un número considerable de pozos de bombeo, unos 2,102 pozos censados y una cantidad indeterminada para los no censados, se ha realizado una simplificación inicial a 650 pozos que bombean del sistema acuífero, y otra simplificación más profunda, según lo explicado en el apartado 3.8.1 del presente trabajo. Una vez realizada la simplificación espacial de pozos, quedan finalmente 242 perforaciones, todas ellas georeferenciadas en la nueva cuadrícula generada de 2,500x2,500 m (Fig. 59).

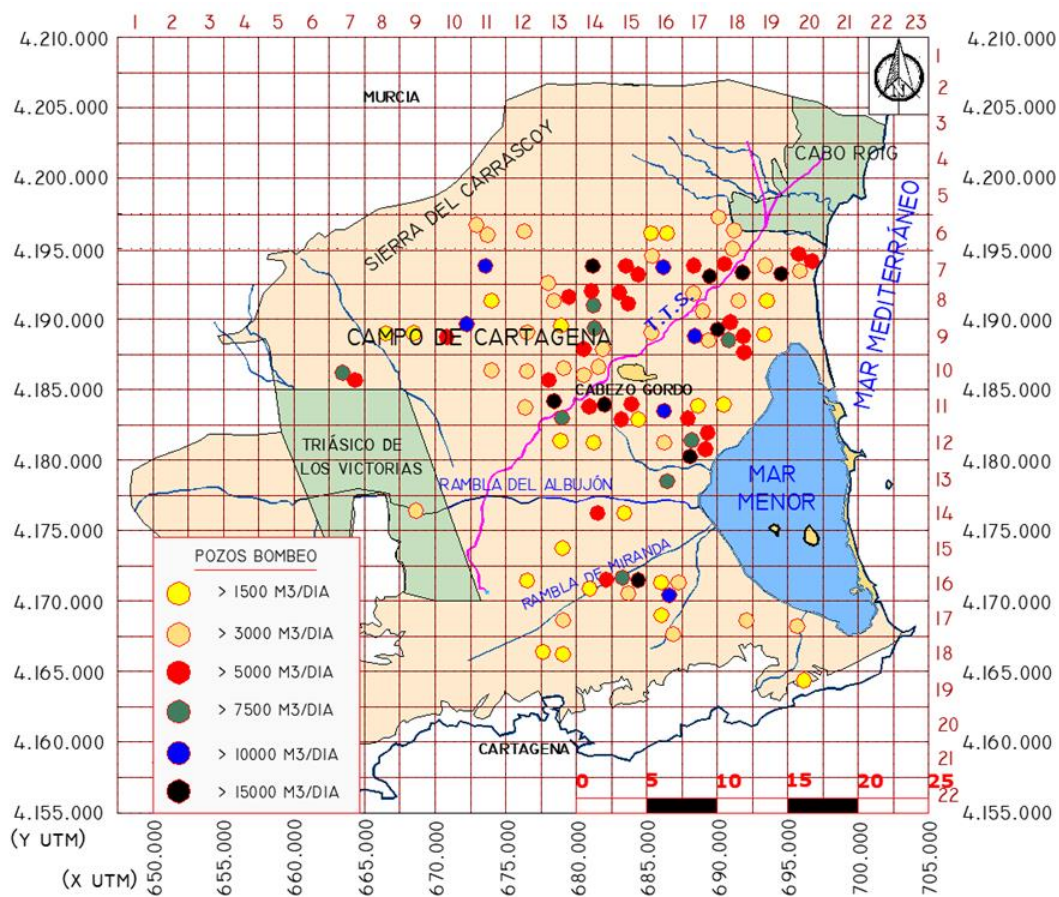


Fig. 59. Mapa de pozos de bombeo de agua subterránea, con cuantificación de la extracción por tramos y para volúmenes mayores a 1,500 m³/día.

De estos 242 pozos repartidos en las cuatro capas acuíferas de las que se extrae agua, se ha generado una explotación por bombeo para todo el periodo a estudiar, con valores iniciales orientativos de extracciones actualizadas de

acuerdo con el PHCS (2016), que estima unas extracciones de 88.00 hm³/año para el periodo 2000-2018, aunque todavía existe incertidumbre sobre la cuantificación exacta de estos valores extractivos de agua subterránea, ya que no hay datos más precisos disponibles. Otros estudios consultados tienen valores dispares, aunque los más recientes tienen valores entre los 80 y 104 hm³/año para periodos de tiempo de los últimos 30 años.

En la figura 59 se puede observar la situación de los nuevos pozos reubicados con volúmenes extractivos mayores de los 1,500 m³/día, considerando que una gran parte de ellos tienen valores inferiores y colocarlos en el dibujo hubiera supuesto una masificación de la información. Es por ello, que de esta manera, clasificando por intervalos de volúmenes extraídos por día y por colores, queda clarificado los pozos de cierta relevancia por su volumen sumatorio acumulado en la simplificación espacial realizada. Del análisis de la información contenida en el mapa anterior, podemos considerar que existen varias zonas con importantes extracciones como son al Oeste de San Javier, del Pilar de la Horadada y de Los Alcázares, al Oeste y Sur de Cabezo Gordo, en la zona de Balsicas y al norte de este hacia Sucina, al Norte de Torre Pacheco y al Este de la Rambla de Miranda entre La Aparecida y el Algar.

Según la información disponible sobre la puesta en marcha del Trasvase Tajo-Segura en 1979, y partiendo de la incertidumbre que rodea la cuantificación de los bombeos en aquella época al no disponer de mediciones recientes, los valores contenidos en varios trabajos cifran una extracciones por bombeo con un volumen de 21 hm³/año (IGME, 1991), la Confederación Hidrográfica del Segura en torno a 88 hm³/año (CHS, 2016), y otro trabajo reciente con valores cercanos a 104 hm³/año, pero incluyendo los bombeos del Triásico de los Victorias (Jiménez-Martínez et al., 2016). Estos bombeos en los años siguientes al TTS, sufren aumentos en los períodos de sequía con volúmenes de extracción en torno a los 125 hm³/año. Se parten de esas cifras para una primera introducción de datos en el modelo antes del calibrado.

El modelo de flujo se ha calibrado con volúmenes de extracción para el periodo 2000-2015 algo superiores a los 92 hm³/año, y para la década entre 1970-1980 justo antes de la puesta en marcha del Trasvase Tajo-Segura, con valores punta en torno a los 182 hm³/año, ligeramente más altos que los valores establecidos en otros estudios y datos de Organismos Gubernamentales, que los

cifraban entre los 125-140 $\text{hm}^3/\text{año}$, como se ha comentado en el párrafo anterior. En la figura 60 se representan los valores obtenidos en el modelo para la explotación por bombeo por capas acuíferas. Se puede observar claramente el descenso de volúmenes con la entrada del TTS, varias puntas de extracciones coincidentes con varios periodos de sequía, como por ejemplo 1995 y 2005.

Entre el total de los pozos de bombeo censados y no censados, existen pozos antiguos e inactivos, generalmente deficientemente construidos, que generan comunicación hidráulica entre las secciones del acuífero, causando a veces contaminación del agua de un tramo acuífero a otro (Lacombe et al., 1995; Jiménez-Martínez et al., 2011).

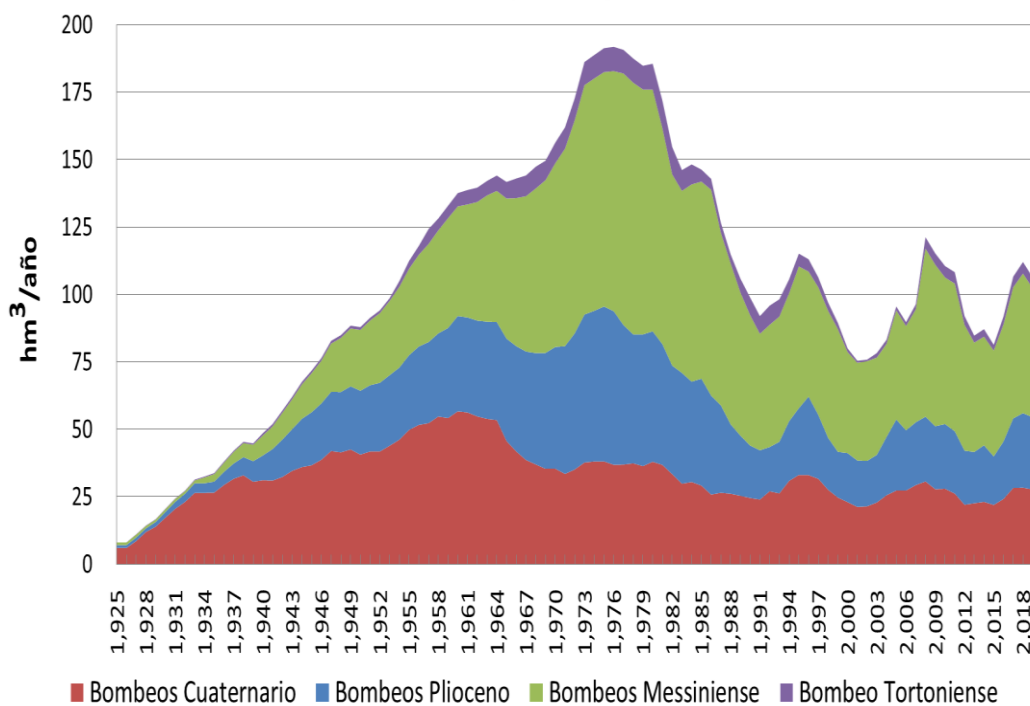


Fig. 60. Gráfica de la evolución temporal de las extracciones de agua subterránea por bombeo y por cada tramo acuífero para el modelo calibrado, con la cuantificación de la extracción por tramos en $\text{hm}^3/\text{año}$, mediante superficies superpuestas.

Para analizar la repercusión que tendrá la implantación del sistema de simplificación espacial en el sistema acuífero, y en particular, con respecto a los puntos de observación mediante la generación de un nuevo mapa de bombeos, se

han realizado dos simulaciones con un análisis de sensibilidad asociado. Una primera con respecto a las ubicaciones dentro o fuera de las celdas del modelo de 500x500 m, y sobre las celdas colindantes dentro de la nueva unidad de simplificación de 2,500x2,500 m; y otra segunda simulación donde se evalúa el porcentaje de variación sobre los resultados, al agrupar dentro de la celda de 2,500x2,500 m., los pozos de bombeo que una vez georeferenciados queden dentro de la citada nueva celda. De estas dos simulaciones se determinará si esta metodología es válida, y si tiene o no un efecto negativo sobre los resultados.

4.5.4. Ejecución del modelo

Una vez se introducen todas las entradas o inputs iniciales en el modelo de flujo, ya se está en disposición de realizar una primera ejecución de la simulación configurada en el modelo mediante el motor seleccionado para el cálculo, que en este caso, ha sido el Modflow vs. 2005 del USGS.

Esta primera ejecución del modelo se ha realizado para un estado estacionario natural, es decir, con un medio no antropizado y donde en las capas estudiadas, se observan algunas celdas secas en la zona de Cabezo Gordo, son fruto de la interconexión hidráulica de las capas acuíferas a través del macizo Pérmico-Triásico (Fig. 61), También se obtienen gradientes hidráulicos elevados al Sur del ámbito estudiado junto a la Sierra de Cartagena-La Unión, y al Norte en la Sierra del Carrascoy, donde aparece el secado de celdas.

Para la ejecución del modelo es necesario establecer una configuración del módulo Run del software para la realización de simulaciones. En este caso se ha realizado la ejecución del modelo con la siguiente configuración:

- Motor de cálculo del flujo (Flow Engine): USGS MODFLOW 2005 from SWS.
- Etapas del cálculo temporal (Time Step): 1 año.
- Opciones de carga inicial (Initial Head Options): Usar carga hidráulica específica para cada capa.
- Paquete de configuración de solución (Solver Package): Se ha usado el paquete de solución por defecto WHS, que es el desarrollado por Schlumberger Water Services.

- Opciones de recarga: La recarga se aplica sobre la capa especificada.
- Transmisividad interblock entre capas: Media armónica.
- Configuración de capas: Capa 1, No confinado; Capas 2 a 7, Confinado, no confinado variable; Capas 8 y 9, Confinado constante.
- Valor de carga en celda seca: 1×10^{-30}
- Anisotropía: Relación $K_x / K_y = 1$.
- Precisión de cálculo: Sencilla.

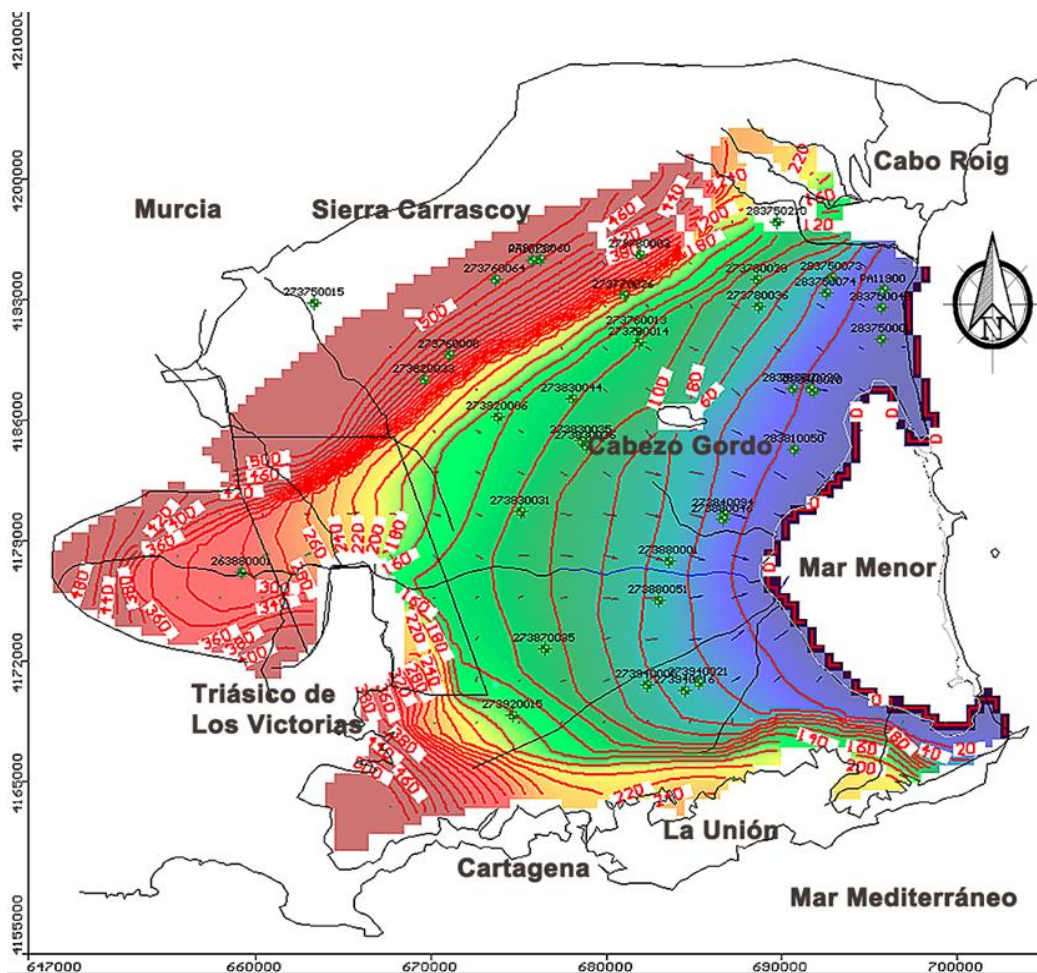


Fig. 61. Vista del mapa generado para la carga hidráulica en la ejecución del modelo, con isopiezas y superficies DEM para un estado estacionario antes de calibrar el modelo. Las líneas isopiezas en rojo son cada 25 m.

4.6. CONTAMINACIÓN CRUZADA DEL ACUÍFERO A TRAVÉS DE LOS POZOS

La transferencia de flujos contaminantes entre acuíferos a través de sondeos mal contruidos o abandonados (Lacombe et al., 1995; Timms y Acworth, 2002; Jiménez-Martínez et al., 2011; Baudron et al., 2014) tiene un gran impacto potencial en la generación de flujos de contaminantes entre acuíferos superiores no confinados y acuíferos profundos confinados (Jiménez-Martínez et al., 2011; Baudron et al., 2013), debido a la contaminación por agroquímicos producidos por los retornos de riego (Baudron et al., 2013, 2014). La fuerte demanda de agua para riego en periodos determinados, ha provocado la instalación de pequeñas plantas de desalinización generalmente de osmosis inversa, lo que a su vez ha provocado vertidos de salmuera en el tramo Cuaternario, deteriorando la calidad de este agua (Jiménez-Martínez et al., 2016) (Fig. 62).

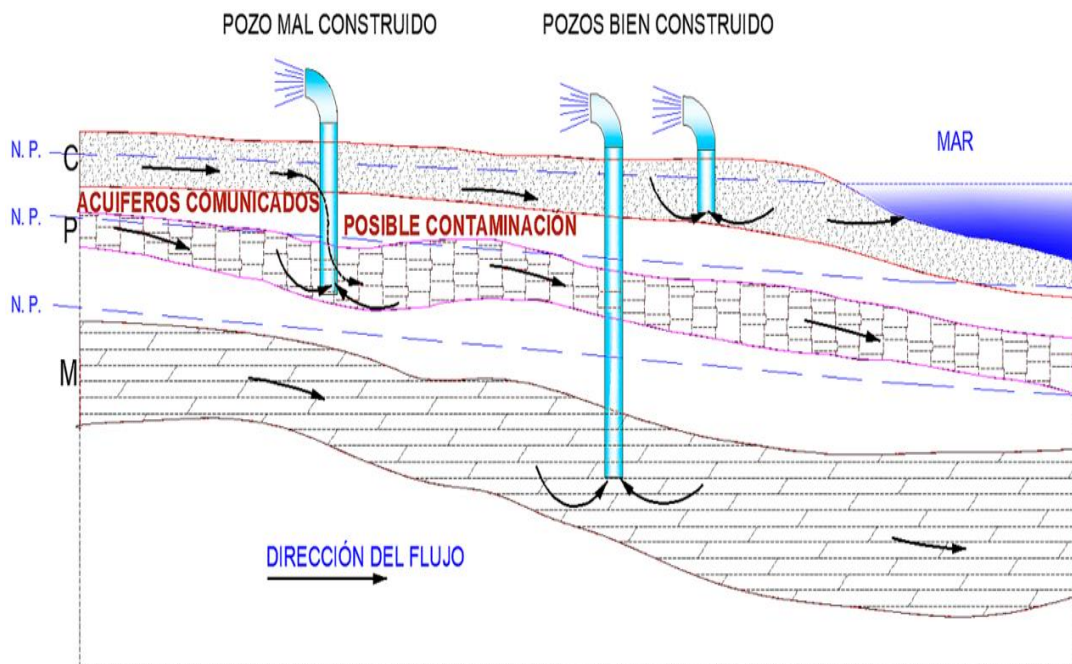


Fig. 62. Esquema de contaminación de acuíferos a través de pozos mal contruidos.

Se ha llevado a cabo una simulación con el modelo para cuantificar de forma aproximada, qué parte del flujo se transmite a través de fallas, discontinuidades geológicas y horst como Cabezo Gordo, y qué parte del flujo se

mueve a través de perforaciones mal construidas o abandonadas. Debido a la enorme dispersión geográfica de los pozos existentes ha sido necesaria una simplificación para reducir el número de pozos introducidos en las capas del modelo, y operar en una serie de celdas como zonas de concentración de pozos en acuitardos y capas de acuíferos. De esta forma, se pretende realizar una primera aproximación de la cuantificación del flujo a través de los pozos mediante teorías similares a las de Lacombe et al. (1995), y los ensayos IGME (1994).

El modelo ha sido ejecutado con los acuitardos atravesados solamente por el horst de Cabezo Gordo con una conductividad hidráulica de alrededor de 0.25 m/d, y contactos de borde en el Triásico de los Victorias, al norte de la Sierra de Cartagena-La Unión y afloramientos de la Sierra de Carrascoy, con una conductividad hidráulica de alrededor de 0.05 m/d. El efecto de los pozos de bombeo sobre el sistema hídrico, se ha realizado mediante celdas en áreas con alta densidad de pozos, con una conductividad hidráulica media de 2.3 m/d. También se ha llevado a cabo una ejecución modelo con los acuitardos en su estado natural, sin tomar en cuenta los pozos mal construidos o abandonados, para poder valorar el grado de afección al conjunto del sistema acuífero y el impacto cuantitativo que tienen sobre el flujo vertical entre las capas del acuífero.

4.7. DESCARGA LATERAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

En la zona costera de Campo de Cartagena donde se encuentran la laguna Mar Menor y el Mar Mediterráneo, sólo están presentes los acuíferos Messiniense, Plioceno y Cuaternario, aunque por razones estratigráficas y tectónicas, las relaciones hidráulicas entre estos mares con esta masa de agua subterránea tiene lugar principalmente a través del acuífero Cuaternario. Debido al aumento gradual de los niveles piezométricos de la capa Cuaternaria en los últimos años, se está produciendo un aumento en la descarga de agua subterránea a la laguna Mar Menor, con el consiguiente efecto negativo que puede producir al ecosistema el posible aumento de la entrada de compuestos como nitratos, y otros elementos agroquímicos procedentes de la fertilización el terreno (Baudron et al., 2015).

En el modelo de flujo se ha introducido una línea de carga constante 0 a lo largo del contacto entre la capa Cuaternaria y la laguna Mar Menor y el Mar Mediterráneo. Esta línea fronteriza se ha dividido en tres partes, dos para el borde

del Mar Menor y otra para la costa Mediterránea de San Pedro del Pinatar y Pilar de la Horadada hasta Cabo Roig. Las dos partes del Mar Menor se corresponden una primera entre el borde Norte y la Rambla del Albujón, y la otra se corresponde al borde Sur hasta la Rambla del Albujón. El modelo calcula el flujo entre la zona terrestre y la zona marítima, en ambas direcciones de entrada y de salida. Se han confirmado episodios de intrusión marina en la década de los 60 y 70, y aún persisten pequeños focos

Finalmente, se han introducido las diferentes capas hasta la sección Messiniense bajo el Mar Menor y el Mar Mediterráneo, para comprobar si hay una transferencia de flujo entre dos capas y las aguas marinas.

4.8. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL MODELO

El buen ajuste del modelo se evaluó cuantitativamente utilizando el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y el error cuadrático medio (NRMSE) normalizado y utilizando gráficos de series temporales. R^2 , RMSE y NRMSE se calcularon a partir de las siguientes ecuaciones:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (hm - \overline{hm})x (hs - \overline{hs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (hm - \overline{hm})^2 x (hs - \overline{hs})^2}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (hm - hs)^2}{n}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$\text{NRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{h_m^{\max} - h_m^{\min}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

donde n es el número total de observaciones, y h_m y h_s , son los valores observados y simulados de la carga hidráulica del acuífero respectivamente. $h_m^{\max} - h_m^{\min}$ es la diferencia máxima en los valores de carga observados. Si el valor de R^2 es cercano a 1, indica una buena correlación entre la carga simulada y la observada. El RMSE varía desde el valor óptimo de 0 hasta un valor positivo mayor.

V - RESULTADOS

V - RESULTADOS

5.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO.

Se han utilizado 37 pozos de observación para la calibración del modelo, con datos piezométricos obtenidos de las bases de datos del IGME y CHS (Fig. 46). Se realizó una simulación de los últimos 93 años, con su origen en 1925. El estado estacionario simula el estado original de los acuíferos en 1925, antes de la antropización del medio causada por la explotación intensiva mediante el bombeo extractivo.

La calibración del modelo suele ser un proceso iterativo que intenta ajustar mediante valores de parámetros hidrogeológicos, que las diferencias entre las variables calculadas por el modelo y las mediciones en el campo sean lo más pequeñas posibles (Gebreyohanes et al., 2017). El método utilizado para la calibración del modelo ha sido el de prueba-error, siendo los parámetros más sensibles la recarga y la conductividad hidráulica, y se han utilizado ambos para conseguir su calibración. También ha sido necesario calibrar algunas zonas mediante la modificación de los valores de las extracciones mediante bombeo inicialmente previstas, ya que solamente con valores hidrogeológicos no era posible su calibrado, teniendo en cuenta que no se dispone de registro histórico de estas extracciones. Modflow mediante su herramienta PEST también calibra el modelo de manera automática, pero al final se ha optado por el método de prueba-error, debido a la dispersión y escasez de datos sobre las extracciones por bombeo donde con PEST es complicado de ajustar.

5.2. CALIBRACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO.

La calibración del modelo para un estado estacionario es un proceso iterativo, donde se inicia un ajuste capaz de reproducir las condiciones y situaciones que tuvieron las aguas subterráneas antes del comienzo de la explotación del acuífero en 1925. Las condiciones de equilibrio para un estado estacionario, se consiguen cuando la cantidad de agua que recarga un acuífero es

similar a la cantidad de descarga en otras zonas y la carga hidráulica es más o menos constante a lo largo del tiempo (Freeze & Cherry, 1979).

La calibración para un régimen de estado estacionario se consigue mediante los parámetros de la conductividad hidráulica y la recarga. Durante el proceso de calibración de este modelo, el principal parámetro hidrogeológico del modelo que se ajustó fue la conductividad hidráulica (K); aunque también se aplicaron pequeños ajustes a la recarga. Los resultados muestran un buen ajuste de los datos obtenidos para el estado estacionario entre los niveles observados en las secciones del acuífero y los niveles obtenidos por el modelo como puede observarse en la figura 63.

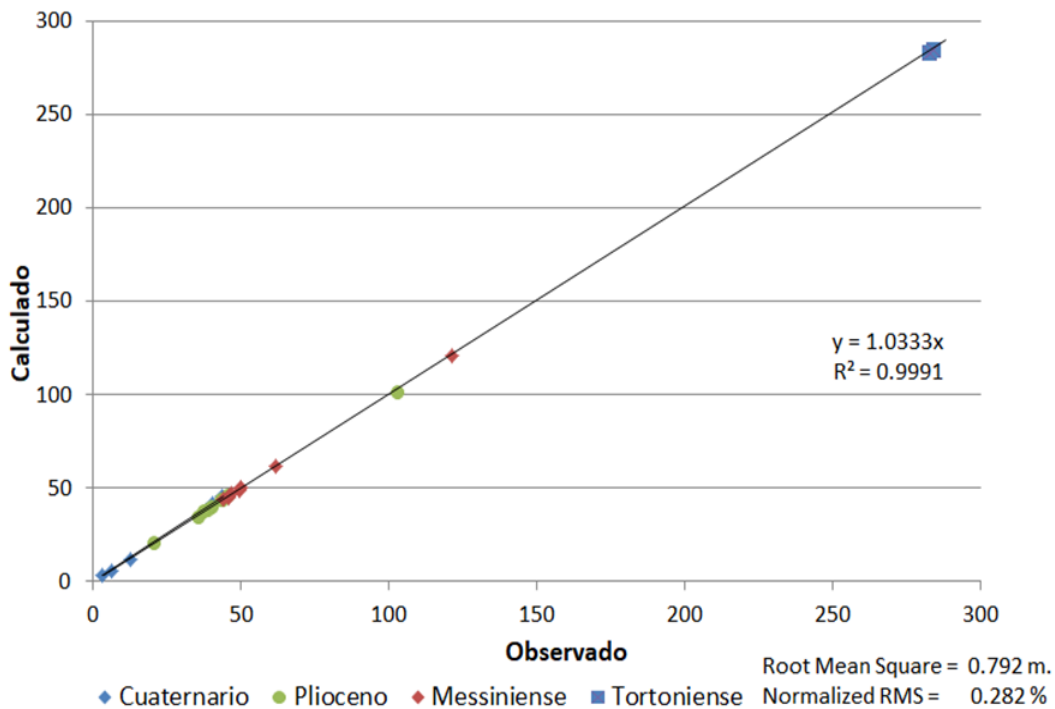


Fig. 63. Gráfico de la calibración del modelo en estado estacionario con las cargas hidráulicas calculadas versus observadas.

El coeficiente de correlación (R^2) para todo el acuífero multicapa, tiene un valor de 0.999, el Root Mean Squared Error (RMSE) de 0.792 m, el Standard Error Estimated (SEE) de 0,157 m, y el RMSE normalizado de 0.282%. Esto valida los parámetros hidrogeológicos calibrados y permite que el modelo desarrollado sea utilizado para objetivos de predicción. En la tabla 11, se han dispuesto los datos

por cada capa y por todo el conjunto del acuífero multicapa.

Tabla 11. Variables de ajuste en la calibración para el régimen estacionario.

| | Capa | Qt | Lt | Vlv | Ultc | Global |
|----------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Nº puntos observación | 8 | 12 | 14 | 3 | 37 |
| | Correlation Coefficient | 0.999 | 0.999 | 0.980 | 0.998 | 0.992 |
| | Root Mean Squared Error | 0.225 | 0.605 | 0.612 | 0.190 | 0.792 |
| VARIABLE | Normalized RMSE % | 0.231 | 0.706 | 9.071 | 19.008 | 0.282 |
| | Standar Error Estimated | 0.044 | 0.204 | 0.190 | 0.004 | 0.157 |
| | Residual Mean | -0.202 | -0.184 | -0.293 | 0.190 | 0.112 |
| | Absolutal Residual Mean | 0.202 | 0.449 | 0.454 | 0.190 | 0.608 |

5.3. CALIBRACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO.

Los niveles piezométricos introducidos en el modelo para el inicio del estado transitorio, son iguales a los niveles del estado estacionario antes de la antropización del medio, aunque es sabido que en el año 1925, ya existía una agricultura tradicional que extraía agua de pozos artesianos principalmente, pero se estima para este trabajo, que el volumen de extracciones era menor que la recarga natural de la capa Cuaternaria. Posteriormente, este modelo se ha ajustado a un régimen transitorio, donde se utilizan los datos obtenidos para la explotación del acuífero. En el caso del calibrado en los regímenes transitorios, junto con la conductividad (K), se debe considerar el coeficiente de almacenamiento (S_y), donde se debe evaluar la admisibilidad de los parámetros del modelo calibrado, así como, la bondad del ajuste entre la carga hidráulica observada y la calculada por el modelo.

En el período incluido para el estado transitorio, existe una evolución gradual y creciente de las extracciones por bombeo en Campo de Cartagena desde

1925 hasta 1980. Esta tendencia creciente cambia con la puesta en marcha del Trasvase Tajo-Segura, ya que esta agua superficial comenzó a ser utilizada para abastecer la fuerte demanda agrícola que existía en ese periodo del siglo XX.

La tabla 12 muestra los valores una vez calibrados de los parámetros hidrogeológicos que han intervenido en la calibración, con valores mínimos y máximos debido a la heterogeneidad de las capas permeables. Los pozos contenidos en la figura 46 se han utilizado para evaluar las variaciones piezométricas de este acuífero y en estudios previos, como el realizado por el IGME (1991), o por Baudron et al. (2014).

Tabla 12. Parámetros calibrados para el régimen transitorio (1925-2018).

| Capas | K (m/día) (Min/Max) | Ss (1/m) (Min/Max) | P (hm ³ /año) (media) |
|------------------|------------------------|--|-------------------------------------|
| Cuaternario | 0.01/35 | 1.5·10 ⁻³ /2.0·10 ⁻³ | 32.53 |
| Plioceno | 0.01/7 | 5.5·10 ⁻⁴ /1.2·10 ⁻³ | 25.42 |
| Messiniense | 0.01/10 | 2.0·10 ⁻⁴ /5.5·10 ⁻⁴ | 41.07 |
| Tortonense | 0.01/3.5 | 5.5·10 ⁻⁴ | 3.80 |
| Margas Acuitardo | 3·10 ⁻⁸ | 5·10 ⁻⁷ | - |

K: Conductividad hidráulica; Ss: Coeficiente de almacenamiento; P: Extracciones por bombeo.

Como se puede observarse en la tabla 12, además de los parámetros K y Ss, ha sido preciso calibrar las extracciones por bombeo, debido a la incertidumbre asociada que tenían los valores introducidos en el modelo antes de su calibrado, y puesto que modificando únicamente parámetros hidrogeológicos no era posible el calibrado, por lo que ha habido que modificar la explotación por bombeo inicialmente prevista.

Los valores de las extracciones por bombeo para la década de los años 50, sufre un fuerte aumento hasta el inicio de los años 60, donde se estabilizan en cierta medida, para volver a sufrir otro fuerte aumento hasta mediados de la década de los años 70, y empieza descender de manera significativa a finales de

esa década con la entrada en funcionamiento del Trasvase Tajo-Segura y la entrada en el sistema de aguas superficiales (Fig. 64). Además, existen otros dos periodos concretos de sequía, en 1995 y en 2005-2006, donde los valores teóricos introducidos inicialmente en el modelo han resultado ser demasiado elevados, corrigiendo el modelo a la baja los valores establecidos, pero donde se siguen apreciando el repunte que sufrieron las extracciones de aguas subterráneas en esos periodos. Se establece para este siglo XXI unas extracciones medias de 92 hm³/año.

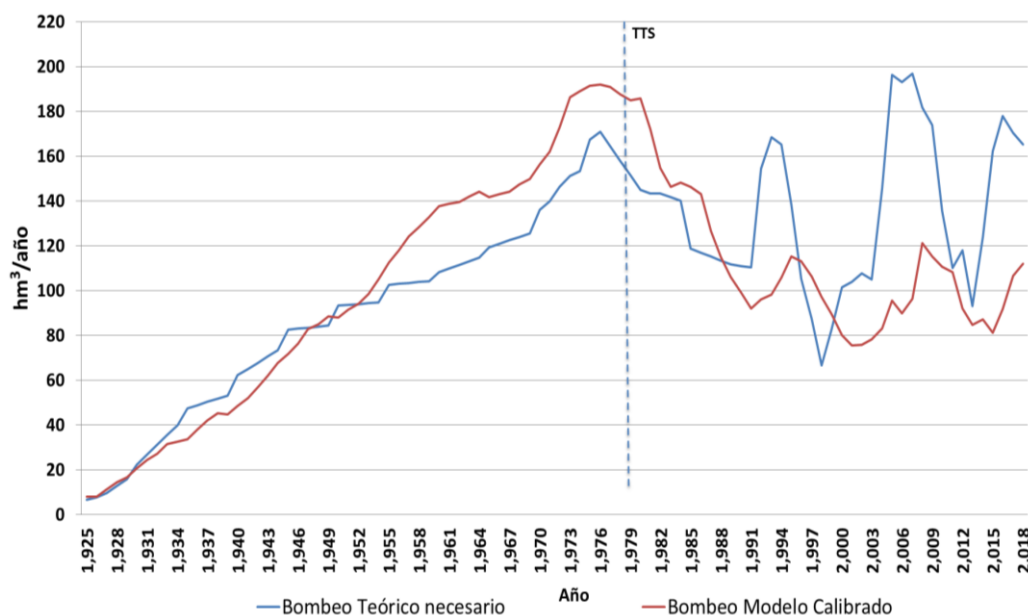


Fig. 64. Resultados de la calibración de la curva de explotación por bombeo, comparada con la curva del bombeo teórico necesario para satisfacer la demanda establecida.

También puede observarse en la Figura 65, el período elegido para la calibración del modelo, siendo en este caso el intervalo temporal entre 1970 y 2005, habiéndose estimado la curva que une los valores entre 1925 a 1970. Como se ha comentado anteriormente, en la calibración del estado transitorio se han utilizado tres parámetros: Conductividad hidráulica en algunas áreas, coeficiente de almacenamiento y extracciones de agua mediante bombeo. Esta última variable ha sido muy laboriosa de calibrar para algunas zonas donde existe cierta heterogeneidad local, reasignando volúmenes extractivos, así como, su

asignación a cada acuífero. Los ajustes de calibración se han realizado comparando los valores de carga hidráulica entre los datos disponibles y los calculados por el modelo (Fig. 65).

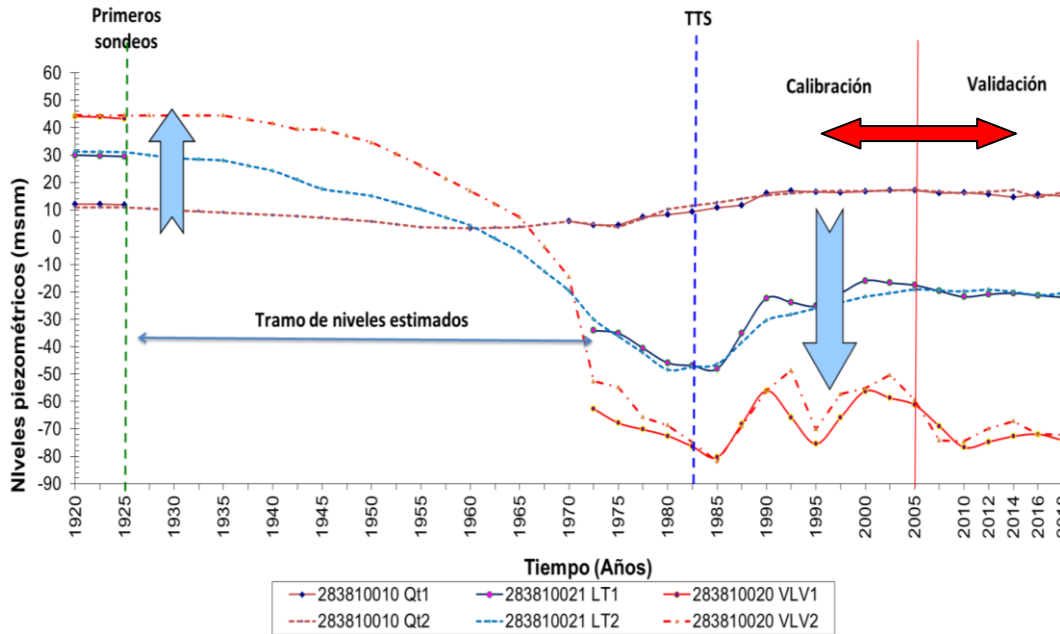


Fig. 65. Resultados de la calibración del modelo en estado transitorio, comparando la carga hidráulica observada y simulada en la zona de San Javier. a) Pozo (283810010) Tramo del acuífero Cuaternario. b) Pozo (283810021) Tramo del acuífero del Plioceno. c) Pozo (283810020) Tramo del acuífero Messiniense.

La comparación entre la carga hidráulica observada y la calculada, indica que existe un buen ajuste entre los contornos y la desviación máxima (Fig. 65), con valores globales del NRMSE (%) inferiores a 5 %. Por lo tanto, los parámetros hidrogeológicos calibrados son válidos y permiten que el modelo desarrollado, pueda ser utilizado para trabajos hidrogeológicos y simulaciones.

La calibración del modelo ha generado ligeras variaciones en los datos presentados inicialmente, tanto en parámetros hidrogeológicos, como en el régimen de bombeos de algunos periodos temporales o su ubicación geolocalizada debido a la simplificación espacial realizada para el bombeo. Se ha considerado calibrado cuando se ha alcanzado un buen ajuste con los 37 pozos de observación del modelo, consiguiendo un error residual promedio (SEE) de 0.194 m, una tasa de error (RMSE%) de 1.510% y un coeficiente de correlación (R2) de

0.989, como puede apreciarse en la tabla 13 realizada para los ajustes para cada diferente capa, así como, para el conjunto de todo el sistema acuífero de Campo de Cartagena denominado global. Cuanta mayor profundidad tiene la capa acuífera, mayor es el error cometido en el ajuste realizado.

Tabla 13. Variables de ajuste en la calibración para el régimen transitorio del periodo 1925-2005.

| ESTADO TRANSITORIO | | | | | | |
|--------------------|-------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | Capa | Qt | Lt | Vlv | Ultc | Global |
| VARIABLE | Nº puntos observación | 8 | 12 | 14 | 3 | 37 |
| | Nº puntos Referencias | 229 | 278 | 262 | 44 | 812 |
| | Correlation Coefficient | 0.999 | 0.995 | 0.970 | 0.973 | 0.989 |
| | Root Mean Squared Error | 1.790 | 4.770 | 8.096 | 3.371 | 5.595 |
| | Normalized RMSE % | 1.604 | 2.740 | 5.930 | 8.731 | 1.510 |
| | Standar Error Estimated | 0.101 | 0.225 | 0.500 | 0.521 | 0.194 |
| | Residual Mean | 0.774 | -1.987 | -0.526 | -1.502 | -0.712 |
| | Absolutal Residual Mean | 1.679 | 3.844 | 5.430 | 3.122 | 3.706 |

5.4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE FLUJO.

Después de la calibración, el modelo fue validado a distintos niveles de construcción del modelo, como el rango de validez de las hipótesis siendo las condiciones de uso las previstas inicialmente, reflejando bien los fenómenos de interés y observando la sensibilidad del modelo frente a parametrización del mismo, y se resuelve adecuadamente, mediante resultados ciertamente razonables utilizando la carga hidráulica observada desde 2005 a 2018 en los puntos de observación empleados en el modelo. En la tabla 14 se presentan los resultados de los criterios de evaluación del modelo para el periodo de validación

según lo especificado en el apartado 4.8 de la presente tesis, comparando estos con los datos de los periodos comprendidos entre 1925 y 2005 realizado para el calibrado, y con el periodo entre 1961 y 2005, que es el tramo temporal donde se tienen más datos piezométricos de los pozos de observación.

Se puede observar en la tabla 14 una comparativa de los resultados obtenidos para dos periodos de calibración, uno más general desde 1925 hasta 2005 (80 años), otro desde que se empiezan a tener datos oficiales entre 1961 a 2005 (44 años) y el periodo de validación comprendido entre 2005 a 2018 (13 años) donde los resultados obtenidos para este último periodo, son ligeramente peores que los obtenidos para los dos periodos de calibración realizados.

Tabla 14. Valores medios en el periodo de validación para el régimen transitorio.

| Parámetro de ajuste | Valores medios para el periodo de calibración 1925-2005 | Valores medios para el periodo de calibración 1961-2005 | Valores medios para el periodo de validación 2005-2018 |
|---------------------|---|---|--|
| R^2 | 0.997 | 0.995 | 0.972 |
| RMSE (m) | 5.681 | 4.293 | 6.831 |
| NRMSE (%) | 1.534 | 1.874 | 2.932 |
| SEE (m) | 0.198 | 1.001 | 1.615 |
| RM (m) | -0.712 | -0.278 | -1.600 |
| ARM (m) | 3.706 | 3.085 | 4.515 |

5.5. RESULTADOS EN ESTADO ESTACIONARIO.

Se realizó una simulación del estado estacionario del sistema sin antropizar con inicio en el año 1925, y se observaron niveles piezométricos entre 15 y 25 metros sobre el nivel del mar (msnm) en el acuífero Messiniense en la parte noreste del modelo y cerca de la costa, y entre 5 y 10 msnm en el acuífero Plioceno. Estos niveles de carga hidráulica se han generado en la parte confinada del acuífero, lo que indica que había niveles piezométricos por encima de la superficie del terreno en zonas cercana a la costa antes de que el medio fuera antropizado, incluso unos pocos kilómetros tierra adentro. En la tabla 15 de

balance hídrico se han generado casillas específicas para Cabezo Gordo, debido a la trascendencia que este Horst tiene en la comunicación hidrogeológica interna entre las diversas capas que componen este acuífero. El volumen de movimiento lateral del flujo de agua de estado estacionario son unos 11 hm³/año, y la tasa de transferencia vertical algo mayor de 5 hm³/año, y el flujo de agua a través de Cabezo Gordo esta en torno a los 7 hm³/año (Tabla 15).

Tabla 15. Resultados del balance hídrico del modelo de Campo de Cartagena en estado estacionario (hm³/año).

| Designación | Entradas | | | | Salidas | | | | | Balance Global |
|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|----------------|
| | LL | CG | TV | AL | CG | MMD | MD | TV | AL | |
| Cuaternario | 38.25 | 6.03 | 0.00 | 1.95 | 0.73 | 36.32 | 4.56 | 2.70 | 1.92 | 0.00 |
| Plioceno | 2.92 | 0.30 | 2.70 | 0.20 | 2.92 | 0.00 | 0.00 | 1.95 | 1.20 | 0.00 |
| Messiniense | 2.52 | 0.44 | 1.95 | 0.25 | 2.52 | 0.00 | 0.00 | 0.75 | 1.85 | 0.00 |
| Tortonense | 1.16 | 0.15 | 0.75 | 0 | 0.75 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.31 | 0.00 |
| Cabe. Gordo | 0.33 | 0.00 | 0.00 | 6.59 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 6.92 | 0.00 |
| Σ | 44.85 | 6.92 | 5.40 | 8.99 | 6.92 | 36.32 | 4.56 | 5.40 | 13.23 | 0.00 |

LL: LLuvias; CG: Transferencia Cabezo Gordo; TV: Transferencia Vertical; AL: Acuíferos Laterales y otros; E: Extracciones por bombeo; MMD: Descargas Mar Menor; MD: Descargas Mar Mediterráneo.

5.6. RESULTADOS EN ESTADO TRANSITORIO.

Debido a la existencia de una explotación artesanal que se realizaba a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, y puesto que el punto de inicio del presente estudio con respecto a la explotación intensiva que sufrió el acuífero de Campo de Cartagena se ha estimado sobre el año 1925, se ha realizado una simulación del modelo para este año 1925 en estado transitorio. Esta simulación pretende ofrecer un perspectiva mejor sobre los balances hídricos en ese año con una cierta explotación, debido a que en ese año ya se producían ligeras extracciones de la capa Cuaternaria, por lo que el balance hídrico ya difería de los

datos obtenidos para el estado estacionario, como puede observarse en la tabla 16. El balance general del acuífero para esa simulación del año 1925 es positivo y con ligeros excedentes, en torno a los 3.50 hm³/año. Las transferencias al Mar Menor son unos 32 hm³/año, y el retorno de riego para la capa Cuaternaria en ese periodo es muy escaso, sobre los 0.15 hm³/año.

Tabla 16. Resultados del balance hídrico del modelo de Campo de Cartagena en estado transitorio (1925) (hm³/año).

| Designación | Entradas | | | | Salidas | | | | | Balance Global |
|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|----------------|
| | LL | R | TV | AL CG | E | MMD | MD | TV | AL CG | |
| Cuaternario | 38.59 | 0.14 | 0.00 | 0.55 1.47 | 4.54 | 31.64 | 2.58 | 0.65 | 0.15 0.24 | 0.95 |
| Plioceno | 2.92 | 0.00 | 0.65 | 0.10 0.72 | 1.08 | 0.00 | 0.00 | 1.35 | 0.85 0.75 | 0.36 |
| Messiniense | 2.52 | 0.00 | 1.35 | 0.17 0.37 | 0.25 | 0.00 | 0.00 | 0.55 | 1.65 0.55 | 1.41 |
| Tortonense | 1.16 | 0.00 | 0.55 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.88 | 0.83 |
| Cabe. Gordo | 0.35 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.35 | 0.00 |
| Σ | 45.19 | 0.14 | 2.55 | 3.38 | 5.87 | 31.64 | 2.58 | 2.55 | 5.06 | 3.55 |

LL: LLuvias; R: Riego; TV: Transferencia Vertical; AL: Acuíferos Laterales; CG: Cabezo Gordo; E: Extracciones por bombeo; MMD: Descargas Mar Menor; MD: Descargas Mar Mediterráneo.

Los datos más relevantes sobre los balances hídricos generados por el modelo están contenidos en las tablas 17 y 18, siendo relevante la sobreexplotación que sufre el acuífero en el periodo 1960-1990, donde los balances globales de las capas confinadas sufren déficits de consideración con mermas importantes en las reservas de agua del acuífero. Estas pérdidas de las reservas de agua, ha provocado la consiguiente bajada de los niveles piezométricos en la zona de estudio. Así, para la capa superior Cuaternaria, el balance global es positivo

con aumento de los niveles piezométricos generalizado desde la segunda mitad del siglo XX, y más sostenido y estable en el siglo XXI. Para el resto de capas confinadas, el más relevante y severo, es el déficit de la acuífero Messiniense con valores en torno a los $-37 \text{ hm}^3/\text{año}$, lo que provocó un desajuste hídrico importante en el conjunto del sistema y una clara inversión del gradiente hidráulico que aún perdura, desde el origen del estudio.

Tabla 17 Resultados del balance hídrico del modelo de Campo de Cartagena en estado transitorio (1960-2000) ($\text{hm}^3/\text{año}$).

| Designación | Entradas | | | | Salidas | | | | | Balance Global |
|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|-------------|--------------|--------------|----------------|
| | LL | R | TV | AL CG | E | MMD | MD | TV | AL CG | |
| Cuaternario | 42.25 | 64.81 | 0.00 | 4.50 2.05 | 35.57 | 28.54 | 3.32 | 37.25 | 1.00 0.95 | 6.97 |
| Plioceno | 3.10 | 0.00 | 37.25 | 4.43 0.46 | 36.85 | 0.00 | 0.00 | 14.15 | 0.95 0.45 | -7.15 |
| Messiniense | 2.66 | 0.00 | 14.15 | 12.54 1.95 | 63.33 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.22 0.55 | -33.80 |
| Tortonense | 1.22 | 0.00 | 1.00 | 0.25 | 4.80 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.80 | -3.13 |
| Cabe. Gordo | 0.38 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.38 | 0.00 |
| Σ | 49.61 | 64.81 | 52.40 | 26.19 | 140.55 | 28.54 | 3.32 | 52.40 | 5.30 | -37.11 |

LL: LLuvias; R: Riego; TV: Transferencia Vertical; AL: Acuíferos Laterales; CG: Cabezo Gordo; E: Extracciones por bombeo; MMD: Descargas Mar Menor; MD: Descargas Mar Mediterráneo.

El volumen de transferencia de agua desde el acuífero Cuaternario a la laguna Mar Menor para un estado estacionario sin antropización es de $36 \text{ hm}^3/\text{año}$, siendo para un estado transitorio en 1925 cercano a $32 \text{ hm}^3/\text{año}$, para el periodo 1960-2000 un promedio de $29 \text{ hm}^3/\text{año}$, y para el periodo 2000-2018 un promedio de $42 \text{ hm}^3/\text{año}$, y desde este acuífero al Mar Mediterráneo, de 4.50, 2.50, 3.30 y $4.00 \text{ hm}^3/\text{año}$ respectivamente. En la figura 66 se puede observar una evolución temporal de los flujos entrantes y saliente entre la capa Cuaternaria (Qt)

y el Mar Menor. Entre los años 1955 a 1970 el acuífero tiene una sobreexplotación severa, que produce intrusión marina desde el Mar Menor a la capa Cuaternaria y un descenso acusado de las descargas al Mar Menor aumentando su salinidad, teniendo su punto máximo en el quinquenio 1959-64 (Rodríguez-Estrella y López Bermúdez, 1991), aunque la información disponible es escasa y está basada principalmente en estudios del IGME (Mora et al., 1988; García-Aróstegui et al., 2003). Esta intrusión marina provocó la salinización parcial del acuífero con la pérdida de calidad de agua, y puso en marcha los procesos de desalobración del Cuaternario.

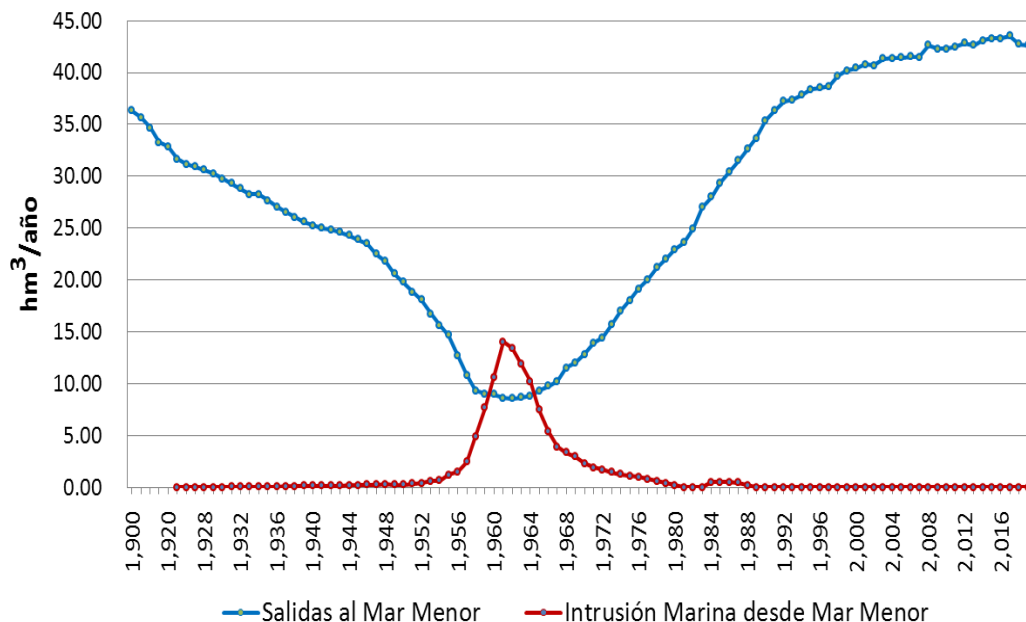


Fig. 66. Gráfico de la evolución histórica de los flujos de agua subterránea entre la capa Cuaternaria (Qt) y el Mar Menor. Evolución en azul de las salidas del Cuaternario al Mar Menor, y en rojo las entradas de agua salada al interior del acuífero.

Las transferencias de flujo verticales del modelo entre acuíferos en un régimen transitorio para el periodo 1960-2000, tienen un valor promedio de 37 $\text{hm}^3/\text{año}$ para los tramos Cuaternario y Plioceno, 14 $\text{hm}^3/\text{año}$ entre el Plioceno y el Messiniense, y 1 $\text{hm}^3/\text{año}$ entre el Messiniense y el Tortoniense, y para el periodo 2000-2018 valores aproximados de 28, 20 y 1.50 respectivamente. El tramo

Plioceno recibe flujos de agua de acuíferos inferiores a través de las fallas existentes en la zona, según estudios realizados por el IGME (IGME, 1994), como además queda constatado en los balances presentados en las tablas 17 y 18.

No existe un aumento continuado de los valores del balance global del sistema desde antes de la antropización del medio hasta la actualidad, aumentando el déficit hídrico desde el inicio del periodo de estudio hasta finales del siglo XX (Tabla 15), quedado estable con pequeño déficit en torno a 1 hm³/año en los años del siglo XXI (Tabla 18). Este balance hídrico para el año 1925 y para el tramo Cuaternario tiene un valor de 41 hm³/año, alcanzando valores para periodo 2000-18 de 114 hm³/año; siendo los volúmenes de extracción de los pozos de bombeo para este mismo periodo del siglo XXI una vez calibrados en el modelo algo mayores de 92 hm³/año, cercanos a los 88 hm³/año utilizados en los estudios recientes realizados por la CHS en 2015.

Tabla 18. Resultados del balance hídrico del modelo de Campo de Cartagena en estado transitorio (2000-2018) (hm³/año).

| Designación | Entradas | | | | Salidas | | | | | Balance Global |
|-------------|----------|-------|-------|--------------|---------|-------|------|-------|--------------|----------------|
| | LL | R | TV | AL CG | E | MMD | MD | TV | AL CG | |
| Cuaternario | 43.13 | 66.17 | 0.00 | 2.00 2.76 | 25.43 | 42.26 | 4.05 | 28.55 | 1.00 0.95 | 11.81 |
| Plioceno | 3.27 | 0.00 | 28.55 | 7.68 1.75 | 21.88 | 0.00 | 0.00 | 20.16 | 0.20 0.40 | -1.39 |
| Messiniense | 2.81 | 0.00 | 20.16 | 7.17 2.76 | 42.42 | 0.00 | 0.00 | 1.50 | 0.25 0.38 | -11.65 |
| Tortonense | 1.30 | 0.00 | 1.50 | 0.15 | 2.69 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.14 |
| Cabe. Gordo | 0.38 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.38 | 0.00 |
| Σ | 50.89 | 66.17 | 50.21 | 24.27 | 92.42 | 42.26 | 4.05 | 50.21 | 3.68 | -1.08 |

El volumen de recarga total del sistema acuífero es de 117.06 hm³/año, lo que supone una tasa promedio de recarga de unos 88 mm/año para el periodo de (2000-18), y de 79 mm/año si fuese para el periodo de estudio (1925-2018). Esta tasa obtenida de 88,00 mm/año, es ligeramente superior a la obtenida otros estudios recientes como el realizado por Alcolea et al. (2018), con un valor de 74 mm/año para el mismo periodo de 2000-18, o el realizado por Jiménez-Martínez et al. (2009, 2010), con un valor de 80 mm/año.

El volumen neto de recarga para el retorno de riego calibrado es de 66.17 hm³/año, muy similar el obtenido por Jimenez-Martinez et al. (2016), donde los volúmenes de recarga resultantes eran de 66 y 46 hm³/año para las recargas de riego y lluvia respectivamente. La tasa promedio de retorno de riego para el periodo 1925-2018 y para toda el área de estudio es de 50 mm/año, y asciende a 86 mm/año para el área regada en el modelo. Los valores promedio de otros estudios recientes como el PHCS 1998, con un valor de 62.58 mm/año; o el realizado por Senent et al. (2009), con un valor de 63 mm/año, quedan dentro del intervalo de valores resultantes.

La tasa media de precipitación calibrada en el modelo ha sido de $I_p = 36,30$ mm/año, lo que representa 11.50% de la precipitación promedio, siendo similar a las tasas de precipitación utilizadas en climas mediterráneos semiáridos (16% (IGME, 1991); 16% (Senent-Alonso et al., 2009); 16% (García-Aróstegui et al., 2012); 6% (Baudron et al., 2013). La tasa de recarga media anual para el periodo de estudio como hemos comentado anteriormente, es de 79,50 mm/año, muy similar a la obtenida en estudios recientes como el realizado por Alcolea et al. (2018), con un valor de 74 mm/año.

La comunicación hidráulica vertical a través de perforaciones tiene un valor aproximado de 36 hm³/año, y ha sido calculada por la diferencia de la transferencia de flujo vertical en el modelo numérico con y sin perforaciones (García-Aróstegui et al., 2016). La transferencia a través de perforaciones existentes entre las secciones Cuaternario y Plioceno es aproximadamente 19 hm³/año, entre las secciones Plioceno y Messiniense son 16 hm³/año y entre las secciones Messiniense y Tortoniense son 0.65 hm³/año (Tabla 19).

Los resultados obtenidos en la tabla 19 si se comparan con los valores estimados a partir de los datos del estudio realizado por IGME en 1991, y se han

modificado reduciendo los flujos verticales que circulan por los pozos con valores unitarios de 1.00 l/s para 500 pozos conectados desde la sección Cuaternario a las secciones inferiores; 2.00 l/s por unidad para 300 pozos conectados desde la sección del Plioceno a las secciones inferiores; y 1.25 l/s por unidad para 35 pozos conectados desde la sección de Messiniense a las secciones inferiores. También en estudios posteriores realizados por el IGME (1994), se estimaba la interconexión hidráulica entre acuíferos a través de los sondeos y pozos mal construidos, que estaba en volúmenes cercanos a los 40 hm³/año (IGME, 2005).

Tabla 19. Resultados para la comunicación hidráulica vertical a través de perforaciones en estado transitorio (2000-2018) (hm³/año).

| Tipo | TGV (1) | THV (2) | TZS (1-2) | TS IGME1 | TS IGME2 |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Cuaternario - Plioceno | 28.55 | 9.45 | 19.10 | 15.77 | 23.65 |
| Plioceno – Messiniense | 20.16 | 3.72 | 16.44 | 18.92 | 28.38 |
| Messiniense - Tortoniense | 1.50 | 0.85 | 0.65 | 1.38 | 0.00 |
| Σ | 50.21 | 14.02 | 36.19 | 36.07 | 52.03 |

TGV: Transferencia Global Vertical; THV: Transferencia Hidrogeológica Vertical (sin Cabezo Gordo); TZS: Transferencia de Zonas con Sondeos; TS IGME1: Transferencia a través de sondeos modificado del IGME 1991 (Estimado); TS IGME2: Transferencia a través de sondeos del IGME 1991 (Estimado).

5.7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

5.7.1. Sensibilidad a la recarga.

De los posibles parámetros hidrogeológicos utilizados en el modelo con los que se podría realizar un análisis de sensibilidad, se ha elegido la recarga como elemento objeto de estudio, debido al interés científico que desde hace tiempo ha

suscitado en estudios realizados sobre Campo de Cartagena (García-Aróstegui et al., 2012; Jiménez-Martínez et al., 2009, 2012; Baudron et al., 2013, 2014; García-Aróstegui, 2018) y por la trascendencia que tiene en la confección del modelo y en los resultados obtenidos. Por ello, se ha estudiado la evolución de la recarga para un régimen permanente y también para uno transitorio, para observar y analizar con los resultados obtenidos su repercusión en el modelo de flujo. En las figuras 67 y 68 se exponen las gráficas de los resultados obtenidos en los dos supuestos realizados para recarga de lluvia, y para la recarga total incorporando los retornos de riego.

En el primer supuesto para estado estacionario, se estudia la variación que producen en los resultados obtenidos ligeras variaciones en los inputs del modelo para la recarga natural, y se analiza la proporcionalidad existente entre estos inputs de recarga y los resultados obtenidos, todo ello según con la metodología seguida por Panagopulos (2012). Mediante este análisis de sensibilidad, se puede llegar a determinar el grado de afección al sistema hídrico que producen posibles variaciones en las precipitaciones anuales debidas al cambio climático.

En el segundo supuesto para estado transitorio, con el análisis de la variación de la recarga como suma de la recarga natural más los retornos por riego, suscita también un gran interés debido a la incertidumbre que aún persiste sobre la parte de retornos por riego. En ambos casos, se pretende analizar cómo ligeras variaciones en sus valores pueden afectar a todo el sistema acuífero, y en su caso, cuantificar el grado de influencia en los resultados obtenidos (Fig. 67).

Con estos objetivos, se ejecutó el modelo para ambos regímenes con 9 valores diferentes de recarga natural, que estaban comprendidos entre 0.8 y 1.2 veces el valor calibrado ($45.00 \text{ hm}^3/\text{año}$) para el estado estacionario, según se aprecia en la figura 67a, y entre -20 % y +20% en la figura 67b. Para el estado transitorio, se empleó el mismo intervalo de valores para un valor calibrado de ($117.06 \text{ hm}^3/\text{año}$) (Fig. 68 c y 68 d). En cada ejecución del modelo para el análisis de sensibilidad, se calculó el error RMS y el porcentaje de variación del flujo de salida del acuífero Cuaternario, representando los resultados en los diagramas contenidos en la figura 68.

Analizando cada gráfica, se puede observar como para el estado estacionario y para valores de recarga inferiores al calibrado (Fig. 67a), el modelo

realizado es menos sensible con errores RMS inferiores que con valores superiores al calibrado, donde los errores obtenidos son mayores

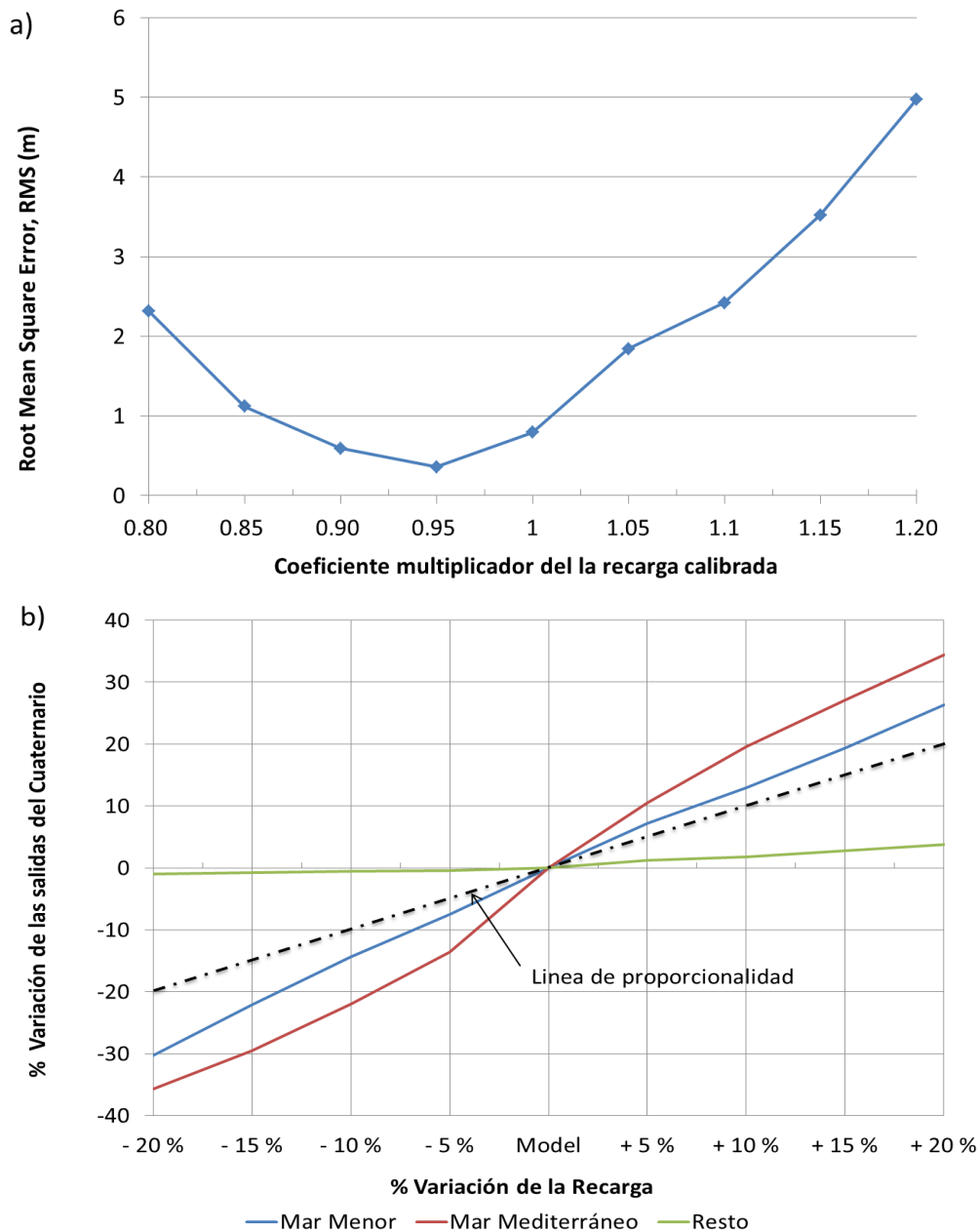


Fig. 67 Análisis de sensibilidad. a) Error cuadrático medio del modelo de flujo en estado estacionario. b) Variación de recarga versus variación de salidas del acuífero cuaternario en estado estacionario (%).

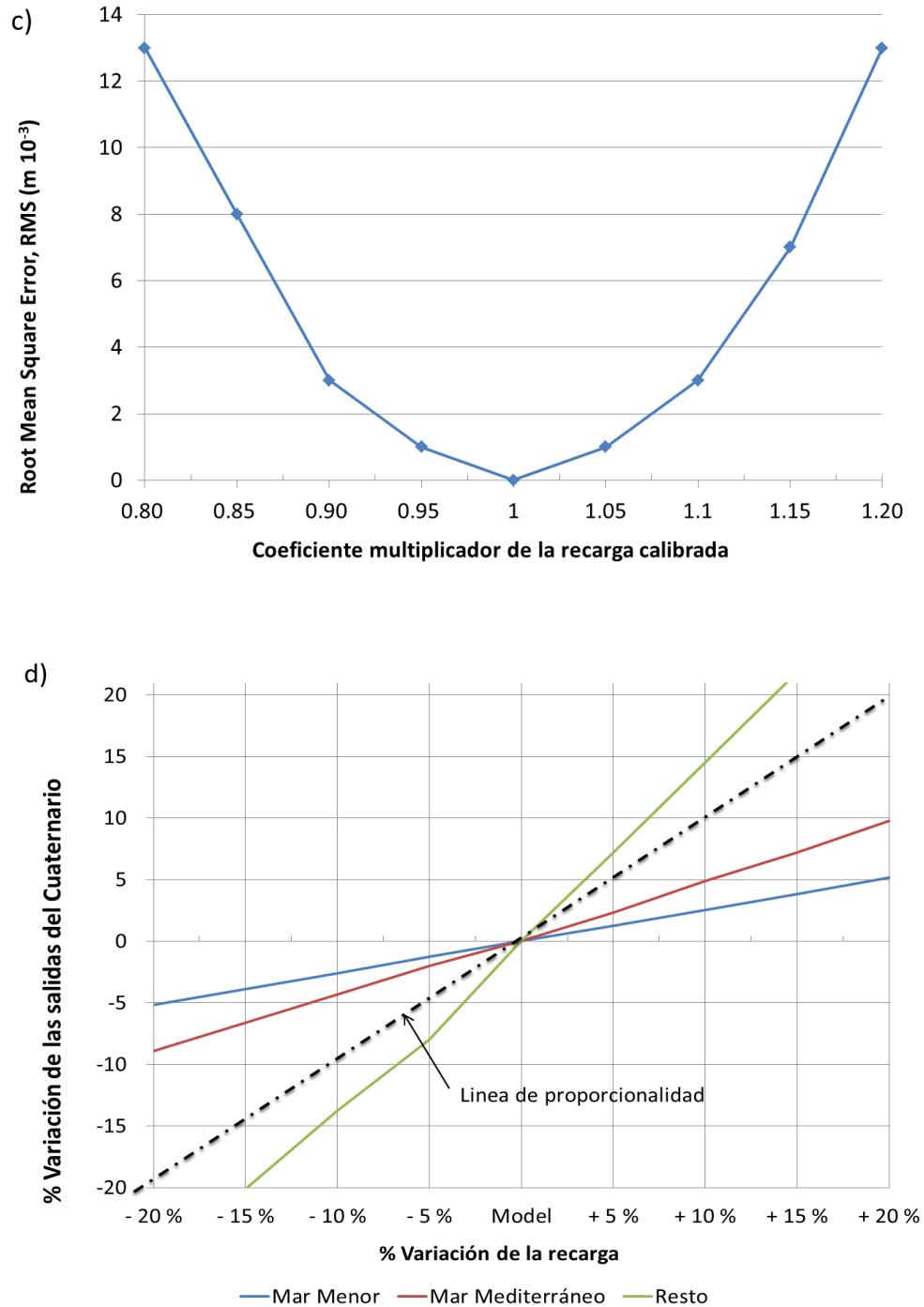


Fig. 68. c) Error cuadrático medio del modelo de flujo en estado transitorio. d) Variación de recarga versus variación de salidas del acuífero cuaternario en estado transitorio (%).

Con respecto a la variación de salidas del Cuaternario, se observa cierta proporcionalidad entre la variación de valores con respecto a las salidas de flujo al Mar Menor, siendo la salida de flujo de agua hacia el Mar Mediterráneo más sensible a estas variaciones, y siendo los flujos interiores hidrogeológicos los menos proporcinales y con mayor sensibilidad a las variaciones de la recarga (Fig. 67b).

Para el estado transitorio, la variación del RMSE en general, es considerable y mayor si la comparamos con los valores para el estado estacionario. Se observa una simetría para los valores mayores o menores que los calibrados. Para poder analizar la sensibilidad del modelo, se observa que el estado transitorio es menos sensible a las variaciones de valores de recarga (Fig. 68 c), donde existe una simetría en las curvas RMSE y en las líneas de porcentaje de variación de recarga para valores mayores y menores. Con respecto a las salidas de flujo del acuífero Cuaternario, se observa un fenómeno contrario al ocurrido para el estado estacionario, y es que en este caso, para cualquier tipo de valor creciente o decreciente, las salidas al Mar Menor son más sensibles y con mayor variación que las observadas para el Mar Mediterráneo u otros flujos interiores o verticales. En este caso, los flujos verticales son los más estables a las variaciones de recarga, siendo para valores crecientes las salidas laterales similares en porcentaje de variación que para el tramo decreciente.

En acuíferos costeros multicapa en zonas semiáridas, donde el contacto con el mar se realiza principalmente por el acuífero superior Cuaternario y en condiciones de sobreexplotación, modificaciones en la recarga afecta de manera importante a los volúmenes de transferencia de agua desde el acuífero al mar para un estado transitorio, guardando una cierta proporcionalidad. Para el estado estacionario, las transferencias hidrogeológicas internas son las más sensibles.

5.7.1. Sensibilidad a la ubicación de pozos dentro de la celda.

Como se ha comentado en el apartado 3.8.1. "*Simplificación de la distribución espacial de la explotación por bombeo*", se ha generado una metodología para la agrupación local de los pozos y sondeos existentes, en celdas de 2,500x2,500 m para extracción de agua en las diversas capas. Es por ello, que el objetivo de este análisis de sensibilidad es analizar el grado de afección que esta simplificación

local, produce en los resultados obtenidos por esta agrupación espacial dentro de cada celda.

Para ello, se han realizado dos simulaciones diferentes. La primera con doce escenarios posibles basados en doce ubicaciones distintas del pozo de bombeo denominado 16-16P para una celda de 500x500 (Tabla 20).

Tabla 20. Resultados del análisis de sensibilidad de la ubicación de los pozos dentro de las celdas del modelo. Distancia: Longitud entre el sondeo de observación y el pozo de bombeo. MC: Misma Celda. % Variación: Las celdas con valor representa el % de variación con respecto a la distancia originaria.

| Distancia (m) | Pozo o escenario | % Variación | Piezometría | RMSE Pozo | RMSE Capa |
|---------------|---------------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| 0 | 273940021 | Sondeo Obs. | - | - | - |
| 1,000 | Escenario 1 (AE1) | An. Ext. 1 | 12.81953 | 5.158 | 6.377 |
| 770 | Escenario 2 (AE+10) | +10 | 15.28043 | 3.922 | 6.258 |
| 700 | Pozo Bombeo 16P | 0 | 17.90088 | 3.445 | 6.227 |
| 630 | Escenario 3 (-10%) | -10 | 17.90088 | 3.445 | 6.227 |
| 560 | Escenario 4 (-20%) | -20 | 17.90088 | 3.447 | 6.277 |
| 490 | Escenario 5 (-30%) | -30 | 17.90088 | 3.445 | 6.277 |
| 420 | Escenario 6 (-40%) | -40 | 17.90088 | 3.445 | 6.277 |
| 350 | Escenario 7 (-50%) | -50 | 17.90088 | 3.445 | 6.277 |
| 245 | Escenario 8 (MC1) | MC 1 | 24.34175 | 6.979 | 6.61 |
| 260 | Escenario 9 (MC1) | MC 2 | 24.35175 | 6.979 | 6.61 |
| 118 | Escenario 10 (MC1) | MC 3 | 24.35175 | 6.979 | 6.61 |
| 655 | Escenario 11 (AI1) | An. Int. 1 | 15.268 | 3.836 | 6.286 |
| 455 | Escenario 12 (AI2) | An. Int. 2 | 16.852 | 3.289 | 6.228 |

La denominación MC, corresponde a ubicaciones usadas y contenidas en la

misma celda donde esta ubicado el sondeo de observación, y el porcentaje de variación, se corresponde con la variación que se ha empleado en la distancia existente entre el sondeo de observación y el pozo de bombeo empleado en el modelo (Fig. 69).

De los resultados obtenidos en el presente análisis, se puede observar como los valores obtenidos tanto para las piezometrías para el año 2005, como los valores del Error Medio Cuadrático Estándar (RMSE) para el sondeo de observación y para toda la capa acuífera en estudio (en este caso el acuífero confinado del Plioceno), se mantienen iguales, o muy parecidos, para las distintas ubicaciones generadas dentro de las celdas del modelo de flujo, por lo que en principio, no parece que en este caso afecte significativamente a los resultados.

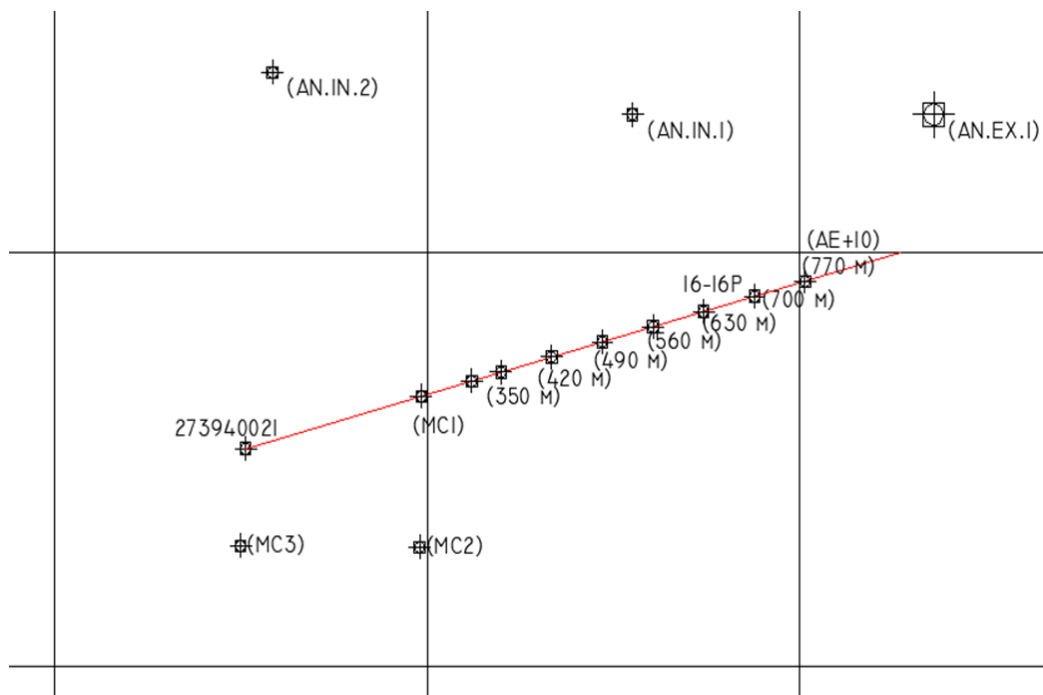


Fig. 69. Ubicaciones empleadas para la primera simulación con diversos escenarios en el análisis de sensibilidad realizado de distintas ubicaciones dentro de una misma celda de 500x500 m. El sondeo de observación se encuentra en la celda central. Entre paréntesis, la distancia entre el pozo de bombeo y el sondeo de observación empleado (273940021).

Cuando se cambia de celda, entonces sí aparecen modificaciones en los valores, pero sí se mantienen estables para las distintas ubicaciones realizadas dentro de la celda que se esté empleando en ese momento. Cuando las nuevas

ubicaciones se corresponden con la misma celda donde se encuentra el sondeo de observación (MC), el resultado es similar, con resultados parecidos para cada una de las tres ubicaciones y simulaciones realizadas dentro de la mencionada celda (Fig. 70).

Cuando se trata de ubicaciones fuera de esta celda central o no están cercanas al pozo de observación, existen diferencias con respecto a la anterior celda, pero no relevantes cuando se mueve dentro de la celda asignada. Se puede suponer inicialmente que Modflow divide el entorno de trabajo en celdas donde se mantienen las mismas propiedades hidrogeológicas y geométricas, asumiendo que cada celda es la unidad mínima de trabajo

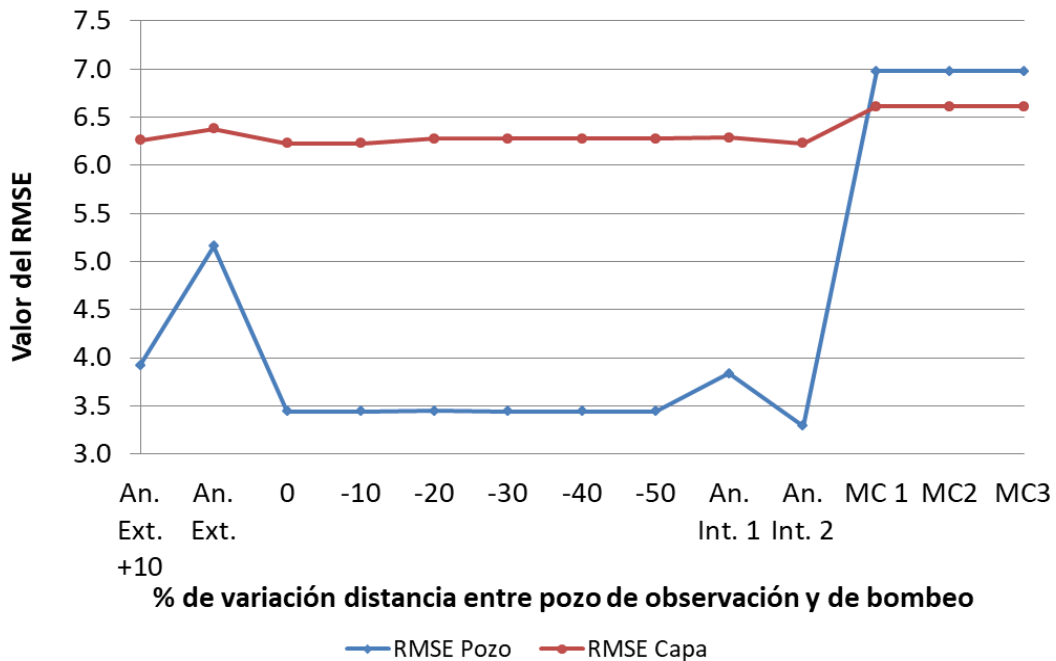


Fig. 70. Análisis de sensibilidad a la ubicación del pozo de bombeo. Error cuadrático medio estándar de cada escenario versus variación de la distancia entre el pozo de bombeo y el punto de observación (%).

La modificación de la ubicación de los pozos dentro de cada una de esas unidades mínimas de trabajo, no altera el resultado del modelo, pudiendo agruparse dentro de cada unidad o celda los distintos pozos de bombeo existentes, en este caso denominada celda central (Fig. 71), según la metodología empleada de la simplificación de la distribución espacial de la explotación por

bombeo generada en la presente tesis doctoral. En la gráfica representada en la figura 71, esta celda central se corresponde con el tramo horizontal de los escenarios MC1 a MC3, donde no se ha reflejado modificación alguna comparando estos tres escenarios.

Para la realización de esta primera simulación, se ha dividido la celda de 2,500x2,500 m en tres zonas que han denominado: Celda central, donde se ubica el el pozo sumatorio de los bombeos ubicados inicialmente en la celda de 2,500x2,500 m; el anillo interior alrededor de la celda central, y el anillo exterior que completa la celda de simplificación (Fig 71).

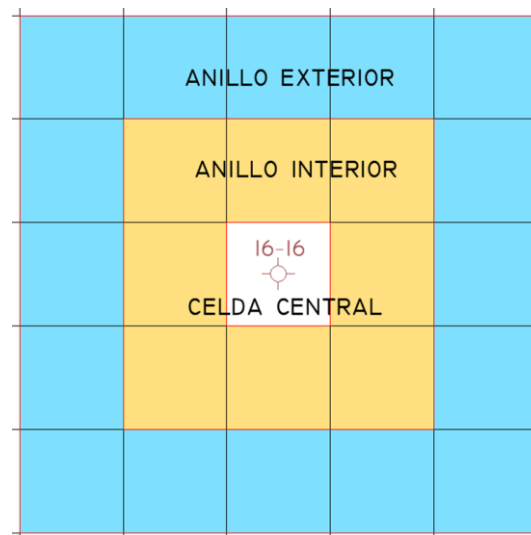


Fig. 71. Vista de la nueva celda generada para la simplificación de 2,500x2,500 m, con las tres subdivisiones interiores realizadas.

La segunda simulación se ha realizado con el objetivo de estudiar la sensibilidad y variación que produce en tres ámbitos: El conjunto del modelo, el conjunto de cada capa, y un ámbito local y concreto para un pozo de observación. En esta segunda simulación se realiza la simplificación espacial realizada en las celdas de 2,500x2,500 m. empleadas, agrupando los pozos de bombeo introducidos en el modelo mediante su geolocalización, y según el inventario empleado por cada capa. Para ello, se crea un pozo sumatorio que agrupe los caudales extrativos de los pozos que extraigan agua de cada capa concreta y que queden dentro de la nueva celda, y se ubica en la celda central (Fig. 71). Esta

misma operación se realizará para cada capa, generando un pozo sumatorio por capa y ubicando los tres dentro de la celda central de 500x500 m.

El escenario empleado para esta segunda simulación ha sido la capa Cuaternaria, en una zona cercana al Pilar de la Horadada y junto al pozo de observación denominado 283750001 (Fig 72). Se ha establecido un escenario inicial donde existen varios pozos ubicados según su geolocalización con los caudales establecidos en los datos obtenidos, y con el modelo calibrado se obtienen una serie de valores del Error Cuadrático Medio Estándar (RMSE) para el pozo 283750001, para toda la capa Cuaternaria, y para todo el conjunto del modelo. Con posterioridad se desactivan esta serie de pozos y se activa un único pozo sumatorio de los caudales de los pozos desactivados y ubicado en la celda central.

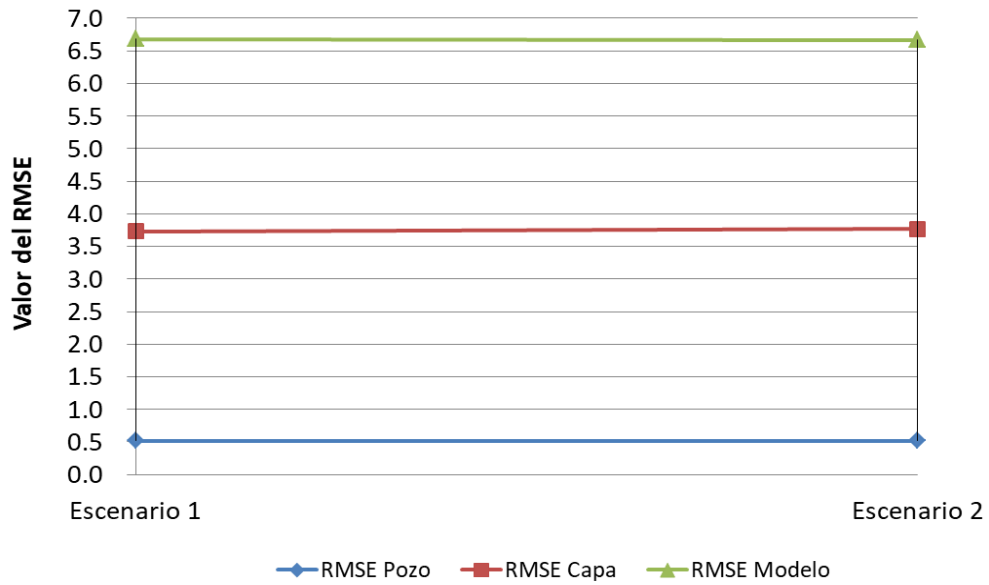


Fig. 72. Vista de la ubicación en el modelo de los pozos empleados en la simulación 2. En verde se observan las celdas donde se ubican los pozos georeferenciados inicialmente, y en el centro de las celdas verdes se ubica la celda central de color marrón que alberga el pozo alternativo sumatorio de los otros cuatro. Al Suroeste se encuentra el pozo de observación 283750001 para la capa Cuaternaria.

De la ejecución del modelo en ambos escenarios se han recogido una serie de valores, y se han comprobado el porcentaje de variación con respecto a los tres valores del RMSE y a la piezometría en el punto de observación. Con estos datos

se han generado varias gráficas expuestas en la figura 73, donde se puede observar que la variación en los datos obtenidos sobre los valores de RMSE generan una líneas prácticamente horizontales (Fig. 73 a), lo que implica variaciones muy poco significativas para el cambio de escenario, con valores son muy pequeños que están comprendidos entre 0,16 a 1,02 % (Fig. 73 b), con una la variación de la piezometría en el punto 283750001 del 4,46 %. Con etos datos podemos concluir que la repercusión con respecto a los valores RMSE son muy pequeños, y aumentando ligeramente cuando se trata de valores piezométricos.

a)



b)

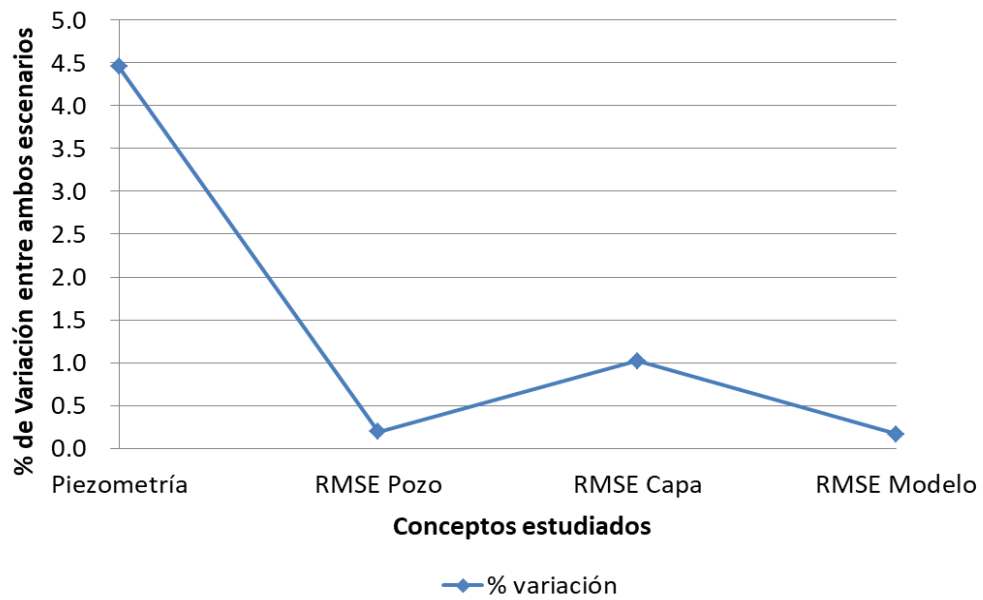


Fig. 73 Análisis de sensibilidad a la simplificación espacial. a) Sobre valores del RMSE en tres ámbitos. b) Sobre la variación porcentual en ambos escenarios.

VI - DISCUSIÓN

VI - DISCUSIÓN

Se ha realizado una reconstrucción de la evolución temporal del acuífero en un régimen transitorio entre 1925 y 2018, con el grado de incertidumbre asociado a la estimación de datos de control piezométrico en el tramo inicial entre los años 1925 a 1973, debido a la falta de datos oficiales (Fig. 65), y también a las interpolaciones realizadas en algunos tramos temporales de las necesidades de aguas subterráneas, debido a la falta de datos fiables sobre estas extracciones del inventario de pozos existentes, con información georeferenciada de su ubicación pero sin información concreta cuantificada en el tiempo sobre las extracciones. Además de los datos conseguidos de la Confederación Hidrográfica del Segura y del Instituto Geológico y Minero de España, se ha conseguido información piezométrica del año 1961, del estudio realizado por García-Aróstegui (2018).

La calibración y validación realizada para esta reconstrucción temporal, se ha basado en la información contenida en 37 pozos de observación, de los cuales, 26 tenían información piezométrica suficiente para poder asegurar una evolución temporal suficiente entre el inicio de la década de los años 70 y nuestros días, y los otros 11 pozos, solamente aportaban pequeños tramos de información que también han servido para completar los ajustes necesarios. Los ajustes realizados son similares a los contenidos en otros trabajos recientes para la capa Cuaternaria, mediante metodología similar de modelización, pero con otro tipo de software, como el empleado en Contreras et al. (2017).

También se ha reconstruido con éxito la inversión del gradiente hidráulico observado como consecuencia de un siglo de antropización (Fig. 55, 56). La evolución obtenida con el modelo calibrado, es similar a la obtenida en estudios similares como el realizado por García-Aróstegui et al. (2012), o Baudron et al. (2014), mediante el empleo de isótopos. El modelo de flujo representó la dualidad entre las subcuencas de Torre-Pacheco y San Javier, donde la altura de las aguas subterráneas aumentó y disminuyó respectivamente desde el comienzo del TTS. Esta diferencia de funcionamiento hidráulico en estas dos subcuencas, varios estudios lo atribuyen a la heterogeneidad del medio y a la desconexión hidráulica

en sentido horizontal que producen los materiales del Pérmico-Triásico de Cabezo Gordo con dirección NO-SE.

Tanto en este estudio, como en otros realizados sobre el Campo de Cartagena (García-Aróstegui et al., 2012; Baudron et al., 2014), queda clara la existencia de una conexión directa entre la explotación intensiva con el déficit hídrico acumulado año tras año, y la bajada paulatina de los niveles piezométricos de los acuíferos inferiores confinados generada por esta explotación intensiva, que modificó la hidrodinámica existente en las distintas capas acuíferas, comentada en trabajos como previos como Senent et al. (2009), o sobre la sobreexplotación por Senent-Alonso et al. (2015). Este fuerte déficit continuado provocó un estrés hídrico entre las décadas de los años 50 a 80, y de la cuál, los acuíferos confinados han sufrido diferente suerte.

Por ejemplo, el acuífero de edad Plioceno con la llegada de aguas superficiales para el riego del Campo de Cartagena mediante el TTS, ha conseguido recuperar niveles piezométricos en la mayoría de las zonas y subcuencas (Fig. 74), con aumentos en torno a los 30 metros entre 1980 y 2018.

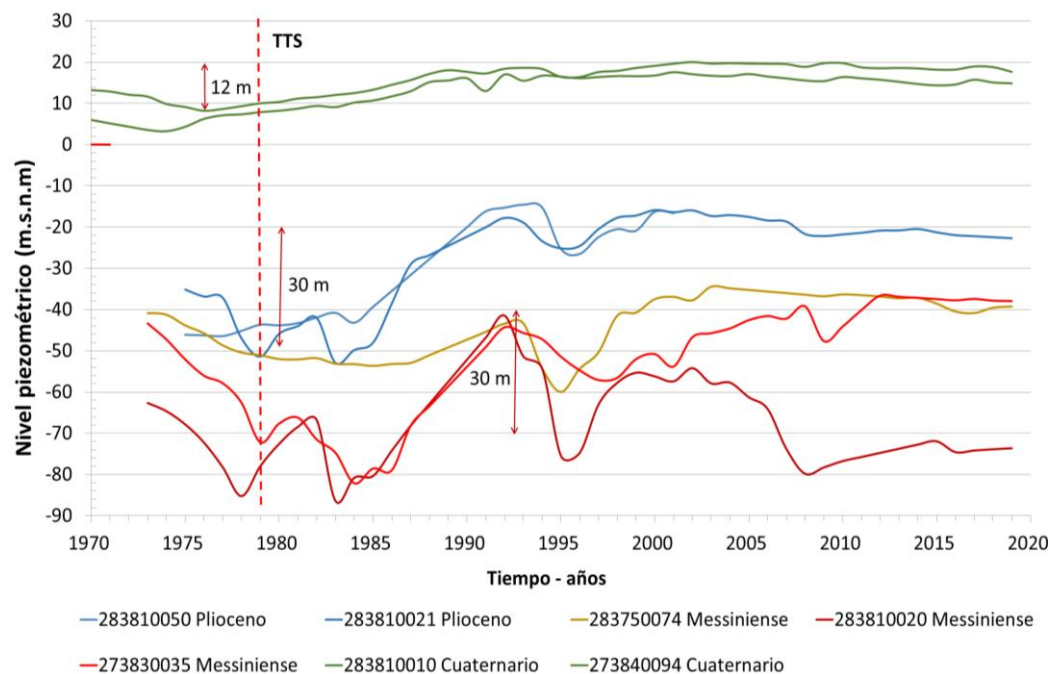


Fig. 74 Gráfica de recuperación de niveles piezométricos. En verde la capa Cuaternaria, en azul capa Plioceno y en la capa Messiniense (Marrón, rojo y verde).

Para la capa de acuífero de edad Messiniense (Andaluciense), la recuperación ha sido muy errática e incluso nula en algunas zonas. Así en la zona norte de la subcuenca de San Javier, al noroeste de San Pedro del Pinatar (283750074), los niveles actuales son similares a los existentes en 1970 sin conseguir recuperar los descensos producidos hasta ese momento. Para la subcuenca de Torre Pacheco (273830035), se produjeron descensos más significativos hasta mediados de los años 80, desde donde sí se ha producido una recuperación de niveles en torno a los 40 metros, pero también sin recuperar lo perdido hasta esa década. Y para la zona de San Javier (283810020) la situación es distinta, donde en la evolución ha sido cambiante según se estaba en época de sequía o en periodo hídricos favorables.

La recuperación mantenida en el tiempo que ha tenido el acuífero Cuaternario en gran parte de su extensión, sobre todo en la parte Este más cercana al Mar Menor, tiene valores cercanos a los 12 metros para el periodo 1980-2018, también comentado en otros trabajos recientes como el realizado por García-Aróstegui (2018), y se estima en torno a los 5-6 metros el aumento de niveles entre el inicio de la explotación intensiva con antropización del medio y los niveles actuales, quedando patente en los balances de flujo donde actualmente las descargas de este acuífero al Mar Menor y Mediterráneo han aumentado (Fig. 66). Parece sensato pensar que si las entradas a la capa Cuaternaria son mayores ahora que al inicio de la antropización, y la recarga también es mayor que las extracciones del sistema, que los niveles piezométricos en la actualidad sean superiores a los de aquella época.

Se han propuesto cuantificaciones del doble efecto del riego, y se ha demostrado que los cambios producidos en la hidrodinámica son debidos a la reducción de los niveles piezométricos en periodos específicos en los acuíferos confinados. La recuperación fue variable según el estrato que estaba involucrado y en la subcuenca donde se encontrase, como se ha explicado en el párrafo anterior, pero con una recuperación clara y mantenida en el tiempo del acuífero de la capa Cuaternaria con retornos de riego de $66 \text{ hm}^3/\text{año}$, donde la calidad de las aguas retornadas queda a veces comprometida por la alta salinidad de las mismas y la contaminación agroquímica, constatado en otros trabajos como los realizados por Baudrón (2013b), por Baudron et al. (2014), o por Jiménez-Martínez et al. (2016). Precisamente ese doble efecto, uno aumentando los niveles del

acuífero superior y el otro disminuyendo los niveles de los acuíferos confinados, está generando ese desequilibrio hídrico interno aunque la actualidad, existe un frágil equilibrio hídrico global debido a la caída de la demanda neta y demandas no satisfechas, y al aumento de las contribuciones de agua superficial y regenerada. Estos desequilibrios hídricos entre capas hacen que tomen cada vez más importancia los flujos verticales, tanto los hidrogeológicos a través de contactos entre capas y fallas principalmente, como los que se producen a través de los pozos que comunican varias capas permeables.

Del análisis de la evolución piezométrica obtenida de los datos introducidos en el modelo, así como, de las piezometrías que el modelo ha generado, podemos comentar que se observan dos situaciones temporales en ambos casos donde los niveles descendieron considerablemente, que son la década de los años 70 hasta la entrada en funcionamiento del Trasvase Tajo-Segura con otro descenso acusado en los años 1984-86, y un periodo de fuerte sequía en los años 1994-96 que se refleja claramente sobre todo en las piezometrías de las capas de edad Plioceno y Messiniense. Localmente se observa también descensos acusados entre los años 2005-2010. Todo ello es debido, a la bajada de entrada al sistema de agua superficial proveniente principalmente del Trasvase Tajo-Segura, lo que provocó el aumento considerable de las extracciones para satisfacer la demanda existente, como se puede observar en las gráficas de la figura 75.

Es necesario considerar que en varios momentos de sequía en la segunda mitad del siglo XX, las extracciones de agua subterránea alcanzaron los 125 hm³/año según datos oficiales y otros estudios realizados en este sentido, que sometieron al sistema a estrés hídrico. Pero el modelo ha revelado que para alcanzar las piezometrías observadas en las décadas de los años 70 y 80, ha habido periodos con extracciones cercanas a 190 hm³/año, aunque todavía existe cierta incertidumbre sobre los datos reales de estas extracciones. En los periodos de sequía de los años 1994-96 y 2005-10, sí que hubo picos de extracciones sobre los 125 hm³/año, tal y como se comentaba anteriormente.

Con valores de extracciones entre 90-95 hm³/año, que es el intervalo de valor medio de extracciones en este siglo XXI, los niveles más altos del acuífero son estables con ligeras subidas y bajadas puntuales, y los niveles más bajos, aún están sujetos a explotación intensiva. En el balance global del sistema hay una frágil estabilidad soportada por los excedentes de la capa Cuaternaria.

Analizando las extracciones realizadas en el periodo estudiado, que a partir de 1979 se complementaban con los aportes del TTS, y más recientemente mediante las incorporaciones de aguas procedentes de EDARs, desaladoras, y otras fuentes, la demanda neta de riego que ha tenido el Campo de Cartagena calculada a partir de datos de Organismos Oficiales principalmente como la CHS (1998, 2014, 2016), de trabajos del IGME (1989, 1991, 1994, 2005), del IMIDA (2013) y de la CARM (2000); en algunos momentos esta demanda ha sido satisfecha con excesos extractivos sobre la demanda teórica antes de los años 80, y en momentos de sequía acusada a partir de los años 80, se observan periodos donde la demanda no ha sido satisfecha por falta de recursos hídricos provenientes principalmente de aguas superficiales (Fig. 75), y donde los bombeos del Cuaternario aumentan mediante las desalobradoras privadas y los efectos que esto provoca.

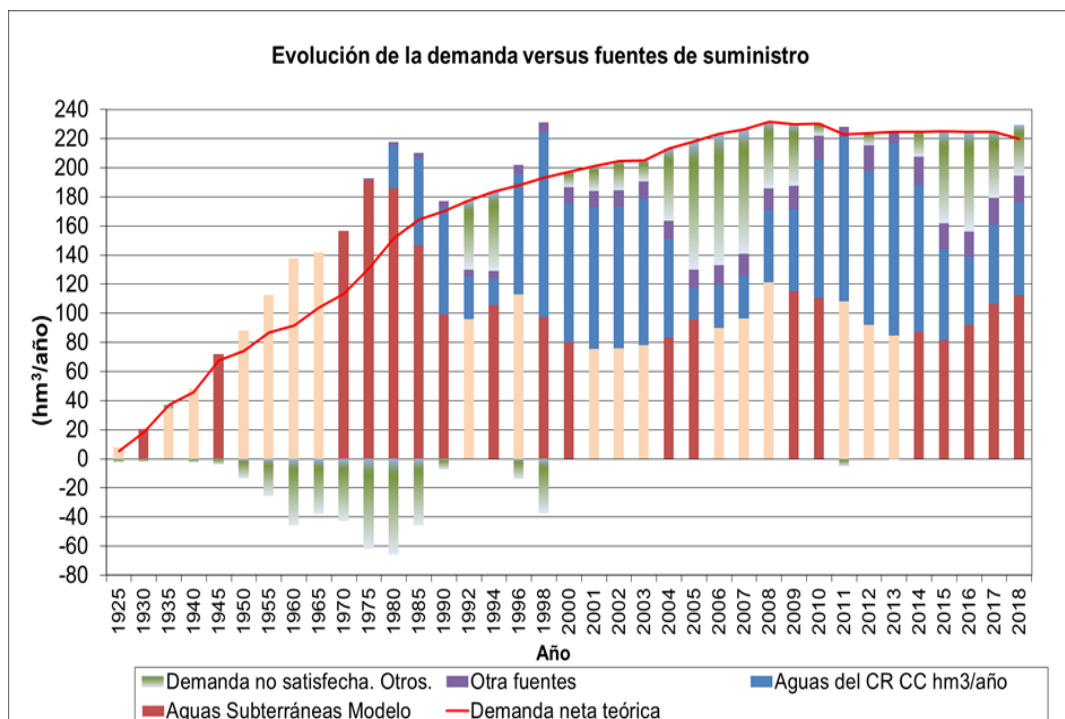


Fig. 75 Gráfica comparativa de la evolución de la demanda neta versus las distintas fuentes de suministro para satisfacer la demanda. Aguas subterráneas (Rojo y naranja), aguas superficiales (Azul), provenientes de EDARs, desaladoras y otros (Morado). Demanda no satisfecha (Verde). Valores negativos (exceso de extracciones con respecto a la demanda neta teórica).

Para un estado estacionario hay evidencia de una transferencia de agua de 36.32 hm³/año desde el acuífero Cuaternario a la laguna del Mar Menor, y para un estado transitorio para el periodo 2000-2018 de 42.26 hm³/año. Estos valores son similares a los resultados obtenidos en otros estudios recientes como el realizado por Contreras et al. (2017), mediante un modelo hidrogeológico regional de la Cuenca de Campo de Cartagena-Mar Menor, con un modelo de hidrología superficial del tipo (SPHY) y otro modelo de hidrología subterránea (SUTRA) para un periodo 2000-2016, con valores entre 38 a 46 hm³/año (Contreras et al., 2017). La descarga de agua con el Mar Mediterráneo está en torno de 4.50 hm³/año. Estos son valores estables para modificaciones no severas de la conductividad hidráulica, almacenamiento específico o bombeo. Estos valores son algo mayores que los calculados usando otro modelo de flujo mediante Modflow en el estudio realizado por Senent et al. (2009), con 25.90 y 3.10 hm³/año respectivamente, y algo menores que los contenidos en Jiménez-Martínez et al. (2016), con un volumen de 68 hm³/año para ambas descargas realizadas por modelo hidrológico (Tabla 21).

Con respecto a la intrusión marina que se ha generado en el acuífero costero y multicapa del Campo de Cartagena durante el periodo de estudio, se tiene constancia de sobreexplotación acusada a inicios de los años 60 del siglo XX, que provocó una fuerte intrusión marina generando desigualdades ecológicas (Rodríguez-Estrella y López Bermúdez, 1991). Esta salinización del medio acuoso se introducía en el interior del Campo de Cartagena varias decenas de kilómetros, en la zona de la Rambla del Albuñón y de la Rambla de Miranda, con pequeñas áreas también en la zona Sur del Mar Menor. Esta intrusión fue fruto de la explotación intensiva con unos déficits hídricos importantes, que año tras año, generó bajadas considerables de los niveles piezométricos y de la entrada de agua salada tierra adentro. Con la llegada de las aguas de TTS, la interfaz fue retrocediendo hacia la costa, donde aún persiste en muy pocas zonas y a nivel local, con intrusiones pequeñas como en la zona Norte de San Pedro del Pinatar o en la zona Sur del Mar Menor (García-Aróstegui, 2018).

Uno de los objetivos de este estudio es establecer, analizar y cuantificar la comunicación hidráulica existente entre capas acuíferas, y en particular, como afecta la existencia del macizo Horst Cabezo Gordo, donde afloran materiales carbonatados del Pérmico-Triásico y que trabajos recientes como el de García-

Aróstegui (2018), o el de Alcolea et al. (2019), lo denominan como el quinto acuífero del sistema hídrico de Campo de Cartagena. Ubicado en el centro del área de Campo de Cartagena, comunica a todos estos tramos acuíferos.

Ha quedado constatada esa comunicación hidráulica a través de Cabezo Gordo, con una entrada de flujo al acuífero Cuaternario para un régimen permanente de $6 \text{ hm}^3/\text{año}$. Este macizo permite evacuar el agua introducida en el sistema procedente de la recarga natural principalmente de los acuíferos confinados, hacia los tramos acuíferos libres superiores. Así, de los $6.60 \text{ hm}^3/\text{año}$ de las recargas de lluvia que reciben los acuíferos confinados, para un régimen estacionario, únicamente $0.70 \text{ hm}^3/\text{año}$ fluyen a otras zonas permeables lateralmente, y el resto sale por el tramo Cuaternario en descargas al Mar Menor, Mar Mediterráneo, o alimentando escorrentías superficiales (Fig. 76).

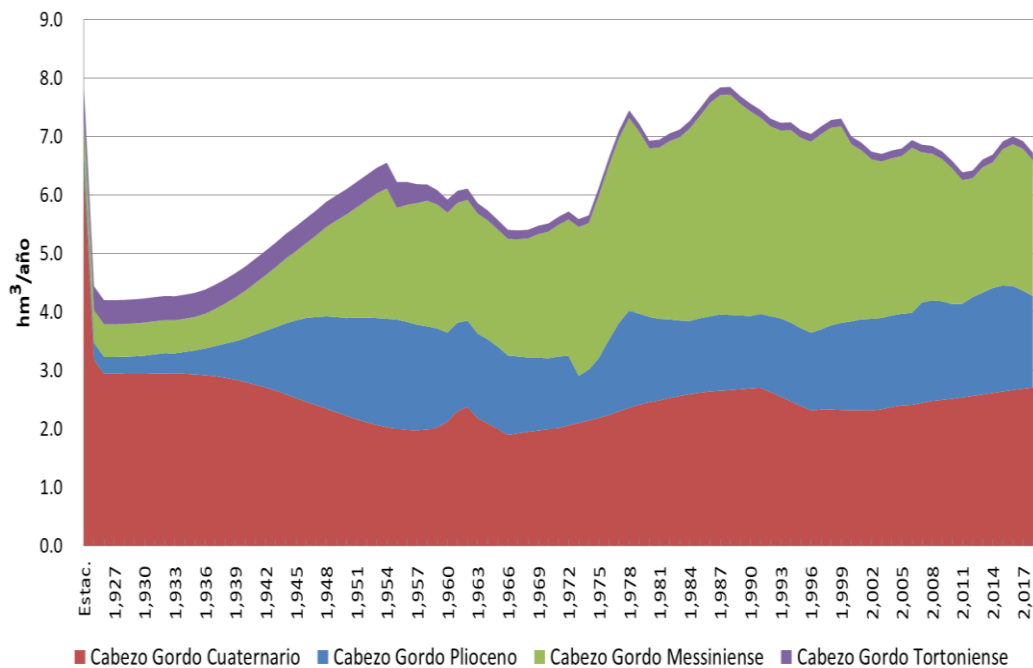


Fig. 76 Gráfica de la evolución del flujo a través del Horst de Cabezo Gordo

Si analizamos esta misma situación para un estado transitorio donde entran a formar parte del balance los flujos extractivos de los bombeos, la entrada de agua al acuífero Cuaternario decrece entre un 50-60 %, estando en valores entre los $2.10\text{-}2.70 \text{ hm}^3/\text{año}$, y quedando el resto del flujo repartido en entradas a los acuíferos confinados Plioceno y Messiniense. Estos acuíferos tienen un claro

déficit hídrico que genera gradientes hidráulicos importantes debido a las fuertes extracciones, y por ejemplo en el tramo Messiniense llega a igualarse o incluso superarse las entradas de flujo que se producen desde Cabezo Gordo al acuífero Cuaternario.

El funcionamiento hidráulico de este macizo carbonatado del Pérmico-Triásico para un régimen permanente, se podría resumir en que recibe agua procedente de la recarga natural de los tramos acuíferos confinados con una carga hidráulica elevada, y la expulsa principalmente a través del tramo acuífero Cuaternario. Para el régimen transitorio, es similar, pero los volúmenes decrecen hacia el Cuaternario, pasando a introducirse flujo en los confinados por déficit hídrico generado por la explotación intensiva a la que están sometidos.

En la gráfica de la Figura 76, se aprecia como al inicio del periodo la mayoría del flujo acaba en el acuífero Cuaternario, y como según se introducen en el sistema los bombeos, el flujo del Cuaternario decrece y el flujo del resto de capas va aumentando. Se constata además que los movimientos de flujo entre capas acuíferas están directamente ligados a las extracciones del sistema mediante bombeo, creando diferencias de carga hidráulica que generan el mencionado movimiento. Un claro ejemplo es la evolución de flujo a través de Cabezo Gordo y como está evoluciona según se introducen en el sistema los bombeos.

Esta comunicación hidráulica ha sido simulada ejecutando el modelo con una capa inferior compuesta por el Pérmico-Triásico unido con el horst de Cabezo Gordo aflorando a la superficie en contacto con todas las capas acuíferas y acuitardas, y contactos de borde en el Triásico de los Victorias, al norte de la Sierra de Cartagena-La Unión y los afloramientos de la Sierra de Carrascoy. Estos aspectos hidrogeológicos han sido ampliamente comentados en trabajos como los realizados por el IGME (1991, 1994), donde se constataban estos contactos e incluso se estimaban flujos a través de ellos dependientes de la carga hidráulica.

También se confirma una primera aproximación de la cuantificación de la transferencia de flujo vertical a través de pozos abandonados y con fugas, con un volumen en torno a los 36 hm³/año (Tabla 19), con valores similares a la modificación realizada al estudio preliminar que realizó el IGME en el año 1991, como puede observarse en los datos comparativos de la tabla 21.

Tabla 21. Comparativa de balances en este estudio y otros similares. Estado transitorio ($\text{hm}^3/\text{año}$). (Modificado del elabor. por García-Aróstegui (Jiménez-Martínez et al., 2016)).

| CONCEPTOS | IGME (1991) | | PHCD (2016) | Jiménez-Martínez et al. (2016) | | Modelo (2000-2018) | | |
|---------------------------|---|-------|---------------------------------|--|--------|---|-------|----|
| | Cuaternario | Resto | Global | Cuaternario | Global | Cuaternario | Resto | |
| Entradas | Infiltración lluvia útil | 46 | 4 | 76 | 46 | - | 43 | 8 |
| | Retornos de riego | 23 | 0 | 18 | 66 | - | 66 | 0 |
| | De otros acuíferos | - | - | - | - | - | 5 | 69 |
| | Total | 69 | 4 | 94 | 112 | 112 | 114 | 77 |
| Salidas | Bombeos | 2 | 19 | 88 | ¿? | 104 | 25 | 67 |
| | Laterales a Mares (Principalmente Mar Menor) | 5 | 0 | 5 | 68 | 68 | 46 | 0 |
| | A otros acuíferos | 38 | 0 | 0 | 46 | 0 | 30 | 23 |
| | Pérdidas | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| | Total | 54 | 19 | 94 | 116 | 174 | 102 | 90 |
| Balance | 15 | -15 | 0 | -4 | -62 | 12 | -13 | |
| Observaciones | Este balance positivo se traduce en las elevaciones del nivel piezométrico en el Cuaternario, causando problemas de drenaje en las áreas más bajas. | | Equilibrado | Equilibrado en valor promedio el Qt. Sobreexplotación de los acuíferos inferiores, mayor en el Messiniense. El Triásico de los Victorias está incorporado. | | Equilibrio positivo en el Cuaternario que causa aumento en los niveles piezométricos. El resto del sistema está en equilibrio, con una sobreexplotación en el acuífero Messiniense. | | |
| Procedimientos de cálculo | Sobre piezometría de 2008, gradiente de 3 por mil, $T = 48 \text{ m}^2/\text{día}$ y 29 km de frente. | | Acepta el valor de IGME. (1991) | Distribución del modelo hidrológico de recarga (60-40), según artículos anteriores. | | De acuerdo con el modelo de flujo hidrogeológico de todo el sistema acuífero. | | |

La comunicación hidráulica entre diferentes capas del acuífero y la interrelación de estos, con la laguna del Mar Menor y el Mar Mediterráneo (Tabla 21), tiene datos similares a los contenidos en estudios como CHS (2015), o Jiménez-Martínez et al. (2011), excepto alguna ligera diferencia en el flujo de transferencia al Mar Menor desde el acuífero Cuaternario. Estos valores inicialmente previstos en el estudio del IGME (1991) para la comunicación hidráulica entre secciones a través de pozos, se han reducido, ya que los valores de transmisividad manejados en el estudio después de la calibración del modelo recomendaron ese ajuste. Estos valores obtenidos de comunicación hidráulica vertical a través de pozos, están en torno al 63% del total de este flujo ($57 \text{ hm}^3/\text{año}$), lo que indica que tiene valores de cierta consideración.

La escasez de algunos datos para la realización de este trabajo, aunque se hayan conseguido avances en las extracciones reales por bombeo, siguen generando una incertidumbre que hace que ModFlow haya sido una herramienta adecuada en este estudio y otros como el efectuado por Ebrahimi et al. (2016), mediante un enfoque de modelado inverso y RS. La recarga y las extracciones por bombeo requieren futuros estudios más profundos, ya que la incertidumbre asociada a estos parámetros hace que se tenga prudencia con los resultados obtenidos.

Los resultados del balance de masa hídrica proporcionado por este estudio (Tabla 18), son $51 \text{ hm}^3/\text{año}$ para recarga de lluvia, que es un valor similar a los aportados en otros estudios hidrogeológicos realizados por el IGME (1991), o Jiménez-Martínez et al. (2011). La recarga de retorno de riego obtenida tiene un valor de 66 hm^3 , muy similar a los datos obtenidos mediante otras metodologías por Jiménez-Martínez et al. (2016), o $53 \text{ hm}^3/\text{año}$ para transferencia vertical en el modelo contra los $46 \text{ hm}^3/\text{año}$ del estudio anterior de Jiménez-Martínez et al., (2016). Las extracciones por bombeo obtenidas de $92.42 \text{ hm}^3/\text{año}$, son también similares a las contenidas en los documentos y estudios de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS, 2016), donde exponen que los bombeos están en torno a los $88 \text{ hm}^3/\text{año}$, o de Jiménez-Martínez et al. (2016), con valores de $104 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Se ha realizado además un estudio de sensibilidad sobre los valores contenidos en los balances generados, para determinar por periodos de tiempo, la estabilidad de esos valores frente al intervalo de tiempo calibrado. De este estudio

de estabilidad o sensibilidad de balances se puede concluir con respecto a las entradas al sistema, que la recarga natural, y las entradas laterales son bastante estables, para los tres periodos de tiempo realizados, decreciendo ligeramente los valores de retornos de riego cuando se introduce en el sistema el periodo de tiempo estimado entre 1925 a 1955, en torno al -35%, debido a los valores bajos de retorno de riego existentes en estas tres primeras décadas, lo que hace bajar el valor medio con respecto a los otros dos periodos temporales, donde no se contabilizan estas décadas de retornos bajos

De este estudio de estabilidad o sensibilidad de balances se puede concluir con respecto a las entradas al sistema, que la recarga natural, y las entradas laterales son bastante estables, para los tres periodos de tiempo realizados, decreciendo ligeramente los valores de retornos de riego cuando se introduce en el sistema el periodo de tiempo estimado entre 1925 a 1955, en torno al -35%, debido a los valores bajos de retorno de riego existentes en estas tres primeras décadas, lo que hace bajar el valor medio con respecto a los otros dos periodos temporales, donde no se contabilizan estas décadas de retornos bajos.

Con respecto a las salidas del sistema, las extracciones son estables con ligeras variaciones y valores cercanos, excepto para el periodo temporal de puesta en marcha del TTS que tiene mucho peso en el los valores promedios objeto de estudio, produciendo aumentos en torno al +35%. Para las descargas al Mar Menor y Mar Mediterráneo, los valores son estables, excepto por un ligero aumento del volumen promedio producido en este siglo XXI, en torno al + 25 %.

Para el resto de salidas a otras capas y zonas laterales, los valores son estables y similares entre ellos no presentando discrepancias importantes, y las ligeras variaciones existentes son fruto de las agrupaciones temporales realizadas para el presente análisis, ya que los valores de la primera mitad del siglo XX, distan sobre los valores de la segunda mitad de siglo, y sobre los valores del actual siglo XXI.

Si lo estudiamos por tramos acuíferos, el acuífero libre Cuaternario es más estable que el resto del sistema confinado, que transmite mayor incertidumbre y variabilidad según aumenta la profundidad de la capa. Analizando en conjunto y por tramos el sistema, es evidente que en todos los casos existe déficit hídrico (Tabla 22).

Tabla 22. Comparativa del equilibrio hídrico del modelo de Campo de Cartagena calculado para varios periodos temporales. Estado transitorio (hm³/año).

| Flujo | Concepto | Valores medios (hm ³ /año) | | | | | |
|----------|------------------------|---------------------------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|
| | | Balance periodo 1970-2000 | | Balance periodo 2000-2018 | | Balance periodo 1925-2018 | |
| | | Cuaternario | Resto | Cuaternario | Resto | Cuaternario | Resto |
| Entradas | Recarga natural | 42 | 7 | 43 | 8 | 41 | 7 |
| | Retorno riego | 65 | 0 | 66 | 0 | 43 | 0 |
| | Otras entradas | 7 | 73 | 5 | 69 | 6 | 53 |
| | Suman.- | 114 | 80 | 114 | 77 | 90 | 60 |
| Salidas | Bombeos | 35 | 105 | 25 | 67 | 32 | 70 |
| | Salida Mar Menor | 29 | 0 | 42 | 0 | 27 | 0 |
| | Salida Mediterráneo | 3 | 0 | 4 | 0 | 3 | 0 |
| | Otras salidas | 39 | 19 | 30 | 23 | 23 | 15 |
| | Pérdidas | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| | Suman.- | 107 | 124 | 102 | 90 | 86 | 85 |
| | Suman balance Σ | 7 | -44 | 12 | -13 | 4 | -25 |

Para el resto de salidas a otras capas y zonas laterales, los valores son estables y similares entre ellos no presentando discrepancias importantes, y las ligeras variaciones existentes son fruto de las agrupaciones temporales realizadas para el presente análisis, ya que los valores de la primera mitad del siglo XX, distan sobre los valores de la segunda mitad de siglo, y sobre los valores del actual siglo XXI.

Si lo estudiamos por tramos acuíferos, el acuífero libre Cuaternario es más estable que el resto del sistema confinado, que transmite mayor incertidumbre y variabilidad según aumenta la profundidad de la capa. Analizando en conjunto y por tramos el sistema, es evidente que en todos los casos existe déficit hídrico.

Desde el análisis de los datos obtenidos en los balances realizados para cada periodo de estudio, se puede comprobar como al acuífero Cuaternario genera excedentes hídricos en los tres casos de la tabla 22, y como el resto de capas acuíferas generan déficits hídricos. Si observamos y analizamos los balances desde el punto de vista del almacenamiento por capas y desde un punto de vista global (Fig. 77), se puede comprobar como el acuífero libre Cuaternario genera déficits hasta la segunda mitad de la década de los años 60 del siglo pasado, y a partir de ese momento, se produce un punto de inflexión donde empieza a generar excedentes hídricos hasta la actualidad con valores algo inferiores a los $1,600 \text{ hm}^3$ acumulados, lo que ha generado mayor descarga y un aumento de los niveles piezométricos.

Para los acuíferos confinados la situación es la contraria. Los acuíferos de edad Plioceno y Messiniense tienen una evolución similar del almacenamiento hasta la segunda mitad de la década de los años 60, desde donde el almacenamiento decrece más fuertemente en el Messiniense que en el Plioceno. Este último acuífero de edad Plioceno decrece paulatimamente hasta la puesta en marcha del TTS, a partir del cual, se modifica la tendencia bajista y se estabiliza con un ligera recuperación que llega hasta la actualidad. El valor del déficit acumulado está en torno a $1,300 \text{ hm}^3$. Para el acuífero de edad Messiniense, la curva de descenso hasta la puesta en marcha del TTS es similar al Plioceno, pero este acuífero confinado no recupera en ningún momento, suavizando ligeramente la pendiente de la curva (Fig. 77), con un valor de déficit acumulado de $2,400 \text{ hm}^3$. El acuífero de edad Tortoniense tiene ligeros excedentes al inicio del periodo, pero luego los déficits son permanentes hasta la actualidad con valores pequeños, acumulando 300 hm^3 .

Para resolver conclusiones sobre este análisis del almacenamiento, se ha generado un balance con la suma de todos los acuíferos y se ha denominado Global, donde se introducen la suma de todos los valores del sistema (Fig. 77). De la observación de estos datos y de la gráfica realizada, queda patente y claro que los datos obtenidos del almacenamiento del sistema confirman la bajada paulatina de niveles piezométricos y asimismo, del almacenamiento del sistema.

La curva de almacenamiento global tiene el mínimo en la primera mitad de los años 80, desde donde empieza una recuperación paulatina y estable hasta la actualidad

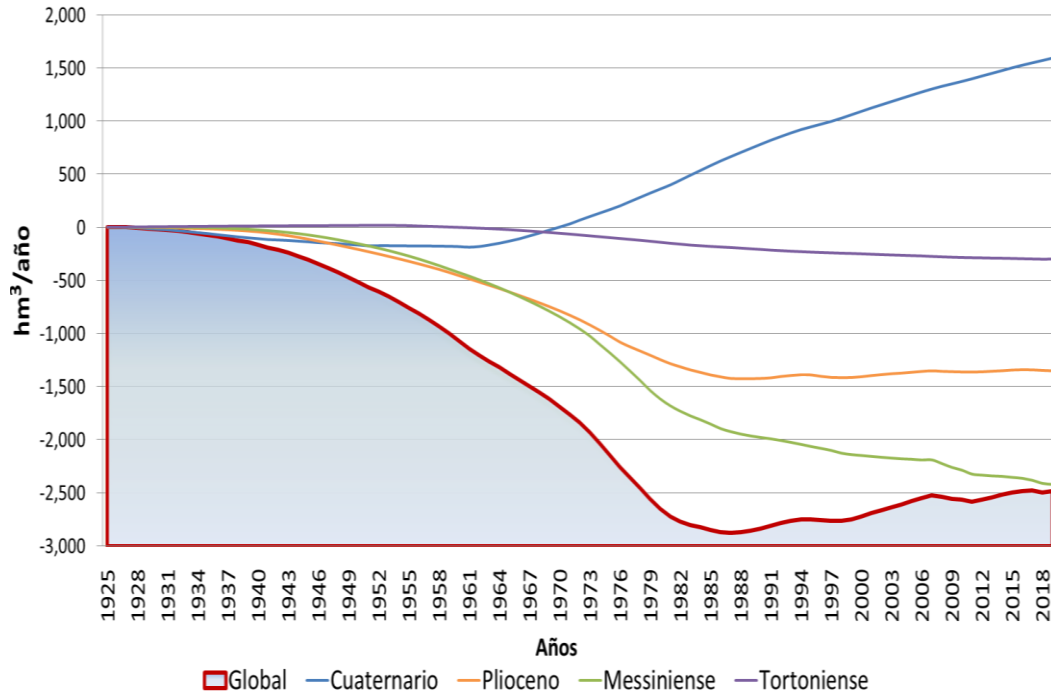


Fig. 77 Gráfica de la evolución del almacenamiento del sistema hídrico (1925-2018).

Esta evolución de niveles se argumentan en otros trabajos sobre Campo de Cartagena, como el realizado por García-Aróstegui et al. (2012), por Baudron et al., (2014), por Jiménez-Martínez et al. (2012, 2016), o por García-Aróstegui (2018).

El modelo de flujo de aguas subterráneas creado nos ha permitido integrar la información hidrogeológica obtenida y generar una herramienta, que permitirá avanzar en el estudio hidrogeológico de acuíferos multicapa costeros sometidos a explotación intensiva en entornos semiáridos, usando este sistema acuífero como laboratorio científico donde estudiar los efectos hidrodinámicos en un sistema muy antropizado.

Ha sido posible reproducir la evolución del siglo pasado con cierto éxito, teniendo en cuenta que en los primeros 45 años no se dispone de información suficiente, ni de niveles piezométricos, ni de regímenes de explotación por bombeo de las distintas capas. También se ha conseguido establecer en un orden de magnitud, los valores de las extracciones por bombeo realizadas en el periodo objeto de estudio con escasos datos, estableciendo intervalos de volúmenes

extractivos que permitirán una gestión sostenible del sistema hídrico. Se han generado balances hídricos entre las diferentes capas acuíferas y sus descargas hacia el Mar Menor y el Mar Mediterráneo, y se ha realizado una primera aproximación cuantitativa a la comunicación hidráulica entre estas capas. Se ha incorporado al sistema un quinto acuífero, los materiales carbonatados del Pérmico-Triásico con el afloramiento en el hosrt de Cabezo Gordo, que comunica a través de su estructura geológica todas las capas.

VII - CONCLUSIONES

VII - CONCLUSIONES

Entre las principales conclusiones del presente estudio, podemos destacar:

Se ha conseguido concluir con éxito la reconstrucción de la evolución temporal del acuífero, teniendo en cuenta que existen grandes periodos de tiempo en que no se dispone de información con la incertidumbre asociada que conlleva, y se ha reconstruido la inversión del gradiente hidráulico provocado por la explotación intensiva a que ha sido sometido este sistema hídrico. Existen varios trabajos científicos anteriores que han estudiado este fenómeno, con la hipótesis de relación entre el exceso de extracciones por bombeo con las modificaciones hidrodinámicas producidas, pero estudiando más en profundidad las afecciones al acuífero Cuaternario. Esta tesis sigue ese mismo criterio, pero incorporando en el estudio todo el sistema completo, y se constata el efecto directo que sobre el sistema ha tenido la explotación intensiva para la inversión el gradiente hidráulico y como esto ha afectado directamente al sentido de los flujos internos dentro del sistema hídrico subterráneo. Las capas acuitardas existentes entre las distintas capas permeables, con las fallas, contactos y discontinuidades existentes, y con los más de 2,000 pozos inventariados que las atraviesan, siguen aislando lo suficiente unas capas acuíferas de otras, como para lograr zonas con evoluciones piezométricas y gradientes totalmente distintos.

Los balances hídricos generados y analizados en la presente tesis por capas y también globalmente como un único sistema, indican la importancia que los retornos de riego tienen en un sistema acuífero multicapa que esté sometido a una explotación intensiva de aguas subterráneas en zonas semiáridas. Estos retornos de riego si no son capaces de recargar a los acuíferos inferiores confinados, pueden provocar problemas en las capas más superficiales el terreno con aumentos excesivos del nivel piezométrico, incluso con surgencias o descargas de agua no deseadas. Si una zona o región tiene una importante actividad agrícola, y esta produjese exceso de infiltración de productos agro-químicos al subsuelo se puede producir un doble efecto negativo. El primero es la contaminación por superficie o subterráneamente de las zonas de descarga de la capa superficial

Cuaternaria, y un segundo efecto sería la contaminación de capas acuíferas inferiores a través de pozos y sondeos, o de transferencias hidrogeológicas naturales.

Para el caso de Campo de Cartagena, los excedentes del acuífero libre Cuaternario no son capaces de recargar a los acuíferos inferiores, provocando descargas subterráneas y superficiales de aguas con alta salinidad. El sistema es sensible a descensos de la recarga, y ligeras bajadas en la misma desequilibran en gran medida el sistema para la explotación existente y generan modificaciones hidrodinámicas de cierta envergadura. Con el cambio climático que se está experimentado actualmente a nivel mundial que repercute directamente en la pluviometría, y que particularmente para España y la zona Sureste del país tiene especial significación con la bajada de precipitaciones, para conservar el frágil equilibrio hídrico que tiene el sistema en los últimos años, puede ser conveniente bajar en la misma medida las extracciones por bombeo del sistema, o en su caso, bajar la demanda neta o satisfacerla con otras fuentes alternativas de suministro que no provengan del subsuelo de Campo de Cartagena. No obstante, las incertidumbres de este sistema hídrico son tan elevadas, que es difícil cuantificar el impacto.

La extracción de agua por bombeo en este siglo XXI del acuífero multicapa de Campo de Cartagena, actualmente se evalúa en 92 hm³/año, aunque ha habido una época entre 1960 y 1980 donde los valores han tenido un promedio superior a los 150 hm³/año. Como el agua subterránea era la única fuente de agua antes de la puesta en marcha del TTS, los valores de extracciones introducidos en el modelo para su calibración han sido algo superiores que las manejadas por otros estudios. El balance hídrico es claramente favorable para la recuperación de niveles en el acuífero Cuaternario, existiendo un cierto equilibrio hídrico en el acuífero Plioceno y una sobreexplotación en el acuífero Messiniense. Para todo el sistema hídrico, también la recuperación está siendo favorable pero lenta. Con niveles extractivos en torno a los 90 hm³/año y entradas pluviométricas útiles de 35 mm/año, el sistema mantiene un frágil equilibrio.

El valor promedio establecido para la recarga global anual es de 84 hm³/año para el período (1925-2018) y de 117 hm³/año para el siglo XXI. Sin embargo, el estudio de recarga y bombeo para plantas privadas desalobradoras en la sección

Cuaternaria merece mayor investigación para ver la repercusión que tiene en el sistema en cantidad y calidad de sus aguas.

Con respecto a la problemática existente por la transferencia de agua subterránea desde el sistema acuífero de Campo de Cartafena a la laguna del Mar Menor, se ha resuelto una efectiva descarga únicamente desde el acuífero libre Cuaternario con un valor promedio en este siglo de 42 hm³/año. Este valor promedio es algo mayor que valor hallado para un régimen permanente (36 hm³/año), debido al incremento que produce en el sistema los retornos de riego. Mientras siga el acuífero libre Cuaternario con excedentes hídricos que generen gradientes hidráulicos a favor de las descargas, este fenómeno seguirá sucediendo.

En la actualidad, no existe una problemática como tal por la intrusión marina que ha podido generarse en el acuífero costero y multicapa del Campo de Cartagena. Si hubo aguas salinas en el interior en la década de los años 60 y 70, pero hoy en día, solamente quedan pequeñas zonas localmente en la parte Sur del Mar Menor y al Norte de San Pedro del Pinatar.

Se ha constatado la existencia de una comunicación hidráulica entre las capas permeables del acuífero. Parte de esta comunicación es causada por los contactos de materiales carbonatados del Pérmico-Triásico, a través del horst de Cabezo Gordo con todas las capas existentes, formando una vía de comunicación hidráulica a través de sus materiales permeables con el resto de capas. Otra parte se produce a través de los contactos con el Triásico de Los Victorias, a través de la Sierra Cartagena-La Unión con el Cuaternario y Plioceno, y otra a través de contactos entre la capa Cuaternaria y el Plioceno. Es significativo el contacto existente en la zona Nor-Oeste del Algar y zona de Torre-Pacheco, donde se ha constatado que las fuertes recuperaciones de niveles piezométricos del tramo Plioceno habidas en periodos de tiempo cortos, no son posibles únicamente con el aporte de la recarga natural, y sí mediante la adición de flujos de agua provenientes de la capa Cuaternaria mediante contactos entre estos estratos permeables.

Existe otra parte de comunicación hidráulica entre capas provocada por flujos verticales a través de los pozos existentes en la zona, generalmente por tener comunicadas varias capas a través de sondeos, algunas veces mal construido y

otras veces mediante pozos abandonados. Se tiene evidencias y constatación de la existencia de más de 2,000 sondeos o pozos, 600 de los cuales atraviesan varios tramos acuíferos generando comunicación hidráulica vertical directa. Esta comunicación vertical a través de pozos se ha calculado para este siglo XXI en 36 hm³/año. Si la transferencia del total de flujo vertical a través del sistema acuífero es de 57 hm³/año, esto implica que el 63% de este flujo se produce a través de la comunicación vertical de los pozos. El 37% restante, se lleva a cabo a través de discontinuidades, contactos e infiltración entre capas acuíferas. Para flujos totales a través del sistema hídrico, los porcentajes serían del 48 y 52 respectivamente.

En las áreas Triásicas de Los Victorias y Cabezo Gordo, se experimentan fuertes caídas en los niveles piezométricos, incluso después del secado de las celdas, causado por sus fuertes gradientes hidráulicos donde hay comunicación entre los acuíferos. Dichas zonas constituyen acuíferos carbonatados difíciles de modelar en sus interrelaciones con el acuífero multicapa.

En el modelo se ha considerado que los acuíferos Plioceno y Messiniense se encuentran bajo la laguna Mar Menor y el Mar Mediterráneo, y en sus resultados se comprueba que no hay comunicación entre esos cuerpos de agua y los acuíferos confinados inferiores en esa zona.

Se ha implementado una metodología para la simplificación espacial sobre los pozos de agua subterránea, por tener que mover una cantidad enorme de datos con los problemas de software que genera. Por ello, se han asignado en celdas de 2,500x2,500 m los sondeos existentes en la misma en un único punto para cada capa, resultanto tres sondeos por celda en la mayoría de los casos. Debido a la incertidumbre asociada a este cambio dentro del modelo y a su posible repercusión en los resultados, se han realizado varias simulaciones que se han resuelto favorablemente, y donde la sensibilidad de la ubicación del sondeo dentro de la celda, se ha constatado de manera satisfactoria al no influir de manera determinante en los resultados obtenidos. De este mismo análisis, entre celdas de 500x500 m, 1,500x1,500 m y 2,500x2,500 m, la más equilibrada es la de 1,500x1,500 m con una simplificación de 9 celdas de 500x500 m que es la celda empleada en el modelo. Dentro de la celda de 500x500 m, la ubicación del pozo o simplificación de pozos que contenga, su repercusión en los resultado es nula o casi nula, pero la simplificación también en muy pequeña.

La investigación realizada de la evolución histórica de esta zona de Murcia, al ajustar todo el sistema acuífero en un modelo numérico, proporciona información valiosa a los interesados en el manejo sostenible del acuífero en el futuro: por un lado, confirma ciertas hipótesis de trabajo hidrogeológicas sobre la explotación intensiva en este tipo de acuíferos, con los valores de balances hídricos proporcionados por el modelo que son similares a las cifras obtenidas por otros estudios similares, y por otro lado, corrobora la recuperación de los niveles piezométricos del acuífero libre Cuaternario, y la ligera recuperación con un frágil equilibrio de todo el sistema observado en las últimas décadas

VIII – LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

VIII –LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de tesis doctoral ha tenido como especial limitación, la relacionada con la escasez de información fiable, fundamentalmente en los datos de las series temporales de piezometrías donde se han conseguido pocos sondeos con series de datos largas, y también en los datos de volúmenes extraídos del inventario de pozos para el bombeo de las aguas subterráneas, donde la incertidumbre es considerable.

Entre los estudios deseables para llevar a cabo en futuras líneas de investigación, estaría el análisis más profundo sobre las transferencias verticales entre la capa cuaternaria y las capas confinadas inferiores, debido al desequilibrio existente entre el acuífero superficial con aumento de niveles y los inferiores con niveles decrecientes o ligeramente estables en algunos casos localmente.

Debido a la repercusión medio-ambiental y socio-económico que produce en la región las descargas de aguas al Mar Menor, se podría estudiar alternativas que redujeran esos flujos mediante bombeos cercanos a la costa, lo que reduciría las descargas del acuífero Cuaternario al Mar Menor.

También, el estudio de recarga y bombeo de plantas privadas de desalinización en el tramo Cuaternario merece mayor investigación, debido a la problemática de aumento de la salinidad de esas aguas y la problemática medio-ambiental de la salmuera o aguas de rechazo de las plantas de osmosis inversa.

IX - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IX – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albacete, M., Solís, L., Quintana, J.L., Gil, F., Gómez, A., Gómez, A., Sánchez, M. (2001). Bases para una gestión sostenible de las aguas subterráneas del Campo de Cartagena. En: VII Simposio de Hidrogeología-AEH. Murcia. España. XXIII, pp. 13-24.
- Alcalá, F.J., Custodio, E. (2014). Spatial average recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in continental Spain. *Hydrological Processes*, 28(2): 218-236.
- Alcalá, F.J., Custodio, E. (2015). Natural uncertainty of spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance in continental Spain. *Journal of Hydrology*, 524: 642–661.
- Alcolea, A., Contreras, S., Hunink, J., García-Aróstegui, J.L., Jiménez-Martínez, J. (2019). Hydrogeological modelling for the watershed management of the Mar Menor coastal lagoon (Spain). *Science of the Total Environment*, 663: 901–914.
- Alcon, F., de Miguel, M.D., Burton, M. (2011). Duration analysis of adoption of drip irrigation technology in southeastern Spain. *Technological Forecasting and Social Change*, 78(6): 991–1001.
- Anderson, M., Woessner, W. (1992). *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*. Elsevier, p. 535.
- Aparicio, J., Alfranca, O., Jimenez-Martinez, J., García-Aróstegui, J.L., Candela, L., López, J.L. (2015). Groundwater salinity process, mitigation measures and economic assessment: An example from an intensive agricultural area. En: 42th IAH Congress 2015. Rome, Italy, Abstr Book, p. 290.
- Aparicio, J.O., Candela, L., Alfranca, O. (2016). Coste de la desalobración de aguas subterráneas con pequeñas plantas desalobradoras ($\leq 2200 \text{ m}^3/\text{ día}$) y su uso en el Campo de Cartagena. En: Congreso hispano-luso, AIH-GE 2016. Madrid, España. AIH, pp. 1-7.

- Bagher, M., Zanzam, A. (2011). Quantitative y Qualitative simulation of groundwater by mathematical models in Rafsajam aquifer using Modflow y MT3MDS. *Arabian Journal of Geosciences*. Springer link 2013. 6(3): 901-912.
- Barthel, R., Jagelke, J., Gotzinger, J., Gaise, T., Printz, A. (2008). Aspects of choosing appropriate concepts for modelling groundwater resources in regional integrated water resources management. Examples from the Neckar (Germany) and Ouémé catchment (Benin). *Physics and chemistry of the Earth*, 33(1-2): 92-114.
- Baudron, P., García-Aróstegui, J.L., Leduc, C., Senent, M., Jimenez-Martinez, J. (2011). Impact of human activities on groundwater flow and quality in a coastal Mediterranean semi-arid aquifer system. Case study of the Campo de Cartagena (S.E. Spain). En: *CIREDD4 2011*, Alger, Algeria.
- Baudron, P., Alonso-Sarria, P., García-Aróstegui, J.L., Cánovas-García, L., Martínez-Vicente, D., Moreno-Brotons, J. (2013). Identifying the origin of groundwater samples in a multi-layer aquifer system with Random Forest classification. *Journal of Hydrology*, 499: 303-315.
- Baudron P. (2013b). Anthropization of a semiarid Mediterranean multi-layer aquifer system (Campo de Cartagena, SE Spain). Hydrodynamic, geochemical and isotopic approaches. [Tesis Doctoral]. Universidad de Murcia.
- Baudron, P., Barbecot, F., García-Aróstegui, J.L., Leduc, C., Travi, Y., Martínez-Vicente, D. (2014). Impacts of human activities on a semiarid multilayer aquifer recharge (Campo de Cartagena, Spain). *Hydrological Processes*, 28(4): 2223-2236.
- Baudron, P., Cockenpot, S., López-Castejon, F., Radakovitch, O., Gilabert, J., Mayer, A., García-Aróstegui, J.L., Martínez-Vicente, D., Leduc, C., Claude, C. (2015). Combining radon, short-lived radium isotopes and hydrodynamic modeling to assess submarine groundwater discharge from an anthropized semiarid watershed to a Mediterranean lagoon (Mar Menor, SE Spain). *Journal of Hydrology*, 525: 55-71.
- Bear, J., Alexander, H., Cheng, D., Batu V., Chen, C., Kuang, X., Jiao, J.J. (2010). Methods to derive the differential equation oh the free surface boundary.

- Department of civil and environmental engineering. Israel. *Ground Water*, 48(4): 486-490.
- Burnett, W.C., Cable, J.E., Corbett, D.R. (2003). Radon tracing of submarine groundwater discharge in coastal environments. *Land and Marine Hydrogeology*, Elsevier, pp. 25-43.
- Bustamante, O. (2012). Modelación del acuífero de Pica. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile. Informe final S.I.T. nº 294, p. 108.
- Cabezas, F. (2009). Balance hídrico del Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico. Murcia, España. Instituto Euromediterráneo del Agua, pp. 167-206.
- Calvache, M.L., Pulido-Bosch, A. (1996). Modelización de medidas correctoras de la intrusión marina en los acuíferos del río Velez, río Verde y Castell de Ferro. Málaga y Granada. *Estudios Geológicos*, 52(5-6): 269-278.
- Candela, L., Elorza, F.J., Tamoh, K., Jiménez-Martínez, J., Aureli, A. (2014). Groundwater modeling with limited data sets: The Chari-Logone area. *Lake Chad Basin, Chad. Hydrological Processes*, 28(11): 3714-3727.
- CARM. (2000). Estudio para un plan de gestión de las aguas subterráneas del Campo de Cartagena. Informe para la Región de Murcia. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, España.
- Chávez, A., Pinales, A., Ducoing, R., Llerar, G., Cruz, J.L. (2006). Programa de desarrollo de modelos hidrodinámicos de acuíferos. *Revista gestión del agua. Aquaforum*, 42: 1-4.
- Cheng, C., Kuang, X., Jiao, J.J. (2010). Methods to derive the differential equation on the free surface boundary. *Ground Water*, 48(4): 486-493.
- CHS (1998). Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura de 1998. Confederación Hidrográfica del Segura. Murcia, España.
- CHS. (2007). Plan de Actuación en situaciones de alerta y eventual sequía de la Confederación Hidrográfica del Segura. Confederación Hidrográfica del Segura. Murcia, España.
- CHS. (2014). Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura para el periodo 2009/2015. Confederación Hidrográfica del Segura. Murcia, España.

- CHS. (2016). Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura para el periodo 2015/2021. Confederación Hidrográfica del Segura. Murcia, España.
- Contreras, S., Hunink, J.E., Baille, A. (2014). Building a watershed information system for the Campo de Cartagena basin Spain. Integrating hydrological modeling and remote sensing. Report 125. Cartagena, Spain: FutureWater, p. 59.
- Contreras, S., Alcolea, A., Jimenez-Martinez, J., Hunink, J. (2017). Cuantificación de la descarga subterránea al Mar Menor mediante modelización hidrogeológica del acuífero superficial Cuaternario. Informe. Cartagena, Spain: FutureWater, p. 176.
- Cox, M., James, A., Hawke, A., Raiber, M. (2012). Groundwater Visualisation System (GVS): A software framework for integrated display and interrogation of conceptual hydrogeological models, data and time-series animation. *Journal of Hydrology*, 491: 56-72.
- Crichlow, H.B. (1977). *Modern reservoir engineering—A simulation approach*. 1st ed. Oklahoma: Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs. New Jersey, USA.
- Custodio, E. (1991). Characterisation of aquifer overexploitation: comments on hydrogeological and hydrochemical aspects: the situation in Spain. En: XXIII IAH Congress, Canary Island, Spain, I, pp. 3-19.
- Custodio, E. (1996). Explotación racional de las aguas subterráneas. *Acta geológica hispánica*, 3: 21-48.
- Custodio, E., Kretsinger, V., Llamas, R. (2005). Intensive development of groundwater: concept, facts and suggestions. *Water Policy*, 7(2): 157-162.
- Custodio, E., Andreu-Rodes, J.M., Aragon, R., Estrela, T., Ferrer, J., Garcia-Aróstegui J.L. Manzano, M., Rodríguez-Hernández, L., Sahuquillo, A., Del Villar, A. (2016). Groundwater intensive use and mining in south-eastern peninsular Spain: Hydrogeological, economic and social aspects. *Science of the Total Environment*, 559: 302–316.
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons, Inc., p. 495.
- Dong, G., Chen, J., Fu, C., Jiang, H. (2012). Analisis of groundwater level fluctuation in a coaster confined aquifer by a sea-level variation. *Hydrogeology Journal*, 20(4): 719-726.

- Dupuy de Lome, E., Gorostízaga, J., Novo y Chicarro, P. (1917). Informe del Instituto Geológico sobre alumbramientos de aguas subterráneas por cuenta del Estado. Boletín Oficial de Minas y Metalurgia, pp. 55-68.
- Ebrahimi, H., Ghazavi, R., Karimi, H. (2016). Estimation of Groundwater Recharge from the Rainfall and Irrigation in an Arid Environment Using Inverse Modeling Approach and RS. *Water Resources Management*, 30(6): 1939-1951.
- Foster, S.S.D. (1991). Unsustainable development and irrational exploitation of groundwater resources in developing nations: an overview. En: XXIII IAH Congress, Canary Island, Spain. Vol I, pp. 385-401.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs. New Jersey, USA. pp. 262-265.
- García-Aróstegui, J.L., Aragón, R., Hornero, J. (2003). Situación de los acuíferos costeros de Cabo Roig y Torreveja (Alicante) en relación con la explotación intensiva de sus recursos hídricos, Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros. Países Mediterráneos. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp. 445-452.
- García-Aróstegui, J.L., Jiménez-Martínez, J., Baudron, P., Martínez-Vicente, D., Guerra, J. (2012). Geometry of the Campo de Cartagena and implications in hydrogeological functioning. New contributions to the knowledge of coastal aquifers. *Hydrogeology and Groundwater Series 29*. Geological Survey of Spain, pp. 439-450.
- García-Aróstegui, J.L., Baudron, P., Martínez-Vicente, D., Senent-Aparicio, J. (2014). Groundwater depletion in south-eastern Spain: A regional analysis to a global problem. En: Conferencia, 41st IAH International Congress "Groundwater : Challenges and Strategies", Marrakech, Marruecos.
- García-Aróstegui, J.L., Marín, F., Martínez, D. (2016). Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor. *Hidrogeología*. CARM y ENRM Murcia, España, 1, pp. 7-22.
- García-Aróstegui, J.L. (2018). Hidrogeología del Campo de Cartagena: Funcionamiento de los acuíferos y relación con el Mar Menor (Murcia). En: VII Jornada Agua y Sostenibilidad. Cátedra del Agua y la Sostenibilidad e IGME. Murcia, España.

- García-Pintado, J., Martínez-Mena, M., Barbera, G.G., Albaladejo, J., Castillo, V.M. (2007). Anthropogenic nutrient sources and loads from a Mediterranean catchment into a coastal lagoon: Mar Menor, Spain. *Science of the Total Environment*, 373(1): 220–239.
- Gebreyohannes, T., De Smedt, F., Walraevens, K., Gebresilassie, S., Hussien, A., Hagos, M., Amare, K., Deckers, J., Gebrehiwot, K. (2017). Regional groundwater flow modeling of the Geba Basin, northern Ethiopia. *Hydrogeology Journal*, 25(3): 639–655.
- Gómez-Beltrán, G., Morales-Reyes, G.P., Macedo-Miranda, G., Pavón-Silva, T. (2013). Aplicación del modelo Visual Modflow para la evaluación de la hidrodinámica del acuífero subyacente a un vertedero de residuos sólidos urbanos. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 29(3): 119-126.
- Gossel, W. (2012). GIS-MODFLOW: Ein kleines OpenSource-Werkzeug zur Anbindung von GIS-Daten an MODFLOW. *Grundwasser*, 18(2): 99-102.
- Grindlay, A., Lizárraga, C. (2012). Regadío y Territorio en la Región de Murcia: Evolución y perspectivas de futuro. *Ciudad y Territorio, Estudios Territoriales*. Ministerio de Fomento. Madrid. España, 172, pp. 281-298.
- Guardiola, R. (1927). Estudio metalogenético de la Sierra de Cartagena. *Memorias del Instituto Geológico de España*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. Vol 33, p. 331.
- Gutiérrez, M.M., Rojas, H., Márquez, J.J. (2004). Modelación de acuíferos para el aprovechamiento del agua sostenible. Universidad del Valle. Colombia. *Ingeniería de recursos naturales y del ambiente*, 1: 38-49.
- Hadded, R., Nouri, I., Alshihabi, O., Nabmann, J. (2012). A Decision Support System to Manage the Groundwater of the Zeuss Koutine Aquifer Using the WEAP-MODFLOW. Springer link. *Water Resources Management*, 27(7): 1981-2000.
- Hernández, A., Llanura, H. (2010). Modelación matemática en la explotación de acuíferos costeros. Centro de investigaciones hidráulicas. CUJAE. Colombia. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 31(1): 51-60.
- Herrera, I. (1985). Modelización de acuíferos costeros. Intrusión salina. Universidad de Sonora, UNAM, México.

- ITGE. (1989). Geometría de los acuíferos del Campo de Cartagena (Murcia) Volumen 1/3 Memoria. Volumen 2/3 Mapas. Volumen 3/3 Anexos: inventario de puntos de agua. Informe Técnico. Murcia: Inst. Tecnológico Geominero de España.
- IGME. (1991). Estudio hidrogeológico del Campo de Cartagena 2ª Fase, (Murcia). Volumen 1/2 Memoria. Volumen 2/2 Anejos 1, 2, 3 y 4. 2ª Fase. Informes Técnicos. Murcia: Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME. (1994). Las aguas subterráneas del Campo de Cartagena. (Murcia, España). Murcia: Instituto Geológico y Minero de España.
- ITGE. (1997). Mapa geológico de España. MAGNA 955. Fuente Alamo de Murcia (1:50.000).
- IGME. (2005). Estudio de la información geológica y geofísica del subsuelo (sísmica de reflexión y sondeos) en el sector SE de la Provincia de Murcia. Consejería de Industria y Medio Ambiente de la Región de Murcia. Anexos 1-37. Informe Técnico. Murcia: Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME. (2017). Cartografía geológica de España. InfoIgme. (Visor cartográfico mapa geológico continuo escala 1:25.000). Instituto Geológico y Minero de España. (10 de Agosto de 2018). URL disponible en: <http://info.igme.es/visorweb/>.
- IMIDA. (2013). Gestión Integrada del agua en la región de Murcia. El caso del Campo de Cartagena. Murcia: Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario, p. 162.
- Jiménez-Martínez, J., Skagg, T.H., Van Genuchten, M., Candela, L. (2009). A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *Journal of Hydrology*, 367(1-2): 138–149.
- Jiménez Martínez, J. (2010). Acuífer recharge from intensively irrigated farmland. Several approaches. Grupo de Hidrogeología, [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Jiménez-Martínez, J., Aravena, J., Candela, L. (2011). The Role of Leaky Boreholes in the Contamination of a Regional Confined Aquifer. A Case Study: The Campo de Cartagena Region, Spain. *Water, Air, & Soil Pollution*, 215(1-4): 311-327.

- Jiménez-Martínez, J., Candela, L., García-Aróstegui, J.L., Aragón, R. (2012). A 3D geological model of Campo de Cartagena, SE Spain. Hydrogeological implications. *Geologica Acta*, 10: 49–62.
- Jiménez-Martínez J, García-Aróstegui JL, Hunink JE, Contreras P, Baudron P, Candela L. (2016). The role of groundwater in highly human-modified hydrosystem: A review of impact and mitigation options in the Campo de Cartagena-Mar Menor coastal plain (SE Spain). *Environmental Reviews*, 24(4): 377-392.
- Khadri, S.F.R., Pande, C. (2016). Groundwater flow modeling for calibrating steady state using MODFLOW software: a case study of Mahesh River basin, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2: 39.
- Knödel, K., Lange, G., Voigt, H. (2007). *Environmental Geology. Handbook of field methods and case studies*. Berlin. Springer, p. 1047.
- Krumbein, W., Graybill, F. (1965). *An introduction to statistical methods in geology*. McGraw-Hill.
- Lacombe, S., Sudicky, E.A., Frappe, S.K., Unger, J.A. (1995). Influence of leaky boreholes on cross-formational groundwater flow and contaminant transport. Waterloo Centre for Groundwater Research. Ontario. Canada. *Water Resources Research*, 31(8): 1871-1882.
- Lambán, J.L., Aragón, R. (2003). Estado de la intrusión marina en el Campo de Cartagena: evaluación preliminar a partir de la composición química del agua subterránea. En: *Tecnología de la Intrusión Marina en Acuíferos Costeros, Países Mediterráneos (TIAC'03)*. Madrid: Publicación Series IGME, pp. 345-355.
- Leduc, C., Pulido-Bosch, A., Remini, B. (2017). Anthropization of groundwater resources in the Mediterranean region: processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 25(6): 1529–1547.
- Lehr, J.H. (1991). Perceived aquifer overexploitation is, in reality, mismanagement commonly correctable by artificial recharge and well field design. En: *XXIII IAH Congress, Canary Island, Spain, I*, pp. 329-338.
- López-Bermúdez, F., Conesa-García, C. (1990). Características granulométricas de los depósitos aluviales en el Campo de Cartagena. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 16(1-2): 31-54.

- López-Llompart, M.P. (2009). Modelación de flujo de densidad variable en acuíferos kársticos costeros. [Master Tesis]. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- March, H., Saurí, D., Rico-Amorós, A.M. (2014). The end of scarcity? Water desalination as the new cornucopia for Mediterranean Spain, *Journal of Hydrology*, 519: 2642-2651.
- Marín, A. (1925). Informe acerca de la ejecución de sondeos artesianos del Campo de Cartagena. Instituto Geológico y Minero de España. Informe técnico.
- Martínez, M., Senent-Alonso, M. (2007). El agua en el Campo de Cartagena. Murcia: *Revista Murciana de Antropología*, 14: 47-61.
- Mesa, J., Ramos, J. (1909). Pozos artesianos. Tordesillas, Madrid, p 238.
- McMillan, L.A., Rivett, M.O., Tellam, J.H., Dumble, P., Sharp, H. (2014). Influence of vertical flows in wells on groundwater sampling. *Journal of Contaminant Hydrology*, 169: 50-61.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W. (1988). A modular three-dimensional finite difference ground water flow model. US Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, book 6, chap. A1, USGS, Reston, VA.
- Molina, J.L., Bromley, J., García-Aróstegui, J.L., Sullivan, C., Benavente, J. (2010). Integrated water resources management of overexploited hydrogeological systems using Object-Oriented Bayesian Networks. *Environments model & software*, 25(4): 383-397.
- Mohamed, M., Al-Suwaidi, N., Ebraheem, A., Al Mulla, M. (2016). Groundwater modeling as a precursor tool for water resources sustainability in Khatt area, UAE. *Environmental Earth Sciences*, 75: 400.
- Montoya, J. (2007). Las viejas artes de extracción de aguas subterráneas en el Campo de Cartagena. *Revista Murciana de Antropología*, 14: 143-164.
- Moore WS, Arnold R. (1996). Measurement of ^{223}Ra and ^{224}Ra in coastal waters using a delayed coincidence counter. *Journal of Geophysical Research*, 101: 1321-1329.
- Mora, V., Rodríguez-Estrella, T., Aragón, R. (1988). Intrusión marina fósil en el Campo de Cartagena (Murcia). En: *Tecnología de la Intrusión Marina en*

- Acuíferos Costeros, Países Mediterráneos (TIAC'88). Madrid: Publicación Series IGME, 3: 221-236.
- Panapopoulos, G. (2012). Application of Modflow for simulating groundwater flow in the Trifilia karst aquifer. Greece. *Environmental Earth Sciences*, 67(7): 1877-1889.
- Peaceman, D.W. (1977). *Fundamentals of numerical reservoir simulation*. New York, USA; Elsevier Scientific Publishing Company, p. 175.
- Peñuelas, L. (1851). Sobre los pozos artesianos en la provincia de Murcia. *Revista Minera*, 2: 717-724.
- Pérez-Ruzafa, A., Aragón, R. (2003). Implicaciones de la gestión y el uso de las aguas subterráneas en el funcionamiento de la red trófica de una laguna costera. En: Fornés, J. M. y Llamas, M. R (eds.). *Conflictos entre el desarrollo de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales: litoral mediterráneo*. Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, pp. 215-245.
- PIAS. (1975). *Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas. Estudio hidrogeológico de la cuenca baja del Segura. Informe Técnico nº 8, El Campo de Cartagena*. Ministerio de Industria, IGME. Ministerio de Agricultura, INRDA, España, p. 136.
- Pulido-Bosch, A., Navarrete, F., Martínez-Vidal, J.F., Molina, L., Sánchez-Martos, F., Vallejos, A., Martín-Rosales, W. (1997). La contaminación en los acuíferos del campo de Dalías y delta del Andarax (Almería). *Recursos naturales y medio ambiente en el sureste peninsular*. Ed. Instituto de Estudios Almerienses, pp. 363-381.
- Pulido-Bosch, A. (2001). Sobreexplotación de acuíferos y desarrollo sostenible. Problemática de la gestión del agua en regiones semiáridas. Ed. Instituto de Estudios Almerienses, pp. 115-132.
- Rasmussen, P., Sonnenborg, T.O., Gonciar, G., Hinsby, K. (2013). Assessing impacts of climate change, sea level rise, and drainage canals on saltwater intrusion to coastal aquifer. Denmark. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17: 421-433.
- Remson, I., Hornberger, G.M., Molz, F.J. (1971). *Numerical methods in subsurface hydrology*: New York, Wiley-Interscience.

- Reverte, A., Pérez, E. (1990). *Legislación de Aguas*. Madrid, Editorial Tecnos, Madrid. 4ª Edic, p. 559.
- Rodriguez-Estrella T. (2004). Decisive influence of neotectonics on the water connection between the Mediterranean Sea, Mar Menor and the Campo de Cartagena aquifers. (South-East of Spain): Consequences on extracting sea water by means of borings for desalination. En: L. Araguás, E. Custodio y M. Manzano (eds.). *Proceedings 18th SWIM Groundwater and Saline Intrusion*. Madrid. Publicaciones Series IGME, pp. 745-758.
- Rodríguez-Estrella, T., López-Bermúdez, F. (1991). Algunas consecuencias ecológicas de la sobreexplotación de acuíferos en los humedales del Sureste español. XXIII IAH Congress, Canary Island, Spain, I, pp.163-166.
- Rojas, H., Gutiérrez, M.M., Márquez, J.J., Materón, H. (2004). Modelación del acuíferos para el aprovechamiento del agua sostenible. En: XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. IAHR. São Paulo, Brasil.
- Rolandi, M., Yugin, V., Herrero, J.L. (2008). Aportación al conocimiento de la caracterización y el funcionamiento hidrogeológico de la U.H. del Campo de Cartagena (Cuenca del Segura), mediante utilización de técnicas de Tomografía Remota Térmica. En: IX Simposio de Hidrogeología. Elche, España, 28, pp. 691-700.
- Román, C. (1996). *Uso y explotación de la tierra en la comarca de Campo de Cartagena, (Siglos XIX y XX)*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.
- Rubio, J.M. (1928). La cuenca artesiana del Campo de Cartagena. *Revista Minera, Metalúrgica y de Ingeniería*, LXXIX, pp. 229-231, 433-444, 457-460.
- Rushton, K.R., Tomlinson, L.M. (2006). Numerical analysis of confined-unconfined acuífers, *Journal of Hydrology*, 25(3-4): 259-274.
- Sanders, L. (1998). *A manual of Field Hydrogeology*. Prentice-Hall, Old Tappan, N.J, p. 381.
- Santi, P.M., McCray, J.E., Martens, J.L. (2006). Investigating cross-contamination of acuífers. *Hydrogeology Journal*, 14(1-2): 51-68.
- Senent-Alonso, M., Martínez-Vicente, D., Cabezas, F., García-Aróstegui, J.L., Baudron, P. (2009). Aproximación mediante modelización matemática de las descargas del acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena al Mar

- Menor, Murcia. El Mar Menor: Estado actual del conocimiento científico. Murcia, España: Instituto Euromediterráneo del Agua, pp. 109–130.
- Senent-Alonso, M., García-Aróstegui, J.L., Martínez-Vicente, D., Hornero, J. (2015). Sobreexplotación de acuíferos en la cuenca del Segura. Evaluación y perspectivas. Capítulo IV: La sobreexplotación de acuíferos. Murcia, España. Instituto Euromediterráneo del Agua, pp. 55–121.
- Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., García-Aróstegui, J.L., Bielsa-Artero, A., Domingo-Pinillos, J.C. (2015). Evaluating Groundwater Management Sustainability under Limited Data Availability in Semiarid Zones. *Water*, 7: 4305-4322.
- Solís, L., Mora, V., Rodríguez-Estrella, T., Aragón, R. (1988). Situación de la intrusión marina en la Cuenca del Segura. En: Simposio Internacional Tecnología. Intrusión en acuíferos costeros (TIAC'88). Almuñecar, España, pp. 249-265.
- Smith, L., Weathcraft, J. (1993). Groundwater Flow. In: Maidment, D.R., Handbook of Hydrology. Chapter 6. McGraw Hill, Inc..
- Timms, W., Acworth, I. (2002). Origin, lithology and weathering characteristics of Upper Tertiary - Quaternary clay aquitard units on the Lower Murrumbidgee alluvial fan. *Australian Journal of Earth Sciences*, 49(3): 525-537.
- Todd, D. (1959). Groundwater Hidrology. New York, Ed. Wiley & Sons.
- Vives L, Campos H, Candela L, Guarracino L. (2001). Modelación del acuífero Guaraní. *Boletín Geológico y Minero*, 112: 51-64.
- Wan Mohd-Zanri., Ismail, W., Yossof, I., Bahha-Eldin, E., Rahim, A. (2012). Simulation of horizontal well performance using Visual MODFLOW. Springer link. *Environmental Earth Sciences*, 68(4): 1119-1126.
- Wang, H., Gao, J., Zhang, S., Zhang, M., Li, X. (2013). Modeling the Impact of Soil and Water Conservation on Surface and Ground Water Based on the SCS and Visual Modflow. Institute for water Research (ICRA), Spain, 8(11): 12.
- Wallis, I., Prommer, H., Post, V., Vandenbohede, A., Simmons, C. (2012). Simulating MODFLOW-Based Reactive Transport Under Radially Symmetric Flow Conditions. *Ground Water*, 51(3): 398-413.

- Walton, W.C. (1970). Groundwater resource evaluation. New York, Ed. McGraw-Hill, p. 664.
- Yao, Y.Y., Zheng, C.M., Liu, J., Cao, G.L., Xiao, H.L., Li, H.T., Li, W.P. (2015). Conceptual and numerical models for groundwater flow in an arid inland river basin. *Hydrological Processes*, 29(6): 2034-2050.

X - ANEXOS

ANEXO 1: DATOS DE SONDEOS DE CONTROL PIEZOMÉTRICO.

| Nº ORDEN | POZOS | CAPA | X UTM | Y UTM | OBSERV. |
|----------|-----------|-------------|---------|-----------|---------|
| 1 | 283750048 | Cuaternario | 695,685 | 4,192,583 | 7.00 |
| 2 | 283810010 | Cuaternario | 691,810 | 4,187,714 | 13.85 |
| 3 | 273830044 | Cuaternario | 678,098 | 4,187,234 | 102.10 |
| 4 | 273840094 | Cuaternario | 686,694 | 4,180,555 | 18.50 |
| 5 | 273780013 | Cuaternario | 681,725 | 4,191,184 | 100.00 |
| 6 | 283750001 | Cuaternario | 695,688 | 4,190,701 | 2.04 |
| 7 | 283750073 | Cuaternario | 692,872 | 4,194,341 | 52.12 |
| 8 | 273940016 | Cuaternario | 684,492 | 4,170,270 | 34.12 |
| 9 | 263880001 | Cuaternario | 659,147 | 4,177,202 | 33.92 |
| 10 | 273940005 | Plioceno | 682,304 | 4,170,639 | 17.50 |
| 11 | 273780036 | Plioceno | 688,704 | 4,192,588 | 50.00 |
| 12 | 273830036 | Plioceno | 678,878 | 4,184,529 | 48.85 |
| 13 | 283810021 | Plioceno | 690,611 | 4,187,816 | 38.25 |
| 14 | 273880051 | Plioceno | 682,948 | 4,175,536 | 31.25 |
| 15 | 273830031 | Plioceno | 675,140 | 4,180,707 | 48.77 |
| 16 | 283810050 | Plioceno | 690,729 | 4,184,322 | 31.55 |
| 17 | 273940021 | Plioceno | 685,257 | 4,170,763 | 33.25 |
| 18 | 273870035 | Plioceno | 676,495 | 4,172,716 | 29.75 |
| 19 | 273880046 | Plioceno | 686,671 | 4,180,255 | 40.00 |
| 20 | 273920015 | Plioceno | 674,635 | 4,168,856 | 40.55 |
| 21 | 273820006 | Plioceno | 673,787 | 4,186,221 | 59.00 |
| 22 | 273830007 | Messiniense | 680,659 | 4,183,771 | 41.25 |
| 23 | 283750074 | Messiniense | 692,558 | 4,193,384 | 43.56 |
| 24 | 273760064 | Messiniense | 673,657 | 4,194,177 | 50.00 |
| 25 | 273770060 | Messiniense | 676,218 | 4,195,352 | 55.00 |
| 26 | 283810020 | Messiniense | 691,611 | 4,187,816 | 44.15 |
| 27 | 273780003 | Messiniense | 681,914 | 4,195,625 | 49.50 |
| 28 | 273830035 | Messiniense | 678,578 | 4,184,829 | 47.25 |
| 29 | 273760008 | Messiniense | 671,048 | 4,189,817 | 133.00 |
| 30 | 273770026 | Messiniense | 681,023 | 4,193,272 | 52.20 |
| 31 | 273780014 | Messiniense | 681,879 | 4,190,503 | 50.15 |
| 32 | 273780029 | Messiniense | 688,590 | 4,194,196 | 75.00 |
| 33 | 273820033 | Messiniense | 669,634 | 4,188,389 | 135.00 |
| 34 | 273880001 | Messiniense | 683,568 | 4,177,831 | 50.00 |
| 35 | 273880047 | Messiniense | 687,671 | 4,181,255 | 28.50 |
| 36 | 273750015 | Tortonense | 663,316 | 4,192,817 | 291.00 |
| 37 | 273750018 | Tortonense | 666,645 | 4,193,147 | 290.00 |

| Well Name | X [m] | Y [m] | Screen Elev. [m] | Obs. Time [day] | HEAD [m] |
|------------|---------|-----------|------------------|--------------------|----------|
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 0 | 291.00 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 366 | 291.55 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 18,981 | 272.00 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 19,346 | 270.56 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 19,711 | 268.80 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 20,076 | 265.50 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 20,441 | 258.85 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 20,806 | 261.52 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 21,171 | 264.18 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 21,536 | 266.85 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 21,901 | 269.52 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 22,266 | 272.19 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 22,631 | 270.12 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 22,996 | 268.25 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 23,361 | 262.65 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 23,726 | 257.30 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 24,091 | 258.94 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 24,456 | 260.58 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 24,821 | 262.21 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 25,186 | 263.85 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 25,551 | 265.49 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 25,916 | 267.13 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 26,281 | 268.76 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 26,646 | 270.40 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 27,011 | 272.04 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 27,376 | 273.68 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 27,741 | 275.31 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 28,106 | 276.95 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 28,471 | 278.59 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 28,836 | 280.23 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 29,200 | 281.86 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 29,565 | 283.50 |
| 273750015T | 663,316 | 4,192,817 | -38.04 | 29,930 | 283.66 |
| 273750018T | 666,645 | 4,193,147 | -424.50 | 0 | 290.00 |
| 273750018T | 666,645 | 4,193,147 | -424.50 | 366 | 288.65 |
| 273750018T | 666,645 | 4,193,147 | -424.50 | 18,981 | 243.65 |
| 273750018T | 666,645 | 4,193,147 | -424.50 | 19,346 | 243.00 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|
| 273750018T | 666,645 | 4,193,147 | -424.50 | 19,711 | 242.00 |
| 273750018T | 666,645 | 4,193,147 | -424.50 | 20,076 | 241.65 |
| 273750018T | 666,645 | 4,193,147 | -424.50 | 20,441 | 241.26 |
| 273750018T | 666,645 | 4,193,147 | -424.50 | 20,806 | 241.85 |
| 273750018T | 666,645 | 4,193,147 | -424.50 | 21,171 | 242.23 |
| 273750018T | 666,645 | 4,193,147 | -424.50 | 21,536 | 243.56 |
| 273750018T | 666,645 | 4,193,147 | -424.50 | 21,901 | 244.36 |
| 273750018T | 666,645 | 4,193,147 | -424.50 | 22,266 | 244.12 |
| 273750018T | 666,645 | 4,193,147 | -424.50 | 22,631 | 243.10 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 0 | 50.00 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 366 | 49.50 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 17,521 | 14.65 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 17,886 | 12.56 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 18,251 | 8.65 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 18,616 | 7.32 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 18,981 | 1.25 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 19,346 | 3.45 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 19,711 | 6.88 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 20,076 | 9.14 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 20,441 | 5.84 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 20,806 | 3.55 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 21,171 | 2.09 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 21,536 | 2.19 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 21,901 | -0.10 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 22,266 | -2.36 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 22,631 | 2.69 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 22,996 | 4.58 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 23,361 | 2.88 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 23,726 | 1.18 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 24,091 | -0.52 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 24,456 | -2.21 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 24,821 | -8.78 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 25,186 | -5.00 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 25,551 | -14.36 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 25,916 | -13.22 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 26,281 | -11.30 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 26,646 | -14.75 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 27,011 | -18.32 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 27,376 | -26.51 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 27,741 | -27.40 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|--------|--------|--------|
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 28,106 | -36.59 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 28,471 | -32.25 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 28,836 | -32.50 |
| 273760064M | 673,657 | 4,194,177 | -49.00 | 29,200 | -32.75 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 0 | 49.50 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 366 | 49.00 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 17,521 | 22.36 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 17,886 | 16.50 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 18,251 | 15.64 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 18,616 | 15.04 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 18,981 | 14.22 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 19,346 | 13.41 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 19,711 | 12.59 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 20,076 | 11.77 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 20,441 | 10.96 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 20,806 | 10.14 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 21,171 | 6.79 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 21,536 | 8.19 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 21,901 | 7.10 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 22,266 | 6.54 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 22,631 | 6.14 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 22,996 | 5.54 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 23,361 | 4.94 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 23,726 | 4.34 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 24,091 | 3.74 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 24,456 | 3.14 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 24,821 | 2.35 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 25,186 | 1.55 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 25,551 | 1.51 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 25,916 | 1.82 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 26,281 | 1.20 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 26,646 | 0.48 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 27,011 | -3.20 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 27,376 | -2.06 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 27,741 | -2.43 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 28,106 | -3.09 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 28,471 | -3.10 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 28,836 | -5.04 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 29,200 | -5.49 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 29,565 | -6.48 |

| | | | | | |
|-------------|---------|-----------|--------|--------|--------|
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 29,930 | -6.85 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 30,295 | -6.65 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 30,660 | -8.32 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 31,025 | -7.85 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 31,390 | -9.55 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 31,750 | -9.95 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 32,120 | -10.00 |
| 273780003M | 681,914 | 4,195,625 | -46.00 | 33,580 | -7.70 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 0 | 100.00 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 1,825 | 99.52 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 12,775 | 95.25 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 16,280 | 103.00 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 17,520 | 97.59 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 17,885 | 97.29 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 18,250 | 97.00 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 18,615 | 96.70 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 18,980 | 96.41 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 19,345 | 96.11 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 19,710 | 95.82 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 20,075 | 96.39 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 20,440 | 96.96 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 20,805 | 97.53 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 21,170 | 98.10 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 21,535 | 98.67 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 21,900 | 99.24 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 22,265 | 99.81 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 22,630 | 100.38 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 22,995 | 100.95 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 23,360 | 101.52 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 23,725 | 102.09 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 24,090 | 102.66 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 24,455 | 103.20 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 24,820 | 103.83 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 25,185 | 102.57 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 25,550 | 102.12 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 25,915 | 104.98 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 26,645 | 97.58 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 27,010 | 100.68 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 27,375 | 94.85 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 27,741 | 95.07 |

| | | | | | |
|-------------|---------|-----------|--------|--------|--------|
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 28,106 | 96.14 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 28,471 | 97.21 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 28,836 | 98.28 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 29,200 | 99.35 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 29,565 | 100.42 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 29,930 | 101.49 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 30,295 | 102.56 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 30,660 | 102.58 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 31,025 | 104.75 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 31,390 | 104.96 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 31,755 | 103.88 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 32,120 | 104.18 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 32,485 | 103.26 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 32,850 | 101.70 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 33,215 | 100.26 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 33,580 | 103.82 |
| 273780013CV | 681,725 | 4,191,184 | 101.35 | 33,945 | 102.93 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 0 | 46.50 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 366 | 46.00 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 17,521 | -31.77 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 17,886 | -32.49 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 18,251 | -35.70 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 18,616 | -36.70 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 18,981 | -38.56 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 19,346 | -43.58 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 19,711 | -45.63 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 20,076 | -47.87 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 20,441 | -49.55 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 20,806 | -51.50 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 21,171 | -52.50 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 21,536 | -54.25 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 21,901 | -55.05 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 22,266 | -58.60 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 22,631 | -57.44 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 22,996 | -56.28 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 23,361 | -55.12 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 23,726 | -53.96 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 24,091 | -52.80 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 24,456 | -51.64 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 24,821 | -50.47 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|--------|--------|--------|
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 25,186 | -52.86 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 25,551 | -58.98 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 25,916 | -63.68 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 26,281 | -64.68 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 26,646 | -62.40 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 27,011 | -59.52 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 27,376 | -56.64 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 27,741 | -53.76 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 28,106 | -50.88 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 28,471 | -48.00 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 28,836 | -45.12 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 29,200 | -42.24 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 29,565 | -39.36 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 29,930 | -36.48 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 30,295 | -33.60 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 30,660 | -31.73 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 31,025 | -29.84 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 31,390 | -23.73 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 31,755 | -22.17 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 32,120 | -23.56 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 32,485 | -30.86 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 32,850 | -31.22 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 33,215 | -32.21 |
| 273780014M | 681,879 | 4,190,503 | -81.30 | 33,580 | -28.65 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 0 | 45.00 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 366 | 44.85 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 17,521 | -9.26 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 17,886 | -8.81 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 18,251 | -9.06 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 18,616 | -11.03 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 18,981 | -11.49 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 19,346 | -11.95 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 19,711 | -12.41 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 20,076 | -12.88 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 20,441 | -13.34 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 20,806 | -13.80 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 21,171 | -14.26 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 21,536 | -14.72 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 21,901 | -15.18 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 22,266 | -15.65 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|--------|--------|--------|
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 22,631 | -16.11 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 22,996 | -16.57 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 23,361 | -17.03 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 23,726 | -17.49 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 24,091 | -17.95 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 24,456 | -18.41 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 24,821 | -18.88 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 25,186 | -19.34 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 25,551 | -19.80 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 25,916 | -20.26 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 26,281 | -20.72 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 26,646 | -21.18 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 27,011 | -21.64 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 27,376 | -22.11 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 27,741 | -22.57 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 28,106 | -23.03 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 28,471 | -23.00 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 28,836 | -23.84 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 29,200 | -24.17 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 29,565 | -23.86 |
| 273780036P | 688,704 | 4,192,588 | -33.93 | 29,930 | -24.54 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 0 | 62.75 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 366 | 62.36 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 17,521 | 37.96 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 17,886 | 43.82 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 18,251 | 43.83 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 18,616 | 46.22 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 18,981 | 42.17 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 19,346 | 41.31 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 19,711 | 40.01 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 20,076 | 41.78 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 20,441 | 44.75 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 20,806 | 47.30 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 21,171 | 50.30 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 21,536 | 50.36 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 21,901 | 51.35 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 22,266 | 54.90 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 22,631 | 56.60 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 22,996 | 57.42 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 23,361 | 58.24 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 23,726 | 60.06 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 24,091 | 60.88 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 24,456 | 61.70 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 24,831 | 60.20 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 25,186 | 51.20 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 25,551 | 48.23 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 25,916 | 55.90 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 26,281 | 54.68 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 26,646 | 55.14 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 27,011 | 52.71 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 27,376 | 51.30 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 27,741 | 49.25 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 28,106 | 49.99 |
| 273820006P | 673,787 | 4,186,221 | -44.13 | 28,471 | 50.35 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 0 | 123.00 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 366 | 122.65 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 17,521 | 94.68 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 17,886 | 92.35 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 18,251 | 91.02 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 18,616 | 87.65 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 18,981 | 85.37 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 19,346 | 85.37 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 19,711 | 97.36 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 20,076 | 105.40 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 20,441 | 106.35 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 20,806 | 107.93 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 21,171 | 110.10 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 21,536 | 110.35 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 21,901 | 110.20 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 22,266 | 110.65 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 22,631 | 115.60 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 22,996 | 116.60 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 23,361 | 117.60 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 23,726 | 118.60 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 24,091 | 119.60 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 24,456 | 120.09 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 24,821 | 119.72 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 25,186 | 119.23 |
| 273820033P | 669,634 | 4,188,389 | 33.76 | 25,551 | 119.34 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 0 | 46.00 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 366 | 45.52 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 17,521 | -7.29 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 17,886 | -5.91 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 18,251 | -5.27 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 18,616 | -7.43 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 18,981 | -18.60 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 19,346 | -17.37 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 19,711 | -22.12 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 20,076 | -23.32 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 20,441 | -23.10 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 20,806 | -23.47 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 21,171 | -24.00 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 21,536 | -24.13 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 21,901 | -25.00 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 22,266 | -23.70 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 22,631 | -20.90 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 22,996 | -19.01 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 23,361 | -17.13 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 23,726 | -15.24 |
| 273830007M | 680,659 | 4,183,771 | -231.60 | 24,091 | -13.36 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 0 | 50.00 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 366 | 49.65 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 20,441 | -5.34 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 20,806 | -7.70 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 21,171 | -6.71 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 21,536 | -9.42 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 21,901 | -8.46 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 22,266 | -7.49 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 22,631 | -6.53 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 22,996 | -5.56 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 23,361 | -4.60 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 23,726 | -3.64 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 24,091 | -2.67 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 24,456 | -1.71 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 24,821 | -0.74 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 25,186 | 0.22 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 25,551 | 1.18 |
| 273830011M | 675,216 | 4,185,087 | -226.86 | 25,916 | 2.15 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 0 | 44.12 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 366 | 43.72 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 18,251 | 20.62 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 18,616 | 19.87 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 18,981 | 19.12 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 19,346 | 18.51 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 19,711 | 18.89 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 20,076 | 19.20 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 20,441 | 19.45 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 20,806 | 21.10 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 21,171 | 21.50 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 21,536 | 22.20 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 21,901 | 23.10 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 22,266 | 24.25 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 22,631 | 23.02 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 22,996 | 25.65 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 23,361 | 27.12 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 23,726 | 29.40 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 24,091 | 30.62 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 24,456 | 31.06 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 24,821 | 29.62 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 25,186 | 32.07 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 25,551 | 29.20 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 25,916 | 28.98 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 26,281 | 32.20 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 26,646 | 33.58 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 27,011 | 34.28 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 27,376 | 38.20 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 27,741 | 40.99 |
| 273830031P | 675,140 | 4,180,707 | -68.06 | 28,106 | 42.02 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 0 | 45.55 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 366 | 45.21 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 17,521 | -43.36 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 17,886 | -47.25 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 18,251 | -52.08 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 18,616 | -56.03 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 18,981 | -57.87 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 19,346 | -62.63 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 19,711 | -72.18 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 20,076 | -67.66 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 20,441 | -66.21 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 20,806 | -71.51 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 21,171 | -74.73 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 21,536 | -72.14 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 21,901 | -71.56 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 22,266 | -70.06 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 22,631 | -68.21 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 22,996 | -63.43 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 23,361 | -58.65 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 23,726 | -53.87 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 24,091 | -49.09 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 24,456 | -44.31 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 24,821 | -45.67 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 25,186 | -47.20 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 25,551 | -51.43 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 25,916 | -54.74 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 26,281 | -57.08 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 26,646 | -56.54 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 27,011 | -52.02 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 27,376 | -50.82 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 27,741 | -53.81 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 28,106 | -46.71 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 28,741 | -45.73 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 28,836 | -44.58 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 29,200 | -42.58 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 29,565 | -41.57 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 29,930 | -42.20 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 30,295 | -39.22 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 30,660 | -37.65 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 31,025 | -37.24 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 31,390 | -36.95 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 31,755 | -36.60 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 32,120 | -36.92 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 32,485 | -37.15 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 32,850 | -37.45 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 33,215 | -37.76 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 33,580 | -37.42 |
| 273830035M | 678,578 | 4,184,829 | -211.51 | 33,945 | -37.85 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 0 | 43.56 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 366 | 43.05 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 18,251 | 5.17 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 18,616 | 0.98 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|--------|--------|-------|
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 18,981 | -2.56 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 19,346 | -5.38 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 19,711 | -5.30 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 20,076 | -5.77 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 20,441 | -5.83 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 20,806 | -4.90 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 21,171 | -4.70 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 21,536 | -4.10 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 21,901 | -4.15 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 22,266 | 2.55 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 22,631 | 7.94 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 22,996 | 10.83 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 23,361 | 17.83 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 23,726 | 24.83 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 24,091 | 31.83 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 24,456 | 29.00 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 24,821 | 26.87 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 25,186 | 29.63 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 25,551 | 31.86 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 25,916 | 13.98 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 26,281 | 18.29 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 26,646 | 22.46 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 27,011 | 24.30 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 27,376 | 27.10 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 27,741 | 26.77 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 28,106 | 23.77 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 28,471 | 22.57 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 28,836 | 23.34 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 29,200 | 27.02 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 29,565 | 28.58 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 29,930 | 31.06 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 30,295 | 27.25 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 30,660 | 24.84 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 31,025 | 26.85 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 31,390 | 30.08 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 31,755 | 31.52 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 32,485 | 31.25 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 32,850 | 32.60 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 33,215 | 36.41 |
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 33,580 | 35.78 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|--------|--------|--------|
| 273830036P | 678,878 | 4,184,529 | -58.84 | 33,945 | 35.16 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 0 | 100.25 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 366 | 100.00 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 12,776 | 91.25 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 16,426 | 96.11 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 16,791 | 95.69 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 17,156 | 95.33 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 17,521 | 95.21 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 17,886 | 94.02 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 18,251 | 93.83 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 18,616 | 93.42 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 18,981 | 93.01 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 19,346 | 92.42 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 19,711 | 91.85 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 20,076 | 91.25 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 20,441 | 89.90 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 20,806 | 90.20 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 21,171 | 90.00 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 21,536 | 89.90 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 21,901 | 90.10 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 22,266 | 89.50 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 22,631 | 89.10 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 22,996 | 86.10 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 23,361 | 85.25 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 23,726 | 84.36 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 24,091 | 84.02 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 24,456 | 83.66 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 24,821 | 81.01 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 25,186 | 80.75 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 25,551 | 80.38 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 25,916 | 80.68 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 26,281 | 82.82 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 26,646 | 82.25 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 27,011 | 83.85 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 27,376 | 88.00 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 27,741 | 91.00 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 28,106 | 93.09 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 28,471 | 93.70 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 28,836 | 94.77 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 29,200 | 94.73 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|--------|--------|-------|
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 29,565 | 94.35 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 29,930 | 94.48 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 30,295 | 94.43 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 30,660 | 94.62 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 31,025 | 95.23 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 31,390 | 94.82 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 31,755 | 95.17 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 32,120 | 95.05 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 32,485 | 94.94 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 32,850 | 95.45 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 33,215 | 94.15 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 33,580 | 94.77 |
| 273830044C | 678,098 | 4,187,234 | 74.51 | 33,945 | 94.72 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 0 | 20.30 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 366 | 19.74 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 12,776 | 14.82 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 16,426 | 13.22 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 16,791 | 12.88 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 17,156 | 12.10 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 17,521 | 11.65 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 17,886 | 9.87 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 18,251 | 9.12 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 18,616 | 8.21 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 18,981 | 8.65 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 19,346 | 9.32 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 19,711 | 10.02 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 20,076 | 10.35 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 20,441 | 11.18 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 20,806 | 11.50 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 21,171 | 12.05 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 21,536 | 12.50 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 21,901 | 13.30 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 22,266 | 14.51 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 22,631 | 15.65 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 22,996 | 17.15 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 23,361 | 18.05 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 23,726 | 17.65 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 24,091 | 17.26 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 24,456 | 18.40 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 24,821 | 18.60 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 25,186 | 18.36 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 25,551 | 16.43 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 25,916 | 16.40 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 26,281 | 17.60 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 26,646 | 17.88 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 27,011 | 18.59 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 27,376 | 19.11 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 27,741 | 19.62 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 28,106 | 20.02 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 28,471 | 19.66 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 28,836 | 19.74 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 29,200 | 19.65 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 29,565 | 19.60 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 29,930 | 19.52 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 30,295 | 18.87 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 30,660 | 19.74 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 31,025 | 19.76 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 31,390 | 18.74 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 31,755 | 18.52 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 32,120 | 18.60 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 32,485 | 18.48 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 32,850 | 18.18 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 33,215 | 18.20 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 33,580 | 18.95 |
| 273840094C | 686,478 | 4,180,650 | -13.83 | 33,945 | 18.80 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 0 | 40.00 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 366 | 39.50 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 17,521 | -31.20 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 17,886 | -35.35 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 18,251 | -39.69 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 18,616 | -35.06 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 18,981 | -30.43 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 19,346 | -25.80 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 19,711 | -21.17 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 20,076 | -17.16 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 20,441 | -18.40 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 20,806 | -13.10 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 21,171 | -12.60 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 21,536 | -5.80 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 21,901 | -2.35 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 22,266 | 3.60 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 22,631 | 6.47 |
| 273880046P | 686,671 | 4,180,255 | -113.61 | 22,996 | 6.25 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 0 | 43.25 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 366 | 42.98 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 17,521 | -13.33 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 17,886 | -15.35 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 18,251 | -16.68 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 18,616 | -19.65 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 18,981 | -22.65 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 19,346 | -26.53 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 19,711 | -24.65 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 20,076 | -17.16 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 20,441 | -18.40 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 20,806 | -4.60 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 21,171 | -3.50 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 21,536 | -5.70 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 21,901 | 1.75 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 22,266 | 3.60 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 22,631 | -6.47 |
| 273880047M | 687,671 | 4,181,255 | -265.90 | 22,996 | -7.26 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 0 | 38.42 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 366 | 38.02 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 18,251 | -20.74 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 18,616 | -22.25 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 18,981 | -23.52 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 19,346 | -26.58 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 19,711 | -28.85 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 20,076 | -29.42 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 20,441 | -27.37 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 20,806 | -31.87 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 21,171 | -34.02 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 21,536 | -45.02 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 21,901 | -41.67 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 22,266 | -40.02 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 22,631 | -31.02 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 22,996 | -24.11 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 23,361 | -17.20 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 23,726 | -10.29 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 24,091 | -3.38 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 24,456 | -11.50 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 24,821 | -11.13 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 25,186 | -7.75 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 25,551 | -11.05 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 25,916 | -13.25 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 26,281 | -7.80 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 26,646 | -3.93 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 27,011 | -3.55 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 27,376 | -0.50 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 27,741 | 0.73 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 28,106 | 2.08 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 28,471 | 2.52 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 28,836 | 5.54 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 29,200 | 5.39 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 29,565 | 3.55 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 29,930 | -0.43 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 30,295 | -0.35 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 30,660 | -0.26 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 31,025 | 4.25 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 31,390 | 4.55 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 31,755 | 3.89 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 32,120 | 0.58 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 32,485 | 4.00 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 32,850 | 2.15 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 33,215 | -0.32 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 33,580 | 2.90 |
| 273880051P | 682,948 | 4,175,536 | -101.67 | 33,945 | 2.33 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 0 | 34.51 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 366 | 34.01 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 12,776 | 12.12 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 18,251 | 3.95 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 18,616 | 4.23 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 18,981 | 4.50 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 19,346 | 4.78 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 19,711 | 5.05 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 20,076 | 5.33 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 20,441 | 5.60 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 20,806 | 7.70 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 21,171 | 6.68 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 21,536 | 5.15 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|--------|--------|--------|
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 21,901 | 5.00 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 22,266 | 5.45 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 22,631 | 5.95 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 22,996 | 7.24 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 23,361 | 8.53 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 23,726 | 9.82 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 24,091 | 11.11 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 24,456 | 12.40 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 24,821 | 11.41 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 25,186 | 11.67 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 25,551 | 12.14 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 25,916 | 10.00 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 26,281 | 12.45 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 26,646 | 11.62 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 27,011 | 10.81 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 27,376 | 11.05 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 27,741 | 12.00 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 28,106 | 12.96 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 28,471 | 13.91 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 28,836 | 14.87 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 29,200 | 15.82 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 29,565 | 16.77 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 29,930 | 17.70 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 30,295 | 17.53 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 30,660 | 17.36 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 31,025 | 17.20 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 31,390 | 17.03 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 31,755 | 16.86 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 32,120 | 16.69 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 32,485 | 16.52 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 32,850 | 15.66 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 33,215 | 14.91 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 33,580 | 15.62 |
| 273940016C | 684,492 | 4,170,270 | -2.09 | 33,945 | 14.46 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 0 | 37.35 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 366 | 36.87 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 16,426 | -9.47 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 16,791 | -8.65 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 17,156 | -10.11 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 17,521 | -14.65 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|--------|--------|--------|
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 17,886 | -18.62 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 18,251 | -20.31 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 18,616 | -18.45 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 18,981 | -16.88 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 19,346 | -14.12 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 19,711 | -11.37 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 20,076 | -10.52 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 20,441 | -10.00 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 20,806 | -8.62 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 21,171 | -7.50 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 21,536 | -9.90 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 21,901 | -8.20 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 22,266 | -8.40 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 22,631 | -6.15 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 22,996 | -2.80 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 23,361 | -0.65 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 23,726 | 2.68 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 24,091 | 4.95 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 24,456 | 8.65 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 24,821 | 13.90 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 25,186 | 14.74 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 25,551 | 9.32 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 25,916 | 9.00 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 26,281 | 11.74 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 26,646 | 11.00 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 27,011 | 8.64 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 27,376 | 9.00 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 27,741 | 10.45 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 28,106 | 12.98 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 28,471 | 15.17 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 28,836 | 17.53 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 29,200 | 19.15 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 29,565 | 19.19 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 29,930 | 19.54 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 30,295 | 19.00 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 30,660 | 19.59 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 31,025 | 22.36 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 31,390 | 23.08 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 31,755 | 23.43 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 32,120 | 22.31 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|--------|--------|-------|
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 32,485 | 20.05 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 32,850 | 20.37 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 33,215 | 18.53 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 33,580 | 17.96 |
| 273940021P | 685,257 | 4,170,763 | -88.85 | 33,945 | 18.05 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 0 | 2.80 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 366 | 2.72 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 12,776 | 0.12 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 16,426 | 2.41 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 16,791 | 2.35 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 17,156 | 2.53 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 17,521 | 2.50 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 17,886 | 2.41 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 18,251 | 2.35 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 18,616 | 2.34 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 18,981 | 2.54 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 19,346 | 2.31 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 19,711 | 2.39 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 20,076 | 2.42 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 20,441 | 2.60 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 20,806 | 2.36 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 21,171 | 2.38 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 21,536 | 2.09 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 21,901 | 2.38 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 22,266 | 2.34 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 22,631 | 2.65 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 22,996 | 2.95 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 23,361 | 3.10 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 23,726 | 3.15 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 24,091 | 3.25 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 24,456 | 2.98 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 24,821 | 3.12 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 25,186 | 2.65 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 25,551 | 2.25 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 25,916 | 2.35 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 26,281 | 2.69 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 26,646 | 2.92 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 27,011 | 3.24 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 27,376 | 3.50 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 27,741 | 3.48 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|--------|--------|--------|
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 28,106 | 2.78 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 28,471 | 2.35 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 28,836 | 2.36 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 29,200 | 2.24 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 29,565 | 2.11 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 29,930 | 2.31 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 30,295 | 2.54 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 30,660 | 2.28 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 31,025 | 2.00 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 31,390 | 2.45 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 31,755 | 2.56 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 32,120 | 2.25 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 32,485 | 2.29 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 32,850 | 2.19 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 33,215 | 2.32 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 33,580 | 2.48 |
| 283750001C | 695,688 | 4,190,701 | -47.56 | 33,945 | 2.51 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 0 | 5.40 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 366 | 5.00 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 12,776 | -0.48 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 16,426 | -6.25 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 16,791 | -6.88 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 17,156 | -7.25 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 17,521 | -10.40 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 17,886 | -8.98 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 18,251 | -7.32 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 18,616 | -6.23 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 18,981 | -5.24 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 19,346 | -4.36 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 19,711 | -3.65 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 20,076 | -2.89 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 20,441 | -1.85 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 20,806 | -0.40 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 21,171 | -3.28 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 21,536 | -2.20 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 21,901 | -5.70 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 22,266 | -5.60 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 22,631 | -2.10 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 22,996 | 0.65 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 23,361 | 4.80 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 23,726 | 4.10 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 24,091 | 3.24 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 24,456 | 2.59 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 24,821 | 2.68 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 25,186 | -2.64 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 25,551 | -5.35 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 25,916 | -5.37 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 26,281 | -4.20 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 26,646 | -4.25 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 27,011 | -3.05 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 27,376 | -2.12 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 27,741 | -4.00 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 28,106 | -1.71 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 28,471 | -1.81 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 28,836 | -2.38 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 29,200 | -1.39 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 29,565 | -1.16 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 29,930 | -1.13 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 30,295 | -2.47 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 30,660 | -3.43 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 31,025 | -4.82 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 31,755 | -3.49 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 32,120 | -4.05 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 32,485 | -6.22 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 32,850 | -8.05 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 33,215 | -6.29 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 33,580 | -7.92 |
| 283750048C | 695,685 | 4,192,583 | -31.49 | 33,945 | -7.62 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 0 | 45.56 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 366 | 45.00 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 17,521 | -40.85 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 17,886 | -41.26 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 18,251 | -43.83 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 18,616 | -45.76 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 18,981 | -48.68 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 19,346 | -50.43 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 19,711 | -51.08 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 20,076 | -52.00 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 20,441 | -52.10 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 20,806 | -51.78 |

| | | | | | |
|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 21,171 | -53.15 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 21,536 | -53.23 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 21,901 | -53.65 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 22,266 | -53.20 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 22,631 | -52.95 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 22,996 | -51.06 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 23,361 | -49.18 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 23,726 | -47.29 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 24,091 | -45.41 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 24,456 | -43.42 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 24,821 | -43.35 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 25,186 | -54.24 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 25,551 | -59.97 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 25,916 | -54.38 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 26,281 | -50.36 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 26,646 | -41.48 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 27,011 | -40.73 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 27,376 | -37.47 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 27,741 | -36.92 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 28,106 | -37.74 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 28,471 | -34.47 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 28,836 | -34.86 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 29,200 | -35.24 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 30,660 | -36.78 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 31,025 | -36.33 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 31,390 | -36.51 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 31,755 | -36.84 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 32,120 | -37.27 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 32,485 | -37.16 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 32,850 | -38.55 |
| 283750074M | 692,558 | 4,193,384 | -262.35 | 33,215 | -40.47 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 0 | 11.05 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 366 | 10.95 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 12,776 | 3.33 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 16,426 | 5.99 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 16,791 | 5.15 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 17,156 | 4.36 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 17,521 | 3.56 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 17,886 | 3.25 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 18,251 | 4.33 |

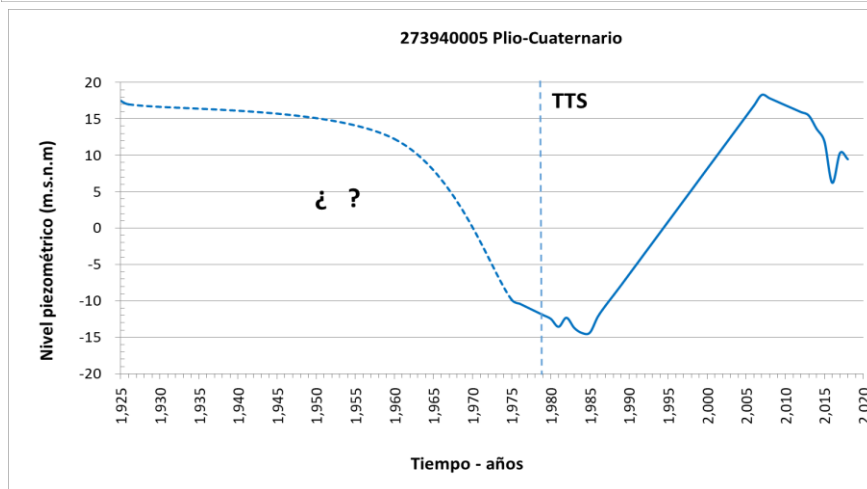
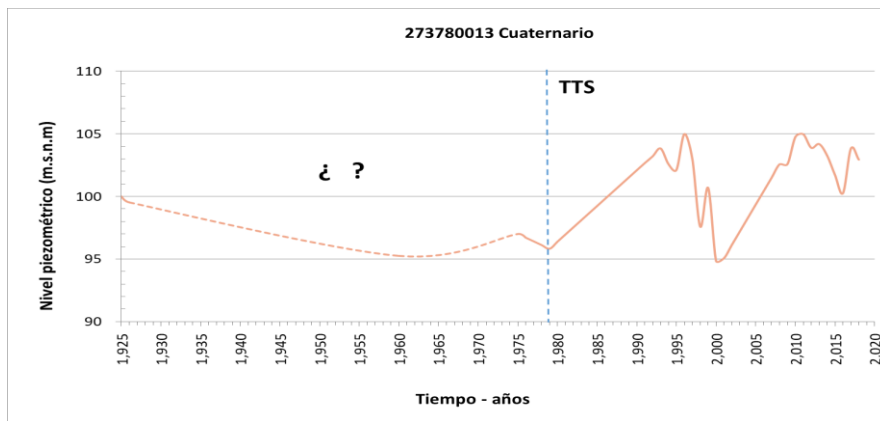
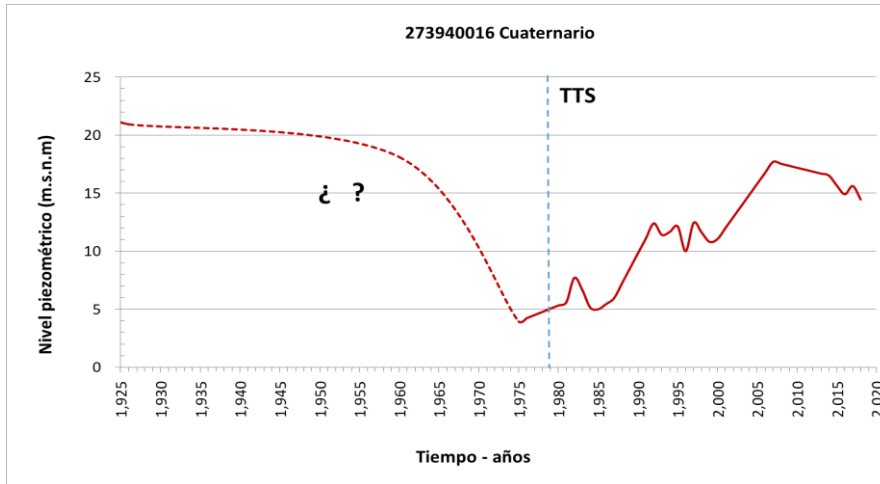
| | | | | | |
|------------|---------|-----------|-------|--------|-------|
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 18,616 | 6.25 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 18,981 | 7.11 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 19,346 | 7.35 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 19,711 | 7.88 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 20,076 | 8.22 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 20,441 | 8.73 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 20,806 | 9.40 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 21,171 | 9.10 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 21,536 | 10.20 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 21,901 | 10.70 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 22,266 | 11.70 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 22,631 | 12.95 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 22,996 | 15.15 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 23,361 | 15.55 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 23,726 | 16.10 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 24,091 | 16.50 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 24,456 | 17.00 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 24,821 | 15.50 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 25,186 | 16.72 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 25,551 | 16.48 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 25,916 | 16.10 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 26,281 | 16.40 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 26,646 | 16.63 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 27,011 | 16.60 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 27,376 | 16.76 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 27,741 | 17.56 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 28,106 | 17.07 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 28,471 | 16.70 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 28,836 | 16.62 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 29,200 | 17.12 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 29,565 | 16.52 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 29,930 | 16.07 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 30,295 | 15.56 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 30,660 | 15.41 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 31,025 | 16.40 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 31,390 | 16.07 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 31,755 | 15.74 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 32,120 | 15.24 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 32,485 | 14.70 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 32,850 | 14.38 |

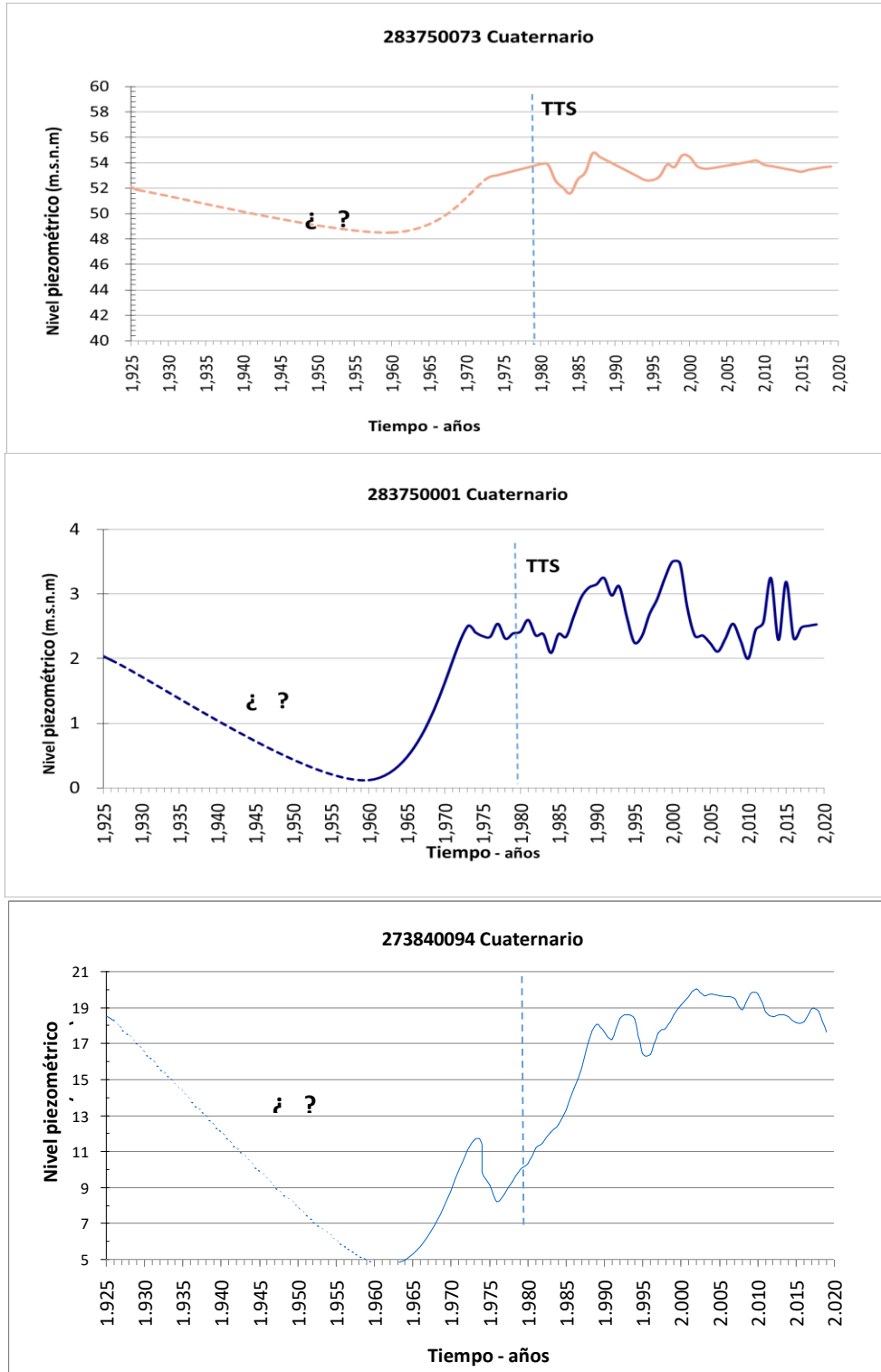
| | | | | | |
|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 33,215 | 14.58 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 33,580 | 15.74 |
| 283810010C | 691,810 | 4,187,714 | -5.18 | 33,945 | 15.08 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 0 | 44.15 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 366 | 43.22 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 17,521 | -62.66 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 17,886 | -64.65 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 18,251 | -67.85 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 18,616 | -72.26 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 18,981 | -78.25 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 19,346 | -85.25 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 19,711 | -77.98 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 20,076 | -72.58 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 20,441 | -68.46 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 20,806 | -66.78 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 21,171 | -86.41 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 21,536 | -80.80 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 21,901 | -80.36 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 22,266 | -74.21 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 22,631 | -68.21 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 22,996 | -62.86 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 23,361 | -57.51 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 23,726 | -52.16 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 24,091 | -46.81 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 24,456 | -41.46 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 24,821 | -51.37 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 25,186 | -54.29 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 25,551 | -75.48 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 25,916 | -74.76 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 26,281 | -63.06 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 26,646 | -57.76 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 27,011 | -55.32 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 27,376 | -56.21 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 27,741 | -57.40 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 28,106 | -54.22 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 28,471 | -57.90 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 28,836 | -57.72 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 29,200 | -61.26 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 29,565 | -64.09 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 29,930 | -73.77 |

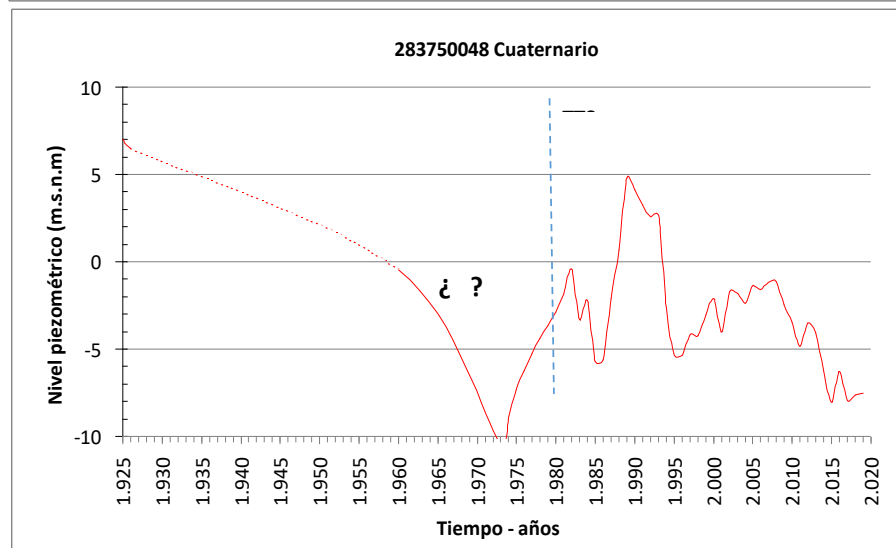
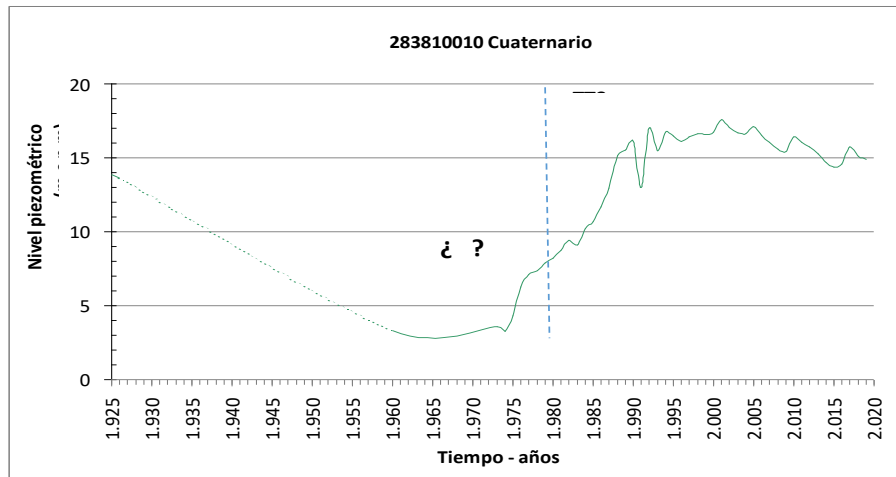
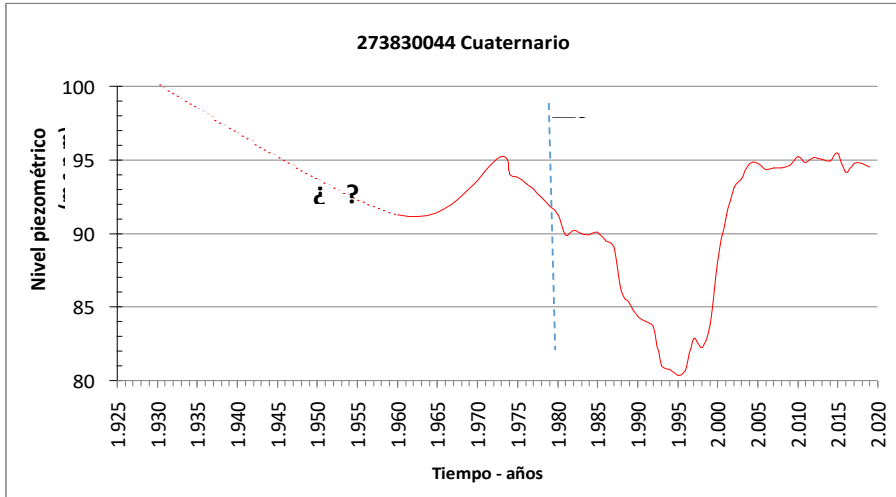
| | | | | | |
|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 30,295 | -79.83 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 30,660 | -78.29 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 31,025 | -76.75 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 31,390 | -75.75 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 31,755 | -74.75 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 32,120 | -73.75 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 32,485 | -72.75 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 32,850 | -71.95 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 33,215 | -74.58 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 33,580 | -74.18 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 33,945 | -73.88 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 34,310 | -73.63 |
| 283810020M | 691,611 | 4,187,816 | -308.90 | 34,675 | -73.94 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 0 | 40.25 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 366 | 39.75 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 18,251 | -35.14 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 18,616 | -36.83 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 18,981 | -37.15 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 19,346 | -47.00 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 19,711 | -51.40 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 20,076 | -45.88 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 20,441 | -44.02 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 20,806 | -42.03 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 21,171 | -52.92 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 21,536 | -49.83 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 21,901 | -48.03 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 22,266 | -38.53 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 22,631 | -29.08 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 22,996 | -26.82 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 23,361 | -24.56 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 23,726 | -22.30 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 24,091 | -20.04 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 24,456 | -17.78 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 24,821 | -18.91 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 25,186 | -23.39 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 25,551 | -25.16 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 25,916 | -24.60 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 26,281 | -20.50 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 26,646 | -17.74 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 27,011 | -17.20 |

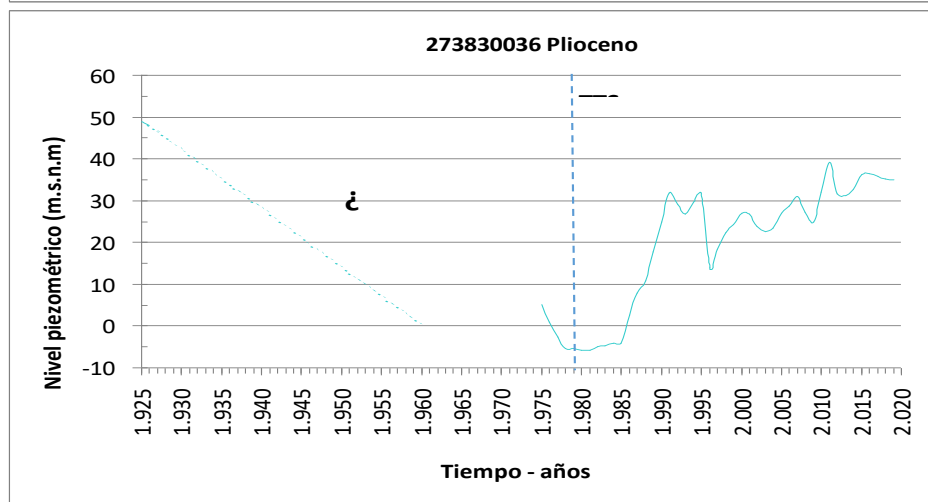
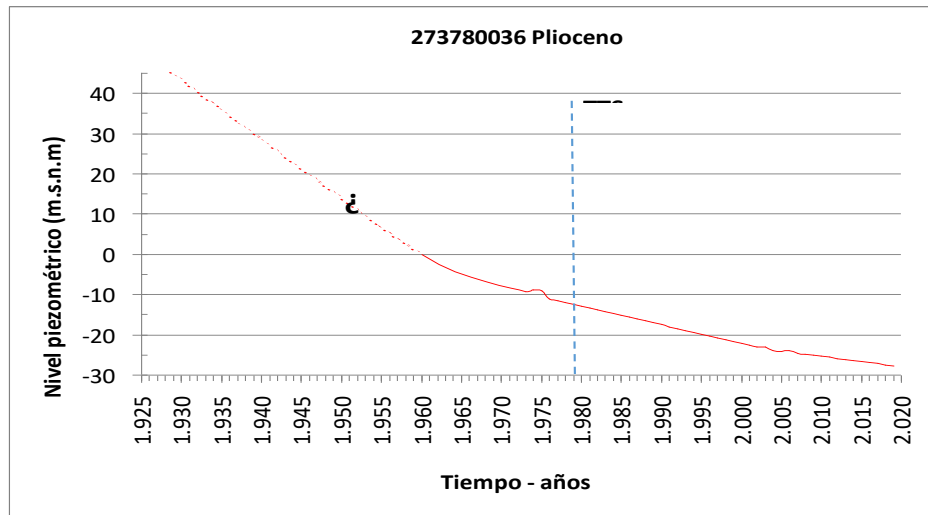
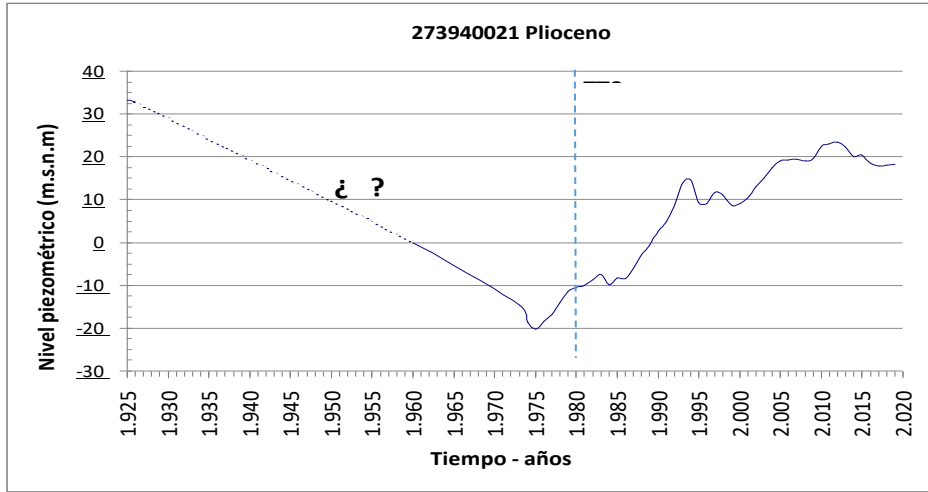
| | | | | | |
|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 27,376 | -15.88 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 27,741 | -16.39 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 28,106 | -15.95 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 28,471 | -17.31 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 28,836 | -17.09 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 29,200 | -17.53 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 29,565 | -18.40 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 29,930 | -18.66 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 30,295 | -21.67 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 30,660 | -22.17 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 31,025 | -21.77 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 31,390 | -21.38 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 31,755 | -20.85 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 32,120 | -20.80 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 32,485 | -20.46 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 32,850 | -21.26 |
| 283810021P | 690,611 | 4,187,816 | -140.26 | 33,215 | -21.95 |

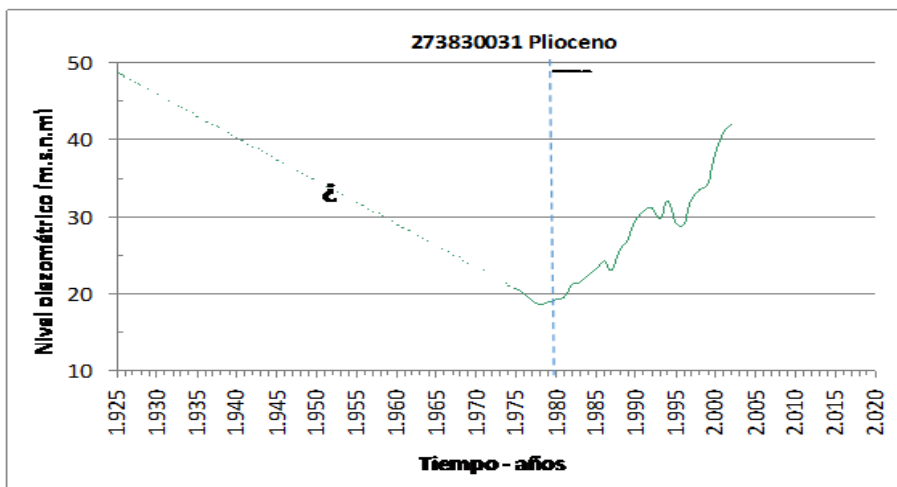
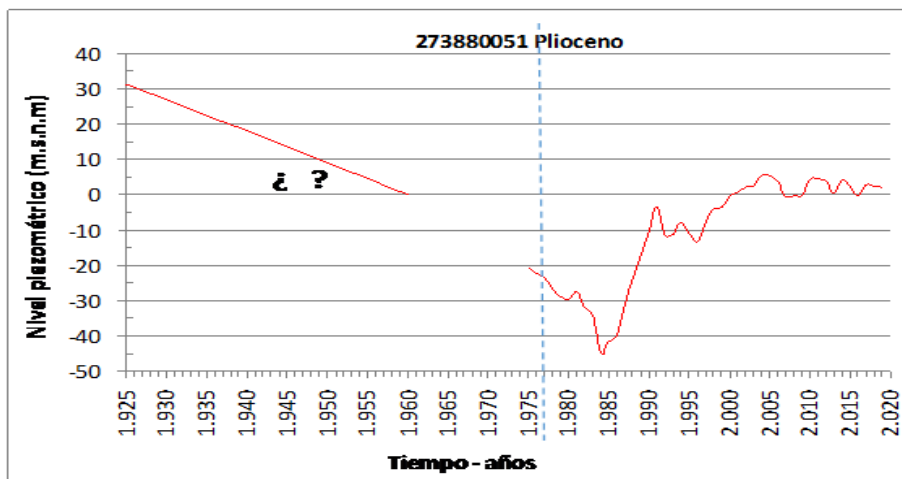
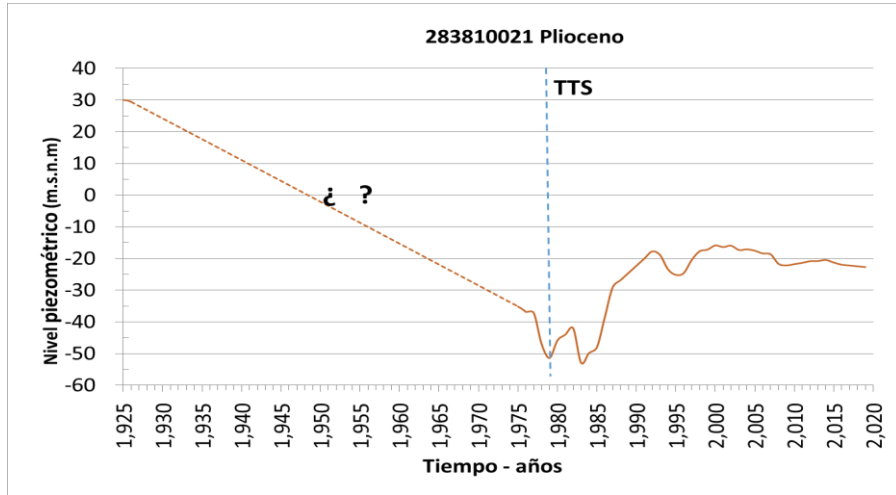
GRÁFICOS: SONDEOS DE CONTROL PIEZOMÉTRICO.

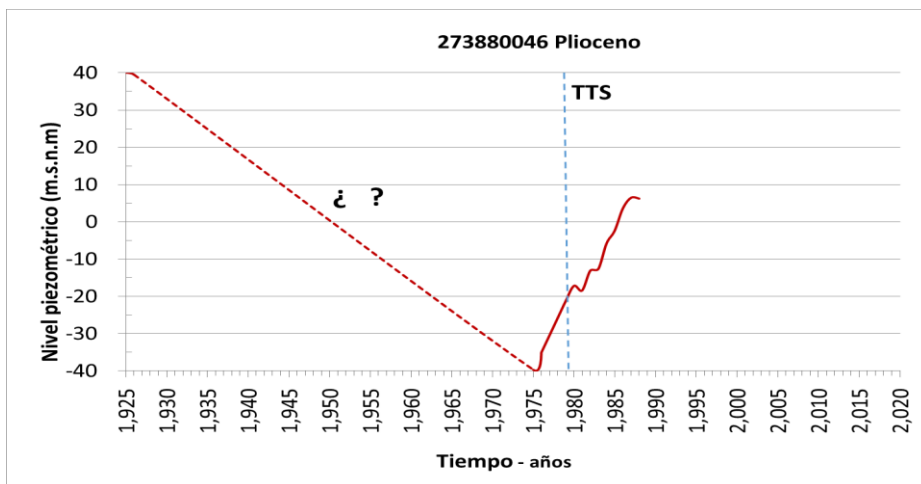
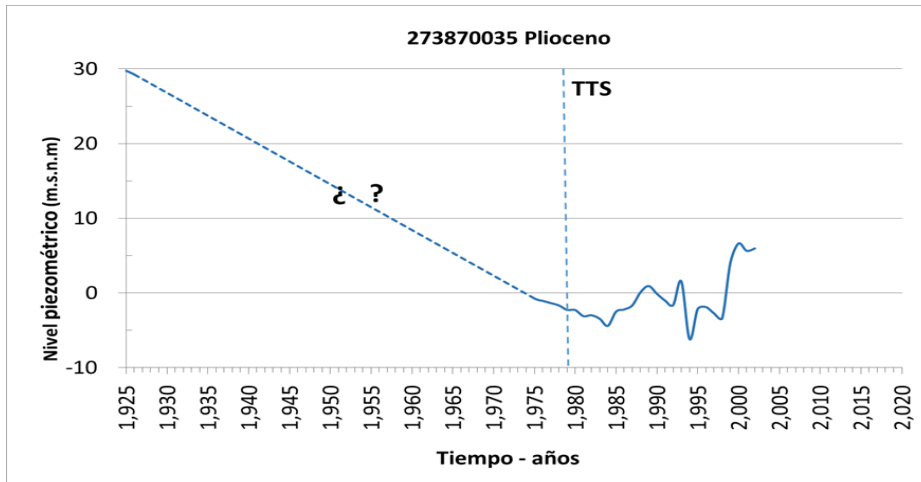
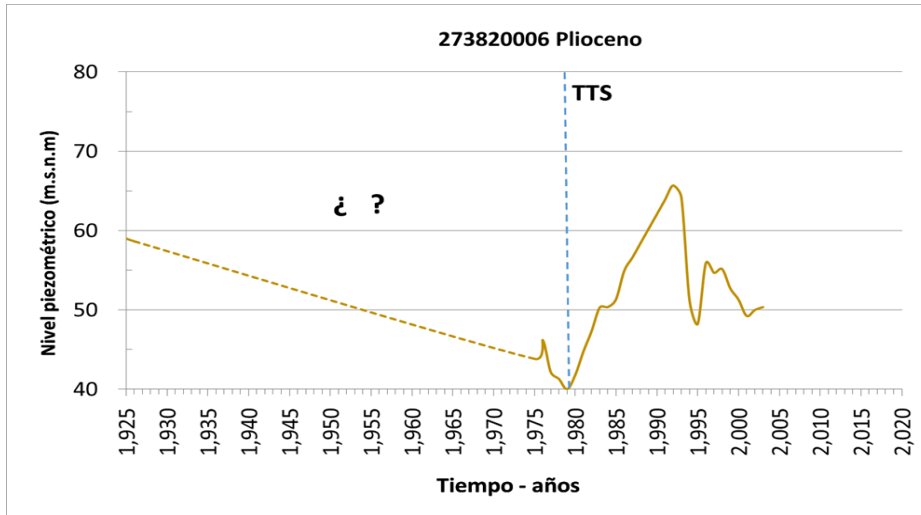


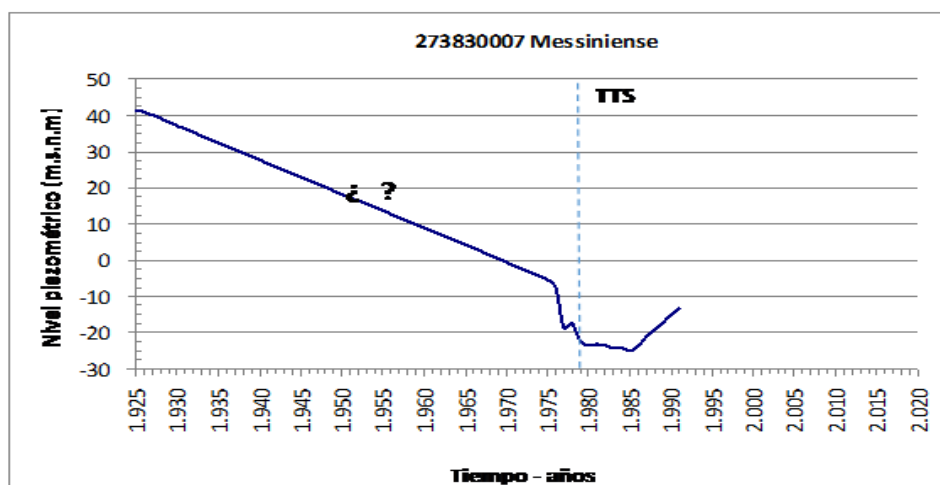
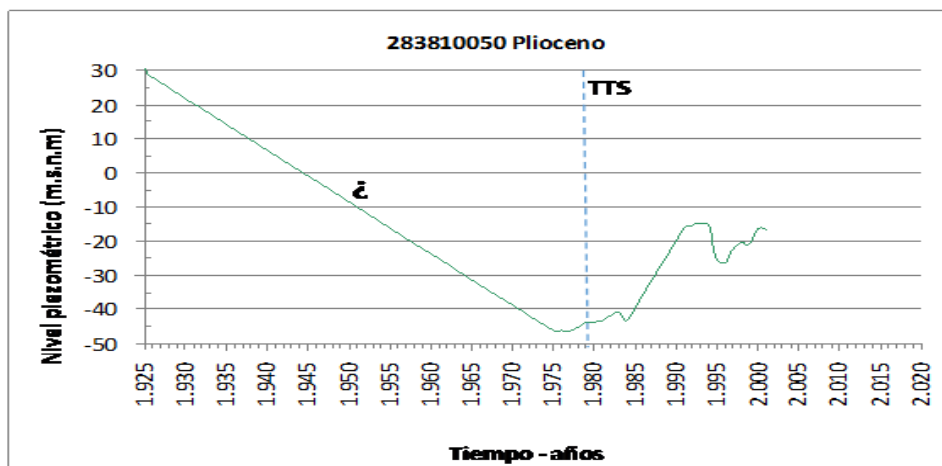
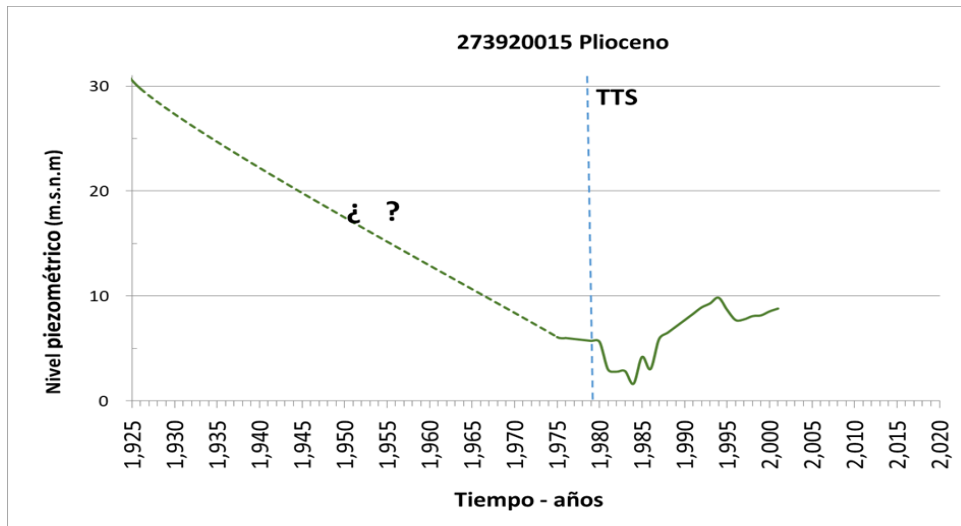


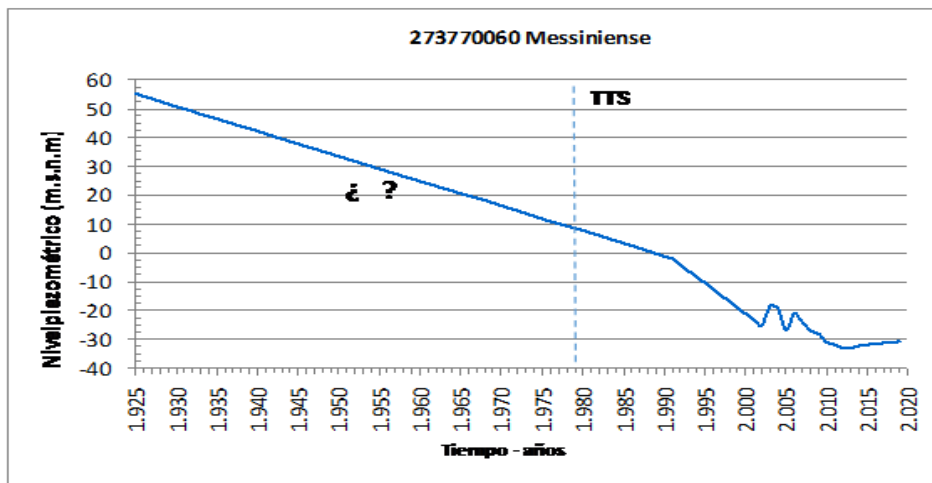
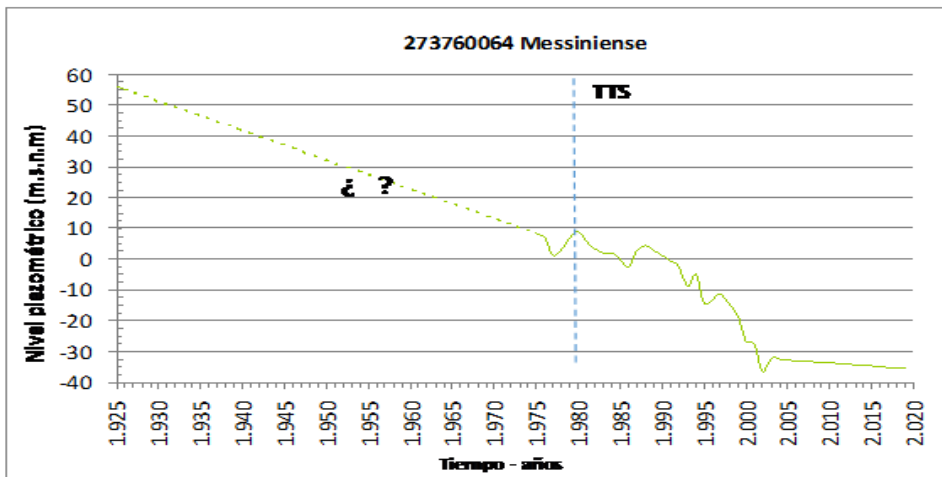
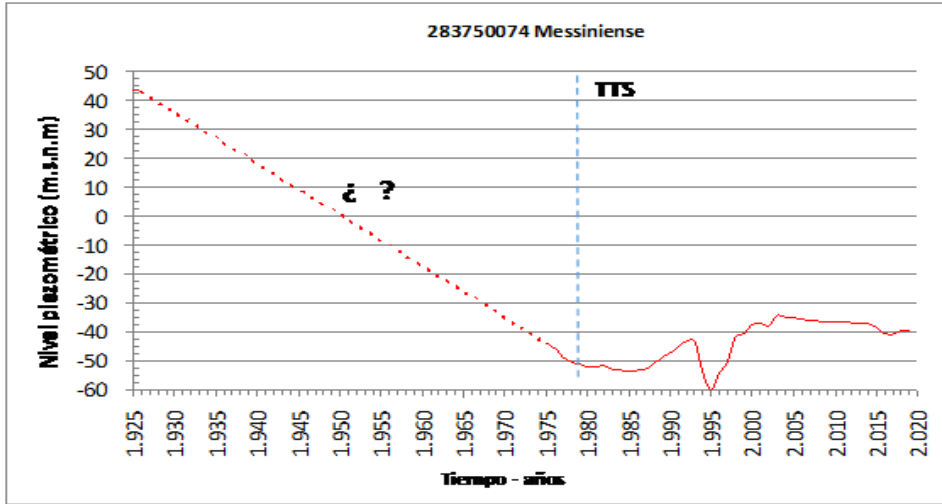


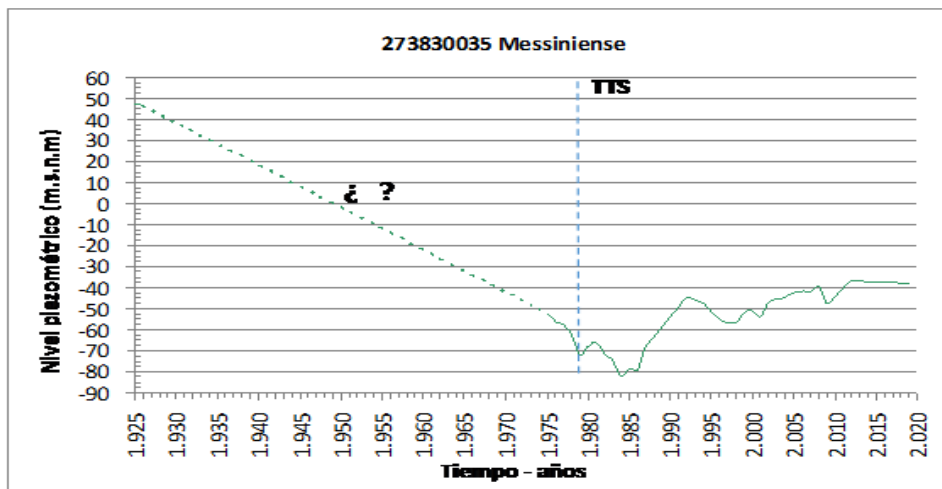
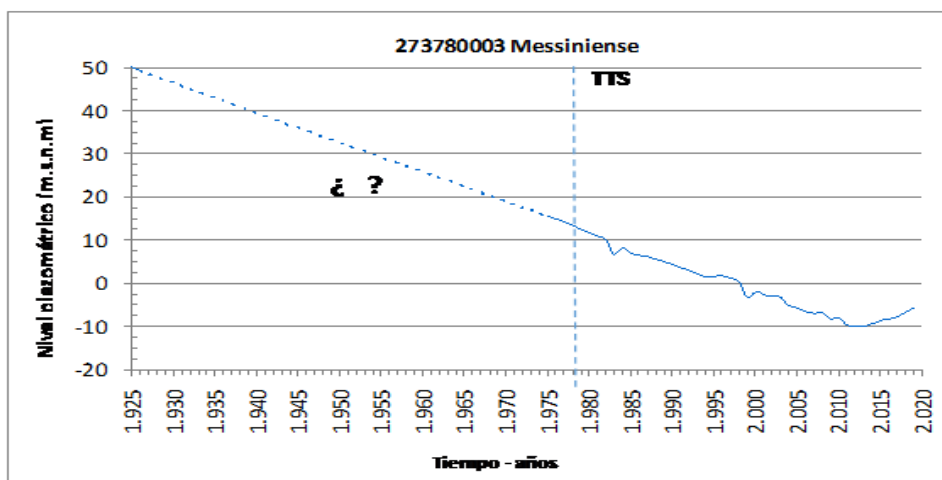
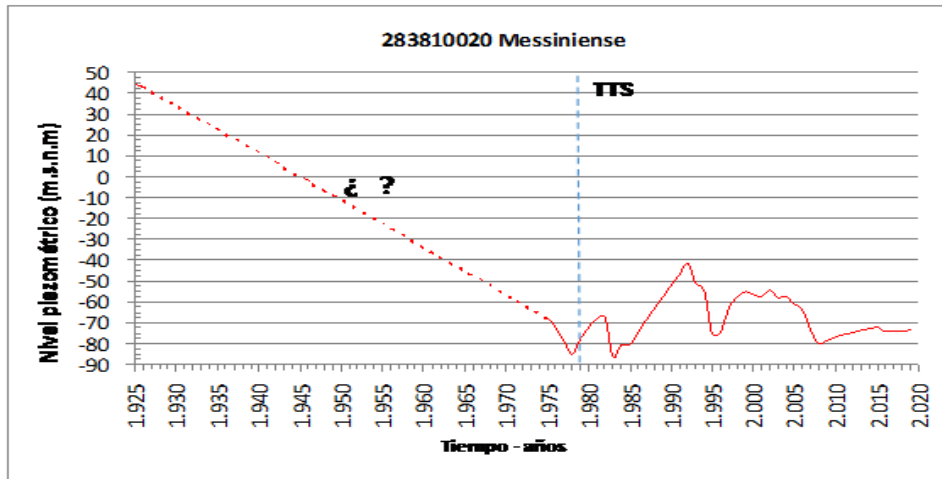


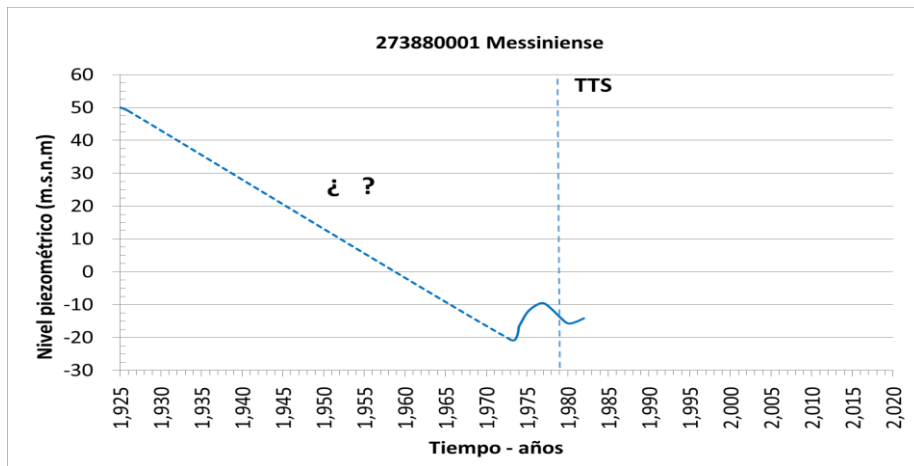
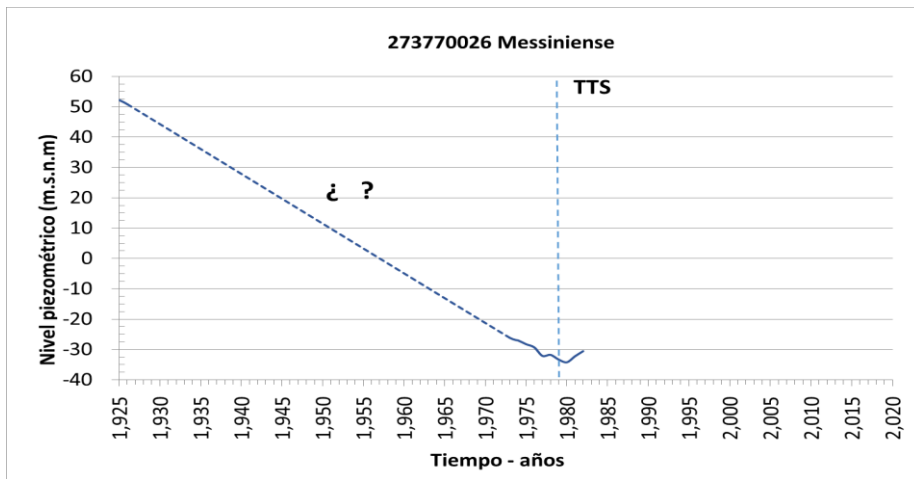
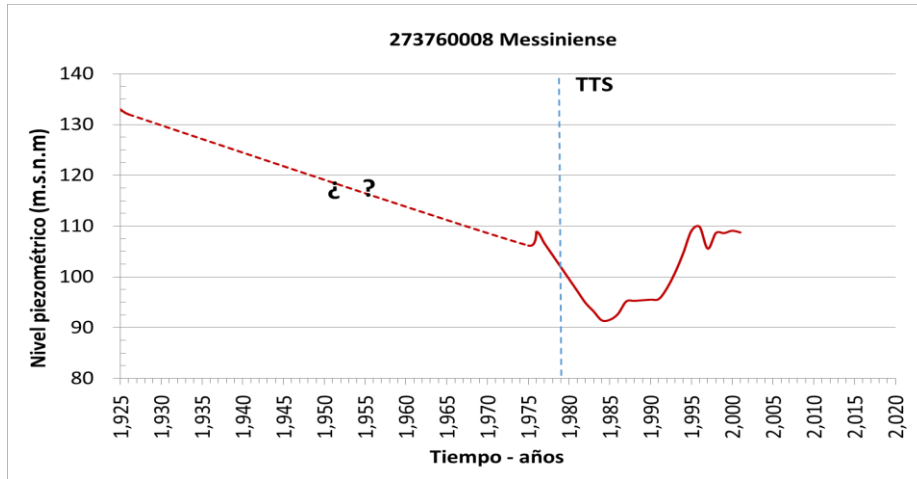


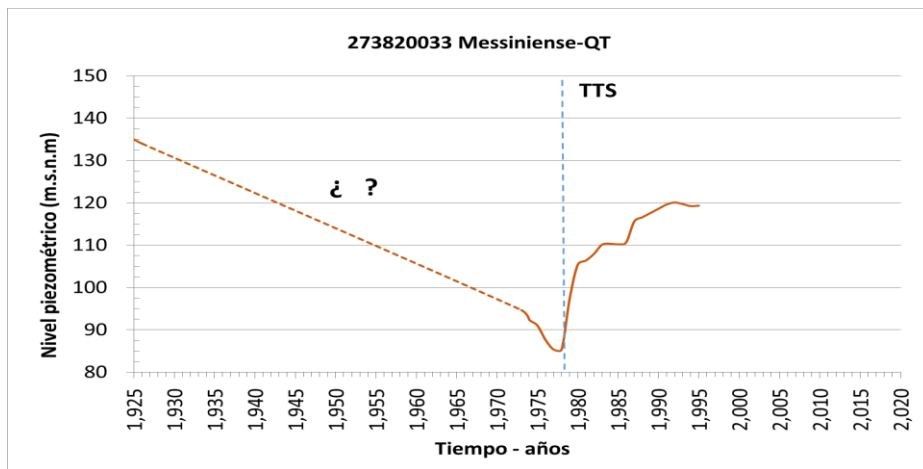
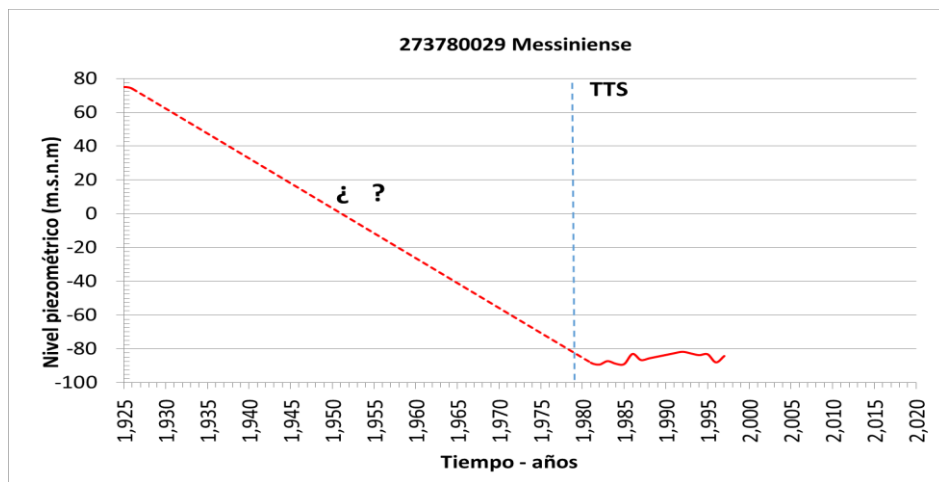
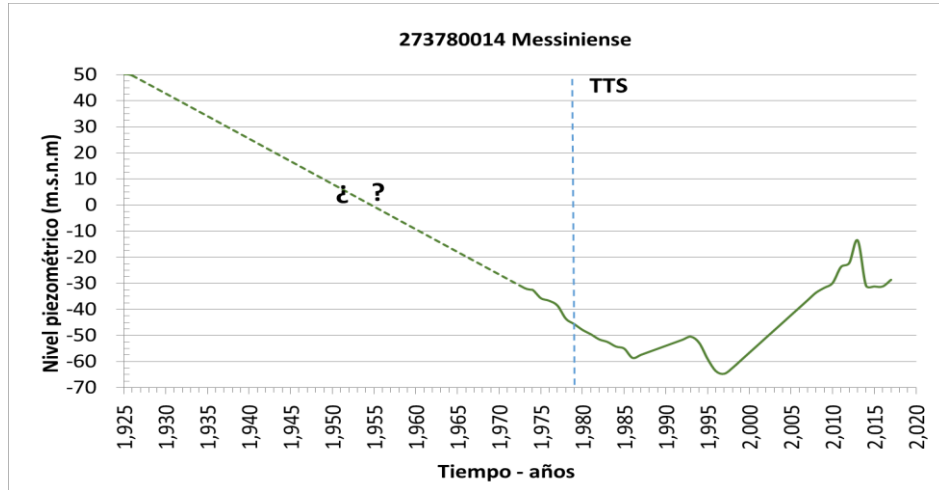


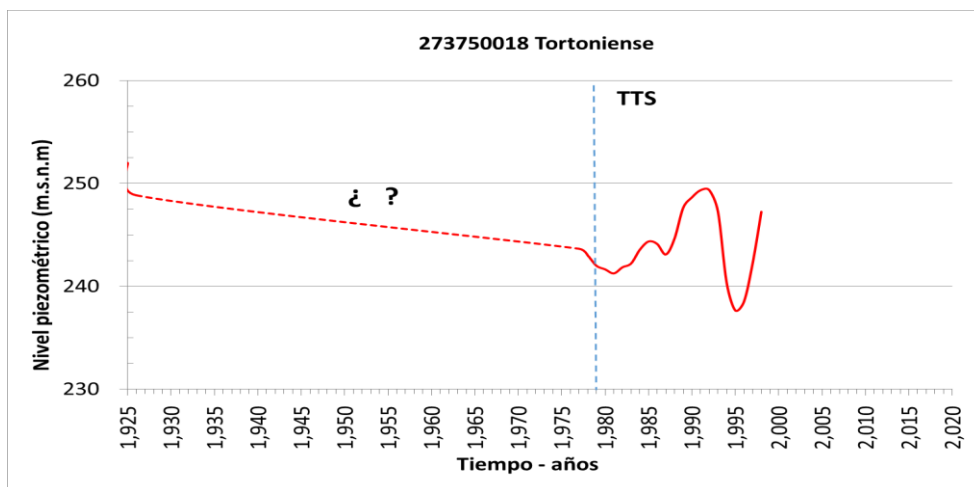
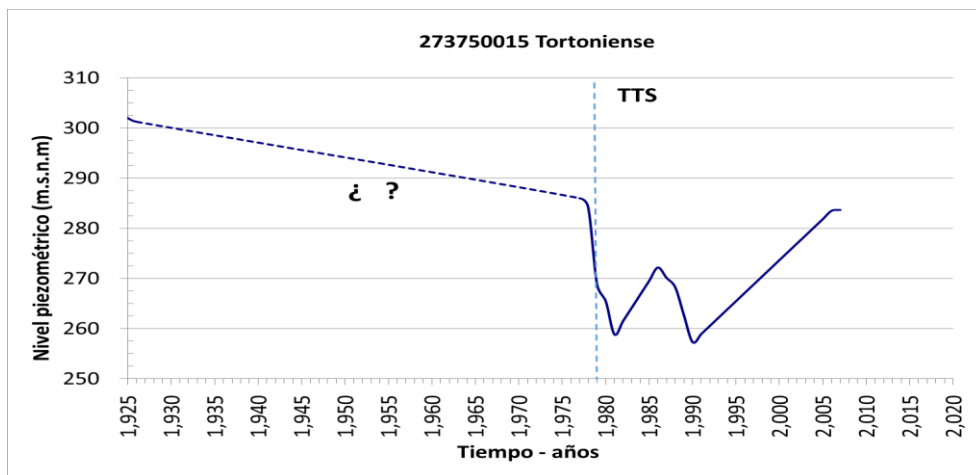
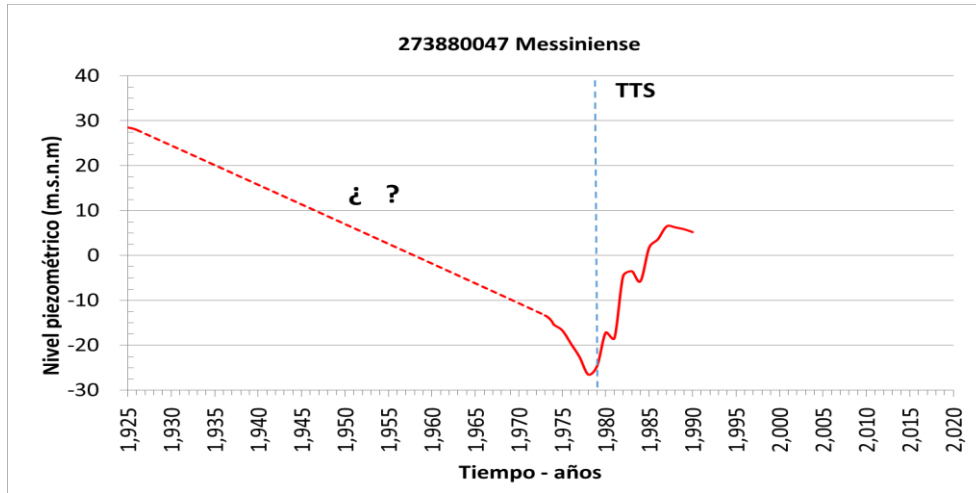




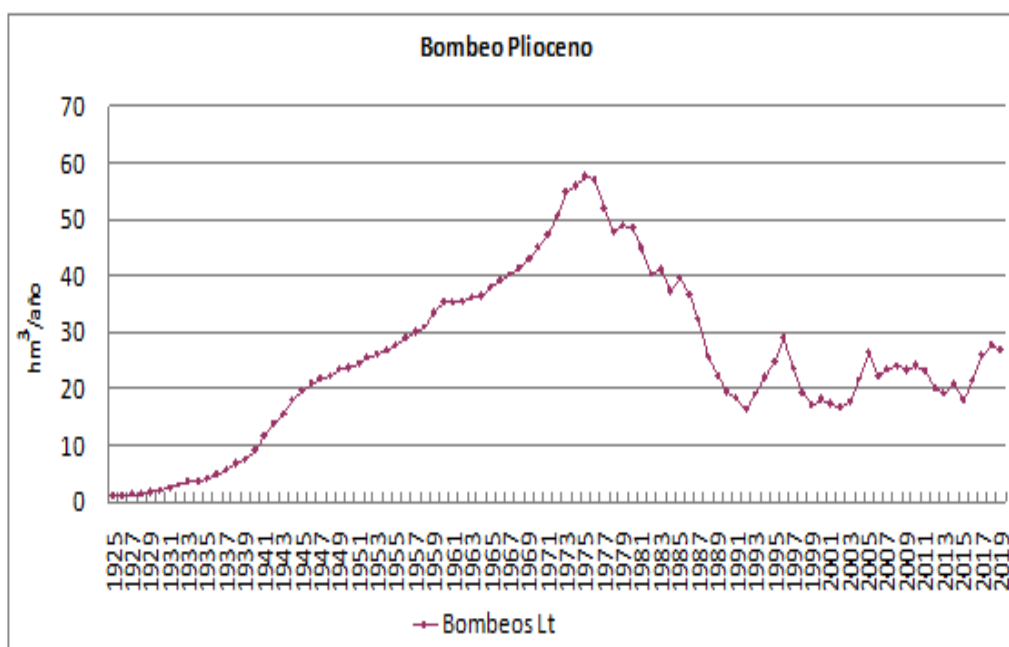
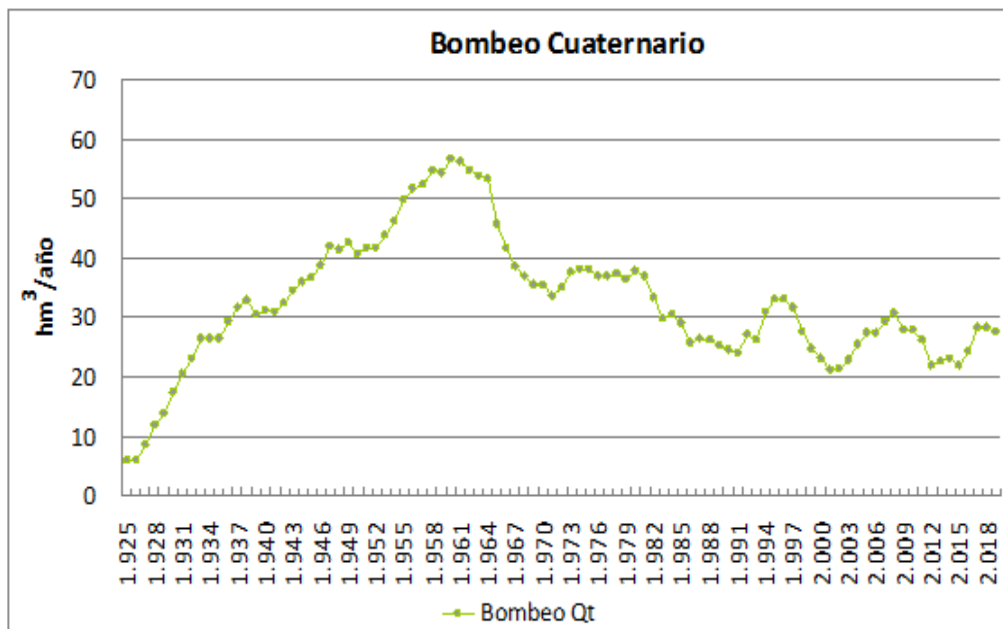


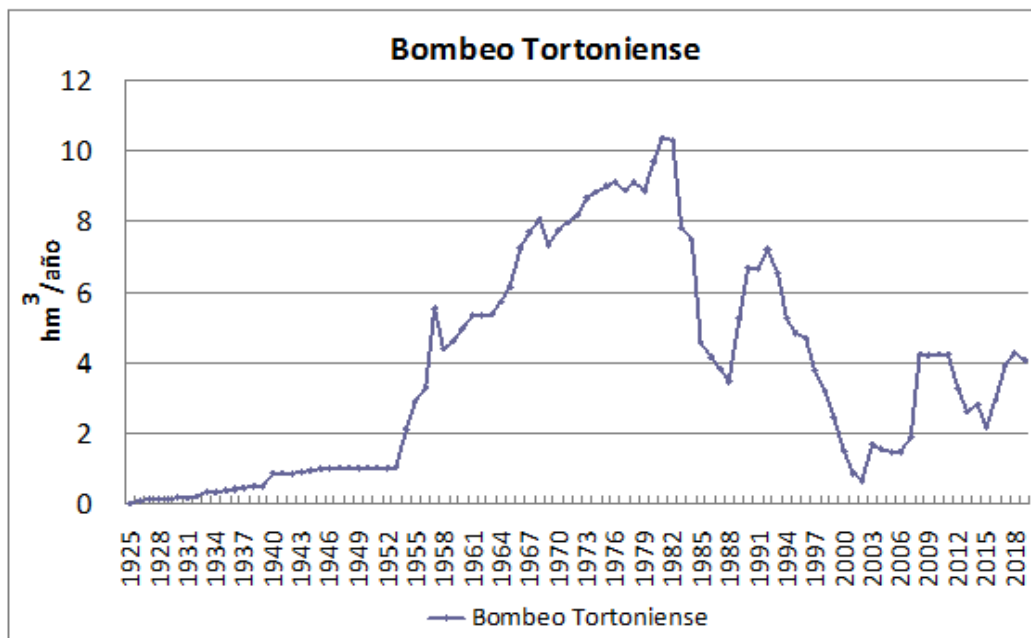
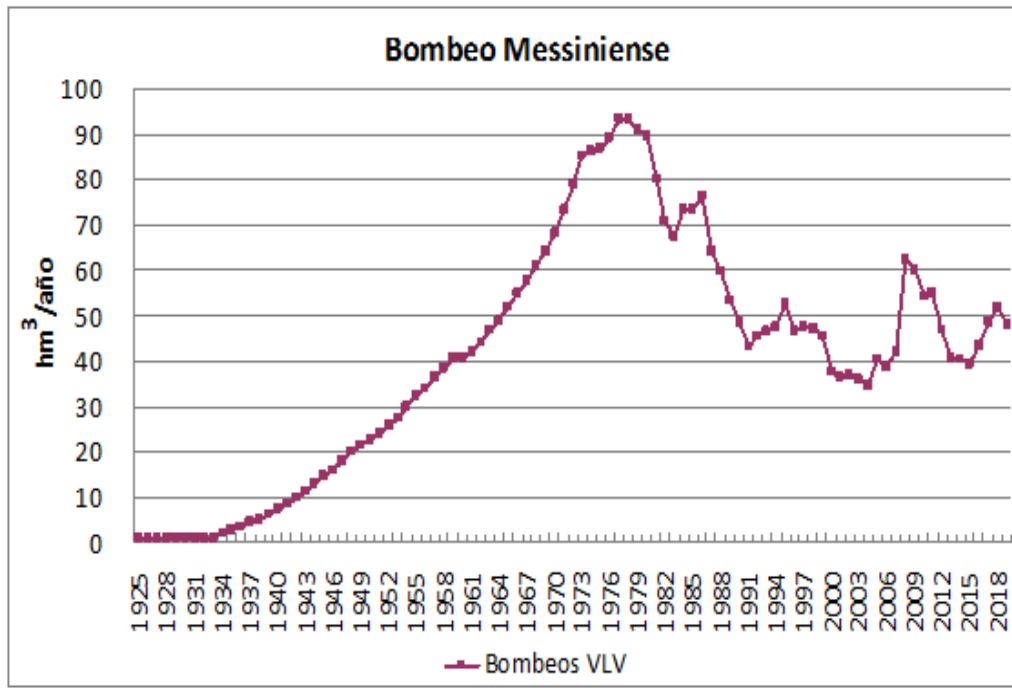






ANEXO 2: GRÁFICOS Y DATOS DE LA EXPLOTACIÓN POR BOMBEO.





POZOS CUATERNARIO (Qt)

| Time [day] | Rates [m ³ /day] | hm ³ /año |
|------------|-----------------------------|----------------------|
| 5 | 16.435,0 | 6,00 |
| 365 | 16.444,0 | 6,00 |
| 730 | 23.483,0 | 8,57 |
| 1,095 | 32.700,0 | 11,94 |
| 1,460 | 38.074,0 | 13,90 |
| 1,825 | 47.326,0 | 17,27 |
| 2,190 | 56.227,0 | 20,52 |
| 2,555 | 63.106,0 | 23,03 |
| 2,900 | 72.461,0 | 26,45 |
| 2,920 | 72.461,0 | 26,45 |
| 3,285 | 72.727,0 | 26,55 |
| 3,650 | 80.429,0 | 29,36 |
| 4,015 | 86.716,0 | 31,65 |
| 4,380 | 90.284,0 | 32,95 |
| 4,745 | 83.715,0 | 30,56 |
| 5,110 | 85.292,0 | 31,13 |
| 5,475 | 84.920,0 | 31,00 |
| 5,840 | 88.628,0 | 32,35 |
| 6,205 | 94.753,0 | 34,58 |
| 6,570 | 98.585,0 | 35,98 |
| 6,935 | 100.500,0 | 36,68 |
| 7,300 | 106.100,0 | 38,73 |
| 7,665 | 114.980,0 | 41,97 |
| 8,030 | 113.580,0 | 41,46 |
| 8,395 | 116.520,0 | 42,53 |
| 8,760 | 111.300,0 | 40,62 |
| 9,125 | 114.460,0 | 41,78 |
| 9,490 | 114.440,0 | 41,77 |
| 9,855 | 120.290,0 | 43,91 |
| 10,220 | 126.410,0 | 46,14 |
| 10,585 | 136.390,0 | 49,78 |
| 10,950 | 141.440,0 | 51,63 |

| | | |
|--------|-----------|-------|
| 11,315 | 143.200,8 | 52,27 |
| 11,680 | 149.971,1 | 54,74 |
| 12,045 | 148.451,1 | 54,18 |
| 12,410 | 155.251,1 | 56,67 |
| 12,775 | 154.101,1 | 56,25 |
| 13,140 | 150.120,8 | 54,79 |
| 13,505 | 147.610,0 | 53,88 |
| 13,870 | 146.320,0 | 53,41 |
| 14,235 | 125.070,0 | 45,65 |
| 14,600 | 114.450,0 | 41,77 |
| 14,965 | 105.820,0 | 38,62 |
| 15,330 | 101.310,0 | 36,98 |
| 15,695 | 96.880,0 | 35,36 |
| 16,060 | 97.020,0 | 35,41 |
| 16,425 | 91.670,0 | 33,46 |
| 16,790 | 96.180,0 | 35,11 |
| 17,155 | 103.260,0 | 37,69 |
| 17,520 | 104.290,0 | 38,07 |
| 17,885 | 104.440,0 | 38,12 |
| 18,250 | 100.930,0 | 36,84 |
| 18,615 | 101.130,0 | 36,91 |
| 18,980 | 102.420,0 | 37,38 |
| 19,345 | 99.620,0 | 36,36 |
| 19,710 | 104.020,0 | 37,97 |
| 20,075 | 100.840,0 | 36,81 |
| 20,440 | 91.466,0 | 33,39 |
| 20,805 | 81.674,0 | 29,81 |
| 21,170 | 83.474,0 | 30,47 |
| 21,535 | 79.832,0 | 29,14 |
| 21,900 | 70.646,1 | 25,79 |
| 22,265 | 72.544,1 | 26,48 |
| 22,630 | 71.538,1 | 26,11 |
| 22,995 | 69.429,1 | 25,34 |
| 23,360 | 67.235,0 | 24,54 |
| 23,725 | 65.596,0 | 23,94 |
| 24,090 | 74.075,0 | 27,04 |
| 24,455 | 71.886,0 | 26,24 |
| 24,820 | 84.579,5 | 30,87 |

| | | |
|--------|----------|-------|
| 25,185 | 90.657,5 | 33,09 |
| 25,550 | 90.444,0 | 33,01 |
| 25,915 | 86.681,0 | 31,64 |
| 26,280 | 75.604,0 | 27,60 |
| 26,645 | 67.696,0 | 24,71 |
| 27,010 | 62.996,0 | 22,99 |
| 27,375 | 58.124,5 | 21,22 |
| 27,740 | 58.766,7 | 21,45 |
| 28,105 | 62.616,5 | 22,86 |
| 28,470 | 70.002,0 | 25,55 |
| 28,740 | 74.797,5 | 27,30 |
| 28,835 | 74.797,5 | 27,30 |
| 29,200 | 80.332,5 | 29,32 |
| 29,930 | 84.001,0 | 30,66 |
| 30,295 | 76.073,6 | 27,77 |
| 30,660 | 76.574,4 | 27,95 |
| 31,025 | 71.659,4 | 26,16 |
| 31,390 | 60.284,6 | 22,00 |
| 31,755 | 61.838,6 | 22,57 |
| 32,120 | 63.277,6 | 23,10 |
| 32,485 | 60.140,6 | 21,95 |
| 32,850 | 66.256,9 | 24,18 |
| 33,215 | 77.372,4 | 28,24 |
| 33,580 | 77.731,4 | 28,37 |
| 33,945 | 75.861,4 | 27,69 |

POZOS PLIOCENO (Lt)

| Time [day] | Rates [m ³ /day] | hm ³ /año |
|------------|-----------------------------|----------------------|
| 5 | 2.954,9 | 1,08 |
| 365 | 2.954,9 | 1,08 |
| 730 | 3.597,3 | 1,31 |
| 1,095 | 3.709,7 | 1,35 |

| | | |
|--------|-----------|-------|
| 1,460 | 4.792,1 | 1,75 |
| 1,825 | 5.829,5 | 2,13 |
| 2,190 | 7.027,4 | 2,57 |
| 2,555 | 8.356,3 | 3,05 |
| 2,900 | 9.713,1 | 3,55 |
| 2,920 | 9.713,1 | 3,55 |
| 3,285 | 11.152,0 | 4,07 |
| 3,650 | 13.294,0 | 4,85 |
| 4,015 | 15.599,0 | 5,69 |
| 4,380 | 18.490,0 | 6,75 |
| 4,745 | 20.856,0 | 7,61 |
| 5,110 | 25.172,0 | 9,19 |
| 5,475 | 32.066,0 | 11,70 |
| 5,840 | 38.022,0 | 13,88 |
| 6,205 | 42.394,0 | 15,47 |
| 6,570 | 49.057,0 | 17,91 |
| 6,935 | 53.832,0 | 19,65 |
| 7,300 | 57.222,0 | 20,89 |
| 7,665 | 60.058,0 | 21,92 |
| 8,030 | 61.298,0 | 22,37 |
| 8,395 | 64.139,0 | 23,41 |
| 8,760 | 64.871,0 | 23,68 |
| 9,125 | 67.271,0 | 24,55 |
| 9,490 | 69.786,0 | 25,47 |
| 9,855 | 71.648,0 | 26,15 |
| 10,220 | 73.294,0 | 26,75 |
| 10,585 | 75.867,0 | 27,69 |
| 10,950 | 79.683,0 | 29,08 |
| 11,315 | 82.375,0 | 30,07 |
| 11,680 | 84.496,0 | 30,84 |
| 12,045 | 91.470,0 | 33,39 |
| 12,410 | 96.852,0 | 35,35 |
| 12,775 | 96.510,0 | 35,23 |
| 13,140 | 97.294,0 | 35,51 |
| 13,505 | 98.706,0 | 36,03 |
| 13,870 | 99.541,0 | 36,33 |
| 14,235 | 104.030,0 | 37,97 |
| 14,600 | 106.980,0 | 39,05 |

| | | |
|--------|-----------|-------|
| 14,965 | 110.200,0 | 40,22 |
| 15,330 | 113.100,0 | 41,28 |
| 15,695 | 117.700,0 | 42,96 |
| 16,060 | 123.560,0 | 45,10 |
| 16,425 | 129.810,0 | 47,38 |
| 16,790 | 138.350,0 | 50,50 |
| 17,155 | 150.330,0 | 54,87 |
| 17,520 | 153.040,0 | 55,86 |
| 17,885 | 157.320,0 | 57,42 |
| 18,250 | 156.030,0 | 56,95 |
| 18,615 | 141.800,0 | 51,76 |
| 18,980 | 130.960,0 | 47,80 |
| 19,345 | 133.710,0 | 48,80 |
| 19,710 | 132.530,0 | 48,37 |
| 20,075 | 122.580,0 | 44,74 |
| 20,440 | 110.220,0 | 40,23 |
| 20,805 | 112.590,0 | 41,10 |
| 21,170 | 101.890,0 | 37,19 |
| 21,535 | 108.620,0 | 39,65 |
| 21,900 | 100.500,0 | 36,68 |
| 22,265 | 88.707,0 | 32,38 |
| 22,630 | 70.516,6 | 25,74 |
| 22,995 | 61.134,6 | 22,31 |
| 23,360 | 53.272,6 | 19,44 |
| 23,725 | 50.067,6 | 18,27 |
| 24,090 | 44.867,6 | 16,38 |
| 24,455 | 52.448,6 | 19,14 |
| 24,820 | 60.635,6 | 22,13 |
| 25,185 | 67.745,2 | 24,73 |
| 25,550 | 79.750,9 | 29,11 |
| 25,915 | 64.919,5 | 23,70 |
| 26,280 | 52.757,6 | 19,26 |
| 26,645 | 46.479,6 | 16,97 |
| 27,010 | 49.810,8 | 18,18 |
| 27,375 | 47.173,8 | 17,22 |
| 27,740 | 46.108,1 | 16,83 |
| 28,105 | 48.416,1 | 17,67 |
| 28,470 | 59.260,0 | 21,63 |

| | | |
|--------|----------|-------|
| 28,740 | 72.124,6 | 26,33 |
| 28,835 | 61.165,7 | 22,33 |
| 29,200 | 63.826,3 | 23,30 |
| 29,930 | 65.843,5 | 24,03 |
| 30,295 | 63.966,6 | 23,35 |
| 30,660 | 65.784,9 | 24,01 |
| 31,025 | 63.332,9 | 23,12 |
| 31,390 | 55.054,6 | 20,09 |
| 31,755 | 52.131,1 | 19,03 |
| 32,120 | 57.505,8 | 20,99 |
| 32,485 | 49.279,8 | 17,99 |
| 32,850 | 58.462,8 | 21,34 |
| 33,215 | 70.679,8 | 25,80 |
| 33,580 | 75.718,8 | 27,64 |
| 33,945 | 73.372,8 | 26,78 |

POZOS MESSINIENSE (VLV)

| Time [day] | Rates [m ³ /day] | hm ³ /año |
|------------|-----------------------------|----------------------|
| 5 | 2,610.0 | 0.95 |
| 365 | 2,610.0 | 0.95 |
| 730 | 3,004.0 | 1.10 |
| 1,095 | 2,520.0 | 0.92 |
| 1,460 | 2,540.0 | 0.93 |
| 1,825 | 2,850.0 | 1.04 |
| 2,190 | 3,060.0 | 1.12 |
| 2,555 | 2,670.0 | 0.97 |
| 2,900 | 2,885.0 | 1.05 |
| 2,920 | 5,954.1 | 2.17 |
| 3,285 | 7,614.1 | 2.78 |
| 3,650 | 9,274.1 | 3.39 |
| 4,015 | 11,734.0 | 4.28 |
| 4,380 | 14,194.0 | 5.18 |
| 4,745 | 16,754.0 | 6.12 |
| 5,110 | 20,314.0 | 7.41 |

| | | |
|--------|-----------|-------|
| 5,475 | 23,099.0 | 8.43 |
| 5,840 | 27,089.0 | 9.89 |
| 6,205 | 30,374.0 | 11.09 |
| 6,570 | 34,964.0 | 12.76 |
| 6,935 | 39,674.0 | 14.48 |
| 7,300 | 43,409.0 | 15.84 |
| 7,665 | 49,019.0 | 17.89 |
| 8,030 | 54,949.0 | 20.06 |
| 8,395 | 58,794.0 | 21.46 |
| 8,760 | 61,799.0 | 22.56 |
| 9,125 | 65,765.0 | 24.00 |
| 9,490 | 70,726.0 | 25.81 |
| 9,855 | 75,369.0 | 27.51 |
| 10,220 | 82,016.0 | 29.94 |
| 10,585 | 87,830.0 | 32.06 |
| 10,950 | 93,193.0 | 34.02 |
| 11,315 | 99,696.0 | 36.39 |
| 11,680 | 104,630.0 | 38.19 |
| 12,045 | 111,550.0 | 40.72 |
| 12,410 | 111,320.0 | 40.63 |
| 12,775 | 114,820.0 | 41.91 |
| 13,140 | 120,530.0 | 43.99 |
| 13,505 | 128,280.0 | 46.82 |
| 13,870 | 133,320.0 | 48.66 |
| 14,235 | 142,360.0 | 51.96 |
| 14,600 | 150,450.0 | 54.91 |
| 14,965 | 157,790.0 | 57.59 |
| 15,330 | 167,240.0 | 61.04 |
| 15,695 | 175,490.0 | 64.05 |
| 16,060 | 186,650.0 | 68.13 |
| 16,425 | 200,630.0 | 73.23 |
| 16,790 | 216,540.0 | 79.04 |
| 17,155 | 233,040.0 | 85.06 |
| 17,520 | 236,030.0 | 86.15 |
| 17,885 | 238,080.0 | 86.90 |
| 18,250 | 243,870.0 | 89.01 |
| 18,615 | 255,550.0 | 93.28 |
| 18,980 | 255,650.0 | 93.31 |
| 19,345 | 248,920.0 | 90.86 |
| 19,710 | 245,500.0 | 89.61 |

| | | |
|--------|-----------|-------|
| 20,075 | 219,250.0 | 80.03 |
| 20,440 | 194,300.0 | 70.92 |
| 20,805 | 184,940.0 | 67.50 |
| 21,170 | 200,440.0 | 73.16 |
| 21,535 | 200,160.0 | 73.06 |
| 21,900 | 209,130.0 | 76.33 |
| 22,265 | 175,180.0 | 63.94 |
| 22,630 | 163,460.0 | 59.66 |
| 22,995 | 145,510.0 | 53.11 |
| 23,360 | 132,370.0 | 48.32 |
| 23,725 | 118,380.0 | 43.21 |
| 24,090 | 124,160.0 | 45.32 |
| 24,455 | 127,130.0 | 46.40 |
| 24,820 | 130,060.0 | 47.47 |
| 25,185 | 138,540.0 | 50.57 |
| 25,550 | 127,010.0 | 46.36 |
| 25,915 | 129,580.0 | 47.30 |
| 26,280 | 129,070.0 | 47.11 |
| 26,645 | 124,590.0 | 45.48 |
| 27,010 | 94,440.0 | 34.47 |
| 27,375 | 91,080.0 | 33.24 |
| 27,740 | 106,800.0 | 38.98 |
| 28,105 | 85,130.0 | 31.07 |
| 28,470 | 94,500.0 | 34.49 |
| 28,740 | 105,370.0 | 38.46 |
| 28,835 | 100,370.0 | 36.64 |
| 29,200 | 114,740.0 | 41.88 |
| 29,930 | 170,720.0 | 62.31 |
| 30,295 | 164,120.0 | 59.90 |
| 30,660 | 148,840.0 | 54.33 |
| 31,025 | 150,030.0 | 54.76 |
| 31,390 | 127,780.0 | 46.64 |
| 31,755 | 111,050.0 | 40.53 |
| 32,120 | 110,270.0 | 40.25 |
| 32,485 | 107,490.0 | 39.23 |
| 32,850 | 118,870.0 | 43.39 |
| 33,215 | 133,250.0 | 48.64 |
| 33,580 | 141,760.0 | 51.74 |
| 33,945 | 130,910.0 | 47.78 |

POZOS TORTONIENSE (ULTC)

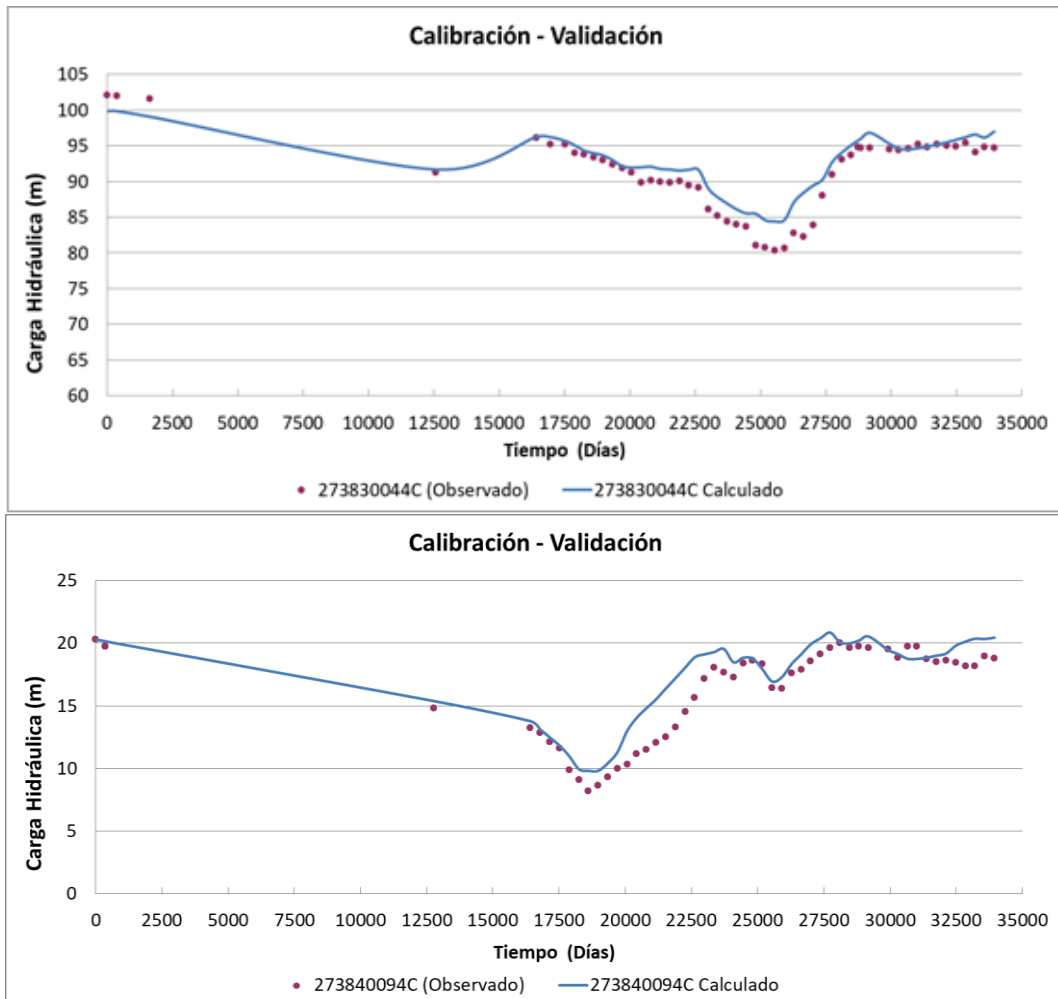
| Time [day] | Rates [m ³ /day] | hm ³ /año |
|------------|-----------------------------|----------------------|
| 5 | 0.0 | 0.00 |
| 365 | 174.9 | 0.06 |
| 730 | 336.0 | 0.12 |
| 1,095 | 358.9 | 0.13 |
| 1,460 | 381.9 | 0.14 |
| 1,825 | 404.9 | 0.15 |
| 2,190 | 425.2 | 0.16 |
| 2,555 | 520.5 | 0.19 |
| 2,900 | 868.1 | 0.32 |
| 2,920 | 868.1 | 0.32 |
| 3,285 | 1,002.5 | 0.37 |
| 3,650 | 1,136.9 | 0.41 |
| 4,015 | 1,256.5 | 0.46 |
| 4,380 | 1,300.9 | 0.47 |
| 4,745 | 1,345.4 | 0.49 |
| 5,110 | 2,339.0 | 0.85 |
| 5,475 | 2,365.8 | 0.86 |
| 5,840 | 2,389.5 | 0.87 |
| 6,205 | 2,471.3 | 0.90 |
| 6,570 | 2,553.1 | 0.93 |
| 6,935 | 2,634.9 | 0.96 |
| 7,300 | 2,716.7 | 0.99 |
| 7,665 | 2,789.6 | 1.02 |
| 8,030 | 2,798.2 | 1.02 |
| 8,395 | 2,806.8 | 1.02 |
| 8,760 | 2,815.5 | 1.03 |
| 9,125 | 2,824.1 | 1.03 |
| 9,490 | 2,831.6 | 1.03 |
| 9,855 | 2,837.1 | 1.04 |
| 10,220 | 5,842.5 | 2.13 |
| 10,585 | 7,920.9 | 2.89 |
| 10,950 | 8,978.6 | 3.28 |
| 11,315 | 15,144.0 | 5.53 |
| 11,680 | 12,077.0 | 4.41 |

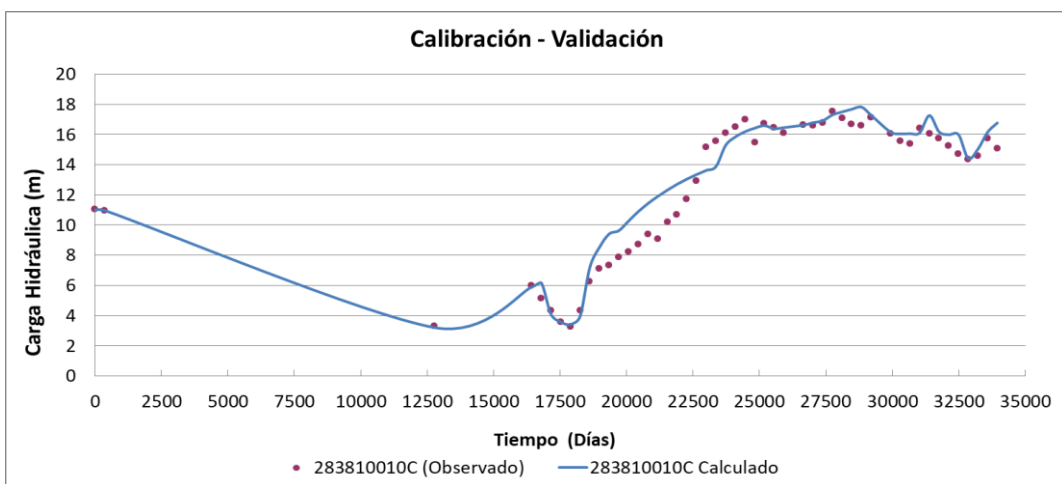
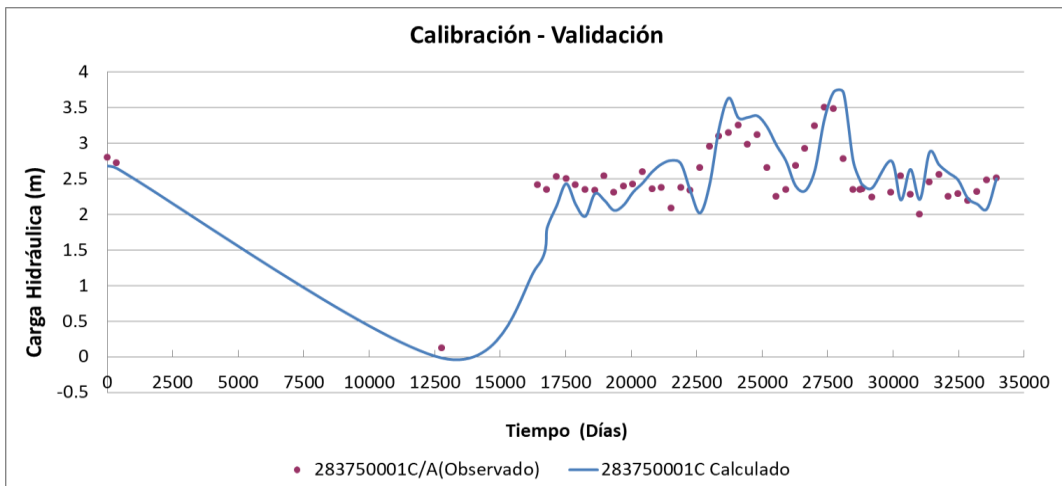
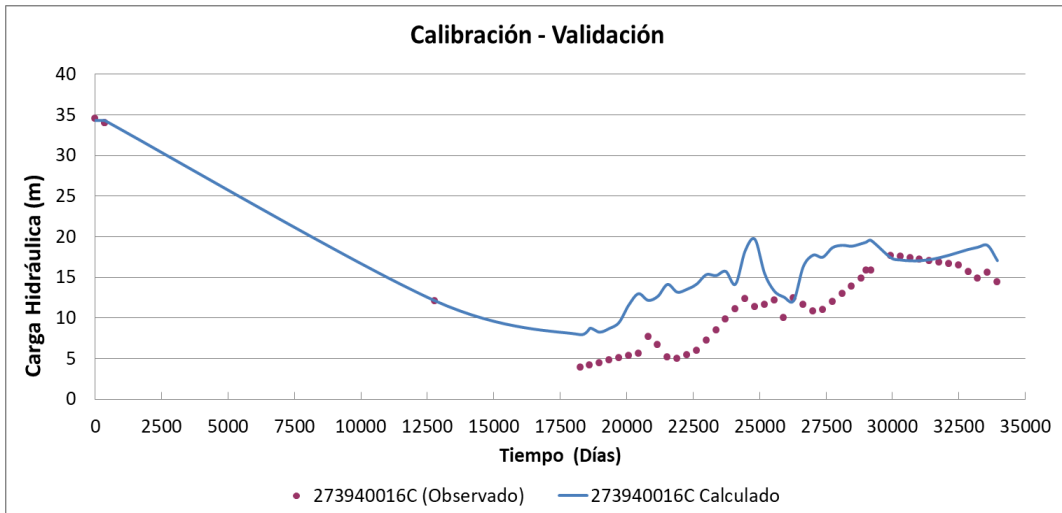
| | | |
|--------|----------|-------|
| 12,045 | 12,619.0 | 4.61 |
| 12,410 | 13,568.0 | 4.95 |
| 12,775 | 14,617.0 | 5.34 |
| 13,140 | 14,572.0 | 5.32 |
| 13,505 | 14,666.0 | 5.35 |
| 13,870 | 15,660.0 | 5.72 |
| 14,235 | 16,818.0 | 6.14 |
| 14,600 | 19,866.0 | 7.25 |
| 14,965 | 21,067.0 | 7.69 |
| 15,330 | 22,080.0 | 8.06 |
| 15,695 | 20,037.5 | 7.31 |
| 16,060 | 21,243.5 | 7.75 |
| 16,425 | 21,881.5 | 7.99 |
| 16,790 | 22,439.5 | 8.19 |
| 17,155 | 23,777.5 | 8.68 |
| 17,520 | 24,141.5 | 8.81 |
| 17,885 | 24,595.5 | 8.98 |
| 18,250 | 24,957.5 | 9.11 |
| 18,615 | 24,279.5 | 8.86 |
| 18,980 | 24,934.5 | 9.10 |
| 19,345 | 24,320.5 | 8.88 |
| 19,710 | 26,560.5 | 9.69 |
| 20,075 | 28,383.5 | 10.36 |
| 20,440 | 28,161.5 | 10.28 |
| 20,805 | 21,396.5 | 7.81 |
| 21,170 | 20,547.5 | 7.50 |
| 21,535 | 12,506.5 | 4.56 |
| 21,900 | 11,396.5 | 4.16 |
| 22,265 | 10,504.5 | 3.83 |
| 22,630 | 9,492.5 | 3.46 |
| 22,995 | 14,326.5 | 5.23 |
| 23,360 | 18,244.5 | 6.66 |
| 23,725 | 18,234.5 | 6.66 |
| 24,090 | 19,748.5 | 7.21 |
| 24,455 | 17,913.5 | 6.54 |
| 24,820 | 14,343.5 | 5.24 |
| 25,185 | 13,316.5 | 4.86 |
| 25,550 | 12,787.5 | 4.67 |
| 25,915 | 10,335.5 | 3.77 |
| 26,280 | 8,652.5 | 3.16 |

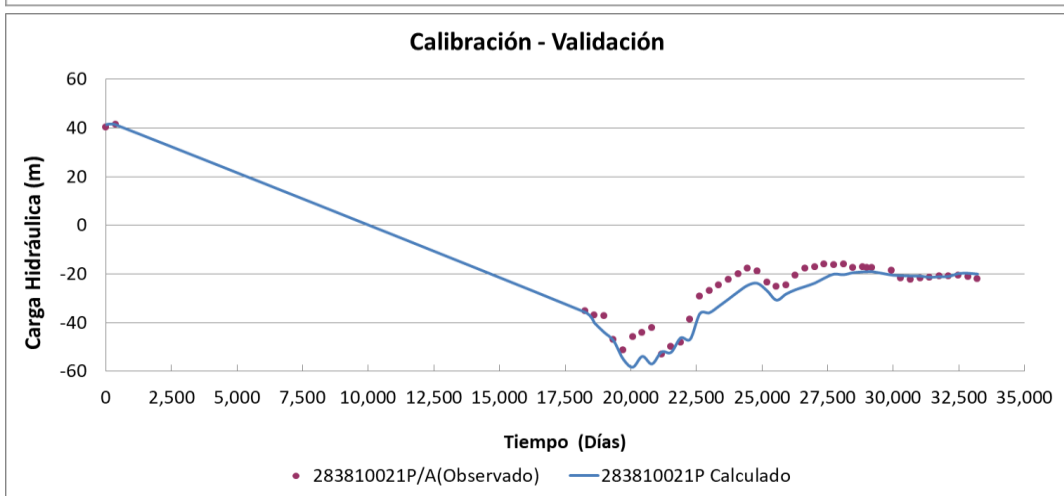
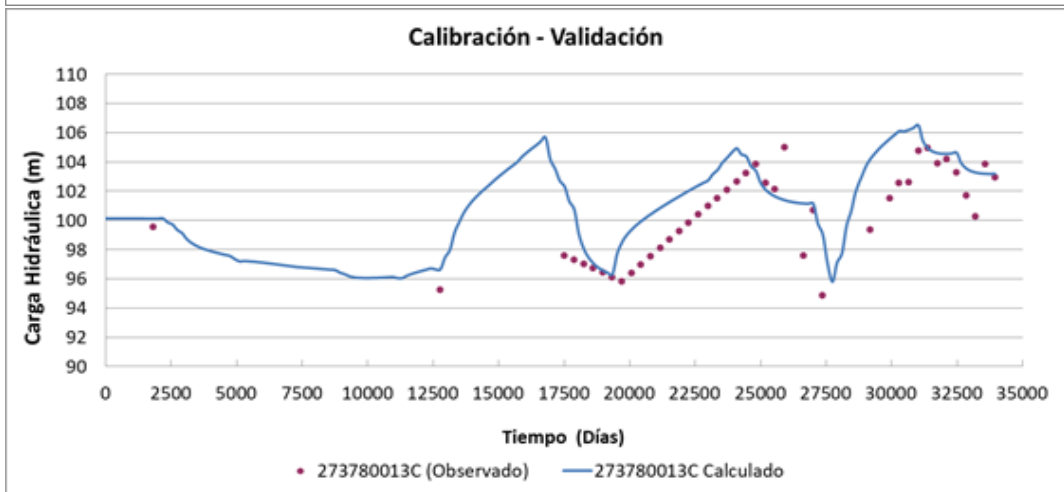
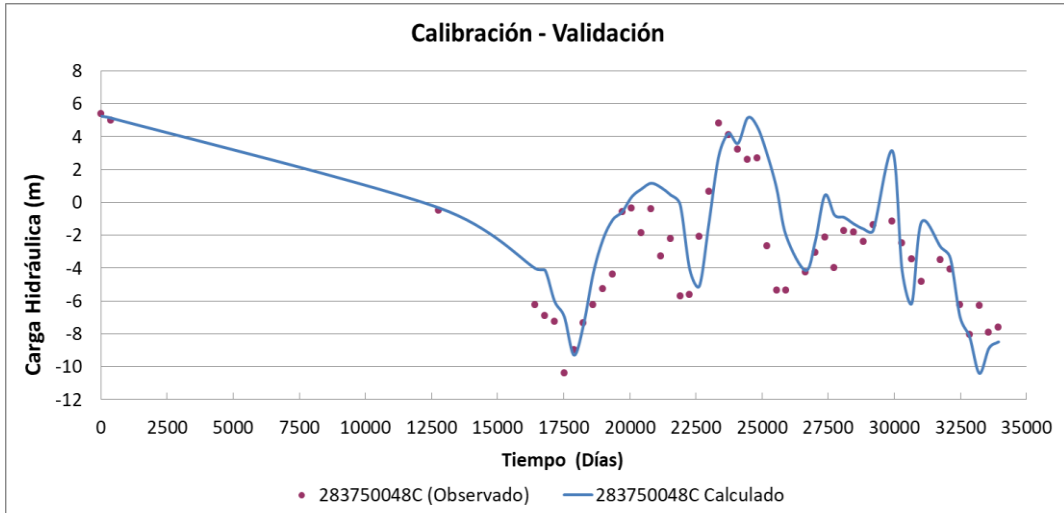
| | | |
|--------|----------|------|
| 26,645 | 6,660.2 | 2.43 |
| 27,010 | 4,046.8 | 1.48 |
| 27,375 | 2,325.7 | 0.85 |
| 27,740 | 1,796.1 | 0.66 |
| 28,105 | 4,581.7 | 1.67 |
| 28,470 | 4,215.8 | 1.54 |
| 28,740 | 4,021.4 | 1.47 |
| 28,835 | 4,021.4 | 1.47 |
| 29,200 | 5,123.2 | 1.87 |
| 29,930 | 11,540.0 | 4.21 |
| 30,295 | 11,492.0 | 4.19 |
| 30,660 | 11,636.0 | 4.25 |
| 31,025 | 11,566.0 | 4.22 |
| 31,390 | 8,891.7 | 3.25 |
| 31,755 | 7,093.4 | 2.59 |
| 32,120 | 7,654.4 | 2.79 |
| 32,485 | 5,912.7 | 2.16 |
| 32,850 | 8,060.7 | 2.94 |
| 33,215 | 10,747.0 | 3.92 |
| 33,580 | 11,757.0 | 4.29 |
| 33,945 | 11,118.0 | 4.06 |

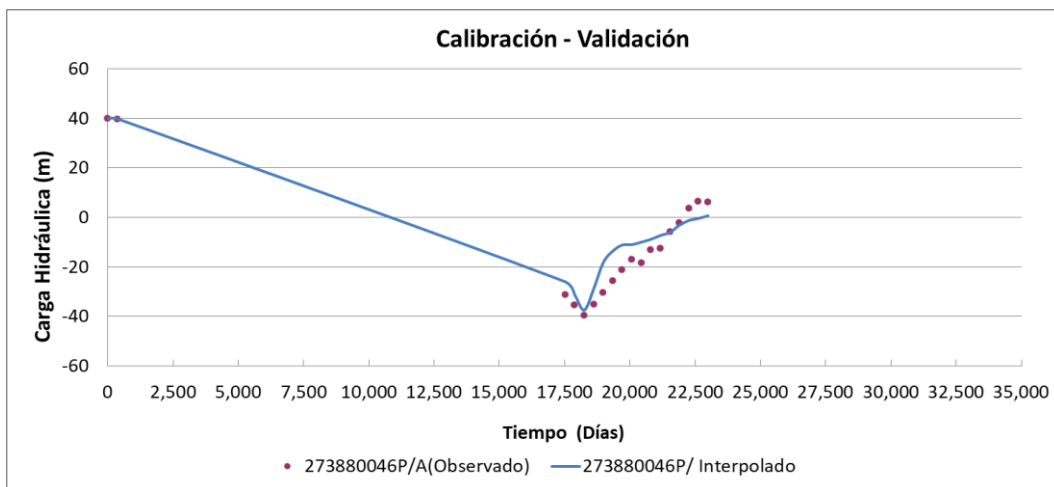
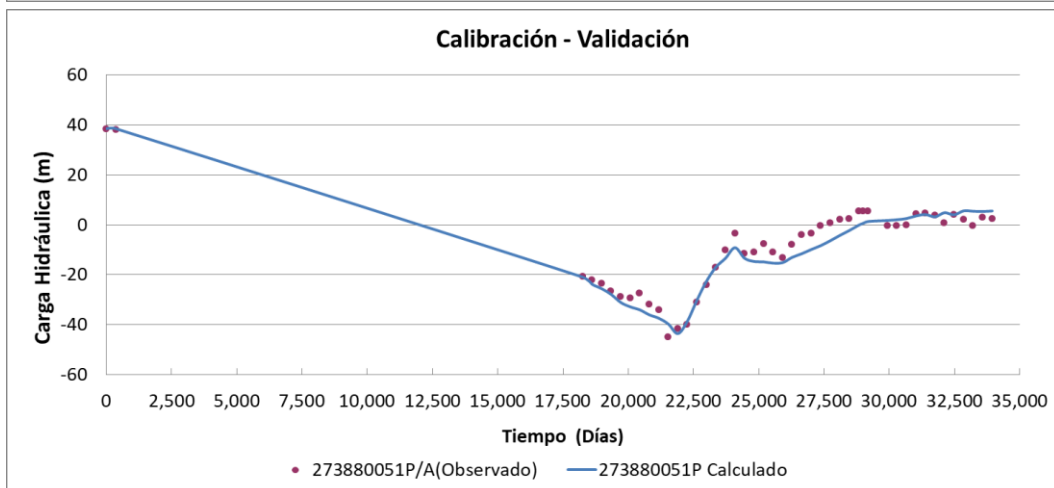
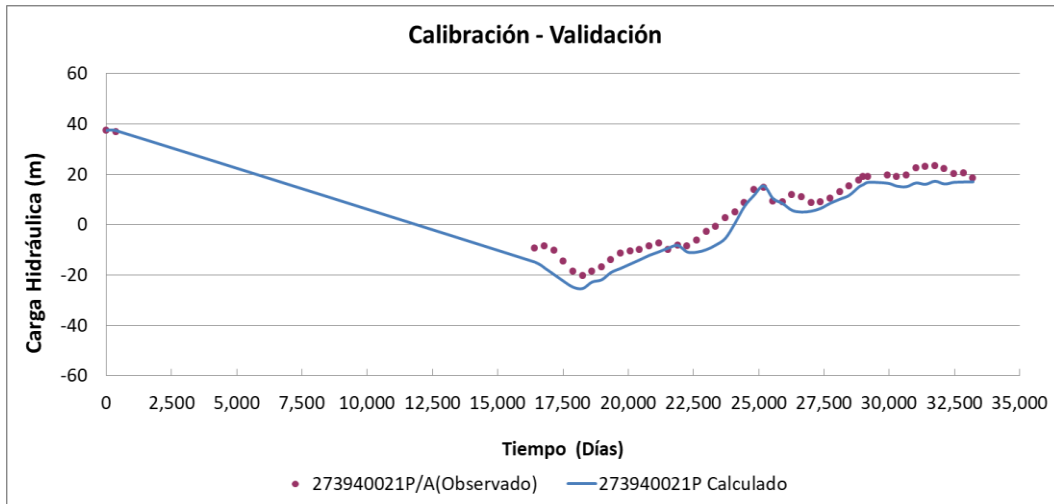
ANEXO 3: GRÁFICOS DE CALIBRACIÓN.

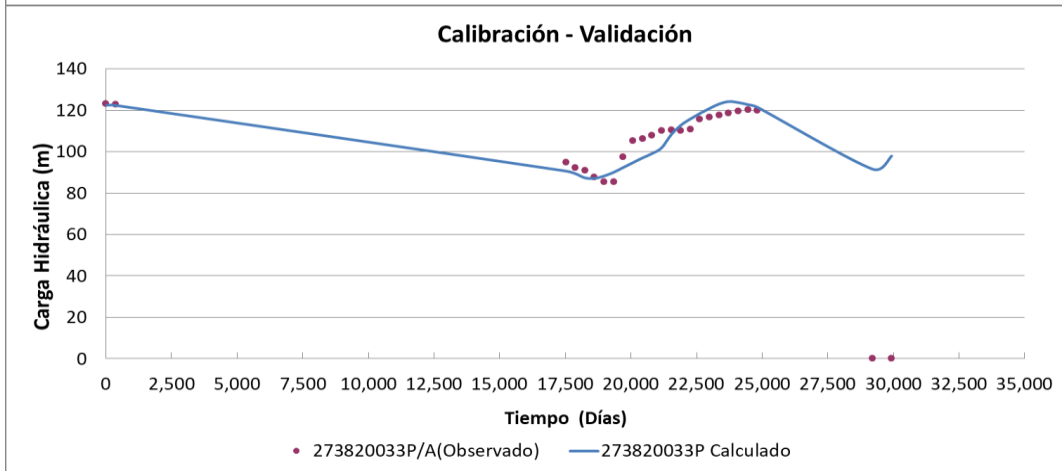
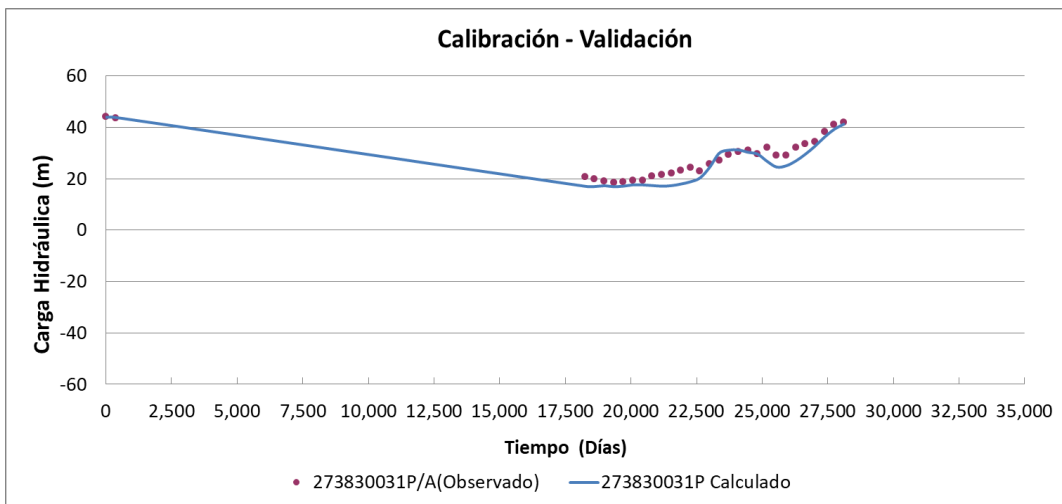
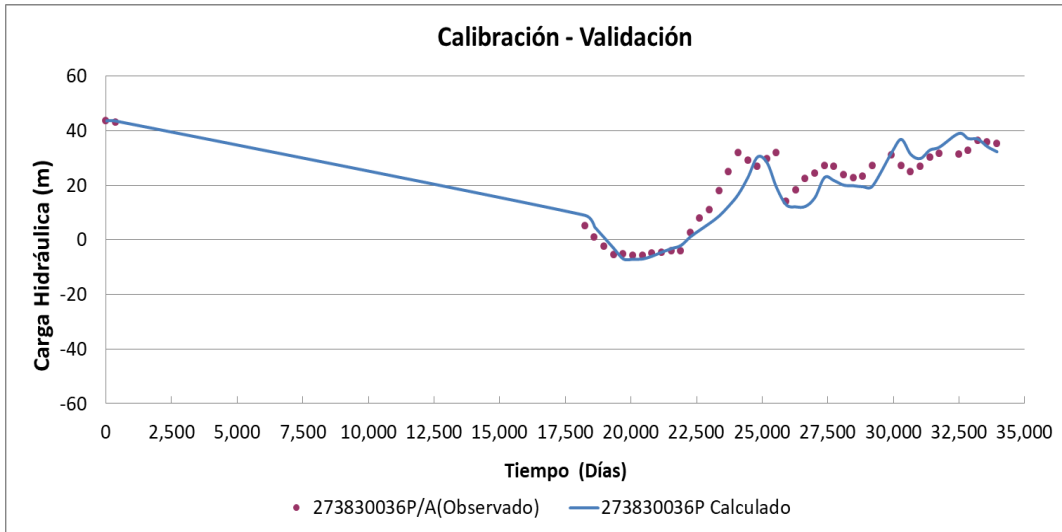
En el presente anexo 3 se presentan una serie de gráficos generados por el modelo de flujo. La información piezométrica disponible en algunos pozos es muy escasa (Ver anexo 1), por lo que se insertarán una serie de gráficos representativos de cada capa con contengan una cantidad de datos lo suficientemente larga para que se aprecie el transcurso evolutivo. Los niveles establecidos para el inicio del periodo de estudio se han estimado, en función de la información disponible para la zona donde se ubica el sondeo de control.

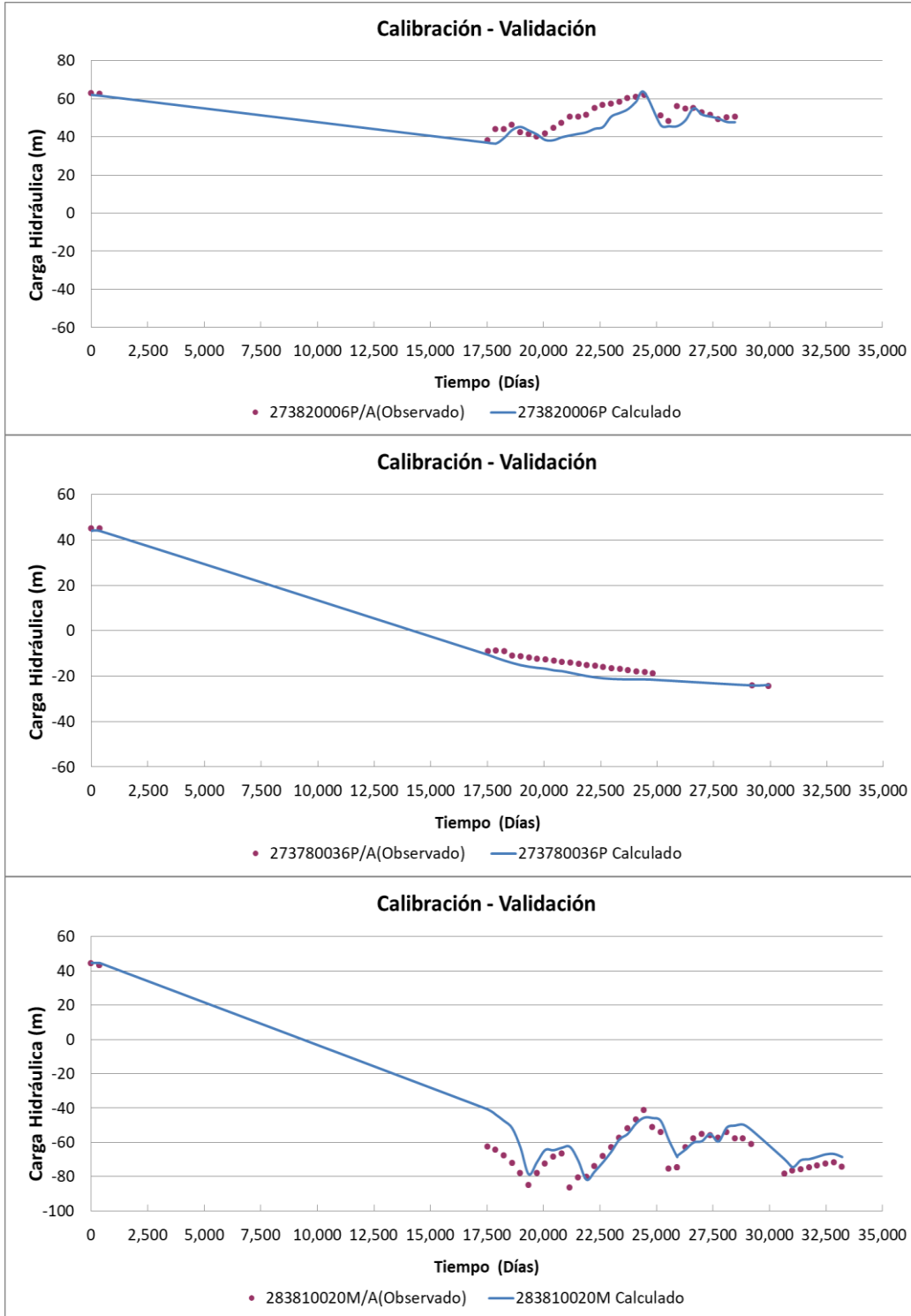


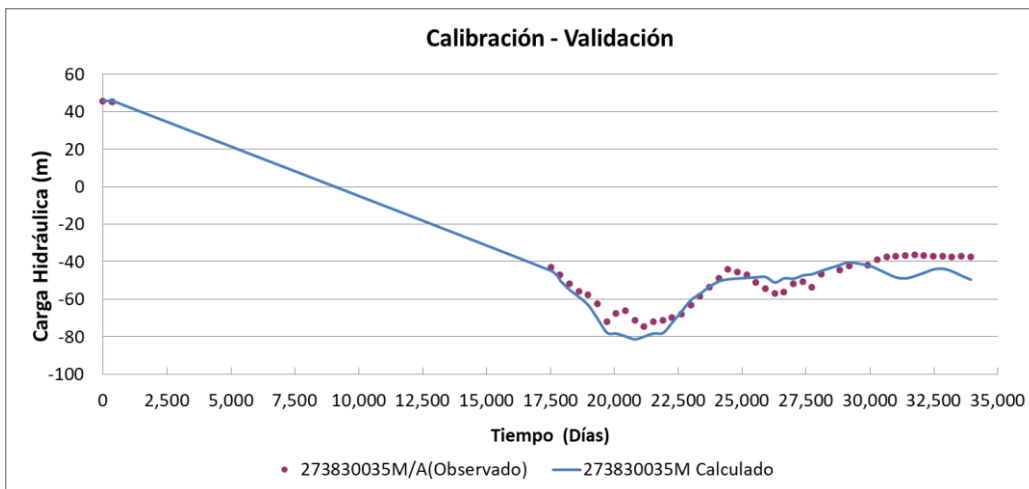
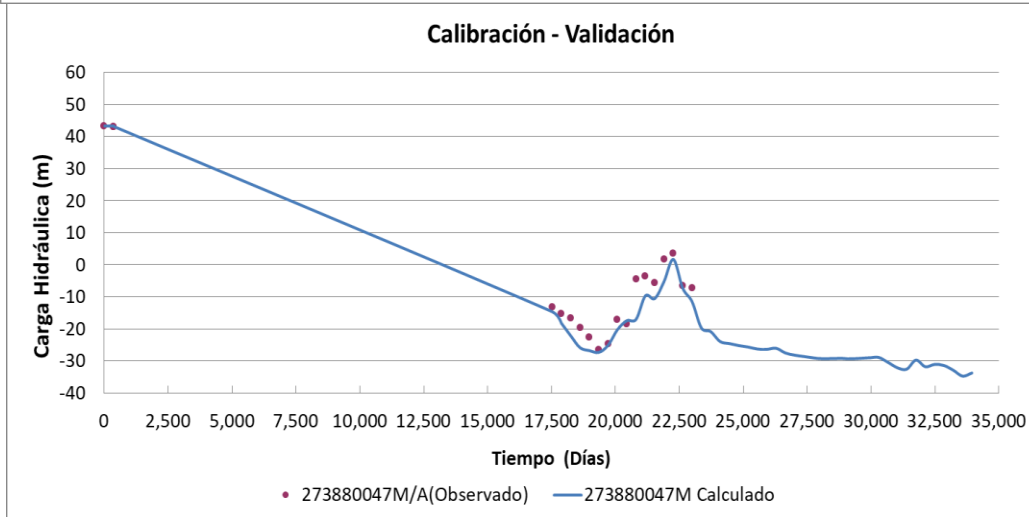
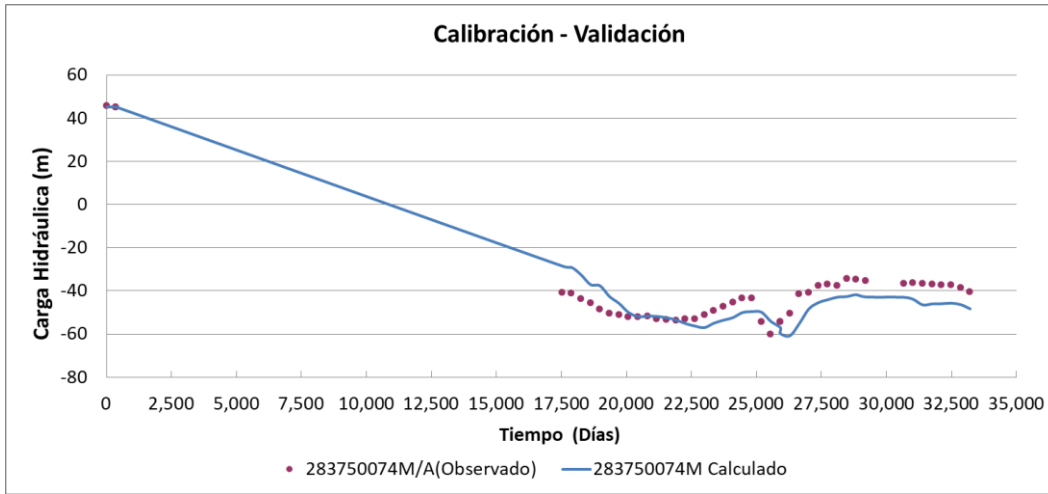


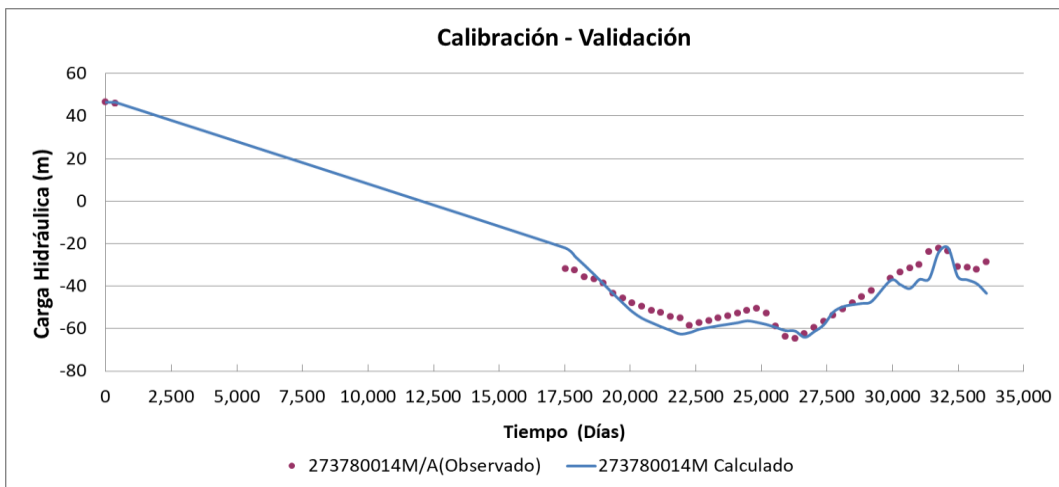
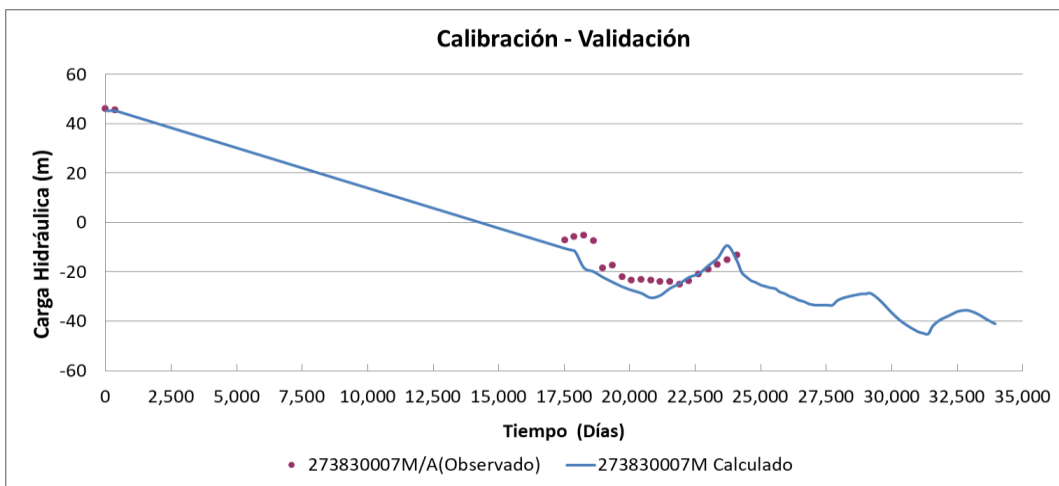
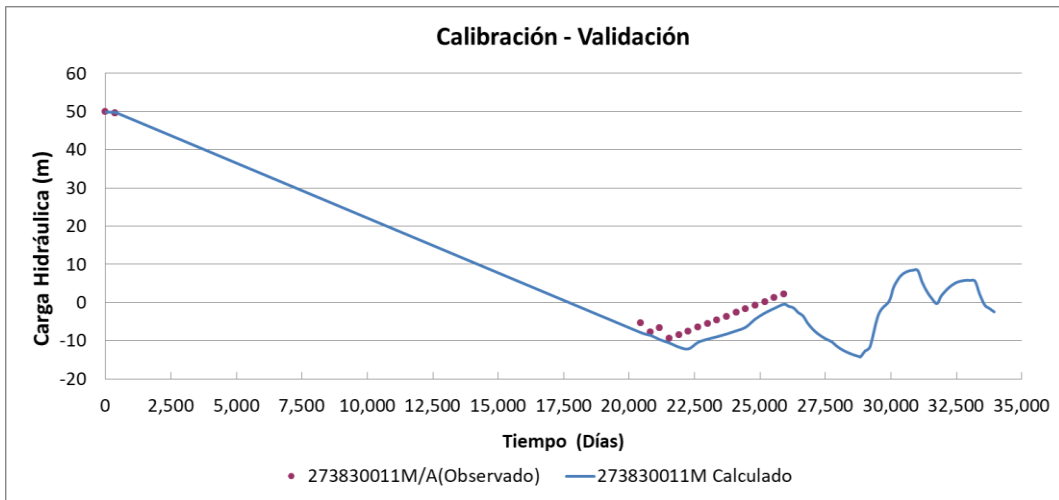


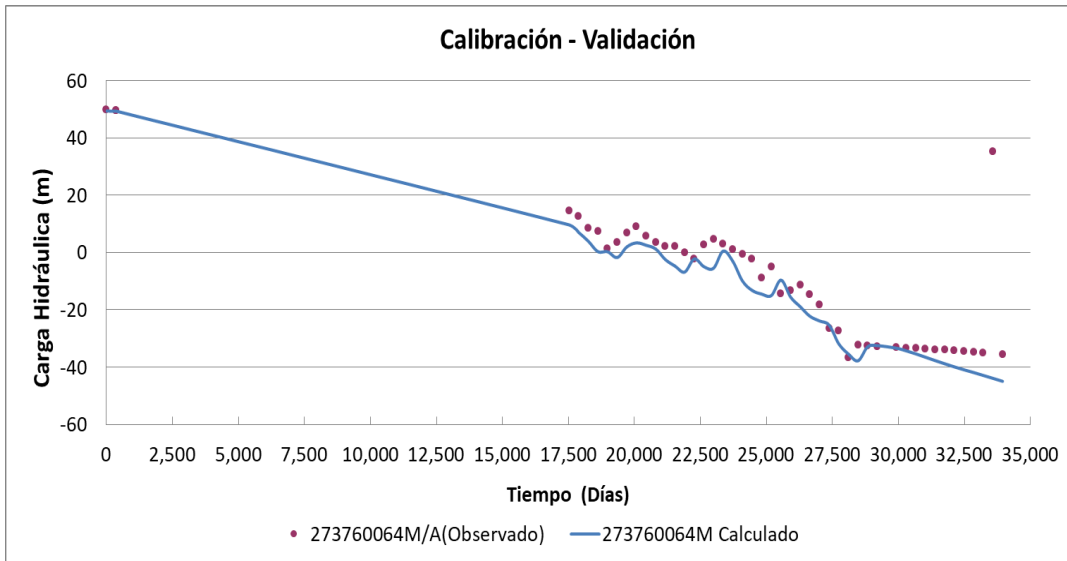
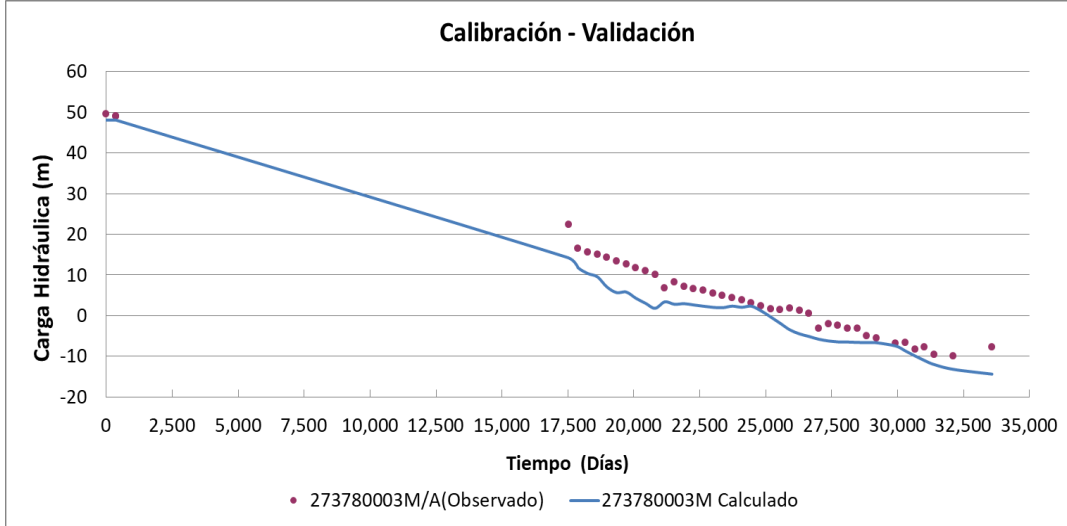












ANEJO 4.- CARTOGRAFÍA HIDROGEOLÓGICA AUXILIAR.

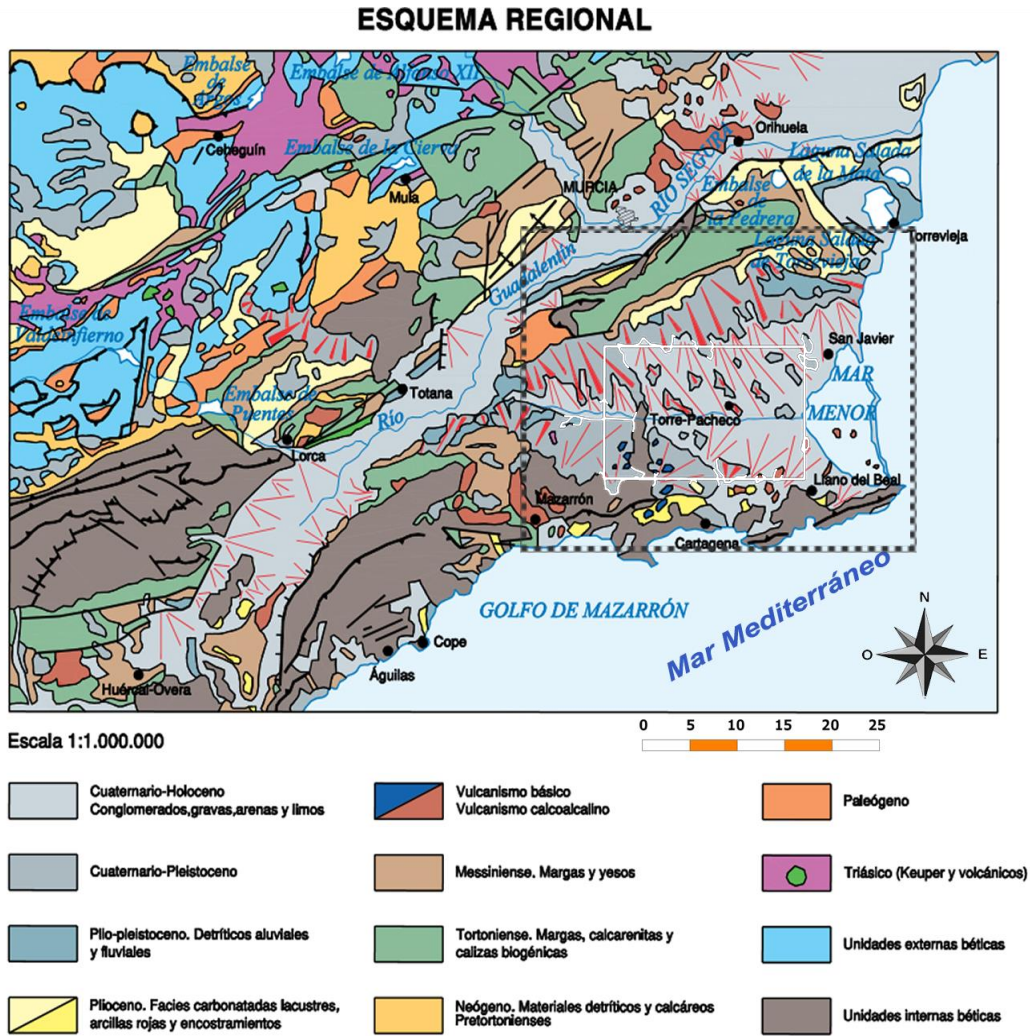


Fig. 1 Anexo 4. Esquema Regional geológico de la zona de Campo de Campo de Cartagena. Se observan al norte de la cuadrícula de estudio los afloramientos del Plioceno, Messiniense y Tortoniense. Modificado de IGME hoja 955 (2010).

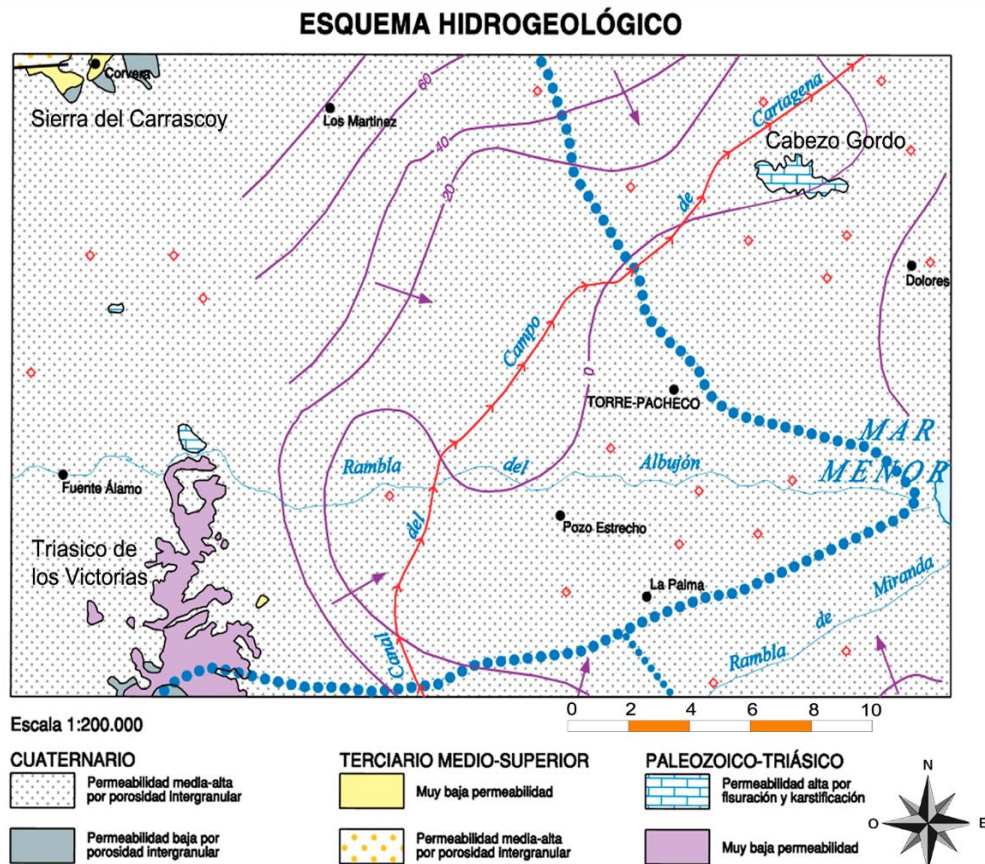


Fig. 2 Anexo 4. Esquema hidrogeológico de Campo de Cartagena. Área de Torre Pacheco, con grados de permeabilidades y curvas isopiezométricas. En azul con puntos las divisorias de cuencas. Modificado de IGME hoja 955 (2010).

Puede observarse como el Cuaternario que comprende la mayoría de la superficie de Campo de Cartagena tiene una permeabilidad media-alta y como se observa la permeabilidad alta del macizo de Cabezo Gordo debida a fisuración y karstificación de su masa, jugando un papel importante en la comunicación hidráulica entre estratos permeables en el sistema acuífero multicapa estudiado.

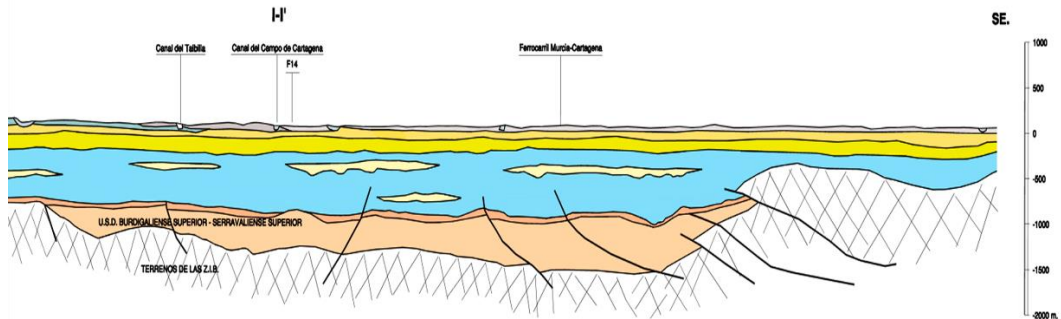


Fig. 3 Anexo 4. Sección geológica de Campo de Cartagena en dirección Noroeste-Sureste. Se observa a la izquierda la escala de profundidades llegando a espesores de estratos cercanos a los 2.000 m. En color azul el estrato Tortoniense con lentejones en amarillo de margas. IGME hoja 955 (2010).

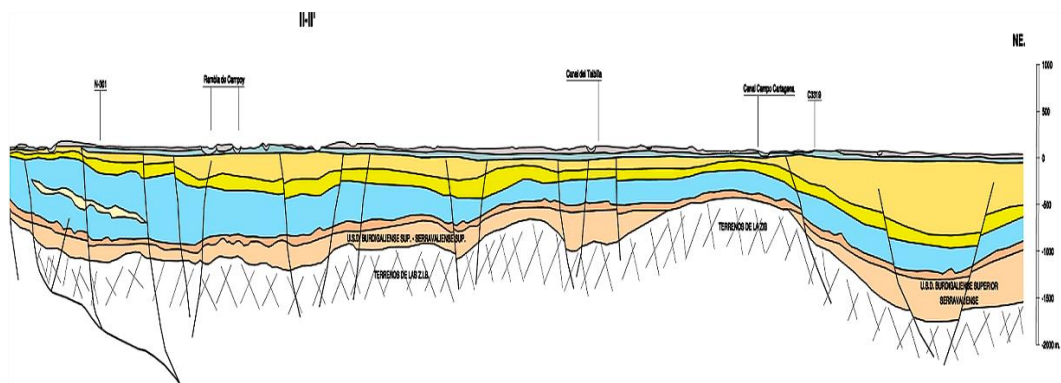


Fig. 4 Anexo 4. Sección geológica de Campo de Cartagena en dirección Suroeste-Noreste. Se observa a la izquierda la escala de profundidades llegando a espesores de estratos cercanos a los 2.000 m. En el centro-derecha de la imagen se observa la elevación del basamento del Cabezo Gordo, y a su derecha existen espesores importantes del tramo acuífero del Messiniense en color naranja, al Noreste de Cabezo Gordo. IGME hoja 955 (2010).

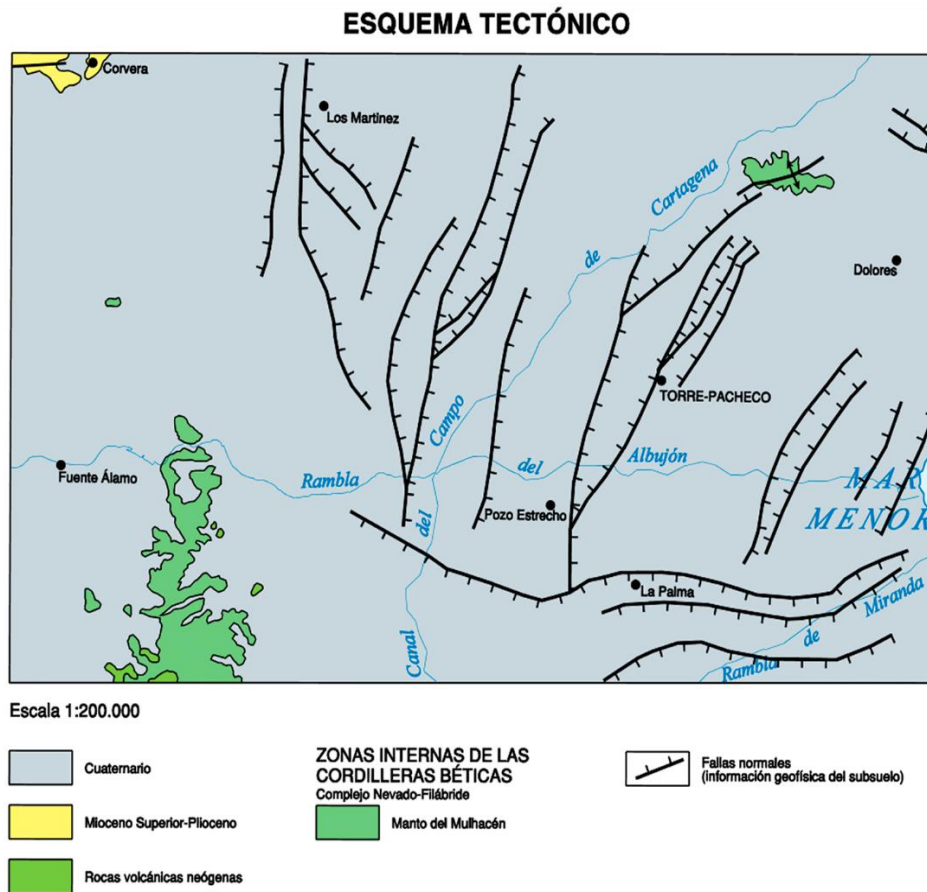


Fig. 5 Anexo 4. Esquema tectónico de la zona de Campo de Cartagena. Existen numerosas fallas en sentido Norte-Sur transversalmente a la Rambla del Albuñón, y otra serie de fallas Este-Oeste orientadas como la Sierra de Cartagena – La Unión que hacen complicar el movimiento del flujo subterráneo a través de los estratos permeables. IGME hoja 955 (2010).

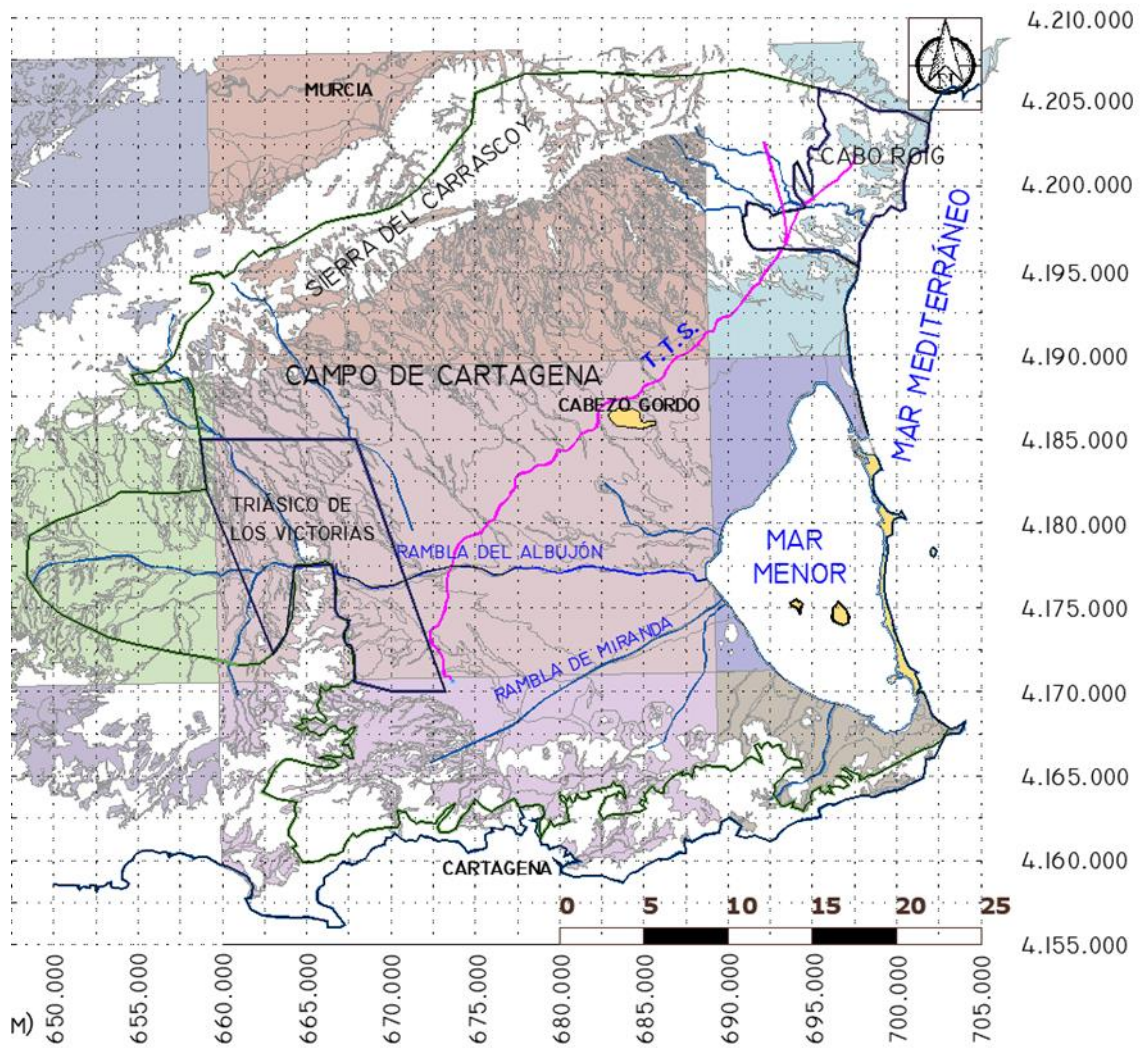


Fig. 6 Anexo 4. Superficie de afloramiento de la capa Cuaternaria, superpuesta sobre el área de estudio.

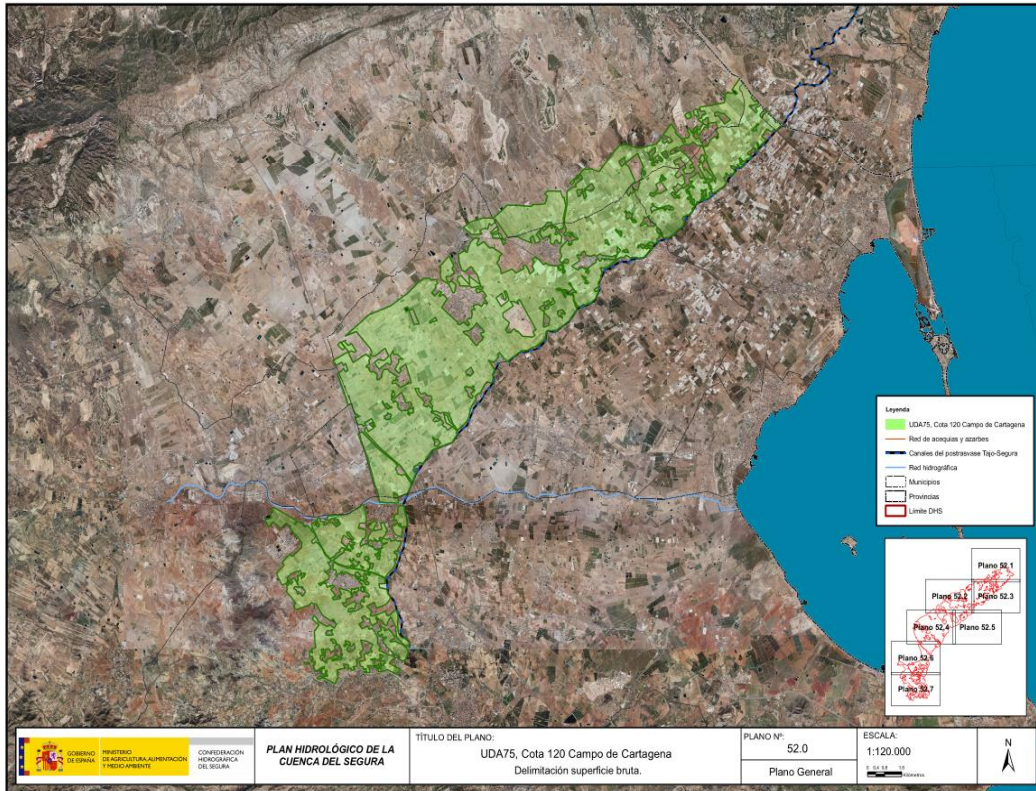


Fig. 2 Anexo 5. Mapa de la UDA 75 del Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura para el periodo 2015-2021 de la Confederación Hidrográfica del Segura, para la delimitación de la superficie bruta de regadío de la zona Campo de Cartagena.

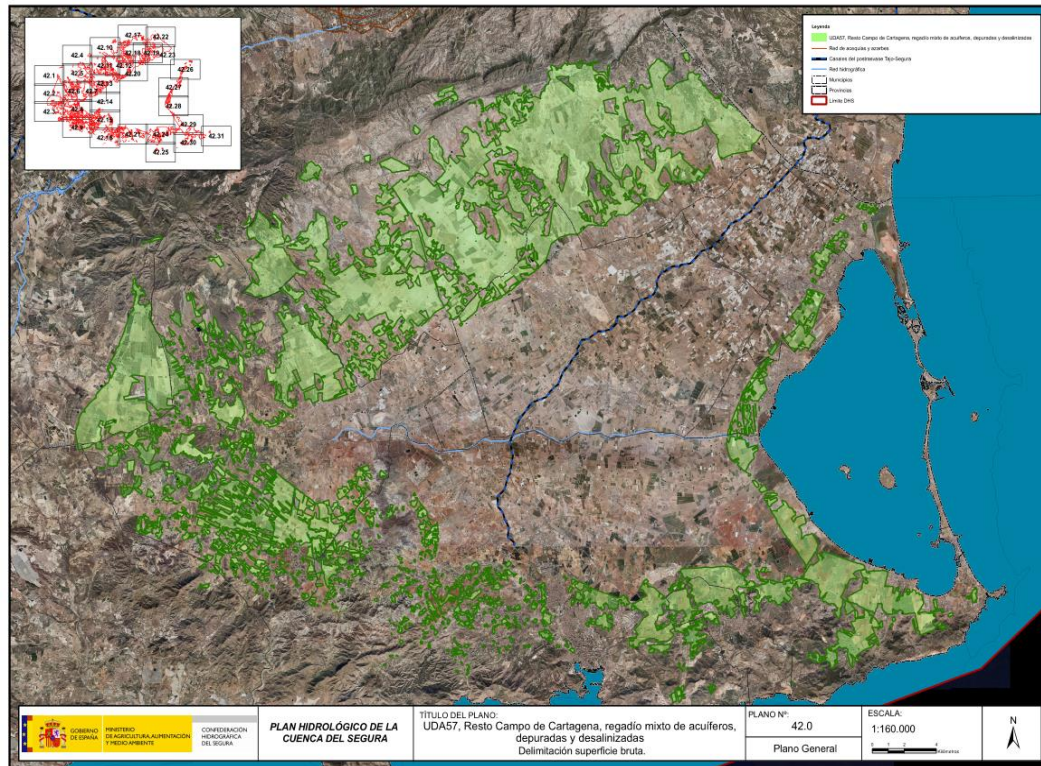


Fig. 3 Anexo 5. Mapa de la UDA 57 del Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura para el periodo 2015-2021 de la Confederación Hidrográfica del Segura, para la delimitación de la superficie bruta de regadío de la zona Campo de Cartagena

ANEXO 6: DATOS DE SALIDAS DEL MODELO. BALANCES.

| Cuaternario (Qt) | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|--|-------------------------------------|
| Fecha Año | Salida al Mar Menor | Salida Mar Medite- rráneo | Recarga | Almace- namiento | Entrada desde Mar Menor | Entrada desde Mar Medite- rráneo | Entrada desde Cabezo Gordo |
| - | hm ³ /año | hm ³ /año | hm ³ /año | hm ³ /año | hm ³ /año | hm ³ /año | hm ³ /año |
| Estacio- nario | 36.32 | 4.56 | 38.58 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 6.03 |
| 1905 | 35.67 | - | - | - | - | - | - |
| 1910 | 34.67 | - | - | - | - | - | - |
| 1915 | 33.27 | - | - | - | - | - | - |
| 1920 | 32.87 | - | - | - | - | - | - |
| 1925 | 31.64 | 2.58 | 38.73 | 0.00 | 0.00 | 0.001 | 3.18 |
| 1926 | 31.14 | 2.58 | 38.73 | -0.00 | 0.00 | 0.001 | 2.94 |
| 1927 | 30.89 | 2.60 | 38.73 | -1.88 | 0.00 | 0.001 | 2.94 |
| 1928 | 30.62 | 2.53 | 38.73 | -4.28 | 0.00 | 0.001 | 2.94 |
| 1929 | 30.23 | 2.39 | 38.73 | -5.44 | 0.00 | 0.001 | 2.94 |
| 1930 | 29.76 | 2.23 | 38.73 | -7.63 | 0.00 | 0.001 | 2.94 |
| 1931 | 29.29 | 2.05 | 41.01 | -5.78 | 0.02 | 0.001 | 2.95 |
| 1932 | 28.80 | 1.84 | 41.01 | -7.20 | 0.05 | 0.001 | 2.95 |
| 1933 | 28.27 | 1.62 | 41.01 | -9.27 | 0.06 | 0.062 | 2.94 |
| 1934 | 28.25 | 1.61 | 41.01 | -9.25 | 0.06 | 0.066 | 2.94 |
| 1935 | 27.66 | 1.65 | 40.98 | -8.93 | 0.05 | 0.000 | 2.93 |
| 1936 | 27.05 | 1.78 | 40.98 | -10.79 | 0.06 | 0.000 | 2.92 |
| 1937 | 26.53 | 1.87 | 43.55 | -9.87 | 0.08 | 0.000 | 2.90 |
| 1938 | 26.06 | 1.91 | 43.55 | -10.55 | 0.10 | 0.000 | 2.88 |
| 1939 | 25.61 | 1.92 | 43.54 | -8.28 | 0.13 | 0.000 | 2.84 |
| 1940 | 25.25 | 1.90 | 43.54 | -8.43 | 0.13 | 0.000 | 2.80 |
| 1941 | 24.97 | 1.87 | 43.54 | -8.11 | 0.12 | 0.000 | 2.76 |
| 1942 | 24.83 | 1.87 | 48.84 | -3.67 | 0.14 | 0.000 | 2.71 |
| 1943 | 24.60 | 1.85 | 49.96 | -5.26 | 0.16 | 0.000 | 2.66 |
| 1944 | 24.27 | 1.82 | 49.95 | -6.11 | 0.17 | 0.000 | 2.59 |
| 1945 | 23.89 | 1.79 | 49.93 | -6.36 | 0.20 | 0.000 | 2.53 |
| 1946 | 23.47 | 1.75 | 49.92 | -7.63 | 0.23 | 0.000 | 2.46 |

| | | | | | | | |
|-------------|-------|------|--------|-------|-------|-------|------|
| 1947 | 22.49 | 1.72 | 55.78 | -4.81 | 0.26 | 0.000 | 2.41 |
| 1948 | 21.78 | 1.69 | 55.78 | -5.28 | 0.27 | 0.000 | 2.35 |
| 1949 | 20.58 | 1.65 | 55.76 | -6.63 | 0.26 | 0.000 | 2.29 |
| 1950 | 19.76 | 1.60 | 55.75 | -5.91 | 0.26 | 0.000 | 2.23 |
| 1951 | 18.81 | 1.52 | 55.75 | -7.44 | 0.33 | 0.000 | 2.17 |
| 1952 | 18.08 | 1.48 | 66.03 | 1.36 | 0.38 | 0.007 | 2.11 |
| 1953 | 16.75 | 1.41 | 66.03 | 0.06 | 0.59 | 0.037 | 2.07 |
| 1954 | 15.61 | 1.35 | 66.03 | -0.70 | 0.66 | 0.105 | 2.03 |
| 1955 | 14.65 | 1.29 | 66.03 | -1.62 | 1.17 | 0.113 | 2.00 |
| 1956 | 12.68 | 1.25 | 66.03 | -1.26 | 1.50 | 0.113 | 1.98 |
| 1957 | 10.81 | 1.23 | 73.30 | 0.71 | 2.44 | 0.105 | 1.98 |
| 1958 | 9.31 | 1.14 | 73.30 | -1.98 | 4.88 | 0.107 | 1.99 |
| 1959 | 9.02 | 1.07 | 73.30 | -0.90 | 7.64 | 0.112 | 2.03 |
| 1960 | 8.97 | 1.02 | 73.30 | -3.30 | 10.64 | 0.121 | 2.12 |
| 1961 | 8.59 | 0.97 | 73.30 | -4.82 | 14.05 | 0.133 | 2.31 |
| 1962 | 8.56 | 0.99 | 81.47 | 6.17 | 13.42 | 0.116 | 2.37 |
| 1963 | 8.66 | 1.04 | 81.47 | 14.65 | 11.90 | 0.074 | 2.18 |
| 1964 | 8.82 | 1.11 | 81.47 | 16.59 | 10.21 | 0.018 | 2.09 |
| 1965 | 9.30 | 1.23 | 81.47 | 20.23 | 7.46 | 0.000 | 2.00 |
| 1966 | 9.77 | 1.36 | 81.47 | 21.90 | 5.36 | 0.000 | 1.90 |
| 1967 | 10.19 | 1.51 | 89.10 | 27.30 | 3.91 | 0.000 | 1.93 |
| 1968 | 11.52 | 1.58 | 89.10 | 26.98 | 3.34 | 0.000 | 1.95 |
| 1969 | 12.04 | 1.64 | 89.10 | 28.06 | 2.92 | 0.000 | 1.97 |
| 1970 | 12.81 | 1.78 | 89.10 | 28.15 | 2.31 | 0.000 | 1.99 |
| 1971 | 13.93 | 1.99 | 89.10 | 29.55 | 1.91 | 0.000 | 2.02 |
| 1972 | 14.41 | 2.33 | 98.86 | 35.81 | 1.72 | 0.001 | 2.06 |
| 1973 | 15.69 | 2.50 | 98.86 | 33.87 | 1.44 | 0.002 | 2.10 |
| 1974 | 17.04 | 2.67 | 98.86 | 32.92 | 1.22 | 0.006 | 2.15 |
| 1975 | 18.04 | 2.53 | 98.86 | 32.35 | 1.12 | 0.031 | 2.19 |
| 1976 | 19.13 | 2.49 | 98.86 | 34.93 | 1.01 | 0.020 | 2.24 |
| 1977 | 20.04 | 2.72 | 108.35 | 40.77 | 0.80 | 0.002 | 2.30 |
| 1978 | 21.17 | 2.77 | 108.35 | 39.71 | 0.60 | 0.002 | 2.36 |
| 1979 | 22.01 | 2.76 | 108.35 | 40.06 | 0.40 | 0.002 | 2.41 |
| 1980 | 22.92 | 2.86 | 108.35 | 38.18 | 0.20 | 0.002 | 2.46 |
| 1981 | 23.59 | 3.04 | 108.35 | 38.46 | 0.00 | 0.002 | 2.49 |
| 1982 | 24.95 | 3.17 | 112.14 | 45.25 | 0.00 | 0.002 | 2.53 |
| 1983 | 26.99 | 3.32 | 112.14 | 46.38 | 0.00 | 0.003 | 2.56 |
| 1984 | 27.99 | 3.42 | 112.14 | 45.19 | 0.51 | 0.003 | 2.59 |
| 1985 | 29.35 | 3.47 | 112.14 | 45.14 | 0.49 | 0.003 | 2.62 |
| 1986 | 30.41 | 3.49 | 112.14 | 43.75 | 0.48 | 0.003 | 2.64 |

| | | | | | | | |
|-------------|-------|------|--------|-------|------|-------|------|
| 1987 | 31.51 | 3.30 | 112.25 | 40.24 | 0.42 | 0.003 | 2.65 |
| 1988 | 32.63 | 3.19 | 112.25 | 39.55 | 0.20 | 0.003 | 2.67 |
| 1989 | 33.66 | 3.52 | 112.25 | 39.09 | 0.00 | 0.003 | 2.68 |
| 1990 | 35.38 | 4.07 | 112.25 | 38.61 | 0.00 | 0.003 | 2.69 |
| 1991 | 36.32 | 4.35 | 112.25 | 37.83 | 0.00 | 0.004 | 2.71 |
| 1992 | 37.22 | 4.23 | 108.97 | 34.80 | 0.00 | 0.004 | 2.63 |
| 1993 | 37.35 | 4.30 | 108.93 | 33.82 | 0.00 | 0.004 | 2.55 |
| 1994 | 37.83 | 4.34 | 108.93 | 30.99 | 0.00 | 0.004 | 2.47 |
| 1995 | 38.39 | 4.26 | 108.90 | 26.09 | 0.00 | 0.004 | 2.39 |
| 1996 | 38.51 | 4.10 | 108.90 | 25.35 | 0.00 | 0.004 | 2.32 |
| 1997 | 38.67 | 3.96 | 109.53 | 26.03 | 0.00 | 0.004 | 2.33 |
| 1998 | 39.70 | 3.74 | 109.53 | 29.96 | 0.00 | 0.004 | 2.33 |
| 1999 | 40.19 | 3.74 | 109.53 | 32.04 | 0.00 | 0.004 | 2.33 |
| 2000 | 40.42 | 3.94 | 109.50 | 32.38 | 0.00 | 0.004 | 2.32 |
| 2001 | 40.80 | 4.37 | 109.50 | 31.65 | 0.00 | 0.004 | 2.32 |
| 2002 | 40.69 | 4.54 | 108.83 | 30.55 | 0.00 | 0.004 | 2.32 |
| 2003 | 41.33 | 4.53 | 108.83 | 30.19 | 0.00 | 0.004 | 2.34 |
| 2004 | 41.38 | 4.04 | 108.83 | 29.86 | 0.00 | 0.004 | 2.38 |
| 2005 | 41.46 | 3.92 | 108.83 | 29.98 | 0.00 | 0.004 | 2.40 |
| 2006 | 41.52 | 3.90 | 108.83 | 29.95 | 0.00 | 0.004 | 2.41 |
| 2007 | 41.47 | 3.90 | 108.83 | 27.79 | 0.00 | 0.004 | 2.44 |
| 2008 | 42.64 | 4.48 | 109.50 | 25.67 | 0.00 | 0.004 | 2.48 |
| 2009 | 42.31 | 4.13 | 109.50 | 22.90 | 0.00 | 0.004 | 2.50 |
| 2010 | 42.30 | 3.92 | 109.50 | 23.48 | 0.00 | 0.004 | 2.52 |
| 2011 | 42.49 | 4.09 | 109.50 | 24.60 | 0.00 | 0.004 | 2.54 |
| 2012 | 42.83 | 4.32 | 109.50 | 26.30 | 0.00 | 0.004 | 2.56 |
| 2013 | 42.65 | 4.24 | 109.50 | 25.59 | 0.00 | 0.004 | 2.59 |
| 2014 | 43.08 | 4.16 | 109.50 | 25.53 | 0.00 | 0.004 | 2.62 |
| 2015 | 43.26 | 3.96 | 109.50 | 26.50 | 0.00 | 0.004 | 2.64 |
| 2016 | 43.29 | 3.83 | 109.50 | 23.77 | 0.00 | 0.017 | 2.67 |
| 2017 | 43.53 | 3.71 | 109.50 | 22.66 | 0.00 | 0.048 | 2.69 |
| 2018 | 42.72 | 3.70 | 109.50 | 21.99 | 0.00 | 0.039 | 2.71 |
| 2019 | 42.62 | 3.76 | 109.50 | 22.46 | 0.00 | 0.030 | 2.73 |

Plioceno (LT)

| Fecha Año | Recarga | Almacena miento | Entradas desde Cabezo Gordo | Salidas hacia Cabezo Gordo | Entradas Laterales |
|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| - | hm ³ /año | hm ³ /año | hm ³ /año | hm ³ /año | hm ³ /año |
| Estacionario | 2.92 | 0.00 | 0.30 | 2.92 | 0.20 |
| 1905 | 2.92 | - | - | - | - |
| 1910 | 2.92 | - | - | - | - |
| 1915 | 2.92 | - | - | - | - |
| 1920 | 2.92 | - | - | - | - |
| 1925 | 2.92 | 0.00 | 0.13 | 0.03 | 0.07 |
| 1926 | 2.92 | 0.00 | 0.13 | 0.03 | 0.07 |
| 1927 | 2.92 | -0.36 | 0.13 | 0.03 | 0.07 |
| 1928 | 2.92 | -0.45 | 0.13 | 0.03 | 0.07 |
| 1929 | 2.92 | -0.86 | 0.13 | 0.04 | 0.07 |
| 1930 | 2.92 | -1.23 | 0.14 | 0.04 | 0.07 |
| 1931 | 2.92 | -1.66 | 0.14 | 0.04 | 0.07 |
| 1932 | 2.92 | -2.12 | 0.15 | 0.04 | 0.08 |
| 1933 | 2.92 | -2.60 | 0.16 | 0.04 | 0.08 |
| 1934 | 2.92 | -2.60 | 0.16 | 0.04 | 0.08 |
| 1935 | 2.92 | -3.10 | 0.17 | 0.04 | 0.09 |
| 1936 | 2.92 | -3.84 | 0.19 | 0.04 | 0.11 |
| 1937 | 2.92 | -4.62 | 0.21 | 0.04 | 0.14 |
| 1938 | 2.92 | -5.59 | 0.24 | 0.04 | 0.19 |
| 1939 | 2.92 | -6.35 | 0.27 | 0.05 | 0.25 |
| 1940 | 2.92 | -7.82 | 0.30 | 0.05 | 0.34 |
| 1941 | 2.92 | -10.19 | 0.34 | 0.06 | 0.45 |
| 1942 | 2.92 | -12.18 | 0.39 | 0.06 | 0.58 |
| 1943 | 2.92 | -13.59 | 0.44 | 0.07 | 0.72 |
| 1944 | 2.92 | -15.82 | 0.49 | 0.07 | 0.88 |
| 1945 | 2.92 | -17.34 | 0.55 | 0.08 | 1.04 |
| 1946 | 2.92 | -18.35 | 0.60 | 0.08 | 1.22 |
| 1947 | 2.92 | -19.16 | 0.65 | 0.09 | 1.40 |
| 1948 | 2.92 | -19.41 | 0.69 | 0.09 | 1.58 |
| 1949 | 2.92 | -20.24 | 0.72 | 0.10 | 1.76 |
| 1950 | 2.92 | -20.33 | 0.74 | 0.10 | 1.92 |
| 1951 | 2.92 | -21.03 | 0.76 | 0.11 | 2.08 |
| 1952 | 2.92 | -21.76 | 0.79 | 0.11 | 2.24 |

| | | | | | |
|-------------|------|--------|------|------|------|
| 1953 | 2.92 | -22.26 | 0.81 | 0.12 | 2.41 |
| 1954 | 2.92 | -22.68 | 0.83 | 0.12 | 2.58 |
| 1955 | 2.92 | -23.44 | 0.84 | 0.13 | 2.75 |
| 1956 | 2.92 | -24.65 | 0.85 | 0.13 | 2.94 |
| 1957 | 2.92 | -25.46 | 0.84 | 0.14 | 3.12 |
| 1958 | 2.92 | -26.09 | 0.82 | 0.14 | 3.29 |
| 1959 | 2.92 | -28.47 | 0.80 | 0.15 | 3.49 |
| 1960 | 2.92 | -30.28 | 0.77 | 0.17 | 3.69 |
| 1961 | 2.92 | -30.08 | 0.69 | 0.18 | 3.86 |
| 1962 | 2.92 | -30.21 | 0.69 | 0.19 | 4.03 |
| 1963 | 2.92 | -30.59 | 0.67 | 0.20 | 4.20 |
| 1964 | 2.92 | -30.75 | 0.66 | 0.21 | 4.36 |
| 1965 | 2.92 | -32.23 | 0.65 | 0.22 | 4.53 |
| 1966 | 2.92 | -33.18 | 0.64 | 0.23 | 4.69 |
| 1967 | 2.92 | -34.23 | 0.62 | 0.24 | 4.85 |
| 1968 | 2.92 | -35.18 | 0.60 | 0.26 | 5.01 |
| 1969 | 2.92 | -36.74 | 0.58 | 0.29 | 5.17 |
| 1970 | 2.92 | -38.74 | 0.57 | 0.31 | 5.35 |
| 1971 | 2.92 | -40.88 | 0.55 | 0.33 | 5.53 |
| 1972 | 2.92 | -43.78 | 0.56 | 0.36 | 5.78 |
| 1973 | 2.92 | -47.94 | 0.54 | 0.41 | 6.08 |
| 1974 | 2.92 | -51.27 | 0.55 | 0.54 | 6.40 |
| 1975 | 2.92 | -54.33 | 0.58 | 0.58 | 6.76 |
| 1976 | 2.92 | -56.48 | 0.60 | 0.68 | 7.14 |
| 1977 | 2.92 | -43.78 | 0.60 | 0.86 | 7.54 |
| 1978 | 2.92 | -39.56 | 0.57 | 1.08 | 7.89 |
| 1979 | 2.92 | -39.79 | 0.56 | 1.19 | 8.25 |
| 1980 | 2.92 | -41.12 | 0.59 | 1.11 | 8.57 |
| 1981 | 2.92 | -37.81 | 0.61 | 1.04 | 8.87 |
| 1982 | 2.92 | -29.88 | 0.59 | 1.00 | 8.99 |
| 1983 | 2.92 | -28.91 | 0.57 | 0.96 | 9.00 |
| 1984 | 2.92 | -23.30 | 0.53 | 0.92 | 8.89 |
| 1985 | 2.92 | -23.76 | 0.49 | 0.90 | 8.79 |
| 1986 | 2.92 | -18.20 | 0.44 | 0.91 | 8.60 |
| 1987 | 2.92 | -14.76 | 0.40 | 0.92 | 8.30 |
| 1988 | 2.92 | -2.61 | 0.34 | 0.93 | 7.93 |
| 1989 | 2.92 | -0.43 | 0.29 | 0.92 | 7.53 |
| 1990 | 2.92 | 2.99 | 0.26 | 0.90 | 7.17 |
| 1991 | 2.92 | 5.72 | 0.24 | 0.88 | 6.83 |
| 1992 | 2.92 | 12.95 | 0.23 | 0.90 | 6.51 |

| | | | | | |
|-------------|------|--------|------|------|------|
| 1993 | 2.92 | 9.32 | 0.23 | 0.93 | 6.25 |
| 1994 | 2.92 | 6.78 | 0.23 | 0.96 | 6.03 |
| 1995 | 2.92 | -1.74 | 0.25 | 0.96 | 5.93 |
| 1996 | 2.92 | -13.35 | 0.26 | 0.95 | 5.88 |
| 1997 | 2.92 | -9.79 | 0.26 | 0.95 | 5.82 |
| 1998 | 2.92 | -2.40 | 0.23 | 0.98 | 5.65 |
| 1999 | 2.92 | 1.38 | 0.22 | 1.03 | 5.46 |
| 2000 | 2.92 | 7.46 | 0.19 | 1.06 | 5.21 |
| 2001 | 2.92 | 10.58 | 0.19 | 1.09 | 5.02 |
| 2002 | 2.92 | 9.21 | 0.18 | 1.11 | 4.83 |
| 2003 | 2.92 | 8.55 | 0.18 | 1.12 | 4.65 |
| 2004 | 2.92 | 5.63 | 0.18 | 1.12 | 4.51 |
| 2005 | 2.92 | 7.82 | 0.18 | 1.12 | 4.39 |
| 2006 | 2.92 | 8.14 | 0.17 | 1.12 | 4.35 |
| 2007 | 2.92 | 5.38 | 0.18 | 1.12 | 4.28 |
| 2008 | 2.92 | -4.64 | 0.20 | 1.23 | 4.20 |
| 2009 | 2.92 | -3.41 | 0.19 | 1.23 | 4.16 |
| 2010 | 2.92 | -2.37 | 0.18 | 1.21 | 4.10 |
| 2011 | 2.92 | -0.97 | 0.17 | 1.16 | 4.02 |
| 2012 | 2.92 | 2.19 | 0.15 | 1.14 | 3.89 |
| 2013 | 2.92 | 5.39 | 0.14 | 1.21 | 3.74 |
| 2014 | 2.92 | 4.46 | 0.14 | 1.25 | 3.62 |
| 2015 | 2.92 | 6.97 | 0.13 | 1.28 | 3.47 |
| 2016 | 2.92 | 3.27 | 0.13 | 1.30 | 3.39 |
| 2017 | 2.92 | -1.37 | 0.14 | 1.27 | 3.37 |
| 2018 | 2.92 | -5.29 | 0.15 | 1.20 | 3.36 |
| 2019 | 2.92 | -4.23 | 0.14 | 1.12 | 3.33 |

Messiniense (Vlv)

| Fecha Año | Recarga | Almacena miento | Entradas desde Cabezo Gordo | Salidas hacia Cabezo Gordo | Entradas laterales |
|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| - | hm ³ /año | hm ³ /año | hm ³ /año | hm ³ /año | hm ³ /año |
| Estacionario | 2.56 | - | 0.44 | 2.52 | 0.20 |
| 1905 | 2.56 | - | - | - | - |
| 1910 | 2.56 | - | - | - | - |
| 1915 | 2.56 | - | - | - | - |

| | | | | | | |
|-------------|------|--------|------|------|------|--|
| 1920 | 2.56 | - | - | - | - | |
| 1925 | 2.56 | 0.00 | 0.35 | 0.55 | 0.00 | |
| 1926 | 2.56 | -0.01 | 0.35 | 0.55 | 0.00 | |
| 1927 | 2.56 | 0.00 | 0.35 | 0.55 | 0.00 | |
| 1928 | 2.56 | 0.00 | 0.35 | 0.55 | 0.00 | |
| 1929 | 2.56 | -0.01 | 0.35 | 0.55 | 0.00 | |
| 1930 | 2.56 | -0.12 | 0.35 | 0.55 | 0.00 | |
| 1931 | 2.56 | -0.17 | 0.35 | 0.55 | 0.00 | |
| 1932 | 2.56 | -0.07 | 0.35 | 0.56 | 0.00 | |
| 1933 | 2.56 | -0.12 | 0.35 | 0.56 | 0.00 | |
| 1934 | 2.56 | -1.27 | 0.35 | 0.56 | 0.00 | |
| 1935 | 2.56 | -1.83 | 0.35 | 0.56 | 0.00 | |
| 1936 | 2.56 | -2.40 | 0.36 | 0.57 | 0.00 | |
| 1937 | 2.56 | -3.24 | 0.37 | 0.57 | 0.00 | |
| 1938 | 2.56 | -4.08 | 0.39 | 0.60 | 0.00 | |
| 1939 | 2.56 | -4.95 | 0.42 | 0.62 | 0.00 | |
| 1940 | 2.56 | -6.16 | 0.46 | 0.64 | 0.00 | |
| 1941 | 2.56 | -7.08 | 0.50 | 0.68 | 0.00 | |
| 1942 | 2.56 | -8.40 | 0.54 | 0.71 | 0.00 | |
| 1943 | 2.56 | -9.43 | 0.58 | 0.74 | 0.00 | |
| 1944 | 2.56 | -10.92 | 0.63 | 0.77 | 0.00 | |
| 1945 | 2.56 | -12.43 | 0.68 | 0.82 | 0.00 | |
| 1946 | 2.56 | -13.57 | 0.73 | 0.86 | 0.00 | |
| 1947 | 2.56 | -15.34 | 0.79 | 0.90 | 0.00 | |
| 1948 | 2.56 | -17.21 | 0.86 | 0.94 | 0.00 | |
| 1949 | 2.56 | -18.30 | 0.94 | 0.99 | 0.00 | |
| 1950 | 2.56 | -19.06 | 1.02 | 1.04 | 0.00 | |
| 1951 | 2.56 | -20.14 | 1.09 | 1.08 | 0.00 | |
| 1952 | 2.56 | -21.45 | 1.16 | 1.12 | 0.00 | |
| 1953 | 2.56 | -22.81 | 1.24 | 1.16 | 0.01 | |
| 1954 | 2.56 | -24.78 | 1.31 | 1.20 | 0.01 | |
| 1955 | 2.56 | -26.43 | 1.38 | 1.24 | 0.01 | |
| 1956 | 2.56 | -28.22 | 1.43 | 1.36 | 0.01 | |
| 1957 | 2.56 | -30.06 | 1.49 | 1.39 | 0.01 | |
| 1958 | 2.56 | -31.30 | 1.29 | 1.41 | 0.01 | |
| 1959 | 2.56 | -33.23 | 1.34 | 1.44 | 0.01 | |
| 1960 | 2.56 | -32.63 | 1.35 | 1.46 | 0.01 | |
| 1961 | 2.56 | -33.41 | 1.34 | 1.51 | 0.01 | |
| 1962 | 2.56 | -34.90 | 1.32 | 1.50 | 0.01 | |
| 1963 | 2.56 | -37.07 | 1.28 | 1.49 | 0.01 | |

| | | | | | |
|-------------|-------|--------|------|------|------|
| 1964 | 2.56 | -38.07 | 1.27 | 1.47 | 0.01 |
| 1965 | 2.56 | -40.46 | 1.26 | 1.44 | 0.02 |
| 1966 | 2.56 | -42.47 | 1.24 | 1.39 | 0.02 |
| 1967 | 2.56 | -44.16 | 1.24 | 1.34 | 0.02 |
| 1968 | 2.56 | -46.22 | 1.24 | 1.30 | 0.02 |
| 1969 | 2.56 | -48.54 | 1.27 | 1.27 | 0.02 |
| 1970 | 2.56 | -51.37 | 1.31 | 1.27 | 0.02 |
| 1971 | 2.56 | -55.27 | 1.34 | 1.24 | 0.03 |
| 1972 | 2.56 | -59.77 | 1.38 | 1.18 | 0.03 |
| 1973 | 2.88 | -66.88 | 1.45 | 1.13 | 0.03 |
| 1974 | 2.97 | -80.34 | 1.60 | 1.10 | 0.05 |
| 1975 | 4.33 | -79.17 | 1.58 | 1.15 | 0.04 |
| 1976 | 4.58 | -82.51 | 1.75 | 1.15 | 0.06 |
| 1977 | 6.42 | -87.59 | 1.86 | 1.14 | 0.09 |
| 1978 | 7.79 | -89.11 | 2.01 | 1.13 | 0.12 |
| 1979 | 9.53 | -93.86 | 2.14 | 1.13 | 0.17 |
| 1980 | 12.25 | -79.02 | 2.10 | 1.27 | 0.13 |
| 1981 | 14.76 | -64.63 | 1.97 | 1.42 | 0.09 |
| 1982 | 17.81 | -51.11 | 1.94 | 1.47 | 0.09 |
| 1983 | 18.36 | -43.52 | 1.98 | 1.58 | 0.08 |
| 1984 | 22.54 | -36.54 | 2.02 | 1.73 | 0.08 |
| 1985 | 25.84 | -40.25 | 2.11 | 1.85 | 0.08 |
| 1986 | 28.76 | -42.63 | 2.22 | 1.89 | 0.16 |
| 1987 | 32.47 | -28.26 | 2.32 | 2.02 | 0.16 |
| 1988 | 29.55 | -23.00 | 2.38 | 2.06 | 0.17 |
| 1989 | 28.58 | -17.73 | 2.39 | 2.05 | 0.16 |
| 1990 | 25.29 | -14.09 | 2.30 | 1.89 | 0.15 |
| 1991 | 25.77 | -12.89 | 2.23 | 1.86 | 0.14 |
| 1992 | 18.69 | -16.13 | 2.14 | 1.69 | 0.14 |
| 1993 | 16.24 | -17.84 | 2.07 | 1.53 | 0.14 |
| 1994 | 15.88 | -18.79 | 2.05 | 1.40 | 0.14 |
| 1995 | 16.04 | -19.60 | 2.10 | 1.30 | 0.13 |
| 1996 | 17.96 | -17.99 | 2.08 | 1.29 | 0.12 |
| 1997 | 14.51 | -19.07 | 2.09 | 1.26 | 0.14 |
| 1998 | 13.94 | -25.31 | 2.13 | 1.25 | 0.17 |
| 1999 | 12.28 | -13.92 | 2.16 | 1.21 | 0.19 |
| 2000 | 11.61 | -8.29 | 2.15 | 1.05 | 0.19 |
| 2001 | 11.75 | -8.79 | 1.95 | 0.99 | 0.19 |
| 2002 | 11.21 | -8.32 | 1.87 | 0.86 | 0.21 |
| 2003 | 12.34 | -7.12 | 1.77 | 0.80 | 0.19 |

| | | | | | |
|-------------|-------|--------|------|------|------|
| 2004 | 12.22 | -6.65 | 1.73 | 0.75 | 0.18 |
| 2005 | 12.60 | -4.95 | 1.74 | 0.75 | 0.18 |
| 2006 | 12.60 | -6.62 | 1.75 | 0.74 | 0.18 |
| 2007 | 12.48 | 1.13 | 1.83 | 0.75 | 0.19 |
| 2008 | 25.24 | -34.51 | 1.70 | 1.13 | 0.25 |
| 2009 | 27.98 | -36.21 | 1.70 | 1.13 | 0.27 |
| 2010 | 29.80 | -26.03 | 1.67 | 1.09 | 0.28 |
| 2011 | 31.63 | -37.23 | 1.63 | 1.08 | 0.30 |
| 2012 | 29.62 | -9.68 | 1.54 | 0.91 | 0.29 |
| 2013 | 36.92 | -7.21 | 1.46 | 0.87 | 0.28 |
| 2014 | 35.46 | -4.66 | 1.50 | 0.85 | 0.28 |
| 2015 | 30.36 | -9.24 | 1.51 | 0.66 | 0.27 |
| 2016 | 30.35 | -8.69 | 1.62 | 0.81 | 0.28 |
| 2017 | 30.35 | -18.72 | 1.71 | 0.98 | 0.29 |
| 2018 | 29.44 | -29.06 | 1.77 | 1.07 | 0.30 |
| 2019 | 32.43 | -10.00 | 1.74 | 1.10 | 0.30 |

Tortoniense (ULTC)

| Fecha Año | Recarga | Almacenamiento | Entradas desde Cabezo Gordo | Salidas hacia Cabezo Gordo |
|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| - | hm ³ /año | hm ³ /año | hm ³ /año | hm ³ /año |
| Estacionario | 1.16 | 0.00 | 0.150 | 0.750 |
| 1905 | 1.16 | - | - | - |
| 1910 | 1.16 | - | - | - |
| 1915 | 1.16 | - | - | - |
| 1920 | 1.16 | - | - | - |
| 1925 | 1.16 | 1.27 | 0.000 | 0.548 |
| 1926 | 1.16 | 0.75 | 0.013 | 0.413 |
| 1927 | 1.16 | 0.78 | 0.013 | 0.413 |
| 1928 | 1.16 | 0.81 | 0.013 | 0.413 |
| 1929 | 1.16 | 0.83 | 0.013 | 0.413 |
| 1930 | 1.16 | 0.85 | 0.013 | 0.413 |
| 1931 | 1.16 | 0.85 | 0.013 | 0.413 |
| 1932 | 1.16 | 0.77 | 0.013 | 0.413 |
| 1933 | 1.16 | 0.80 | 0.013 | 0.413 |
| 1934 | 1.16 | 0.77 | 0.013 | 0.413 |

| | | | | |
|-------------|------|-------|-------|-------|
| 1935 | 1.16 | 0.77 | 0.013 | 0.413 |
| 1936 | 1.16 | 0.76 | 0.013 | 0.413 |
| 1937 | 1.16 | 0.78 | 0.013 | 0.413 |
| 1938 | 1.16 | 0.80 | 0.013 | 0.414 |
| 1939 | 1.16 | 0.47 | 0.013 | 0.414 |
| 1940 | 1.16 | 0.49 | 0.013 | 0.415 |
| 1941 | 1.16 | 0.51 | 0.013 | 0.416 |
| 1942 | 1.16 | 0.51 | 0.013 | 0.418 |
| 1943 | 1.16 | 0.51 | 0.013 | 0.419 |
| 1944 | 1.16 | 0.51 | 0.013 | 0.420 |
| 1945 | 1.16 | 0.50 | 0.013 | 0.422 |
| 1946 | 1.16 | 0.50 | 0.013 | 0.424 |
| 1947 | 1.16 | 0.52 | 0.013 | 0.426 |
| 1948 | 1.16 | 0.53 | 0.013 | 0.427 |
| 1949 | 1.16 | 0.55 | 0.013 | 0.429 |
| 1950 | 1.16 | 0.56 | 0.013 | 0.431 |
| 1951 | 1.16 | 0.57 | 0.013 | 0.433 |
| 1952 | 1.16 | 0.59 | 0.013 | 0.435 |
| 1953 | 1.16 | -0.50 | 0.014 | 0.437 |
| 1954 | 1.16 | -1.22 | 0.014 | 0.439 |
| 1955 | 1.16 | -1.56 | 0.014 | 0.440 |
| 1956 | 1.16 | -3.81 | 0.014 | 0.442 |
| 1957 | 1.16 | -2.92 | 0.014 | 0.393 |
| 1958 | 1.16 | -3.16 | 0.014 | 0.323 |
| 1959 | 1.16 | -3.33 | 0.014 | 0.278 |
| 1960 | 1.16 | -3.70 | 0.014 | 0.247 |
| 1961 | 1.16 | -3.69 | 0.014 | 0.224 |
| 1962 | 1.16 | -3.72 | 0.014 | 0.207 |
| 1963 | 1.16 | -4.08 | 0.015 | 0.192 |
| 1964 | 1.16 | -4.50 | 0.015 | 0.181 |
| 1965 | 1.16 | -5.60 | 0.015 | 0.172 |
| 1966 | 1.16 | -6.03 | 0.015 | 0.164 |
| 1967 | 1.16 | -6.39 | 0.015 | 0.157 |
| 1968 | 1.16 | -6.80 | 0.015 | 0.152 |
| 1969 | 1.16 | -7.23 | 0.016 | 0.148 |
| 1970 | 1.16 | -7.45 | 0.016 | 0.144 |
| 1971 | 1.16 | -7.64 | 0.016 | 0.141 |
| 1972 | 1.16 | -8.11 | 0.016 | 0.139 |
| 1973 | 1.16 | -8.23 | 0.016 | 0.137 |
| 1974 | 1.16 | -8.37 | 0.016 | 0.135 |

| | | | | |
|-------------|------|-------|-------|-------|
| 1975 | 1.16 | -8.49 | 0.017 | 0.134 |
| 1976 | 1.16 | -8.22 | 0.017 | 0.133 |
| 1977 | 1.16 | -8.44 | 0.017 | 0.133 |
| 1978 | 1.16 | -8.20 | 0.017 | 0.133 |
| 1979 | 1.16 | -9.00 | 0.018 | 0.133 |
| 1980 | 1.16 | -9.65 | 0.018 | 0.133 |
| 1981 | 1.16 | -9.55 | 0.018 | 0.133 |
| 1982 | 1.16 | -8.35 | 0.019 | 0.133 |
| 1983 | 1.16 | -8.82 | 0.019 | 0.133 |
| 1984 | 1.16 | -6.05 | 0.019 | 0.133 |
| 1985 | 1.16 | -6.34 | 0.019 | 0.133 |
| 1986 | 1.16 | -5.51 | 0.019 | 0.133 |
| 1987 | 1.16 | -4.85 | 0.019 | 0.133 |
| 1988 | 1.16 | -5.98 | 0.019 | 0.133 |
| 1989 | 1.16 | -6.19 | 0.019 | 0.133 |
| 1990 | 1.16 | -5.83 | 0.019 | 0.133 |
| 1991 | 1.16 | -6.36 | 0.019 | 0.133 |
| 1992 | 1.16 | -5.74 | 0.019 | 0.133 |
| 1993 | 1.16 | -4.62 | 0.019 | 0.132 |
| 1994 | 1.16 | -4.35 | 0.019 | 0.132 |
| 1995 | 1.16 | -4.18 | 0.019 | 0.132 |
| 1996 | 1.16 | -3.65 | 0.019 | 0.132 |
| 1997 | 1.16 | -3.47 | 0.019 | 0.132 |
| 1998 | 1.16 | -3.04 | 0.019 | 0.132 |
| 1999 | 1.16 | -2.75 | 0.019 | 0.132 |
| 2000 | 1.16 | -3.20 | 0.019 | 0.132 |
| 2001 | 1.16 | -3.72 | 0.019 | 0.132 |
| 2002 | 1.16 | -3.64 | 0.019 | 0.132 |
| 2003 | 1.16 | -3.42 | 0.019 | 0.132 |
| 2004 | 1.16 | -3.16 | 0.019 | 0.132 |
| 2005 | 1.16 | -2.96 | 0.019 | 0.132 |
| 2006 | 1.16 | -3.12 | 0.019 | 0.132 |
| 2007 | 1.16 | -4.71 | 0.019 | 0.132 |
| 2008 | 1.16 | -3.54 | 0.019 | 0.132 |
| 2009 | 1.16 | -3.23 | 0.019 | 0.132 |
| 2010 | 1.16 | -2.97 | 0.019 | 0.132 |
| 2011 | 1.16 | -2.12 | 0.020 | 0.133 |
| 2012 | 1.16 | -1.86 | 0.020 | 0.133 |
| 2013 | 1.16 | -1.96 | 0.020 | 0.133 |
| 2014 | 1.16 | -1.31 | 0.020 | 0.133 |

| | | | | |
|-------------|------|-------|-------|-------|
| 2015 | 1.16 | -1.94 | 0.020 | 0.133 |
| 2016 | 1.16 | -2.31 | 0.020 | 0.133 |
| 2017 | 1.16 | -2.39 | 0.020 | 0.133 |
| 2018 | 1.16 | -2.06 | 0.020 | 0.133 |
| 2019 | 1.16 | 0.93 | 0.020 | 0.133 |

