



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

62059



DIPUTACIÓN
DE ALICANTE

**ANÁLISIS PREVIO DE LOS RESULTADOS DE LAS OPERACIONES DE
RECARGA ARTIFICIAL EN ORBA, JIJONA Y CUENCA DEL GORGOS**

**ACTUALIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO DEL
ACUÍFERO DE JIJONA MEDIANTE EL PROGRAMA PROCESSING
MODFLOW (PMWIN)
FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS DE RECARGA ARTIFICIAL
TOMO I:MEMORIA**

MADRID DICIEMBRE DE 1999



Secretaría de Estado de Aguas y Costas
Ministerio de Medio Ambiente



INFORME	Identificación: H.6.-005.99
	Fecha: 20-12-99
TÍTULO ACTUALIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO DEL ACUÍFERO DE JIJONA MEDIANTE EL PROGRAMA PROCESSING MODFLOW (PMWIN) FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS DE RECARGA ARTIFICIAL ACUÍFERO DE JIJONA (ALICANTE)	
PROYECTO ANÁLISIS PREVIO DE LOS RESULTADOS DE LAS OPERACIONES DE RECARGA ARTIFICIAL EN ORBA, JIJONA Y CUENCA DEL GORGOS.	
RESUMEN La importancia que presentan pequeños acuíferos situados en las zonas de serranía en la provincia de Alicante, como es el caso del acuífero de Jijona, para el desarrollo de las poblaciones que hacen uso de sus recursos tanto para abastecimiento como en agricultura, ha originado que durante las últimas décadas la Diputación de Alicante y el ITGE hallan desarrollado diferentes estudios y proyectos con el objeto de mejorar su conocimiento y optimizar sus posibilidades de gestión. El presente estudio se enmarca dentro de estos objetivos generales y partiendo del modelo matemático realizado por la Diputación de Alicante-ITGE en 1994 se ha * continua al dorso	
Revisión Nombre: Juan Antonio López Geta Unidad: Aguas Subterráneas y Geotecnia Fecha: 29-11-99	Autores: Jose Luis Armayor Cachero José Antonio de la Orden Gomez Responsable: José Manuel Murillo Díaz

procedido a actualizarlo mediante la utilización del programa Processing Modflow, de amplia difusión y contrastada eficiencia como herramienta que permite modelizar matemáticamente el flujo del agua en los medios porosos, así como simular diferentes alternativas y escenarios de evolución y gestión del acuífero.

Además, se ha analizado la posible utilización de excedentes procedentes del manantial de Nuches para efectuar una recarga artificial del acuífero de Jijona, si bien la falta de un registro de datos diarios no permite conocer, con la exactitud requerida, las posibles descargas excedentarias para simularlas sobre el modelo matemático actualizado. Por lo tanto, se recomienda la realización de un estudio detallado de las descargas del manantial de Nuches.

Este informe ha sido realizado dentro del Convenio de Asistencia Técnica establecido entre el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE) y la Excelentísima Diputación Provincial de Alicante (DPA), actuando como:

Director del estudio

D. José Manuel Murillo Díaz (ITGE)

D. Luis Rodríguez Hernández (DPA)

Autor del informe

D. José Luis Armayor Cachero (ITGE)

D. José Antonio de la Orden Gómez (ITGE)

ÍNDICE GENERAL

	Página.
0.- INTRODUCCIÓN	3
1.- ANTECEDENTES	4
2.- SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DE JIJONA.....	6
3.- MODELIZACIÓN MATEMÁTICA CON EL PROGRAMA PROCESSING MODFLOW (PMWIN)	8
3.1.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROGRAMA.....	8
3.2.- MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO	9
3.3.- CONSTRUCCIÓN DEL MODELO	13
3.3.1.- Discretización del acuífero	13
3.3.2.- Condiciones de borde	18
3.3.3.- Datos de recarga y de descarga	18
3.3.4.- Entradas de datos al modelo.....	20
3.4.- CALIBRACIÓN-VALIDACIÓN DEL MODELO	25
4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS DE RECARGA ARTIFICIAL	30
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	32

ANEXOS

Anexo 1.- Modelo matemático de flujo del acuífero de Jijona diseñado en 1994 con el programa de ordenador "MINIPROGRAMAS (III) Programas simples para modelado de acuíferos"(ITGE 1992). Simulación de alternativas de recarga artificial.

Anexo 2.- Datos utilizados en el modelo: datos de piezometría, bombeos y precipitaciones.

Anexo 3.- Disquete con el modelo en PMWIN y datos de salida.

0.- INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como objetivo realizar una actualización del modelo matemático de flujo del acuífero de Jijona (Alicante) realizado en 1994 mediante el programa de ordenador diseñado en el I.T.G.E en 1992, bajo el nombre de "MINIPROGRAMAS (III) Programas simples para modelado de acuíferos".

Para el cumplimiento de este objetivo se ha utilizado el programa PROCESSING MODFLOW (PMWIN) en entorno Windows y bajo licencia del ITGE, de amplia difusión y utilización para estudios del flujo de aguas subterráneas en medios porosos.

La necesidad de actualizar el modelo matemático de flujo del acuífero de Jijona se enmarca dentro la importante evolución que han seguido los desarrollos informáticos para ordenadores personales, especialmente durante los últimos años, hacia la utilización de programas de modelización matemática del flujo de acuíferos cada vez más sencillos de manejar, acompañados de procesadores de alta velocidad. Estos programas ofrecen preprocesadores y posprocesadores que facilitan, de una manera simplificada, tanto la entrada de datos como las salidas del modelo mediante el desarrollo de representaciones gráficas, compatibles con el entorno del sistema operativo Windows de uso universalizado.

Como resultado, se dispone de una herramienta informática aplicada a la modelización matemática del flujo de acuíferos que permitirá reproducir el comportamiento hidrogeológico (hidrodinámico) del acuífero de Jijona a lo largo del tiempo y podrá servir para la reproducción de distintos escenarios de simulación, bajo distintas hipótesis de afección exterior, permitiendo su utilización de cara a una planificación futura de la gestión del sistema acuífero.

1.- ANTECEDENTES

En el anterior informe donde se presentaba el modelo matemático de flujo del acuífero de Jijona (año 1994), encuadrado dentro del Convenio de Asistencia Técnica suscrito entre la Diputación de Alicante y el Instituto Tecnológico Geominero de España, se pretendía la modelización del acuífero de Jijona con el fin de disponer de una herramienta de trabajo útil con la que poder realizar una adecuada toma de decisiones ante situaciones diferentes que se pudieran presentar en la normal explotación del acuífero. Con ello se pretendía poder actuar sobre el acuífero de la manera más adecuada ante previsible problemas futuros, como podría ser la falta de recarga natural en el acuífero de Jijona.

Para la realización del modelo en estudio se utilizó un programa de ordenador "MINIPROGRAMAS (III) Programas simples para modelado de acuíferos.(ITGE.1992)" (Boletín Geológico y Minero. Vol. 103-6. Año 1.992 pp. 33-50).

Este programa estaba escrito en lenguaje Basic, y utilizaba para resolver la ecuación del flujo el método de diferencias finitas. Era un programa para un acuífero monocapa y anisótropo en la horizontal, con mallas poligonales de cualquier forma, que admitía recargas y extracciones variables en cada intervalo, cálculos de surgencias e infiltraciones, cotas mínimas de bombeo y dos procesos diferentes: cálculos de piezometrías o cálculos de residuales con piezometría predeterminada. También proporcionaba balances de masa para cada elemento y período y para el conjunto del modelo. Además, permitía simular comportamientos de acuíferos libres o confinados, pero no el de acuíferos que tengan una parte libre y otra confinada, como es el caso de Jijona. Para resolver este inconveniente, se simuló la recarga natural por lluvia como entradas de agua al sistema proveniente de una inyección de la misma en aquellas celdas que corresponden a la zona de recarga, haciendo hincapié en que no eran tales, sino que sólo se consideraban así por exigencias del programa.

Una vez calibrado el modelo, se pudieron realizar la simulación de una serie de alternativas de gestión del acuífero, fundamentadas en las necesidades existentes o previsible en un futuro. Las simulaciones realizadas se basaron en períodos de pluviometrías diversas, así como la recarga artificial del acuífero en varias hipótesis.

La descripción del programa utilizado, así como su fundamento matemático y los resultados de las simulaciones realizadas, se acompaña en el anexo 1.

2. SÍNTESIS HIDROGEOLOGICA DEL ACUIFERO DE JIJONA.

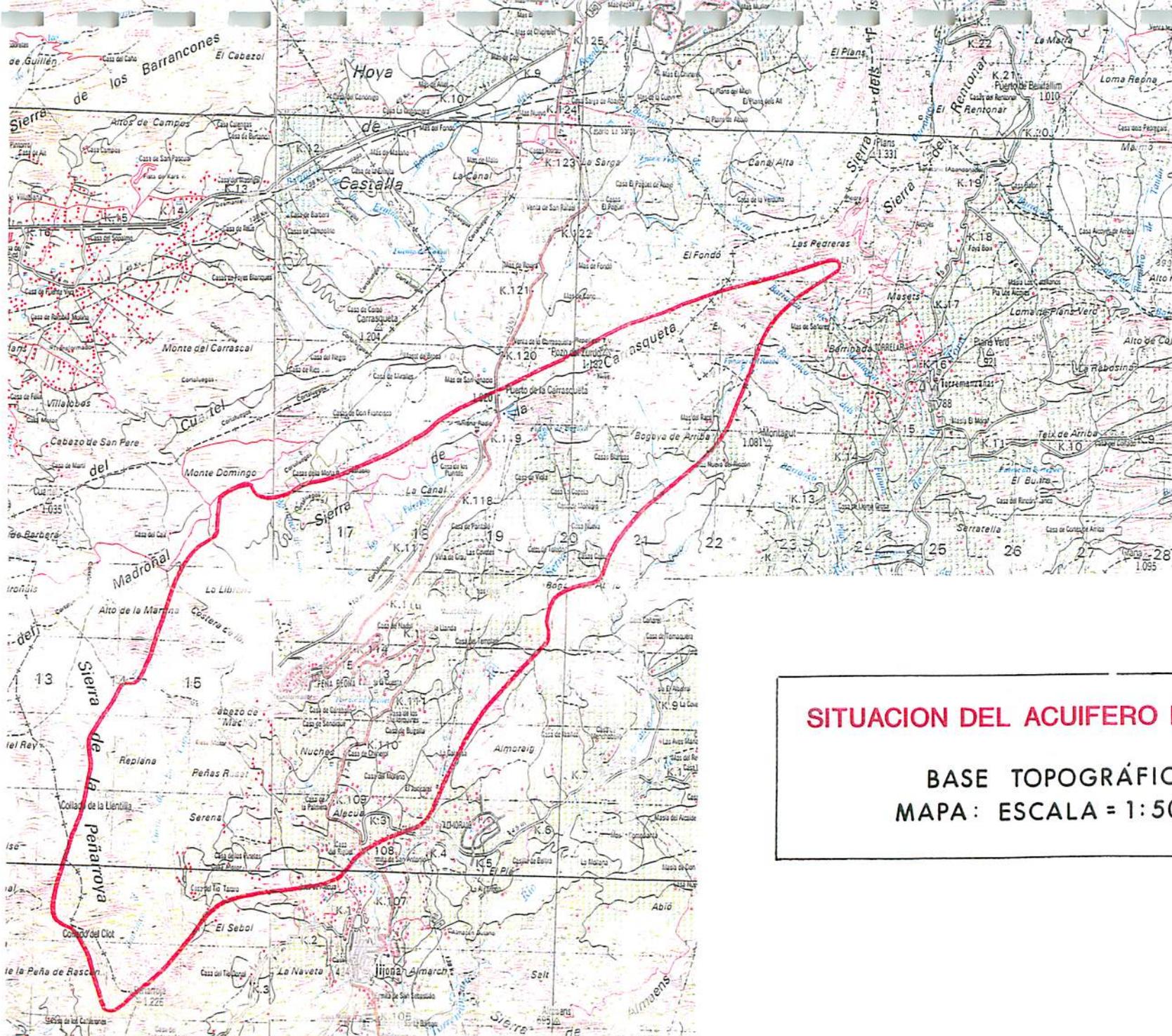
El acuífero de Jijona está situado en la Provincia de Alicante, en el Municipio de Jijona. Geológicamente, se encuadra dentro del Prebético de Alicante, conformando una unidad de características propias. La roca acuífera está formada por calizas del Mioceno inferior (Burdigaliense), actuando el Oligoceno como impermeable de base y la formación Tap 1 como impermeable de techo. En el sector vértice Peñarroja - manantial de Rosset las calcarenitas del Serravaliense están conectadas a las calizas, por lo que forman un tramo permeable único. La disposición del sistema comentado se refleja en el plano nº 1.

Los límites hidrogeológicos del sistema se pueden establecer, según el informe "Estudio hidrogeológico de las sierras de Plans, Carrasqueta y Madroñal para mejorar el abastecimiento público a Jijona (Alicante)", I.T.G.E., 1987, de la manera siguiente:

- Al este, entre el vértice Peñarroja y la zona norte del Cabezo de Machet, por el afloramiento del impermeable de base.
- Desde ahí hacia el noreste continúa el límite con estas características, pero no es observable en superficie por encontrarse recubierto por las calcarenitas del Serravaliense.
- Todo el límite meridional y suroriental esta condicionado por el cabalgamiento de la unidad Jijona-Torremanzanas, que pone lateralmente en contacto la roca acuífera con formaciones arcillosas del Mesozoico y terciario.

El acuífero así definido tiene una extensión de 35 km².

Las consideraciones sobre el funcionamiento hidrogeológico del sistema se hacen en el apartado siguiente del informe, por lo cual aquí sólo se comentará que la alimentación del acuífero procede de la infiltración de la lluvia sobre los afloramientos permeables, que constituyen el borde este del sistema, y que ocupan una superficie de unos 9,5 km². La descarga se produce de forma natural por el manantial de Rosset, y de forma artificial por los pozos de bombeo que abastecen de agua a la población de Jijona.



SITUACION DEL ACUIFERO DE JIJONA

BASE TOPOGRÁFICA

MAPA: ESCALA = 1:50.000

Plano N°1

3.- MODELIZACIÓN MATEMÁTICA CON EL PROGRAMA PROCESSING MODFLOW (PMWIN)

3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROGRAMA.

El paquete informático consta del conocido y ampliamente difundido modelo MODFLOW del U.S. Geological Survey, consistente en un modelo tridimensional de diferencias finitas para simular el flujo del agua subterránea en acuíferos heterogéneos y anisótropos. Además, lleva acoplados el PMPATH, un sencillo modelo de seguimiento de partículas en el medio saturado, dos programas para generar las matrices de datos de cualquier parámetro en todas las celdas del modelo a partir de los datos reales conocidos en unas cuantas celdas, llamados FIELD INTERPOLATOR y FIELD GENERATOR, un programa de estimación de parámetros, el denominado PEST (sirve para calibrar los parámetros del modelo), y el modelo de transporte de solutos MT3D.

La utilidad del PMWIN radica en el preprocesador que lleva incorporado, que facilita enormemente la introducción de los datos necesarios, así como su modificación. Permite identificar espacialmente las zonas que presentan igual valor de un determinado parámetro asignándole colores diferentes a los distintos valores, lo cual es muy útil a la hora de trabajar con la distribución espacial de parámetros como la transmisividad o el coeficiente de almacenamiento. La capacidad del modelo alcanza las 80 capas, con 2000x2000 celdas en cada capa, y 1000 periodos de simulación.

Las aplicaciones del código MODFLOW a la descripción y predicción del comportamiento del agua subterránea son muy importantes al poder simular los efectos de bombeos o recarga artificial por pozos, la relación río-acuífero, drenes, bordes con nivel fijo, recarga natural y evapotranspiración.

3.2. MODELO CONCEPTUAL DEL ACUIFERO.

El modelo conceptual es el primer y fundamental paso para la correcta elaboración de un modelo matemático. Consiste en el estudio cualitativo del funcionamiento hidrogeológico del sistema.

Un aspecto muy importante en la elaboración del modelo conceptual es el conocimiento geológico del acuífero, así como sus características físicas, que permitan delimitar su extensión y profundidad. También es necesario conocer, al menos en un orden de magnitud, los parámetros hidrogeológicos que gobiernan el comportamiento del sistema. Además, se han de definir con la mayor exactitud posible, las entradas y salidas que tenga, y el establecimiento de un balance real de agua en el mismo.

El esquema de funcionamiento del sistema se conoce bastante bien, debido a informes previos, como el "Estudio hidrogeológico de las Sierras del Madroñal, Carrasqueta y Plans para mejorar el abastecimiento público a Jijona (Alicante)" realizado por el I.T.G.E. en 1989 y el ensayo de bombeo realizado en marzo de 1.994.

De las conclusiones de estos estudios se pueden extraer las siguientes premisas sobre el funcionamiento del acuífero:

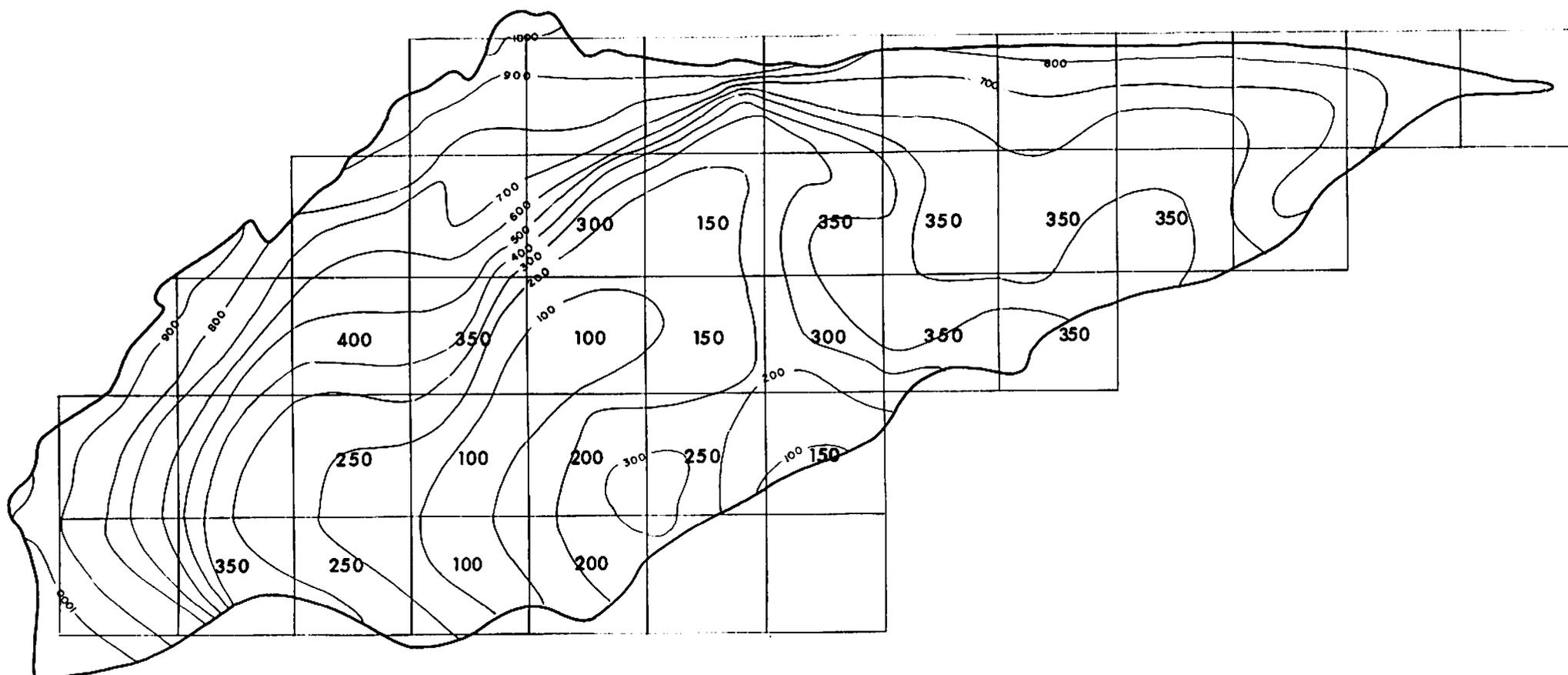
1. Se trata de un acuífero confinado, con una pequeña extensión de comportamiento libre que actúa como zona de recarga. Se considera, fundamentándose en los estudios ya existentes, que el sistema funciona sin recargas o descargas laterales provenientes o dirigidas hacia otras unidades hidrogeológicas.
2. La recarga natural del sistema se produce por agua de lluvia, que se infiltra a lo largo de los afloramientos permeables del sistema, que ocupan una extensión de 9,5 km² en la Sierra de la Peñarroya.
3. El acuífero, en la parte que contiene agua, tiene un comportamiento confinado comprobado, mientras que la zona de afloramientos permeables actúa solamente como zona de transición del agua, no de almacenamiento.

4. El espesor medio del acuífero está en torno a los 50 metros, y las cotas isohipsas de muro y techo del mismo, según el estudio hidrogeológico citado anteriormente, son las reflejadas en los planos números 2 y 3.

5. Actualmente las únicas salidas del sistema son por bombeos, a través de los pozos de Pineta y Sereñat, y, eventualmente, Rosset, utilizados para el abastecimiento público de agua a Jijona y urbanizaciones cercanas.

6. Antiguamente existía una fuente que drenaba naturalmente el acuífero, la fuente de Rosset. Esta surgencia lleva años seca, y sólo se dispone de un dato histórico de su caudal. Por tanto en la modelización se considerará como salida del sistema, conjuntamente con las extracciones por bombeos, en forma de dren.

7. Los parámetros hidrogeológicos del sistema se conocen gracias a un ensayo de bombeo y se considerarán válidos como valores iniciales, sin perjuicio de que a lo largo del proceso de modelización puedan calibrarse y, por tanto, cambien de valor, con objeto de conseguir el mejor ajuste posible.



PLANO Nº 2
MAPA DE COTAS DE MURO

3.3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Para la construcción del modelo se han tenido en consideración los aspectos definidos por el modelo matemático antecedente, intentando, siempre que el programa lo ha permitido, construir el actual modelo con las mismas características que presentaba el modelo matemático previo.

3.3.1. Discretización del acuífero.

La discretización consiste en dividir la superficie total del acuífero en celdas de pequeño tamaño en las cuales el programa va a resolver la ecuación de la continuidad.

Las celdas se deben diseñar rectangulares cuando el acuífero es más o menos uniforme y no tiene bordes complicados, pues ello favorece la tarea de cálculo.

Las intersecciones de las líneas rectas que definen las celdas se denominan nodos, y en el uso del método de diferencias finitas no son los puntos donde se resuelve la ecuación de continuidad, sino que ésta adopta un valor medio en cada celda. Este valor es válido en todos los puntos de la misma.

El tamaño de las celdas puede ser variable o constante, según interese. En el caso de existir una amplia información de una zona concreta de un acuífero y escasa en otras zonas, es interesante definir un tamaño de celda menor en las zonas donde mayor información existe. En el caso de acuíferos de poca extensión, y sin una gran cantidad de información, como es el caso del acuífero de Jijona, es más útil, porque se cometen menos errores, utilizar una celda cuadrada. Esto es lo que se ha hecho en este modelo.

Por último es necesario definir las dimensiones de cada celda. Para hacerlo, los criterios son parecidos a los expuestos anteriormente, teniendo en cuenta además el tamaño del acuífero. Cuanto más grande sea, si el tamaño de celda es pequeño, se obtendrá un número de celdas elevado, con la consiguiente complicación de cálculo y la probable obtención de información que en algunos casos puede ser redundante.

Si en el acuífero existen gradientes hidráulicos altos, el tamaño de celda en la zona en que esto ocurra deberá ser pequeño, porque los niveles variarán mucho espacialmente, y si la celda se toma grande no se obtendrá una serie de oscilaciones del nivel piezométrico lo suficientemente precisa.

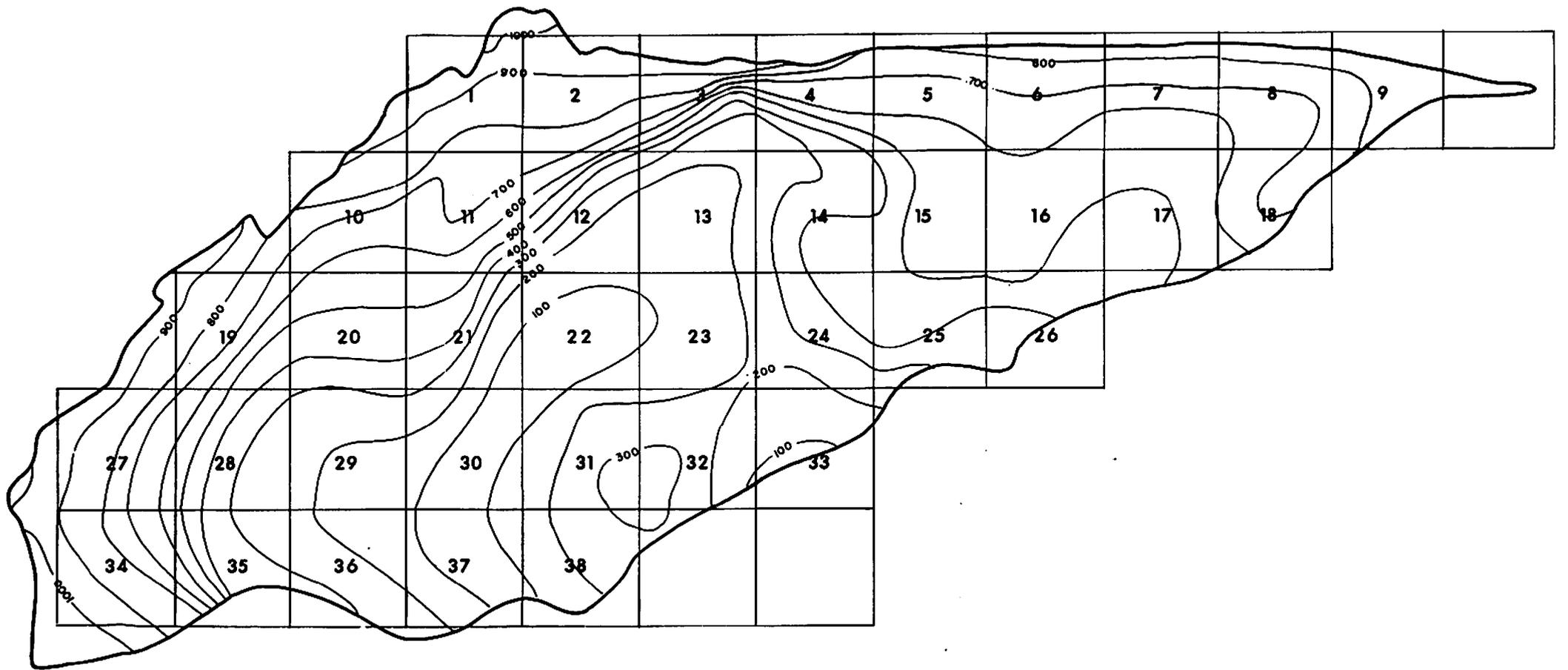
Por ello, en cada caso, debe hacerse la elección en función de las características concretas del sistema que se quiere modelizar.

En el caso que se estudia en este informe, se ha considerado que una celda de tamaño 1.000 m de lado es la idónea, tanto en función del tamaño del acuífero, de pequeña extensión, como de la cantidad de información disponible, que se centra en pocas celdas.

Con estas premisas, el acuífero de Jijona se ha discretizado en celdas cuadradas de tamaño 1.000 metros de lado y superficie por tanto 100 hm^2 . El total de celdas necesario es de 38, y su disposición espacial se refleja en el plano nº 4.

Esta discretización inicial había tenido un inconveniente a la hora de utilizar el programa de ordenador en el modelo antecedente. Aquel programa no admitía acuíferos que tengan una parte de su área libre y otra confinada, debe ser toda ella uniforme. Según puede comprobarse en el plano adjunto, el borde delimitado por las celdas 1, 10, 11, 19, 20, 27, 28 y 34 constituyen los afloramientos permeables del sistema, en los cuales éste tiene un comportamiento libre. Para solventar este inconveniente se recurrió a una simplificación del problema, que consistía en eliminar estas celdas del modelo y sustituir la recarga, debida a infiltración del agua de lluvia en ellas, por una entrada lateral de agua en las celdas de borde de la nueva discretización. Así, el programa aceptaba estas condiciones y podía realizarse sin problemas la modelización.

El programa PMWIN, si permite modelizar acuíferos con comportamiento en parte libre y en parte confinado (opción de tipo de capa nº3, confinada-no confinada, para un modelo de una sola capa). Para seguir el mismo criterio que en el modelo anterior, se han eliminado también estas capas incluyendo la totalidad de la recarga natural al sistema en las cinco celdas exteriores del límite oeste en la nueva discretización (se



PLANO N° 4
DISCRETIZACION INICIAL DEL ACUIFERO (N° ORDEN DE CADA CELDA)

especifica el número de celda más adelante).

Otra simplificación que se ha realizado sobre la discretización inicial siguiendo las mismas características del modelo anterior, ha sido la eliminación del modelo de las celdas nº 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, y 9. La razón de esta supresión es que la cota del muro de todas ellas siempre está por encima del nivel saturado, con lo cual siempre van a estar secas no introduciendo un elemento de error significativo al sistema.

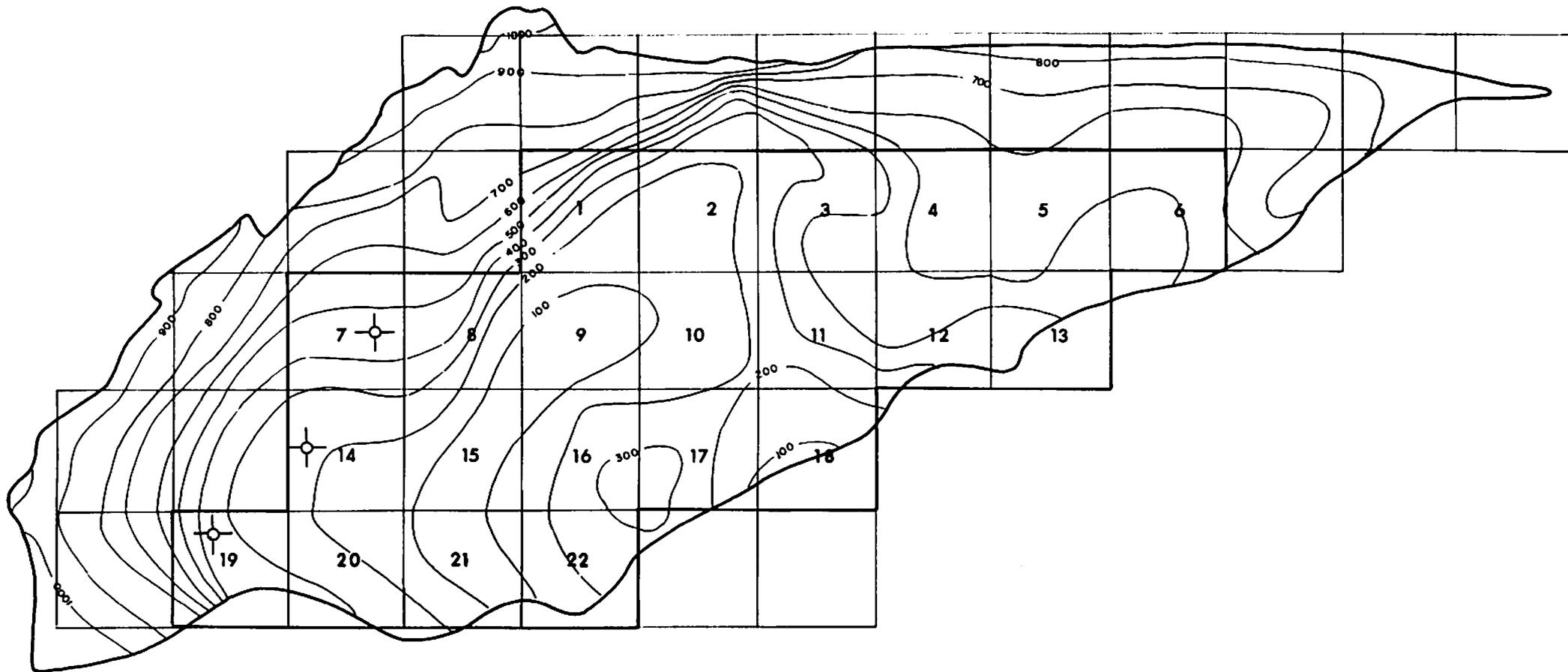
Una vez tenidas en cuenta estas condiciones de simplificación del sistema a modelizar, la discretización final que se ha introducido en el programa es la que se muestra en el plano nº 5 cuya numeración es la que se va a considerar a partir de ahora como definitiva.

A partir de las condiciones expuestas en el modelo conceptual del acuífero, las únicas acciones sobre el sistema serán:

- * CELDA 1. Recarga por lluvia.
- * CELDA 7. Recarga por lluvia y extracciones por bombeos (pozo Rosset).
- * CELDA 8. Recarga por lluvia.
- * CELDA 14. Recarga por lluvia y extracciones por bombeos (pozo Serefiat).
- * CELDA 19. Recarga por lluvia y extracciones por bombeos (pozo Pineta).

En el resto de las celdas no hay acciones externas sobre el sistema, y lo único que ocurrirá será la existencia de un flujo de agua entre ellas. Este flujo será consecuencia tanto de las entradas y salidas como de la existencia de gradientes dentro del propio acuífero condicionados por su topografía.

Para comenzar con el proceso de modelización es necesario establecer en cada celda unas condiciones iniciales de los parámetros que el programa va a calcular. Dichas condiciones se establecen celda a celda, y son objeto de estudio en el apartado 3.3.4 de este informe.



PLANO N° 5
N° DE CELDA EN LA DISCRETIZACION FINAL DEL ACUIFERO

3.3.2.- Condiciones de borde.

La existencia de una solución única para el sistema de ecuaciones que el programa plantea viene condicionada por la imposición de las condiciones de borde en las celdas exteriores del modelo. Si dichas condiciones no se establecen, el sistema de ecuaciones resultante tendrá más incógnitas que ecuaciones, y por tanto no tendrá una solución determinada, y habrá incógnitas que quedarán sin resolver. Las condiciones de borde más usuales que se establecen en este tipo de modelos son las siguientes:

- * **CONDICION DE BORDE IMPERMEABLE.** Implica que desde el exterior no hay flujo de agua hacia el interior ni viceversa. Es decir, que el acuífero es un sistema aislado lateralmente.

- * **CONDICION DE BORDE DE NIVEL CONSTANTE.** Implica que el nivel piezométrico en la celda considerada se mantiene siempre constante. Es el caso de bordes en contacto con mares o lagos, o ríos totalmente penetrantes.

En el caso del acuífero en estudio, las condiciones impuestas son las de borde impermeable en todas las celdas exteriores del modelo, resultantes del conocimiento del sistema en el cual no existe transferencia de flujo de agua con el exterior en ningún sentido. La forma de considerarlas por el programa es considerar inactivas las celdas envolventes.

3.3.3. Datos de recarga y descarga.

Los datos de recarga y descarga corresponden a las acciones exteriores sobre el sistema. Representan todas las entradas de agua al sistema, de cualquier procedencia, y todas las salidas del mismo, asimismo de cualquier tipo: salidas laterales hacia otros acuíferos, surgencias o bombeos.

Son los datos más importantes a la hora de modelizar. Si los datos existentes son escasos o poco fiables, los resultados del modelo acusarán esta circunstancia y no

serán más fiables que los propios datos. Las series de datos deben ser lo más amplias posible, con objeto de poder calibrar el modelo y posteriormente validarlo. Si son cortas y espaciadas, como ocurre en el caso del acuífero de Jijona, las posibilidades de maniobra al modelizar se restringen, y deben asumirse las restricciones y tenerlas en cuenta, tomando con ciertas reservas los resultados del modelo. En definitiva se aumentan las incertidumbres del sistema.

En el acuífero de Jijona las únicas acciones externas que se ejercen sobre el sistema son la recarga por lluvia y las extracciones por bombeos.

Los datos disponibles de lluvias son muy completos, ya que existen datos diarios durante el período 1962-1976 de la estación pluviométrica de Jijona y 1976-1993 de la estación pluviométrica de Tibi, que son extrapolables a los de Jijona utilizando un coeficiente corrector denominado peso. Este es el factor por el que hay que multiplicar la precipitación de la estación de Tibi para obtener la representativa de la estación de Jijona. Se calcula a partir de los datos de precipitación coincidentes en día en ambas estaciones. Los datos correspondientes se suman por separado para cada estación, y después se hace el cociente entre ambas sumas y se obtiene así el peso. En este caso, el factor es 1,18. Es decir, la precipitación de Tibi se multiplica por 1,18 y se obtiene un valor representativo de la precipitación en Jijona.

Los datos disponibles de las extracciones de agua en los pozos que bombean actualmente o han bombeado alguna vez del acuífero han sido facilitados por la Diputación de Alicante. Existen datos del período 1986-1993 de extracciones totales mensuales.

Los datos disponibles tanto de precipitaciones como de extracciones se encuentran en el anexo 2.

En los datos de dicho cuadro se observa que durante el período 1986-1990 los datos de extracciones correspondientes a los pozos de Pineta y Serefiat se dan en conjunto, sin especificar qué cantidad corresponde a cada pozo, y con la especificación de "volúmenes mensuales aproximados". Como quiera que el modelo necesita este dato por separado, para introducirlo en la celda correspondiente a cada pozo de bombeo,

para estos períodos de tiempo en que los datos no son concretos, se ha supuesto que el pozo de Serefiat bombea un 60% del total y el de Pineta un 40%. Así se ha obviado el problema que supone no disponer de datos de cada pozo por separado, sin cometer un error excesivamente importante, frente al que se puede haber cometido al hablar de "volúmenes aproximados".

Se pone de manifiesto con este inconveniente la necesidad de disponer de una serie de datos lo más completa y fiable posible para obtener un resultado satisfactorio en el proceso de modelización.

3.3.4. Entradas de datos al modelo.

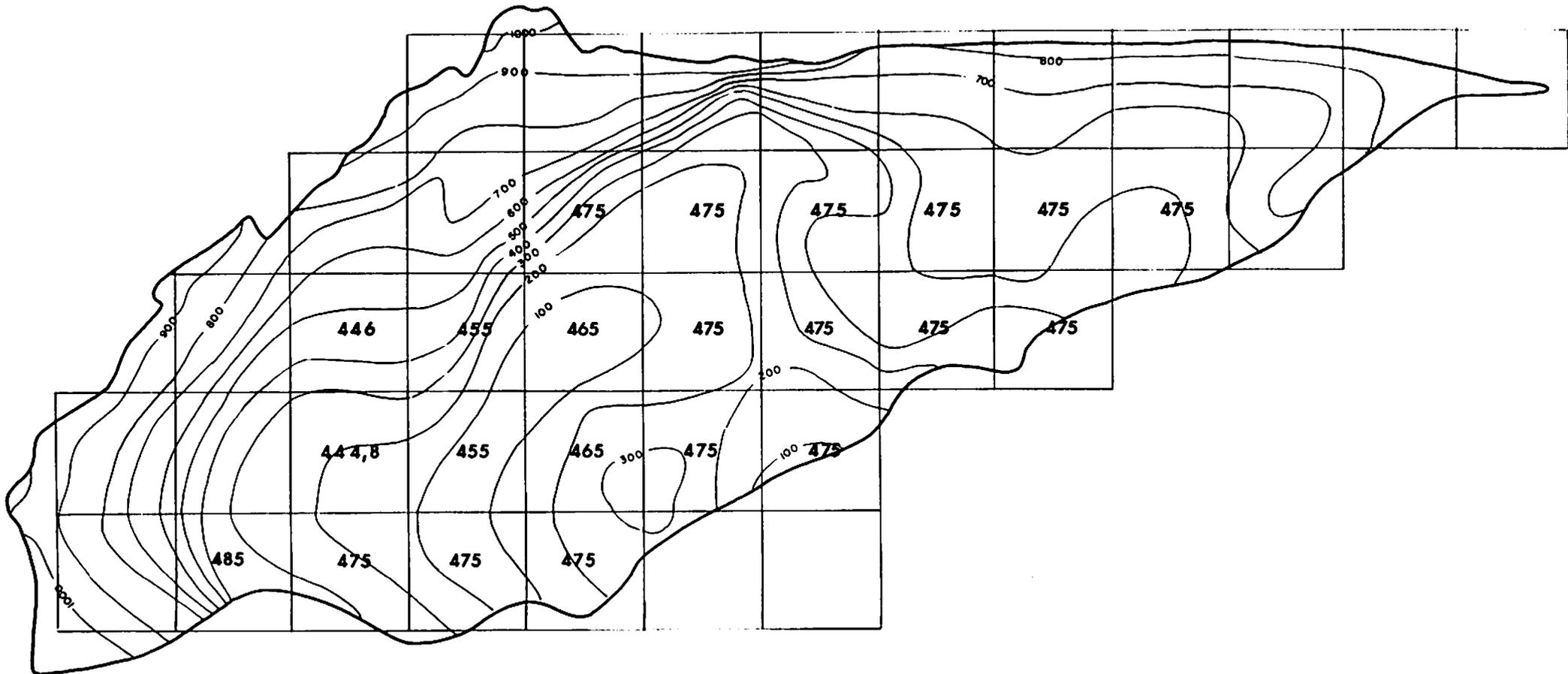
En primer lugar se han de definir las condiciones iniciales del modelo, que son los valores que toman todos los parámetros que intervienen en el mismo al comienzo de cada simulación. Estos valores deben ser introducidos por el modelista basándose en el conocimiento del sistema. Una vez introducidos estos datos en el modelo, el programa irá resolviendo el sistema de ecuaciones correspondiente mediante un método iterativo, en el cual el valor de las variables al comienzo de un período de simulación determinado es el valor final del período anterior.

Los parámetros que intervienen en el programa PMWIN que se ha utilizado para modelizar el acuífero de Jijona son los siguientes (siguiendo el orden de entrada marcado por el menú que aparece en pantalla):

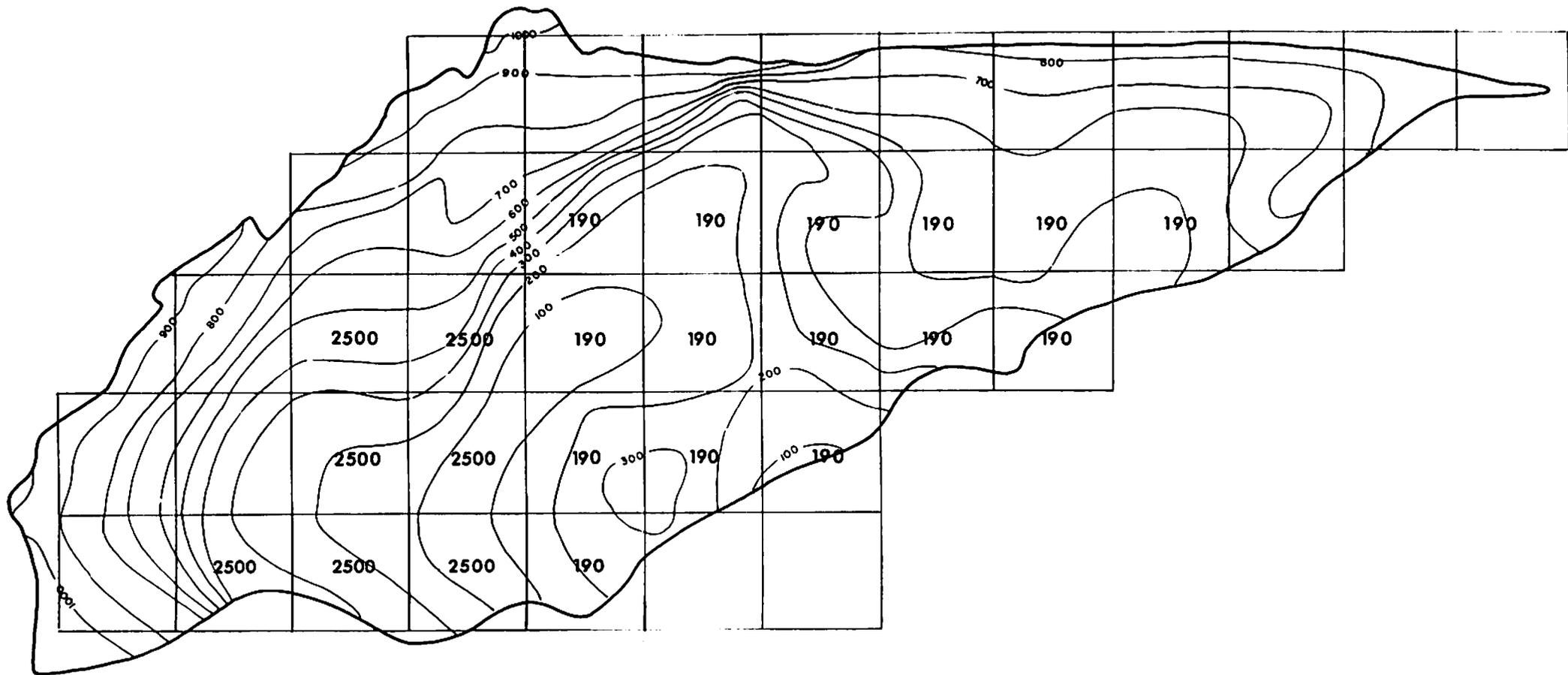
- **GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO.** Se han discretizado un total de 38 celdas (5 columnas y 13 filas) cuadradas de 1000 metros de lado.
- **TIPO DE CAPA.** Se ha elegido un modelo monocapa con tipo de capa nº3, confinada-noconfinada, que permite reproducir un comportamiento libre como confinado. Se han especificado los valores de transmisividad y del coeficiente de almacenamiento.
- **CONDICIONES DE BORDE.** Como se comentó anteriormente, las celdas activas (con flujo de agua) se han reducido a 22 (adquieren el valor 1), considerando la resto de las envolventes como inactivas (valor 0).
- **COTAS DE MURO Y TECHO.** Se han introducido en el modelo los valores de cotas

de techo del plano n°2, mientras que para el muro se ha optado por introducir el valor 100 para todas las celdas con el fin de permitir la conexión hidráulica entre las celdas debido a sus dimensiones (este es un factor que introduce incertidumbre en el modelo al alejarse de las condiciones físicas contempladas por los mapas de isohipsas para el acuífero de Jijona).

- **PARÁMETROS RELACIONADOS CON EL TIEMPO.** Es el número de intervalos de tiempo en los cuales el modelo va a calcular los niveles. Es un número variable, que depende de las acciones exteriores al sistema (extracciones por bombes) modelizados. En este caso, cada período coincide en duración con un mes (30 días), sin subperiodos, siendo el total de periodos de 90, que van desde abril de 1986 hasta septiembre de 1993. Por otra parte, los datos suministrados al modelo no permiten reproducir el modelo en régimen natural sin afecciones exteriores (régimen estacionario), por lo que se ha optado por modelizar desde un principio en régimen transitorio.
- **PIEZOMETRÍA INICIAL.** Como se ha comentado en el párrafo anterior, la modelización se ha realizado en régimen transitorio partiendo de una piezometría inicial correspondiente a la del mes de abril de 1986 registrada en el pozo de Serefiat, la cual ha valido para, mediante interpolación teniendo en consideración la geometría del sistema, obtener una distribución piezométrica para toda la zona que aparece reflejada en el plano 6 (elaborada para el modelo precedente).
- **PERMEABILIDAD HORIZONTAL.** Se ha tomado el valor de 0.20 m/s para todo el acuífero.
- **TRANSMISIVIDAD.** La transmisividad se ha obtenido a partir del plano n°7, mapa de transmisividades de celda para el modelo calibrado precedente. El valor de transmisividad está relacionado con la obtenida en un ensayo de bombeo realizado en el acuífero cuyo valor era de 190 m²/día. Durante la calibración del modelo anterior se detecto una mejor bondad en la calibración si en las celdas próximas a los puntos de extracción se elevaba el valor de la transmisividad a 2500 m²/día, criterio que también se ha utilizado para el desarrollo del presente modelo.
- **COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO.** Se ha tomado como valor inicial el de 0,0008, valor obtenido en el ensayo de bombeo realizado en marzo de 1994 .
- **POROSIDAD EFICAZ.** Se ha fijado en 0.25 %.
- **POZOS.** Se han introducido los dos pozos, Serefiat y Pineta, que han sido



PLANO N° 6
MAPA DE PIEZOMETRIA INICIAL



PLANO N° 7

MAPA DE TRASMISIVIDADES DE CELDA PARA EL MODELO CALIBRADO

utilizados constantemente a partir de mayo 1986 hasta septiembre de 1999. Los datos de las extracciones introducidos en el modelo aparecen en el anexo 2. El pozo de Rosset no se ha tenido en consideración por los bajos valores de extracción, conjuntamente con su rápido abandono.

- **DRENES.** El manantial de Rosset se ha simulado como un dren de cota 600 m y conductancia hidráulica de 100000 m²/día. La cota del manantial ha supuesto la introducción de una nueva incertidumbre al aparecer reflejadas en distintos trabajos consultados y fichas de inventario, cotas del manantial que van desde los 720 m s.n.m. a 590 m s.n.m.
- **RECARGA NATURAL.** Esta cantidad debe ser la parte de la precipitación total que llega a almacenarse en el acuífero. La dificultad de utilizar una relación matemática entre la variable precipitación y la variable infiltración, ha obligado en este modelo a realizar una calibración también de la infiltración como porcentaje del total de lluvia. Esta cantidad debe ser la parte de la precipitación total que llega a almacenarse en el acuífero. Para el modelo precedente se le aplicó una infiltración de un 24% del total de la precipitación. La recarga se ha repartido entre las cinco celdas 1, 7, 8, 14 y 19 (mapa nº2). Los datos de la precipitación se muestran en el anexo 2.
- **NUMERO MAXIMO DE ITERACIONES.** Es un valor de acotación superior del número de iteraciones que el programa debe hacer para encontrar una solución con error aceptable. Se debe acotar porque, en el caso de existir problemas de convergencia, el programa podría alargar indefinidamente el cálculo sin obtener ningún resultado. Se ha tomado un total de 200 iteraciones mediante el sistema de cálculo SIP.
- **PUNTOS DE OBSERVACIÓN.** Se han contemplado como puntos de observación los pozos de Sereñat y Pineta, introduciendo los datos de niveles piezométricos para el periodo modelizado. La correspondencia de estos puntos de observación con zonas de bombeo, susceptibles de estar interferidos por niveles dinámicos, origina una importante incertidumbre sobre los datos de observación suministrados al modelo.

3.4. CALIBRACION- VALIDACIÓN DEL MODELO.

El proceso de calibración del modelo consiste en obtener del mismo unos resultados lo más aproximados a los datos reales del sistema en un período lo más amplio posible. De esta forma, se facilita poder contrastar los resultados con los datos reales y tener una seguridad suficiente de su bondad. Esto se consigue haciendo variar los parámetros hidrogeológicos del sistema, es decir, la transmisividad, la permeabilidad, y el coeficiente de almacenamiento (especialmente en este modelo calibrado en régimen transitorio), coeficiente de infiltración, etc. Al realizar sucesivas pasadas del modelo con parámetros distintos, se obtendrán resultados diferentes, que irán cotejándose con los datos reales existentes y comprobando si se ajustan o no. Cuando se ha conseguido un grado de ajuste que se pueda considerar suficiente, habrá terminado el proceso de calibración.

Como la modelización es un proceso matemático que pretende reflejar la realidad, muchas veces es prácticamente imposible que del modelo se obtengan exactamente los mismos valores reales. En muchos casos se considera que el modelo está ajustado cuando reproduce con suficiente aproximación las tendencias que toman los valores reales a lo largo del tiempo ante las acciones exteriores sobre el sistema.

Una vez que se ha calibrado el modelo, si existen datos suficientes de otro período de tiempo distinto al de calibración, se realiza la validación del mismo. Este proceso consiste en hacer una pasada del modelo con los parámetros que se han obtenido en la calibración, y que ya no deben cambiarse nunca. Si los resultados que de dicha pasada se obtienen se consideran ajustados suficientemente a los reales, se podrá decir que el modelo está validado y listo para simular distintas alternativas, que ya no tienen porqué estar relacionadas con la realidad, sino que pueden ser supuestos de gestión del acuífero ante determinadas situaciones. En este caso, ante la ausencia de datos, no se ha podido realizar la validación como proceso independiente de la calibración, considerándose ésta última como una calibración-validación.

La calibración debe hacerse en régimen permanente o natural, sin influencia de las acciones externas sobre el sistema. En este caso no se ha podido realizar de esta manera porque los datos existentes de los niveles en el acuífero están relacionados con

los bombeos realizados en el mismo, no existiendo datos de niveles antes de comenzar la explotación. Por tanto, no se dispone de los datos del acuífero funcionando en régimen natural. Por ello se realiza la calibración en régimen transitorio, aceptando los resultados con la salvedad indicada.

Si el proceso de calibración-validación es satisfactorio, se puede tener una alta seguridad de que los resultados que se obtengan en las simulaciones de cualquier hipótesis de gestión del sistema serán fiables.

La calibración se ha extendido a un período largo, que abarca más de 7 años, en concreto 90 meses, con datos relativamente fiables, con objeto de comprobar la bondad de los parámetros así calibrados. El período va desde abril 1986 (período de simulación nº 1) hasta octubre de 1993 (período de simulación nº 90), en el que se dispone de mejores datos de niveles piezométricos (más escasos) y bombeos. Para el ajuste de los valores de los niveles simulados por el modelo con los reales, hay que tener en cuenta que el hecho de que los puntos de observación no sean piezómetros en sentido estricto, sino pozos de bombeo, que están funcionando alternativamente en el tiempo, produce unas medidas en algunos casos no válidas para el ajuste. Dichas medidas corresponden a los niveles medidos cuando el/los pozos están en funcionamiento, ya que estos niveles son dinámicos, y están influenciados por los bombeos, con lo cual no sirven para ajustar el modelo. Esta es la razón por la cual todos los valores de niveles dinámicos se han desechado, y no aparecen en el proceso de calibración, ni en los gráficos correspondientes.

Los parámetros fundamentales utilizados en la calibración han sido el coeficiente de almacenamiento y el porcentaje de recarga natural del acuífero que constituye la recarga neta del acuífero (porcentaje infiltrado de la precipitación mensual). De las sucesivas pasadas realizadas a la modelización, se ha obtenido los siguientes valores para los parámetros de calibración con mejor ajuste:

- **Coefficiente de almacenamiento: 0.0012**
- **Porcentaje de la precipitación mensual que se infiltra: 35%**

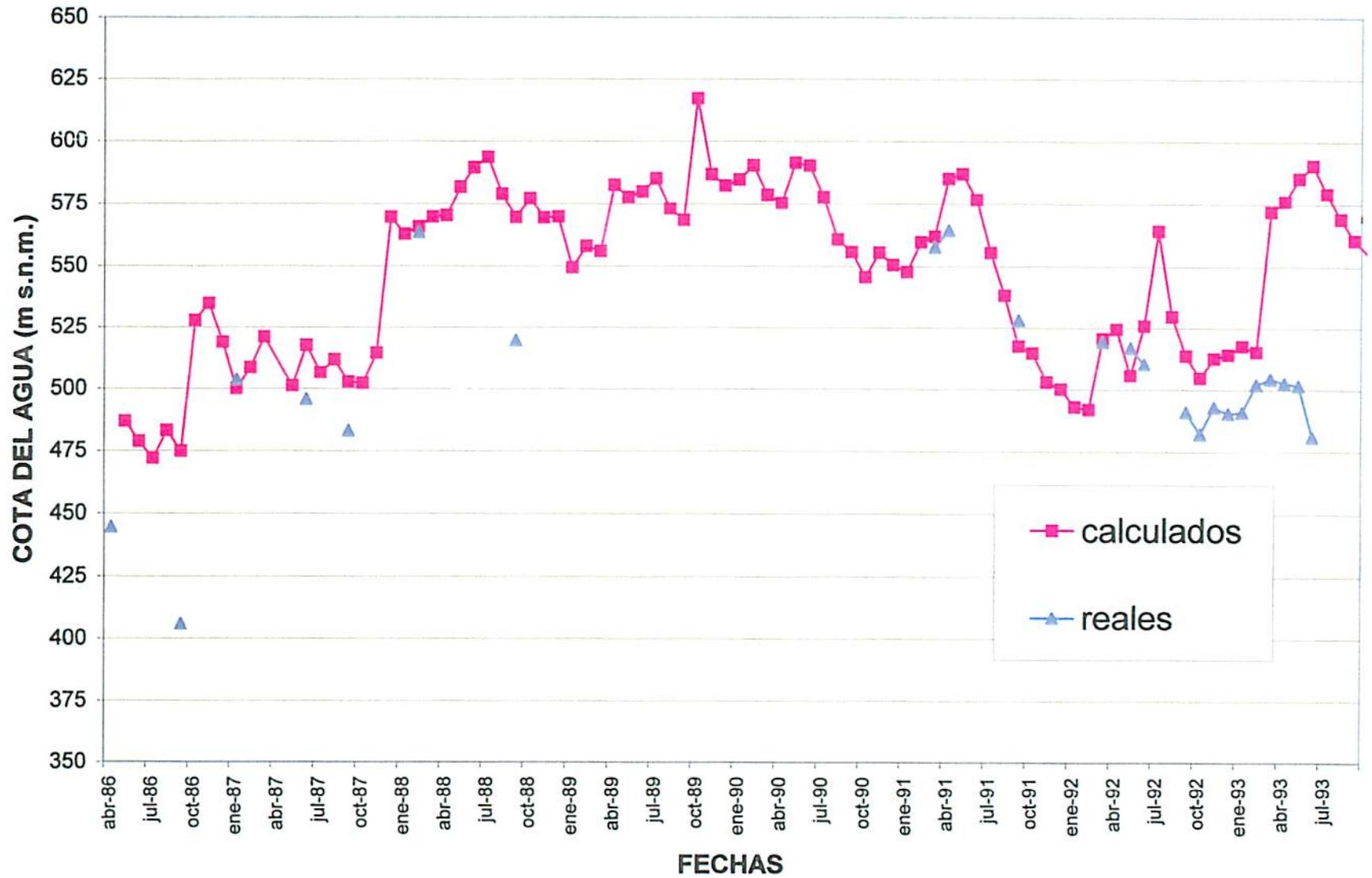
El resultado conseguido en este proceso de calibración-validación se ha considerado

aceptable porque el modelo ha reproducido con suficiente aproximación la tendencia que sigue la evolución de los niveles piezométricos con el tiempo. Hay que señalar que el modelo calibrado debe reproducir bien las tendencias de los valores del nivel piezométrico, y no los valores puntuales, puesto que éstos son prácticamente imposibles de obtener en un proceso tan complejo y en el que intervienen tantas variables, muchas de ellas no conocidas con exactitud.

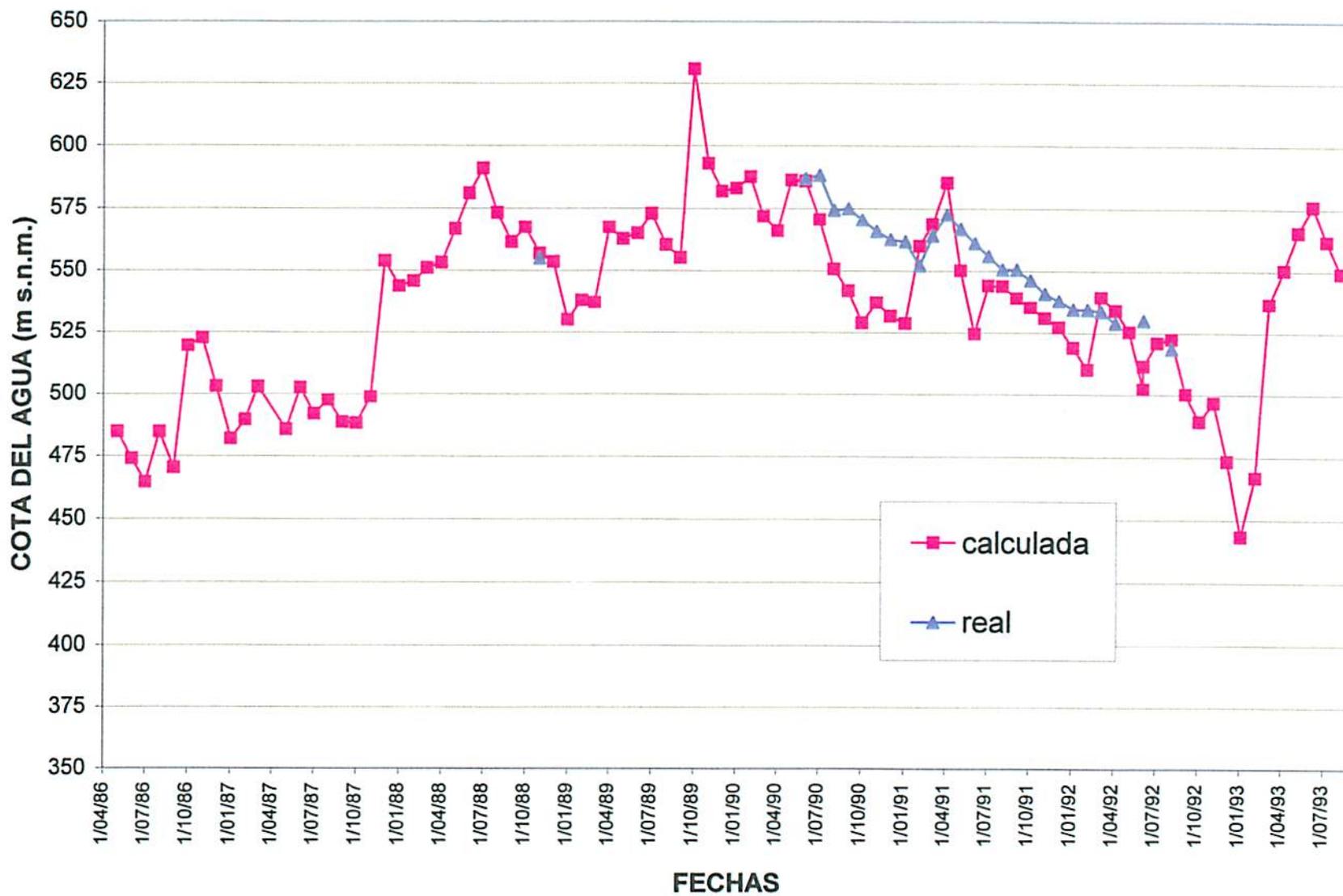
Con los datos proporcionados por el modelo (anexo 3), se han elaborado los gráficos nº 1 y 2 en los cuales se ha representado la evolución piezométrica real y simulada en las celdas, nº 14 (pozo de Sereñat) y nº 19 (pozo de Pineta). En estos gráficos se puede comprobar que la tendencia de los valores simulados coincide con bastante aproximación con la de los reales, especialmente en el pozo de Pineta, con lo cual se puede decir que el modelo está calibrado con los parámetros ya comentados. Nótese que, en los datos reales, hay intervalos en los que parece que el ajuste no es bueno, especialmente en el pozo de Sereñat. La razón de que esto ocurra es la ausencia de datos fiables (incertidumbre de los datos) de niveles reales en los períodos comentados, bien porque éstos no se hayan tomado, o porque correspondan a instantes en los cuales los pozos están funcionando, con lo cual son niveles dinámicos, que no se pueden utilizar en la modelización.

Una separación apreciable de niveles (menor nivel en los datos reales que en los modelizados), a pesar de manifestar la misma tendencia, ocurre para el pozo de Sereñat, en los primeros tramos y los últimos de la modelización efectuada (Abril de 1986-enero de 1987 y octubre de 1992 a octubre de 1993). Las causas de esa separación o bien están relacionadas con extracciones no registradas, o bien con la disminución de la recarga natural, o nuevamente (más probablemente), con la gran incertidumbre que acompaña tanto a los datos recogidos de las extracciones (en los primeros años son estimadas) y/o los datos de nivel del agua recogidos en los pozos que pueden haber sufrido interferencias de niveles dinámicos.

CALIBRACIÓN-POZO DE SEREÑAT



CALIBRACIÓN- POZO DE PINETA



4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS DE RECARGA ARTIFICIAL

Históricamente, el acuífero de Jijona ha sufrido distintos episodios con problemas de sobreexplotación. Este hecho planteó distintos tipos de soluciones, entre las que principalmente se ha impuesto la recarga artificial.

Actualmente se han realizado dos actuaciones basadas en la utilización de los recursos procedentes del manantial de Nuches, asociado al acuífero de la Carrasqueta, y en la utilización de las aguas de escorrentía superficial concentradas en la cabecera de la cuenca del río Coscón.

En el primer caso se utilizó el agua del manantial transportada por una conducción de caudal máximo de 40 l/s mediante una derivación a un pozo específico de recarga artificial. El rendimiento que presenta esta instalación es muy limitado, en primer lugar por que solo son utilizables los caudales para riego hasta un máximo de 40 l/s, hecho que ocurre pocas veces al año, y por que la mayor parte del caudal recogido va a parar directamente al abastecimiento a Jijona.

En el segundo caso, la actuación de recarga artificial ha consistido en la construcción de un dique aprovechando una cerrada del río Coscón en el área denominada Cabezo de Machet. Concretamente en esta zona el río entra en contacto directo con el acuífero, especialmente a través de estructuras fisuradas del terreno, por lo que el agua embalsada pasa por infiltración directa al acuífero. La efectividad de esta instalación está muy condicionada por la irregularidad de las precipitaciones, concentradas en unos pocos días y con aporte de un gran caudal, por lo que la instalación actual recogería una cantidad modesta de agua para embalsar, calculada en el entorno de los 15000m³ de media anual.

Tanto para la recarga artificial mediante excedentes procedentes del manantial de Nuches como para el dique del río Coscón se realizaron, utilizando el modelo matemático de Jijona (año 1994), distintas simulaciones de la recarga artificial observándose una leve mejoría en los niveles del acuífero respecto a los calculados sin recarga (anexo 1). Estos resultados se deben tomar con ciertas reservas debido a que las simulaciones siempre se han efectuado en condiciones óptimas.

La falta de datos precisos y regulares que definan exactamente la cuantía de los recursos hídricos disponibles, motivado para el manantial de Nuches por problemas derivados de los mecanismos de control, y para la instalación del río Coscón, por la inexistencia de ningún tipo de mecanismo de registro, plantea la necesidad de diseñar un programa de toma de datos previo a realizar nuevas simulaciones con el modelo matemático de Jijona actualizado.

Estos programas de medidas, que deberá ser diseñado detalladamente en un futuro, deberá tener en consideración, como mínimo, la toma de datos diarios para el manantial de Nuches y la instalación de una sonda que registre los episodios de llenado en el dique del río Coscón.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

1.- La actualización del modelo matemático del acuífero de Jijona mediante el programa PMWIN, de gran difusión en el ámbito de la hidrogeología, permite a los potenciales usuarios, la utilización de una herramienta muy ágil para la entrada, cambio y salidas de datos, a través del uso de preprocesadores y posprocesadores con un alto potencial para el tratamiento de datos.

2.- Como consecuencia de su calibración, permite su uso para la simulación de múltiples alternativas de gestión del sistema, que permitirán una adecuada toma de decisiones ante perspectivas futuras de uso de sus recursos. En este aspecto, el uso de un modelo matemático se demuestra una herramienta fundamental.

2.- La ausencia de series de mayor amplitud en datos de niveles estáticos en los pozos de explotación del acuífero, así como de datos de bombeos, ha limitado el proceso de validación del modelo, habiendo sido necesario realizar un proceso conjunto de calibración-validación, que ha aportado un ajuste bastante aceptable.

3.- Es recomendable validar el modelo matemático del acuífero de Jijona realizado con el programa PMWIN, mediante la introducción de datos desde octubre de 1993 hasta la actualidad.

4.- De las diferentes alternativas de simulación posibles a realizar, mediante el modelo matemático actualizado de Jijona, se recomienda las asociadas a la infiltración forzada de aguas pluviales en la instalación de recarga artificial situada en el Barranco de Coscón y a la utilización de los excedentes generados por el manantial de Nuches en actuaciones de recarga artificial en el acuífero de Jijona. En ambos casos un deficiente registro de datos continuos no permite actualmente la realización de simulaciones ajustadas a la realidad. Los registros deberían ser para el manantial de Nuches como mínimo diarios y para la instalación de recarga sería necesario registros detallados de los episodios de llenado e infiltración.