UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA



CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA

"ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE FLUJO EN ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS"

TESIS

Que, para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA:

Guillermo Pedro Morales Reyes

Director de Tesis:
Ph. D. Jaime Gárfias Soliz

Toluca,Estado de México Abril de 1998.

Universidad Autónoma del Estado de México
UAEM *FACULTAD DE INGENIERIA*

Ciudad Universitaria, Toluca, Méx., a 31 de marzo de 1998

ING. GUILLERMO PEDRO MORALES REYES
P r e s e n t e

En contestación a su solicitud transcribo a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Dr. Jaime Gárfias Solíz para que lo desarrolle como Tesis para la presentación de su Examen de Grado de la Maestría en Ingeniería - Ciencias del Agua -.

"ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE FLUJO EN ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS"

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN
CAPITULO II: MODELACIÓN DE FLUJO EN ACUÍFEROS
CAPITULO III: MODELOS DE SIMULACIÓN DE FLUJO SUBTERRÁNEO
CAPITULO IV: DESCRIPCION DEL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN
CAPITULO V: APLICACIÓN DEL MODELO MODFLOW AL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN
CAPITULO VI: PROPUESTA DE SOLUCIONES ALTERNATIVAS RELACIONADAS CON LA GESTIÓN DEL USO Y EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO
CAPITULO VII: CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA
ANEXO I
ANEXO II

Asimismo, para la aprobación de la Tesis y demás trámites deberá sujetarse al Reglamento respectivo de esta Facultad.

A T E N T A M E N T E
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO
"1998, CENTENARIO DEL DR. MAXIMILIANO RUIZ CASTAÑEDA"

M. EN I. ÁNGEL ALBITER RODRÍGUEZ
D I R E C T O R

FACULTAD DE INGENIERIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA

"ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE FLUJO EN ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS"

T E S I S

Que, para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA:

Guillermo Pedro Morales Reyes

Director de Tesis:
Ph. D. Jaime Gárfias Soliz

Toluca, Estado de México Abril de 1998

AGRADECIMIENTOS

La realización del presente trabajo se llevó a cabo, gracias al apoyo de honorables personas a quíen, con estas palabras, solo alcanzo a expresar mi profundo agradecimiento por la relevancia de su contribución.

Ph. D. Jaime Gárfias Solíz. Por haber llevado a cabo la dirección de este trabajo, que implicó para mí, el acceso afortunado a una formación académica invaluable, que solo personas de la calidad científica y humana como usted pueden transmitir; así también, por el espiritud de profesionalismo contagiado para lograr las metas y objetivos fincados en este trabajo. Gracias por siempre Doctor.

Ph. D. María Vicenta Esteller Alberich. Por su importante contribución con la información de su proyecto de investigación, referente al acuífero de la Plana de Castellón, la cual fué fundamental para el desarrollo del presente trabajo. Gracias por siempre Marissa.

Iséla Angeles y Erika Flores. Por su apoyo con el escaneado y dibujado de figuras y mapas. Gracias por siempre.

A todo el personal del CIRA que de manera directa e indirectamente ayudó en diferentes aspectos, para realizar el presente trabajo. Gracias por siempre.

DEDICATORIAS

El presente trabajo de tesis lo dedico con todo cariño a mi familia, en especial a mis hermanos: Alejandro, Reina y Roberto.

Dedico en forma muy especial al Ph. D. Jaime Gárfias Soliz ditector del presente trabajo.

A todos mis amigos y gente de alta estima.

RESUMEN

El presente trabajo está basado fundamentalmente en el estudio de las condiciones de sobreexplotación en un acuífero, mediante la aplicación de un modelo de simulación de flujo subterráneo en tres dimensiones, logrando también la caracterización de la magnitud de los parámetros de flujo. Esta caracterización ha permitido conocer el efecto y variación espacial de la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento.

El acuífero bajo estudio es el de la Plana de Castellón, considerado como un acuífero libre y de una sola capa, constituido por arenas, gravas, limos y arcillas. El modelo que se aplica es el **"Modflow" versión 2.7 presentado en 1989**, el cual se eligió con base a un análisis crítico, bibliográfico y funcional de cada uno de los modelos que tenian posibilidad de ser aplicados y que se encontraban disponibles.

La aplicación del modelo se llevó a cabo para los periodos de simulación 1975, 1976, 1979 y 1989, identificados de acuerdo a los datos de piezometría, como los años donde empieza a observarse un paulatino descenso del nivel freático (1975 y 1976) hasta llegar a un máximo abatimiento de la piezometría en 1979 y posteriormente en 1989, observandose una recuperación del acuífero.

Los resultados de una simulación original, indicaron la existencia de zonas que por tener una notable actividad de bombeo, resultan ser las más afectadas, presentándose efectos de una importante explotación para consumo. Con base a los resultados de la simulación referida, se consideró la necesidad de proponer algunos escenarios de explotación por bombeo, que permitieran cumplir con el suministro requerido y propiciara la disminución de las tasas de bombeo para la obtención de la recuperación del nivel freático. Al respecto se manejaron dos alternativas: la primera consiste en el manejo de un valor medio de las tasas de bombeo para los periodos de tiempo considerados, la segunda alternativa consiste en el manejo de las tasas de bombeo ajustadas, para las zonas donde, con la aplicación de la alternativa 1, no se presentó recuperación del nivel freático.

De acuerdo a los resultados, la alternativa 2 muestra mayor ahorro en los volúmenes de salida anual, para los periodos de simulación considerados. El ahorro máximo obtenido con esta alternativa es del orden del 6.84 %, el cual se verifico con las dotaciones medias del anexo II, para la obtención de las dotaciones reducidas. Posteriormente, estos valores fueron revisados y verificados, para ver si éstas están comprendidas dentro de los rangos de dotaciones vigentes en el lugar bajo estudio, situación que sí se presentó, por lo que se consideraron razonables las propuestas de promediación y ajuste del bombeo.

También se desarrollaron simulaciones de flujo, con la finalidad de predecir bajo dos condiciones de explotación para periodos de 5 y 10 años. La primer condición toma en cuenta las características de recuperación del acuífero y la segunda, cuando el acuífero se encuentra sometido a grandes extracciones por bombeo donde el nivel piezométrico se caracteriza por sufrir descensos.

Pedro Guillermo Morales Reyes
Estudiante

Dr. Jaime Gárfias Soliz
Director de tesis

ÍNDICE

CAPÍTULO I **1**

INTRODUCCIÓN **1**

1.1 ANTECEDENTES 1
1.2 OBJETIVOS 5
1.3 SEGUIMIENTO METODOLÓGICO 6

CAPÍTULO II **10**

MODELACIÓN DE FLUJO EN ACUÍFEROS **10**

2.1 IMPORTANCIA DE LA SIMULACIÓN DE FLUJO EN LOS ACUÍFEROS 10
2.1.1 ASPECTOS IMPORTANTES DE LA MODELACIÓN DE FLUJO EN ACUÍFEROS *12*
2.2 LOS MODELOS EN EL ÁMBITO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO 14
2.2.1 TIPOS DE MODELOS DE FLUJO SUBTERRÁNEO *15*
a) MODELOS FÍSICOS *15*
b) MODELOS MATEMÁTICOS *15*
c) MODELOS NUMÉRICOS *16*
2.3 ECUACIONES GOBERNANTES DE FLUJO 20
2.3.1 ECUACIÓN BÁSICA DE BALANCE *26*
2.3.2 FORMAS ADICIONALES DE LA ECUACIÓN DE BALANCE DE MASA *28*

CAPÍTULO III **36**

MODELOS DE SIMULACIÓN DE FLUJO SUBTERRÁNEO **36**

3.1 SOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES QUE RIGEN EL FLUJO EN ACUÍFEROS 36
3.1.1 SOLUCIONES ANALÍTICAS DE LAS ECUACIONES QUE RIGEN EL FLUJO EN ACUÍFEROS *36*
3.1.2 CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA *39*
3.2 MÉTODOS NUMÉRICOS 40
3.3 MODELACIÓN DE FLUJO SUBTERRÁNEO EN ACUÍFEROS. 51
3.3.1 CRÍTICA GENERAL DE LOS MODELOS DE FLUJO SUBTERRÁNEO *51*
3.4 ANÁLISIS CRÍTICO DE MODELOS PROBABLES DE APLICAR EN LA REGIÓN DE ESTUDIO 55
3.4.1 ELECCIÓN DEL MODELO PARA SU APLICACIÓN *55*
3.4.2 PRESENTACIÓN DE LOS MODELOS POSIBLES DE APLICAR *57*
3.4.2.1 ACTUALIZACIONES DEL MODELO MODFLOW *64*
3.4.2.2 ANÁLISIS DEL MODELO MODFLOW VERSIÓN MODIFICADA PARA MODINV (1990) *67*
3.4.2.3 VERSIÓN "VISUAL MODFLOW 2.0" *68*
3.4.2.4 VERSIÓN DEL MODELO MODFLOW SELECCIONADO *69*

CAPÍTULO IV **74**

DESCRIPCIÓN DEL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN **74**

4.1 CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA ZONA DE MODELACIÓN 74
4.1.1 ANTECEDENTES GEOLÓGICOS DEL SECTOR DE LA PLANA DE CASTELLÓN *80*
4.2 HIDROGEOLOGÍA DEL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN 81
4.2.1 DESCRIPCIÓN DE NIVELES ACUÍFEROS *81*
4.3 PRESENTACIÓN GENERAL DEL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN 85
4.3.1 CARACTERIZACIÓN LITOLÓGICA Y GEOMÉTRICA *85*
4.4 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS 88
4.5 ESTUDIO PIEZOMÉTRICO DEL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN 90
4.5.1 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS *92*
4.5.1.1 Evolución Piezométrica del Sector de Benicasim *94*
4.5.1.2 Evolución Piezométrica del Sector Central *94*
4.5.1.3 Evolución Piezométrica en el Sector de Moncófar *95*
4.6 EVOLUCIÓN DE CARÁCTER ESPACIAL DE FLUJO SUBTERRÁNEO EN EL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN. 96
4.7 DEFINICIÓN DE LA ZONA DE MODELADO CORRESPONDIENTE AL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN 101
4.7.1 Definición de las Fronteras Físicas de la Zona de Modelado *101*
4.7.2 Discretización Espacial de la Malla de Modelado *101*
4.7.3 Definición de los Elementos Componentes del Ciclo Hidrológico que Intervienen en el Modelo. *102*

CAPÍTULO V **105**

APLICACIÓN DEL MODELO MODFLOW AL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN **105**

5.1 PRESENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA Y MANEJO DE LOS DATOS DE ENTRADA PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO MODFLOW 105
5.1.1 ESTRUCTURACIÓN DEL PAQUETE DE PROCESAMIENTO BÁSICO, "BAS" *107*
5.1.2 ESTRUCTURACIÓN DEL PAQUETE DE FLUJO EN BLOQUE CENTRADO, "BCF" *110*
5.1.3 ESTRUCTURACIÓN DEL PAQUETE POZOS, "WELL" *111*
5.1.4 ESTRUCTURACIÓN DEL PAQUETE DRENES, "DRN" *111*
5.1.5 ESTRUCTURACIÓN DEL PAQUETE RECARGA SUPERFICIAL, "RCH" *114*
5.1.6 ESTRUCTURACIÓN DEL PAQUETE PROCEDIMIENTO TOTALMENTE IMPLÍCITO, "SIP" *115*
5.1.7 ESTRUCTURACIÓN DEL PAQUETE CONTROL DE ENTRADAS Y SALIDAS, "OC" *116*
5.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO MODFLOW 116
5.3 VALIDACIÓN DEL MODELO MODFLOW 120
5.4 ETAPA DE SIMULACIÓN DE FLUJO EN EL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN, APLICANDO EL MODELO MODFLOW 123
5.5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN 124

CAPÍTULO VI **131**

PROPUESTA DE SOLUCIONES ALTERNATIVAS RELACIONADAS CON LA GESTIÓN DEL USO Y EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO **131**

6.1 INTRODUCCIÓN 131
6.2 ALTERNATIVAS DE BOMBEO PROPUESTAS 132
6.2.1 ALTERNATIVA 1 ..... *132*
6.2.2 ALTERNATIVA 2 ..... *142*
6.3 ANÁLISIS DE LA PIEZOMETRÍA SIMULADA, CONSIDERANDO LAS ALTERNATIVAS DE BOMBEO PROPUESTAS 146
6.3.1 SIMULACIÓN DEL FLUJO CORRESPONDIENTE A LA FRANJA COSTERA CONSIDERANDO LA SIMULACIÓN ORIGINAL *146*
6.3.2 SIMULACIÓN DEL FLUJO CORRESPONDIENTE A LA FRANJA COSTERA, CONSIDERANDO LA ALTERNATIVA 1 ..... *148*
6.3.3 SIMULACIÓN DEL FLUJO CORRESPONDIENTE A LA FRANJA INTERIOR MEDIA *149*
6.3.4 SIMULACIÓN DEL FLUJO CORRESPONDIENTE A LA FRANJA INTERIOR ALTA *150*
6.4 SIMULACIÓN DEL FLUJO UTILIZANDO LA ALTERNATIVA 2 150
6.4.1 SIMULACIÓN DEL FLUJO EN LA FRANJA COSTERA *150*
6.4.2 SIMULACIÓN DEL FLUJO EN LA FRANJA INTERIOR MEDIA *151*
6.4.3 SIMULACIÓN DEL FLUJO EN LA FRANJA INTERIOR ALTA *151*
6.5 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES CORRESPONDIENTES A LA ALTERNATIVA 2 DE BOMBEO PROPUESTA 152
6.6 ANÁLISIS DE LOS RANGOS MANEJADOS PARA EL SUMINISTRO DE AGUA EN LOS DIFERENTES CONCEPTOS DE CONSUMO DEL LUGAR 160
6.7 PROPUESTA DE SOLUCIONES PARA LA GESTIÓN EN EL USO Y APROVECHAMIENTO DEL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN 161
6.7.1 PROPUESTA CORRESPONDIENTE A LA FRANJA COSTERA *161*
6.7.2 PROPUESTA CORRESPONDIENTE A LA FRANJA INTERIOR MEDIA *162*
6.7.3 PROPUESTA CORRESPONDIENTE A LA FRANJA INTERIOR ALTA *163*

CAPÍTULO VII **164**

CONCLUSIONES **164**

BIBLIOGRAFÍA **168**

ANEXO I **173**

ANEXO II **177**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema general de la secuencia del desarrollo de un modelo de predicción. 18

Figura 2.2 Componentes del modelo: datos de entrada, ecuación gobernante resuelta en el código y distribución predicha. para este ejemplo, es la carga hidráulica. 21

Figura 2.3 Nomenclatura del volumen de control para la conservación de masa..... 26

Figura 3.1 Desarrollo de un modelo generalizado por los métodos de diferencias finitas y elemento finito 41

Figura 3.2 a Esquema de diferencias finitas en red centrada 44

Figura 3.2 b Esquema de diferencias finitas en bloque centrado 44

Figura 3.3.a Esquema del elemento finito para el caso unidimensional 49

Figura 3.3.b Esquema del elemento finito para el caso bidimensional 49

Figura 3.3.c Esquema del elemento finito para el caso tridimensional 50

Figura 4.1 Situación geográfica de la Plana de Castellón 75

Figura 4.2 Rasgos geográficos de la Plana de Castellón 77

Figura 4.3 Situación geológica de la Plana de Castellón según Esteller (1994) 79

Figura 4.4 Mapa de isoespesores del acuífero de la Plana de Castellón 87

Figura 4.5 Mapa de transmisividades de la Plana de Castellón 89

Figura 4.6 Mapa de distribución del coeficiente de almacenamiento 91

Figura 4.7 Ubicación de los piezómetros de control y estaciones pluviométricas 93

Figura 4.8 Evolución del nivel freático observado en el acuífero de la Plana de Castellón 97

Figura 4.9 Piezometría observada para el mes de Septiembre de 1975 98

Figura 4.10 Piezometría observada para el mes de Septiembre de 1979 99

Figura 4.11 Piezometría observada para el mes de Septiembre de 1989 100

Figura 4.12 Malla de modelado del acuífero de la Plana de Castellón 104

Figura 5.1. Modelo conceptual del acuífero de la Plana de Castellón 106

Figura 5.2 Ubicación de los piezómetros de control en el acuífero de la Plana de Castellón 109

Figura 5.3 Ubicación de los pozos de bombeo en el acuífero de la Plana de Castellón 112

Figura 5.4 Ubicación de los drenes de salida en el acuífero de la Plana de Castellón 113

Figura 5.5 Distribución de los valores de la tasa de recarga superficial, en la Plana de Castellón 117

Figura 5.6 Representación de las regiones críticas de bombeo en las zonas costera, media y alta 127

Figura 6.1 Comportamiento de los volúmenes de las salidas anuales 153

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1	Tipos de modelos y sus aplicaciones.	53
Cuadro 3.2	Clasificación por versión, según sus ventajas y desventajas del modelo	71
Cuadro 5.1	Valores de la transmisividad T y coeficiente de almacenamiento S, aplicables al modelo "Modflow"	119
Cuadro 5.2	Valores de la piezometría calibrada para el periodo 1974	120
Cuadro 5.3	Valores de la piezometría validada para el periodo 1975	121
Cuadro 5.4	Valores de la piezometría validada para el periodo 1976	122
Cuadro 5.5	Valores de la piezometría validada para el periodo 1989	122
Cuadro 5.6	Bombeo manejado en la franja costera de la Plana de Castellón	126
Cuadro 5.7	Bombeo correspondiente a la franja interior media de la Plana de Castellón	129
Cuadro 5.8	Bombeo correspondiente a la franja interior alta de la Plana de Castellón	130
Cuadro 6.1	Piezometría correspondiente a los pozos ubicados en la franja costera, interior media e interior alta; manejando los resultados de la simulación original y alternativa1.	135
Cuadro 6.2	Volúmenes obtenidos para la simulación original.	141
Cuadro 6.3	Volúmenes obtenidos para la alternativa 1 de bombeo	141
Cuadro 6.4a	Piezometría correspondiente a la franja costera, utilizando la alternativa 2	143
Cuadro 6.4b	Piezometría correspondiente a la franja interior media, utilizando la alternativa 2.	144
Cuadro 6.4b	Piezometría correspondiente a la franja interior media, utilizando la alternativa 2 (continuación).	145
Cuadro 6.4c	Piezometría correspondiente a la franja alta, utilizando la alternativa 2.	146

Cuadro 6.5 Valores de los volúmenes para la alternativa 2. 152

Cuadro 6.6 Piezometria simulada para el año 1975 154

Cuadro 6.7 Piezometria simulada para el año 1976..... 154

Cuadro 6.8 Piezometria simulada para el año 1979..... 155

Cuadro 6.9 Piezometria simulada para el año 1989..... 155

Cuadro 6.10 Representación de los balances anuales para las diferentes condiciones de simulación. 157

Cuadro 6.11 Presentación de los balances a futuro para periodos de tiempo de 5 y 10 años, bajo las condiciones de recuperación y descenso del nivel freático 158

SIMBOLOGÍA

$\boldsymbol{V}$	vector velocidad
$\boldsymbol{q}$	vector caudal específico
$\boldsymbol{J}$	vector gradiente hidráulico
$\boldsymbol{s}$	vector unitario de dirección cualquiera
ρ	densidad del agua
p	presión en un punto del medio
δ_y	dimensionamiento diferencial en la dirección ì
$\boldsymbol{J}^*$	vector flujo de masa de agua
δ_t	intervalo corto de tiempo
P'_w	caudal de un sumindero
δ	función Delta Dirac
β_c	coeficiente que introduce el efecto de la concentración
T	temperatura absoluta
c	concentración de un soluto
η	porosidad de un medio
$\boldsymbol{q_r}$	caudal específico relativo
S	coeficiente de almacenamiento
$\boldsymbol{K}$	vector conductividad hidráulica
μ	viscosidad dinámica
∇	operador diferencial
h	carga hidráulica
R	fuente general, sumidero o pozo
g	constante gravitacional
z	elevación respecto a algún sistema de referencia
p_0	presión de referencia, o atmosférica
q_n	caudal en la frontera
h_b	carga en la frontera
$\boldsymbol{u(x)}$	función contínua

x_i, x_{i+1}	puntos nodales
L	operador diferencial
$f(x)$	función forzada conocida
Ω	dominio sobre el cual se aplica una ecuación diferencial determinada
$\delta\Omega$	es la frontera de Ω
S_N	función de espacio finito dimensional
$U(x)$	función verdadera
$R(x)$	residual
$w(x)$	miembro de un juego de pesos.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

No cabe duda que al transcurso de las últimas décadas hasta la fecha, el hombre ha obtenido grandes avances en casi todos los ámbitos de la ciencia, mismos que resultaron por el surgimiento de nuevas necesidades y el tener que satisfacerlas, en otras palabras, dar solución a los problemas originados por la misma evolución del hombre, por ejemplo, la industrialización de los países que antes desarrollaban otros tipos de actividades, crecimiento desmesurado de la población, surgimiento de grandes demandas de servicios, las cuales aumentan cada día.

El panorama de problemas que el hombre trata de resolver es inmenso, es aquí donde la ciencia ocupa un lugar importante en la aportación de posibles soluciones. Con referencia al problema de satisfacer la demanda de servicios al hombre, hay uno el cual se considera prioritario en la actualidad, tal es el caso del suministro de agua potable a toda la raza humana, al respecto, se han encontrado algunas soluciones para este tipo de problemas, tal es el caso del suministro de agua proveniente de los acuíferos. Es verdad que es una solución, pero se pregunta, ¿ hasta que punto es una solución ? y, ¿ hasta cuando deja de ser una solución ?, a este tipo de preguntas es importante encontrar una

respuesta concreta y eficaz, porque el agua es un elemento, que día a día se requiere en mayores cantidades y las fuentes de abastecimiento como lo son los acuíferos, deben de estar limitados para extraer solamente la cantidad óptima, que represente un estado de equilibrio "recarga - extracción". Sin embargo, con el asentamiento de grandes ciudades en regiones donde el agua es localizada en fuentes de abastecimiento superficiales, mismas que resultan ser insuficientes, ha provocado a que se recurra como solución inmediata, al abastecimiento de agua a partir de fuentes de abastecimiento subterráneas, debido a tal situación y al incremento desmesurado de extracción de agua a través de pozos de bombeo, surge un gran problema a nivel mundial, **"la sobreexplotación de las aguas subterráneas"**.

La presencia de la sobreexplotación de las aguas subterráneas, ha provocado que una gran cantidad de científicos y organismos encargados de la normatividad de la explotación de las aguas, tengan la necesidad de tomar decisiones para la solución de tal problema. Las soluciones no son fáciles y las posibles, tienen un elevado costo, por lo que, solamente los países desarrollados han realizado algunos proyectos de recuperación y saneamiento de niveles de los acuíferos sobreexplotados, tomando en cuenta que los modelos de flujo subterráneo, es la mejor herramienta para obtener predicciones del comportamiento del flujo, obteniendo a través de esto, alternativas en la selección de una posible solución de un problema bajo estudio (Anderson y Woessner, 1992).

La evolución de la modelación del flujo subterráneo en la zona saturada ha sido impresionante, a partir de la aceptación universal de las ecuaciones de "Navier - Stokes" y su simplificación, para obtener la ley de Darcy (White, 1974). Junto con ello, la comunidad científica realizó los primeros modelos del flujo en la zona saturada, considerados extensamente estudiados, principalmente en lo que se refiere a la simulación y comportamiento de los acuíferos sobreexplotados, pues involucran una extensa variedad de problemas afines. Respecto a los primeros modelos en referencia, se tomó como base las ecuaciones diferenciales parciales, que gobiernan el flujo de las

aguas subterráneas en la zona saturada y debido a su forma típica, aplicable a una amplia variedad de problemas físicos estudiados ampliamente.

Debido a que las ecuaciones son lineales, muchas herramientas poderosas de análisis matemático son aplicables y por lo tanto, soluciones analíticas exactas se encuentran disponibles para una amplia variedad de problemas, caracterizados por geometrías simples, condiciones de frontera, condiciones iniciales y parámetros de campo (normalmente homogéneos). Estas soluciones analíticas suelen ser esenciales en la comprobación y verificación de técnicas de soluciones numéricas aproximadas, mismas que a su vez, proporcionan viabilidad en muchos casos complejos (National Research Council, 1990). También surgen en los últimos años, modelos del flujo en la zona saturada y no saturada, mismos que son bastante utilizados por estar vinculados con los problemas de estudio y predicción de fenómenos como transporte y migración de contaminantes, la infiltración de la lluvia, irrigación, recarga artificial, simulación de flujo, etc. De la misma manera han tomado gran importancia dentro de los acuíferos sobreexplotados, los modelos que simulan el transporte de contaminantes en la zona saturada, ya que es uno de los problemas más suscitados en la actualidad (Bear, 1972; Dagan, 1986; National Research Council, 1990).

La evolución de la modelación del flujo subterráneo siempre implica e implicará el empleo de herramientas matemáticas y de cálculo más sofisticadas, por lo que han surgido, "técnicas de aproximación numérica avanzadas", "métodos numéricos innovados", así también, literaturas especializadas en problemas de flujo de las aguas subterráneas y por supuesto, innovaciones en computadoras, sistemas expertos, herramientas gráficas introducidas a los pre y post-procesadores, diseñados para las diferentes aplicaciones de los códigos computacionales (Huyakorn y Pinder, 1983; Remson, 1971; Wang y Anderson, 1982; Anderson y Woessner, 1992).

En el estado del arte de la modelación del flujo bajo un estado saturado y continuo, en general, aún tiene numerosas restricciones en el área de la caracterización hidrológica.

La magnitud de los parámetros de flujo y su variabilidad espacial, actualmente permanecen sin predicción a priori, esta escasez de predicción es una fuente mayor de incertidumbre en la modelación actual del flujo subterráneo (National Research Council, 1990). A pesar de todas las limitaciones que se presentan, se han realizado muchas estimaciones de parámetros de manera continua, incluso se han logrado avances importantes, tal es el caso de la "técnica inversa", la cual, es una aplicación a modelos de flujo subterráneo para obtener valores de los parámetros a través de una calibración. Al respecto, una gran cantidad de literatura teórica ha sido conjuntada en relación al ámbito de las aguas subterráneas, por ejemplo "el problema inverso" (Yeh, 1986; McLaughlin, 1996).

Recientemente, más métodos numéricos se han enfocado sobre eficientes y aproximados programas de cálculo, involucrados con la evolución de los niveles piezométricos en un acuífero (por ejemplo), para problemas en una y dos dimensiones. Sin embargo, en respuesta al incremento de la disponibilidad de equipos de cómputo de mayor capacidad, los últimos años han sido de progreso significativo en lo que se refiere a técnicas de solución tridimensional, tales técnicas son mayormente experimentales y recientemente se utilizan con gran variedad en modelos, tanto de flujo subterráneo, como de transporte de contaminantes, por ejemplo, el modelo "Modflow", "Modpath" y el "Visual Modflow", éste ultimo considerado uno de los paquetes más completos para modelación de flujo subterráneo, simulación de transporte de contaminantes así como aplicaciones en la remediación de acuíferos contaminados (Walton, 1992; Guiguer y Franz, 1996).

De acuerdo con lo anteriormente enunciado, cada vez más, se acepta que la modelación con variabilidad espacial tridimensional, provoca que los modelos tengan mayor aceptación, debido a que presentan simulaciones más aceptables y aproximadas (Verruijt, 1987; Smith, 1981; National Research Council, 1990). Por ejemplo, un modelo de simulación de flujo subterráneo que funciona bajo un esquema de diferencias finitas centradas tridimensional, aplicado a toda la estructura de sus programas, mismos que a su vez constituyen un programa modular, es el modelo "Modflow", el cual tiene

una amplia aceptación en la realización de estudios de simulación y predicción del comportamiento del flujo subterráneo. Hoy en día, el nivel de predicción de los modelos en acuíferos sobreexplotados ha adquirido más aceptación y con ello, un mayor número de posibles soluciones a los problemas que se pretenden solucionar mediante la aplicación de los mismos (Hoeksema y Kitanidis, 1983).

Finalmente se puede decir en forma escueta que, en la actualidad, debido a la enorme sobreexplotación de las aguas subterráneas en el mundo, surge la necesidad de plantear soluciones a partir de profundos estudios científicos, tomando como herramienta fundamental, la modelación, cuya finalidad es, obtener una representación del comportamiento y evolución del acuífero sobreexplotado, y a partir de esto, tomar las decisiones pertinentes que conduzcan a una solución alternativa óptima del problema.

1.2 OBJETIVOS

En relación al presente trabajo, éste se fundamenta principalmente en el siguiente objetivo, el cual consiste en estudiar las condiciones de sobreexplotación de un acuífero mediante la aplicación de un modelo de simulación de flujo subterráneo en tres dimensiones. Así también, este modelo permite caracterizar la magnitud de los parámetros de flujo y conocer el efecto de su variabilidad espacial.

Conjuntamente con el anterior objetivo, se han considerado los siguientes objetivos específicos, los cuales son los indicadores en el desarrollo integral del trabajo en referencia.

a).- Con base a información documental y bibliografía especializada, en el presente trabajo, se pretende realizar una crítica y análisis sobre la modelación en medios hidrogeológicos, para lograr definir un modelo que, por sus características, estructura y funcionamiento, sea factible de aplicar en un estudio de modelación del flujo subterráneo para un acuífero

sobreexplotado, tales actividades se presentan en el capítulo 2 y parte del tercero.

b).- Definir las características físicas de la región de estudio, en este caso el Acuífero de la Plana de Castellón, las cuales están representadas en el desarrollo del capítulo 4.

c).- Definir un modelo conceptual del acuífero bajo estudio, con base a las características del medio y en función de los datos disponibles. También la conceptualización del acuífero que se encuentra representado en el capítulo 4.

d).- Mediante ensayos de calibración, definir los valores de los parámetros de control del modelo. El desarrollo correspondiente a este rubro es extenso y los resultados se presentan en el capítulo 5.

e).- Verificación del modelo con datos observados. Considerado comúnmente como la validación del modelo, los resultados obtenidos se presentan en el capítulo 5.

f).- Realizar simulaciones que permitan plantear políticas de gestión del acuífero. El desarrollo de estas simulaciones corresponde a la última etapa de aplicación del modelo, su análisis y crítica son presentados en el capítulo 6, junto con las propuestas de solución alternativa generadas de los resultados de referidas simulaciones.

1.3 SEGUIMIENTO METODOLÓGICO

Para la realización del presente trabajo, se ha procedido con base a los objetivos que se tienen establecidos, así también, tomando en cuenta el desarrollo de la siguiente metodología.

1.- Formulación y construcción del modelo conceptual, a partir de los siguientes elementos:

a).- En primera instancia, se considera básico la disposición de los estudios que se tengan realizados en la zona de estudio, de preferencia hidrogeológicos y físicos, así también, la información disponible que permite estimar parámetros básicos, que constituyen el modelo conceptual y dan lugar a la aplicación del modelo.

b).- Posteriormente a la obtención de la información básica e información de los parámetros prioritarios para el modelo, se procede a definir los elementos del modelo conceptual, con base a la definición de las fronteras físicas de la región en estudio, estratigrafía existente en el lugar, localización de fuentes de recarga y de bombeo (pozos, drenes, etc.).

c).- El siguiente paso que se realiza, es la formulación definitiva de los elementos constitutivos del modelo conceptual, tal es el caso de las fronteras físicas y de modelado, distribución de valores de la conductividad hidráulica, transmisividad, almacenamiento específico, discretización de la malla del modelado, discretización del paso de tiempo, definición de elementos de recarga y bombeo, los cuales son interactuantes durante la simulación, así también el establecimiento de las condiciones iniciales y de frontera.

2.- Definición del modelo matemático/numérico que se aplica a la región en estudio mediante las siguientes actividades:

a).- Realización de una crítica bibliográfica acerca de los modelos, que permita elegir uno que ofrezca cierta probabilidad de aplicación. En este caso particular el modelo "Modflow" es el que reúne las características suficientes, que se requieren para la realización de una simulación de flujo subterráneo.

b).- Análisis de estructura, características y funcionamiento del modelo que se considera para su aplicación, y con ello, lograr definir sus alcances y limitantes para su aplicación a un caso particular de modelación.

c).- Con la disposición de todos los elementos mencionados y la formulación del modelo conceptual, se prosigue a adaptar toda la información a la estructura del modelo que se pretende aplicar.

d).- Con base al desarrollo del inciso anterior, se realiza una serie de ensayos de aplicación, para lograr una identificación plena del modelo. Para tal propósito, se realizó una documentación de valores de parámetros de un acuífero, siendo este el de la Plana de Castellón, así también se consultaron ejemplos de aplicaciones del modelo "Modflow" presentados por la "National Ground Water Association"(Julio, 1993).

e).- Las series de simulaciones y ensayos de calibración, dependen para su aceptación, de los resultados preliminares, por lo que está sujeto directamente de las condiciones de funcionamiento del modelo "Modflow", con base a los diferentes valores de los parámetros y variables que se manejan. Por lo tanto, se recomienda realizar una cantidad suficiente y necesaria para lograr las condiciones apropiadas de aplicación del modelo.

f).- Realización de una evaluación del modelo, con base a los resultados obtenidos mediante los ensayos de calibración, de tal manera que se obtengan las condiciones específicas en las que se aplica el modelo a una determinada región de estudio.

3.- Con la definición de los parámetros de control para el modelo "Modflow" en su forma definitiva, se procede a realizar una verificación del modelo con datos registrados, es decir, se realiza la aplicación del mismo en la zona correspondiente al acuífero de la Plana de Castellón, considerando los valores de datos observados.

4.- Finalmente, a partir de los resultados obtenidos en la validación del modelo "Modflow", se procede a realizar ensayos para diferentes periodos de cálculo a través de los cuales, se generan los resultados necesarios para establecer propuestas de solución alternativa, sobre el funcionamiento hidráulico del acuífero de la Plana de Castellón.

5.- De acuerdo a los resultados generados de los ensayos realizados para diferentes periodos de cálculo, se propone una solución alternativa para la recuperación de los niveles freáticos en el acuífero de referencia, basado en algunas alternativas de bombeo.

Cabe mencionar que, en el desarrollo del seguimiento metodológico de han considerado las alternativas de bombeo como posibles soluciones al mejoramiento del nivel freático en el acuífero de la Plana de Castellón, basado en la información disponible a cerca de éste, donde se especifica que la situación de explotación da lugar a la presencia de indicios de sobreexplotación.

CAPÍTULO II

MODELACIÓN DE FLUJO EN ACUÍFEROS

2.1 IMPORTANCIA DE LA SIMULACIÓN DE FLUJO EN LOS ACUÍFEROS

Con el cambio y evolución del mundo en todos sus ámbitos, surgen paralelamente nuevas necesidades y problemas que resolver, estos requerimientos son complejos de satisfacer y en gran parte de ellos se requiere de estudios y proyectos de investigación profundos, que permitan obtener soluciones alternativas a tales necesidades; pues al incrementarse de manera importante se convierten automáticamente en problemas de grandes dimensiones. Ejemplo de ello puede ser el abastecimiento de agua potable para consumo humano, utilización de agua en las industrias, agricultura, etc.

Las diferentes actividades que implican necesidad de empleo de agua, se han incrementado considerablemente, en gran parte por el crecimiento de la población y en consecuencia el establecimiento de grandes ciudades en lugares donde el elemento agua, no es suficiente si éste proviene de fuentes de abastecimiento superficiales. Lo anterior ha derivado recurrir a la búsqueda de soluciones alternativas para obtener nuevas fuentes de abastecimiento; tal es el caso de la "extracción de agua de los acuíferos", ciertamente es una solución que ha sacado de muchos problemas derivados a la sociedad, pero; con el transcurrir del tiempo es cada día mayor el volumen de extracción en el subsuelo,

originando un problema de **"sobreexplotación de los acuíferos"** debido a la falta de precaución por mantener un balance hidráulico en el funcionamiento de los mismos, es decir, se presentan en mayor índice los volúmenes de extracción que los volúmenes de recarga en tales acuíferos.

Para lograr ofrecer soluciones eficaces al respecto, los países desarrollados han optado por desarrollar estudios y proyectos de investigación que involucren la restauración hasta lo posible, de los recursos naturales, como es el caso del establecimiento de soluciones que regulen y controlen las políticas de consumo de agua, y de sus fuentes de abastecimiento subterráneas. La comunidad científica es el grupo que encabeza la realización de los estudios en referencia, mismos que han sido desarrollados con apoyo de una herramienta, la modelación, que hasta la fecha se considera fundamental y tiene como principal objeto ser utilizada para predecir comportamientos aproximados de un sistema real, el cual requiere ser simplificado para su mejor adaptación al estudio. Esto permite implementar el manejo de decisiones sobre la solución de un problema en particular. La aplicación práctica de referida herramienta es el "*modelo*", que de acuerdo con la mayoría de los científicos, su desarrollo para dar solución a un problema o fenómeno real, implica realizar simplificaciones con criterio sobre las características reales de un problema, a una forma más comprensible, que pueda simular aproximadamente las relaciones excitación - respuesta de un sistema real (Bear y Verruijt, 1987).

Debido a los propósitos que se tratan de lograr a partir del desarrollo y aplicación de un modelo, se considera importante su manejo en cualquier ámbito de la ciencia y para el caso particular de la Hidrogeología, lo que corresponde a la modelación de flujo en los acuíferos, es indispensable por las necesidades de conocer el comportamiento del flujo, su evolución en el tiempo y espacio dentro de un dominio determinado, en función a un interés particular y lograr con ello determinar una posibilidad de soluciones alternativas, que permitan llevar a cabo una toma de decisiones inmejorable para la resolución de un problema bajo estudio.

2.1.1 ASPECTOS IMPORTANTES DE LA MODELACIÓN DE FLUJO EN ACUÍFEROS

A partir del surgimiento de los modelos, estos son considerados como herramientas de gran éxito por su aplicación en lo que se refiere a:

- evaluación y asistencia en la solución de un problema;
- diseño de estrategias de remediación;
- conceptualización y estudio de los procesos de flujo;
- proporción de información adicional para la toma de decisiones;
- reconocimiento de limitaciones en los datos y conjunción de procedimientos para nuevos datos.

Con base en los puntos anteriores, los modelos de flujo subterráneo son considerados herramientas de evaluación, que pueden ser utilizados para ayudar a comprender el movimiento del agua, y si es el caso, el transporte de químicos a través del flujo, además de otros fenómenos vinculados como son: la migración de contaminantes de la zona no saturada a la saturada, contaminación de acuíferos a través de la infiltración de pesticidas, etc. Uno de los propósitos de los modelos es simular las condiciones subsuperficiales y la predicción aproximada del comportamiento de un flujo, su aplicación puede proporcionar información aceptable sobre diferentes procesos de flujo de interés; así como en los diseños de programas de remediación de acuíferos, cuando existe el problema de migración de contaminantes bajo un proceso de transporte y flujo.

Durante la modelación de flujo, los resultados de la aplicación de un modelo, son dependientes de la calidad de los datos utilizados en la entrada para el mismo. Generalmente los datos del sitio específico son requeridos para desarrollar el modelo del sitio. El modelo no puede ser utilizado como un sustituto de una colección de datos, sin embargo; el uso del modelo puede ayudar directamente en un programa de colección de

datos para la identificación de áreas, donde algunos datos adicionales son requeridos. Con mucha similitud, la colección de datos y la aplicación de un modelo pueden proporcionar una representación adecuada de las condiciones del lugar. Frecuentemente una modelación incorrecta sucede cuando son utilizados datos limitados en una situación, en la que el modelo espera una información más completa y por lo tanto no puede hacer reconocimiento de la información que se proporciona.

Dentro de las aplicaciones de los modelos de flujo en acuíferos, hay algunos que tienen como función la regulación y procedimiento legal para la evaluación de un determinado fenómeno o problema; estos modelos están sujetos a la revisión y comentarios de las agencias competentes en el caso, así como de organismos que estén involucrados; esto con la finalidad de definir si existe el riesgo de perjudicar intereses que repercutan en el bienestar de la sociedad, debido a las políticas que se pudiesen manejar. Con base en lo anterior, la documentación asociada con el modelo debe ser aceptable y revisada para:

- comprender que es lo que se ha desarrollado en el ámbito de la modelación de flujo subterráneo;
- evaluar la calidad del modelo, considerando rubros como el alcance para el cual las ecuaciones gobernantes describen los procesos actuales, es decir, la validación del modelo, los pasos tomados para verificar que el código resuelva correctamente las ecuaciones gobernantes y la operatividad total correspondiendo a la verificación del código;
- evaluar la aplicación del modelo para un sitio particular;
- distinguir los insumos de carácter científico de los de carácter político en el modelo.

En forma adicional, cabe mencionar que la modelación del flujo tiene como una de sus metas ofrecer una posible toma de decisiones alternativa, pues; los modelos no pueden ser sustitutos directos en el proceso de la toma de decisiones, debido a que las mismas en su mayoría, están basadas sobre un amplio rango de factores.

A manera de conclusión, se puede decir que desde el surgimiento de los modelos, se hizo posible realizar modelación de flujo en los diferentes tipos de acuíferos, pues permite con ello realizar una simulación del comportamiento del flujo, considerando desde luego, simplificaciones de una situación real. Esto permite la posibilidad de manejar un número mayor de parámetros y variables que intervienen en el funcionamiento de un acuífero, implicando la obtención de mejores resultados, mismos que son mejorados conforme sea de mayor aproximación y calidad el modelo; teniendo que involucrar para ello mayor y mejor calidad de datos de entrada, innovaciones de métodos numéricos, equipo de cómputo de mayor capacidad, etc.

2.2 LOS MODELOS EN EL ÁMBITO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

A partir de las últimas cuatro décadas, la comunidad científica ha tratado de profundizar mediante estudios, el conocimiento del comportamiento del flujo subterráneo, sujeto a diversos elementos interactivos, como es la infiltración del agua de precipitación hasta el nivel freático, extracción de agua a través de pozos de bombeo, recarga del acuífero mediante la infiltración de agua de riego, recarga por medio de la infiltración del agua proveniente de los cuerpos de agua, salidas de agua a través de manantiales, etc. Pero, para lograr resultados, surgió la necesidad de realizar suposiciones que permitieran simplificar el problema aunque con ello se aminorara la capacidad de solución, certidumbre y aproximación, lo que provocaba insatisfacciones en sus estudios. Sin embargo, con la evolución de la ciencia y la aparición de nuevas herramientas matemáticas, surgen los "modelos", los cuales dan respuesta a varias inquietudes por establecer una manera de representar un estado real de un problema en condiciones simplificadas, pero con el suficiente criterio, y así; lograr la obtención de una buena relación entre los datos de entrada y los resultados del mismo modelo.

Con base en lo anteriormente expuesto, un modelo de flujo subterráneo se define como *una versión simplificada de un sistema real (acuífero) que aproximadamente simula las relaciones excitación - respuesta del mismo sistema.* Las simplificaciones son

introducidas a través de un juego de suposiciones que expresan la comprensión de la naturaleza del sistema (acuífero) y su comportamiento, estas suposiciones relatan otra cantidad de factores para la geometría del dominio investigado, la forma y el efecto de varias heterogeneidades que pueden ser eliminadas, también respecto a la naturaleza del medio poroso (homogeneidad, isotropía y deformabilidad), la naturaleza del fluido involucrado y el tipo de régimen de flujo que toma lugar.

Debido a que el modelo es una versión simplificada de un sistema real (acuífero), no existe un modelo único para un sistema de flujo subterráneo determinado. Diferentes juegos de suposiciones simplificatorias resultarán en diferentes modelos, cada aproximación en diferente forma investiga el sistema de flujo subterráneo.

2.2.1 TIPOS DE MODELOS DE FLUJO SUBTERRÁNEO

Generalmente existen tres tipos de modelos, estos son los **"físicos o analógicos", "matemáticos" y "numéricos"**.

a) MODELOS FÍSICOS

Fueron utilizados hasta principios de los años setenta como herramientas prácticas para resolver problemas de aguas subterráneas. Con la introducción de las computadoras y su aplicación en la solución de modelos numéricos, los modelos físicos y analógicos se han convertido en herramientas redundantes para la predicción de futuros regímenes de flujo subterráneo, principalmente por el costo que implica su adaptación.

b) MODELOS MATEMÁTICOS

Se pueden considerar como un segundo paso en el procedimiento de la modelación, posterior a un primero, el cual consiste en la construcción de un modelo conceptual del problema y el dominio relevante del acuífero. Consiste básicamente de un juego de

suposiciones que reducen el problema real y su dominio real, a versiones simplificadas que son aceptables en vista de los objetivos de la modelación y lo relacionado con el manejo del problema. Referente al modelo "matemático", se define como la expresión del modelo conceptual con características matemáticas, consistiendo de:

- definición de la geometría del dominio considerado y sus fronteras;
- ecuación (o ecuaciones) que expresa el balance de la cantidad extensiva considerada;
- ecuaciones de flujo que describen el flujo de la cantidad extensiva, considerada para el estado relevante de las variables del problema;
- ecuaciones constitutivas que definen el comportamiento de los materiales del medio poroso y del fluido involucrados;
- condiciones iniciales que describen el conocimiento del estado del sistema considerado en algún tiempo inicial;
- condiciones de frontera que describen la interacción del dominio considerado con su medio ambiente, a través de las fronteras que lo forman.

c) MODELOS NUMÉRICOS

En algunas ocasiones en lugar de utilizar el termino "modelo numérico" se habla más apropiadamente de la solución del modelo matemático adaptado a un código de cálculo, representado casi siempre, por un programa de computadora (correspondiente al modelo matemático). Esto se justifica por la grandeza de un número de suposiciones que son introducidas, además de aquellas controladas por el modelo matemático. Esto hace del modelo numérico un modelo con derecho propio, permitiendo representar diferentes versiones de aproximación de un sistema real; además de que normalmente puede disponer de su propio juego de coeficientes, que pueden identificarse antes que el modelo pueda ser utilizado para la realización de alguna aplicación.

Es preciso mencionar que su diversidad en aplicaciones e intereses sobre el desarrollo particular de los mismos, ha originado en común acuerdo con el criterio de un gran número de científicos, una clasificación de los modelos de acuerdo a sus objetivos (Peck y Gorelick, pp. 9, 1988).

Los modelos para aguas subterráneas se han subdividido con relación a sus objetivos en:

- **modelos de predicción;**
- **modelos de evaluación o identificación;**
- **modelos para manejo, administración y dirección.**

Los tres tipos son estrechamente parecidos, pero cabe señalar que los modelos de predicción, forman la base de los otros dos. Más adelante en la figura 2.1, se presenta un esquema que muestra la secuencia general del desarrollo de un modelo de predicción, utilizando una simulación numérica.

Referente a los modelos de evaluación o identificación, éstos bajo su concepción de modelo numérico, pueden ser desarrollados principalmente para identificar o evaluar los parámetros o fronteras, de un acuífero poco conocido. Esto puede ser comprendido utilizando un modelo de simulación, exclusivamente en la etapa de calibración, ajustando los valores de parámetros y/o condiciones de frontera; para reproducir una respuesta del acuífero observado y conocer los cálculos.

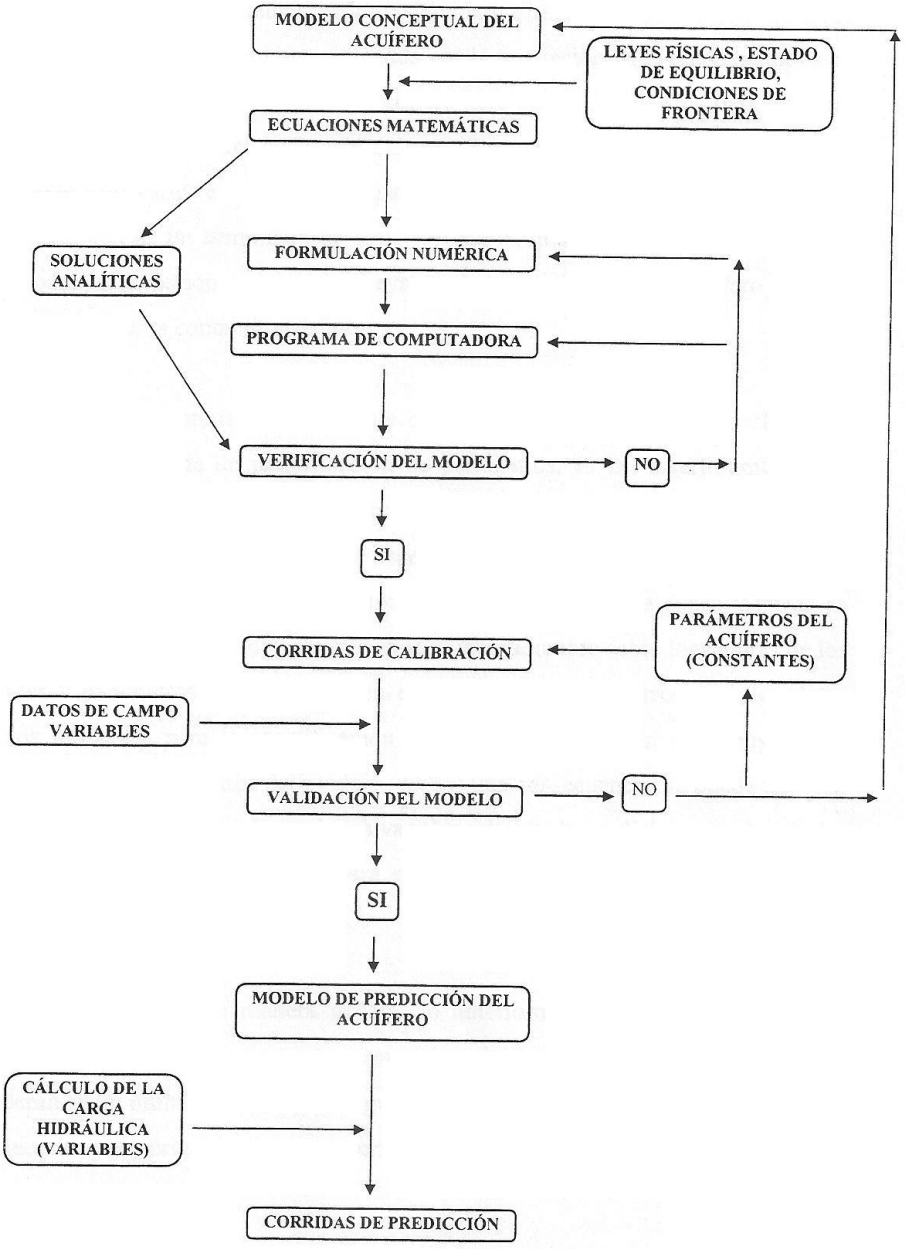


Figura 2.1 *Esquema general de la secuencia del desarrollo de un modelo de predicción.*

Hablando de los modelos de manejo, administración y dirección, éstos son básicamente los mismos modelos de predicción, originados por la asociación de algunos métodos de simulación numérica y parámetros de un acuífero heterogéneo, utilizados para explorar las alternativas de manejo del agua subterránea. Para tal fin, el modelo es ejecutado repetidamente bajo varios escenarios, asignados para obtener un objetivo particular. Tal como la obtención de un suministro de agua sostenible, drenar una área de excavación destinada para construcciones, prevenir el avance de la salinidad en un acuífero costero, controlar alguna pluma contaminante, etc.

Por otro lado, una característica importante de la modelación que está estrechamente asociada con el problema de identificación de parámetros, es la "incertidumbre". La incertidumbre sobre cualquier modelo conceptual seleccionado (o algún juego propio de suposiciones) en verdad representa lo que sucede en un sistema de acuífero real, siendo un indicador para aceptar el grado de aproximación. Por lo tanto, algunas técnicas de identificación se han desarrollado para que aquella incertidumbre sobre los valores de los coeficientes y parámetros, sea utilizada en el modelo. Posibles errores en los datos observados utilizados para la identificación de parámetros, también contribuyen a la incertidumbre en los parámetros del modelo. Como una consecuencia, se puede también esperar incertidumbre en los valores de las variables de estado predichas por el modelo; estas consideraciones tienen la forma para el desarrollo de un modelo que puede ser estocástico.

Por último, para ilustrar de manera general lo anteriormente mencionado, sobre la estructuración de un modelo, se presenta como ejemplo, los pasos en la modelación que se consideran en un problema de flujo de agua subterránea (figura 2.2.). La información que se necesita para proporcionar la descripción de un sistema real, puede incluir lo siguiente:

- la forma de la región de modelado;
- condiciones de frontera iniciales;

- la distribución de la conductividad hidráulica y almacenamiento específico de la región;
- parámetros de control del modelo.

Los parámetros de control del modelo al igual que el tamaño de la malla y los pasos de tiempo, son necesarios para la solución numérica de las ecuaciones diferenciales (modelo numérico). Estos detalles son utilizados, dando la capacidad del modelo para resolver las ecuaciones diferenciales parciales, que describen el flujo de agua subterránea. La salida del modelo es una predicción de la distribución de la carga hidráulica para la región especificada.

Cada uno de los diferentes tipos de problemas de flujo de interés (simulación de flujo subterráneo, flujo multifase, transporte de contaminantes, etc.), tendrá diferentes ecuaciones gobernantes, según las características de los fenómenos involucrados, esto está estrechamente relacionado con el comportamiento del flujo subterráneo, pues a través de este medio se hacen presentes los referidos fenómenos.

Los parámetros de control del modelo también variarán de un modelo a otro porque en general, muchas técnicas matemáticas diferentes, son disponibles para resolver una ecuación dada.

2.3 ECUACIONES GOBERNANTES DE FLUJO

Se puede decir que el producto de las investigaciones que en un inicio se realizaron a mediados del siglo XVIII, se culminaron con la creación de leyes y ecuaciones que representaban en forma matemática, el comportamiento del movimiento del flujo a través de un medio poroso. Uno de los investigadores que aportó las bases para la representación del movimiento del flujo a través de un medio poroso fue Henry Darcy en 1856; él investigó el flujo de agua en un filtro vertical de arena homogénea, de este experimento Darcy concluyó que la tasa de flujo o volumen de agua por unidad de tiempo, Q, es:

ENTRADA:

FORMA DE LA REGIÓN

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

CONDICIONES DE FRONTERA

PARÁMETROS DE CONTROL DEL MODELO

⇓

ECUACIÓN

⇓

SALIDA:

NIVELES PIEZOMÉTRICOS

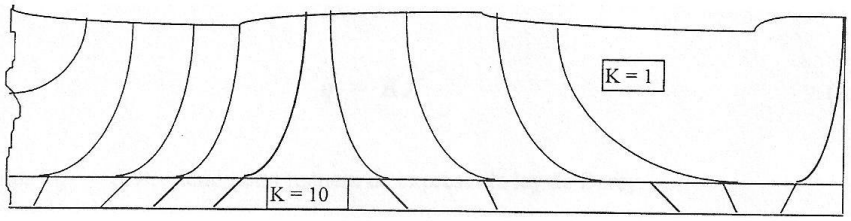


Figura. 2.2 ***Componentes del modelo:*** *datos de entrada, ecuación gobernante resuelta en el código y distribución predicha. Para este ejemplo, es la carga hidráulica.*

- proporcional al área de la sección transversal A;
- proporcional a la diferencia de las elevaciones del nivel de agua en la entrada y salida del flujo del almacenamiento del filtro $(h_1 - h_2)$;
- inversamente proporcional a la longitud del filtro, L.

Al combinar tales conclusiones da origen a la famosa fórmula o ley de Darcy enunciada como:

$$Q = KA(h_1 - h_2)/L \tag{2.1}$$

Donde K es un coeficiente de proporcionalidad (conductividad hidráulica), las longitudes h_1 y h_2 son medidas con respecto a algún sistema de referencia común. Si se asume que ϕ es la carga piezométrica definida por $\phi = z + p/\gamma$, donde z es la elevación del punto; p es la presión y γ es el peso específico del agua. La carga piezométrica expresa la suma del potencial de energía y la energía de presión por unidad de peso de agua.

La perdida de energía $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ es producida por la fricción del flujo a través de las proximidades tortuosas de los caminos en el medio poroso. Con las definiciones anteriores, se puede establecer que $(\phi_1 - \phi_2)/L$ es el gradiente hidráulico (adimensional) denotado por $\boldsymbol{J}$, además se define el caudal específico $\boldsymbol{q}$, como el volumen de agua que fluye por unidad de tiempo a través de una área de sección transversal unitaria, normal a la dirección del flujo, por lo tanto se obtiene:

$$\boldsymbol{q = KJ} \tag{2.2}$$

donde $q = Q/A$, siendo otra manera de expresar la ley de Darcy.

Es preciso mencionar que la ley de Darcy, con base a definiciones y la relación que tiene con el número de Reynolds, es válida para todos los números de Reynolds que no

excedan algún valor entre 1 y 10. La mayoría de los flujos subterráneos corresponden a este rango, excepto cuando convergen en la proximidad de grandes bombeos, pozos de recarga o en puntos de grandes saltos o salidas rápidas.

También es conveniente mencionar que la ecuación de Darcy está limitada para un flujo unidimensional de un fluido incompresible y homogéneo, pero la ecuación ha sido generalizada para flujos tridimensionales como:

$$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{KJ} = -K\,grad\phi; \quad \text{con } v = q/n \tag{2.3}$$

donde **v** es el vector velocidad con componentes v_x, v_y, v_z; $\boldsymbol{q}$ es el vector caudal específico, con componentes q_x, q_y, q_z, en las direcciones de las coordenadas cartesianas identificadas por x, y, z; respectivamente y $\boldsymbol{J} = -grad\,\phi \equiv \nabla\phi$ es el gradiente hidráulico con componentes: $J_x = -(\partial\phi/\partial x)$, $J_y = -(\partial\phi/\partial y)$, $J_z = -(\partial\phi/\partial z)$ en las direcciones x, y, z, respectivamente.

Cuando el flujo se produce a través de un medio isotrópico homogéneo, el coeficiente K es una constante escalar, entonces la ecuación 2.3 se puede escribir como:

$$\begin{aligned} q_x &= KJ_x = -K(\partial\phi/\partial x) = nv_x \\ q_y &= KJ_y = -K(\partial\phi/\partial y) = nv_y \\ q_z &= KJ_z = -K(\partial\phi/\partial z) = nv_z \end{aligned} \tag{2.4}$$

Así también, el flujo en la dirección de un vector unitario **s**, está dada por:

$$q_s = \mathbf{q}.\mathbf{s} = -K(\partial\phi/\partial s) = nv_s \tag{2.5}$$

Las ecuaciones 2.3 y 2.4 son válidas también para flujos a través de un medio no homogéneo, donde $\boldsymbol{K} = K(x,y,z)$ a lo largo de un medio que también es isotrópico.

Así también cuando el fluido es compresible, en un medio homogéneo e isotrópico, bajo condiciones isotérmicas, $\rho = \rho(p)$, entonces la carga piezométrica ϕ^* fue definida por Hubbert (1940) como:

$$\phi^* = z + \int_{p_0}^{p} dp / g\rho(p) \tag{2.6}$$

donde el término correspondiente a la integral representa la integración de la carga de presión, considerando que, la densidad ρ depende de la presión p.

Entonces, para un fluido compresible, la ecuación de movimiento está definida como:

$$\boldsymbol{q} = K\boldsymbol{J} = -K\,grad\phi^*; \quad \text{con } \boldsymbol{J} = -\nabla\phi^* \tag{2.7}$$

Referente al flujo a través de un medio poroso "**anisotrópico**", es preciso mencionar las siguientes definiciones (Bear y Verruijt, 1987):

Un dominio con un medio poroso se dice que es homogéneo con respecto a su permeabilidad, si esta última es la misma en todos los puntos. En otro caso, se dice que el dominio es heterogéneo. Si la permeabilidad considerada en un punto es independiente de la dirección, entonces se dice que el medio es isotrópico en ese punto. En otro caso se dice que el medio poroso es anisotrópico. Las definiciones son similarmente aplicables para otras propiedades del medio poroso de los acuíferos, tales como la conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc.

Por otra parte, cuando se quiere representar la ecuación de Darcy para un medio poroso "anisotrópico y homogéneo" en la ecuación 2.4, ésta toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned} q_x &= K_{xx} J_x + K_{xy} J_y + K_{xz} J_z \\ q_y &= K_{yx} J_x + K_{yy} J_y + K_{yz} J_z \\ q_z &= K_{zx} J_x + K_{zy} J_y + K_{zz} J_z \end{aligned} \tag{2.8}$$

donde q_x, q_y, q_z, son las componentes en las direcciones x, y, z respectivamente, del vector caudal específico $\boldsymbol{q}$; J_x, J_y, J_z, son los componentes del vector gradiente hidráulico $\boldsymbol{J}$; así también K_{xx}, K_{xy}, ..., K_{zz}, son nueve coeficientes constantes.

Si se tratara de un medio poroso anisotrópico y no homogéneo, los referidos coeficientes K_{xx}, K_{xy}, ..., K_{zz}, pueden variar en el espacio.

La ecuación 2.8 se puede expresar en una forma más compacta como:

$$q_i = K_{ij} J_i \; ; \quad \boldsymbol{q} = \boldsymbol{K}\,\boldsymbol{J}$$

$$q_i = - K_{ij} (\partial\phi/\partial x_i) \; ; \quad \boldsymbol{q} = -\boldsymbol{K}\,\nabla\phi \tag{2.9}$$

donde los subíndices i, j; permanecen para X_i, X_j respectivamente, con $X_1 = X$, $X_2 = Y$, $X_3 = Z$; en la ecuación 2.9 se ha empleado la convención de doble índice.

Las ecuaciones básicas que gobiernan el flujo de agua, no son suficientes para resolver problemas de flujo, por lo que la ecuación 2.3 es una sola ecuación con dos variables dependientes: $\boldsymbol{q}\ (x,y,z,t)$ y $\phi\ (x,y,z,t)$, esto también se convierte en un sistema de tres ecuaciones con cuatro incógnitas ϕ, $\boldsymbol{q}_x$, $\boldsymbol{q}_y$, $\boldsymbol{q}_z$. Esto conduce a requerir una ecuación adicional con el fin de obtener una descripción completa de un flujo dentro de un dominio determinado. Lo mismo sucede con otras ecuaciones definidas (Bear y Verruijt, pp. 44-51, 1987), donde la ley básica adicional a la que se tiene que recurrir es la de "Conservación de Masa" o "Balance de Masa".

2.3.1 ECUACIÓN BÁSICA DE BALANCE

La deducción de esta ecuación requiere de la consideración de un volumen de control con forma de paralelepípedo rectangular de dimensiones δx, δy, δz, centrado en algún punto $P(x,y,z)$ y en el interior, el dominio del flujo en un acuífero, como se muestra en la figura 2.3.

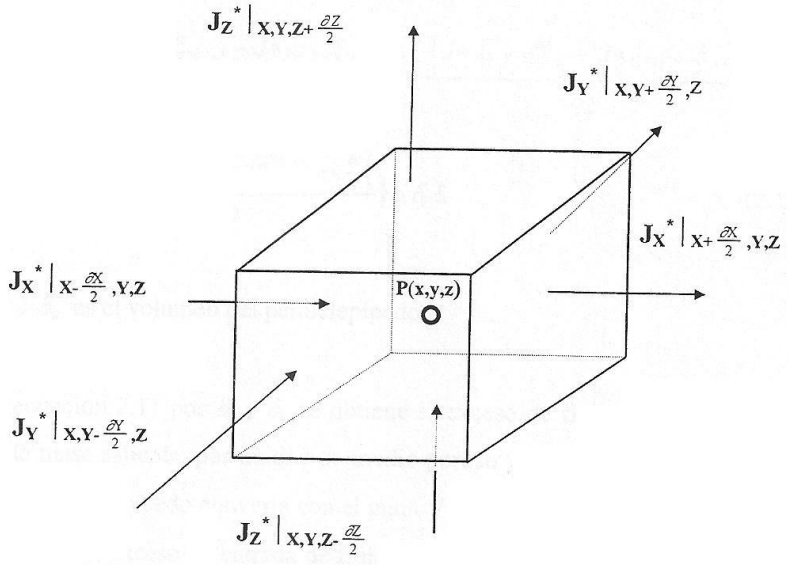


Figura 2.3 ***Nomenclatura del volumen de control para la conservación de masa.***

Sea el vector $J^* = \rho q$ el que denota el flujo de masa de agua de densidad ρ en un punto $P(x,y,z)$ referida a la notación de la figura 2.3; el exceso de entrada de flujo sobre la salida de flujo de masa durante un intervalo corto de tiempo δt, a través de las superficies, las cuales son perpendiculares a la dirección x, puede ser expresada por la diferencia:

$$\delta t \{J^*_x|_{x-(\delta x/2),\,y,\,z} - J^*_x|_{x+(\delta x/2),\,y,\,z}\}\delta_y\,\delta_z \tag{2.10}$$

Expresiones similares pueden ser escritas en forma análoga, para las direcciones *y, z;* respectivamente Sumando las tres expresiones para el total de las tres direcciones, se obtiene una expresión para el exceso total de flujo de masa entrante sobre el flujo de masa saliente, durante el intervalo de tiempo δt.

Es decir:

$$\delta t\left\{\frac{\left\{J^*x\left|_{x-\frac{\delta x}{2},y,z}-J^*x\right|_{x+\frac{\delta x}{2},y,z}\right\}}{\delta x}+\frac{\left\{J^*y\left|_{x,y-\frac{\delta y}{2},z}-J^*y\right|_{x,y+\frac{\delta x}{2},z}\right\}}{\delta \mathrm{y}}+\right.$$
$$\left.+\frac{\left\{J^*z\left|_{x,y,z-\frac{\delta z}{2}}-J^*z\right|_{x,y,z+\frac{\delta z}{2}}\right\}}{\delta z}\right\}\delta_x\delta_y\delta_z \tag{2.11}$$

donde $\delta_x\,\delta_y\,\delta_z = \delta_u$ es el volumen del paralelepípedo.

Dividiendo la ecuación 2.11 por δ_u y δ_t, se obtiene el exceso de flujo de masa entrante sobre el flujo de masa saliente, por unidad de medio poroso y por unidad de tiempo. Si es posible que el paralelepípedo converja con el punto *P*, permitiendo así también que δ_x, δ_y, δ_z, $\rightarrow 0$, entonces el exceso de entrada de flujo sobre la salida de flujo, por unidad de volumen medio (alrededor de *P*) y por unidad de tiempo, se convierte en:

$$-\left(\frac{\partial J^*_x}{\partial x}+\frac{\partial J^*_y}{\partial y}+\frac{\partial J^*_z}{\partial z}\right) \quad \text{o} \quad -divJ \quad (\equiv -\nabla . J^*) \tag{2.12}$$

Tomando en cuenta que $\frac{\partial\,\eta\rho}{\partial\,t}$ expresa el incremento en la masa de agua por unidad de volumen de medio poroso y por unidad de tiempo, se puede escribir el balance completo como:

$$- \nabla \cdot \rho \boldsymbol{q} = \frac{\partial \eta \rho}{\partial t} \tag{2.13}$$

Para un fluido incompresible y homogéneo en un medio poroso no deformable (o para un flujo permanente de un fluido homogéneo), $\nabla \rho = 0$; $(\partial \eta \rho / \partial t) = 0$, por lo que la ecuación 2.13 se reduce a:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{q} = 0 \tag{2.14}$$

Si los sumideros distribuidos de intensidad $P_w = (x, y, z, t)$ (volumen de agua, extracciones por volumen unitario de medio poroso y por unidad de tiempo), están presentes en el dominio del flujo, entonces se puede modificar la ecuación 2.13 en la forma:

$$- \nabla \cdot \rho \boldsymbol{q} - \sum_{(i)} \rho P'_w(x,y,z.t) \cdot \delta(x - x_i, y - y_i, z - z_i) = \frac{\partial \eta \rho}{\partial t} \tag{2.15}$$

Donde: P'_w, es el caudal del sumidero ($L^3 \cdot T^{-1}$) localizados en un punto (x_i, y_i, z_i) y δ es la función "Delta Dirac". Es preciso mencionar que el desarrollo de las ecuaciones de balance, son desde el punto de vista "Euleriano", es decir, tomando en cuenta lo que sucede en un punto fijo en su vecindad (Bear y Verruijt, 1987).

2.3.2 FORMAS ADICIONALES DE LA ECUACIÓN DE BALANCE DE MASA

Por consideraciones de simplicidad se omitirán los términos que expresan las fuentes o sumideros, presentes en el dominio del flujo. Ello puede ser adicionado cuando sea necesario, también se continuará suponiendo que ρ no es afectado por cambios en la concentración de un soluto, este efecto también puede ser adicionado cuando sea necesario, haciendo uso de la ecuación:

$$\eta\frac{\partial \rho}{\partial t} = \eta\frac{\partial \rho}{\partial p}\frac{\partial p}{\partial t} + \eta\frac{\partial \rho}{\partial c}\frac{\partial c}{\partial t} = \eta\rho\beta\frac{\partial p}{\partial t} + \eta\rho\beta_c\frac{\partial c}{\partial t} \qquad (2.16)$$

donde:

$\beta_c = \frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial t}|_{p,T}$ es un coeficiente que introduce el efecto de la concentración para cierta temperatura T constante (Bear y Verruijt; pp. 57, 1987).

c = la concentración de un soluto y

η = porosidad del medio.

Si se reescribe la ecuación 2.10 en términos de un caudal específico relativo $\boldsymbol{q_r}$ y la velocidad de los sólidos $\boldsymbol{v}$, en la forma:

$$\nabla\cdot\rho(\boldsymbol{q_r} + \eta\boldsymbol{v_s}) + \rho\{\eta\beta + (1-\eta)\alpha\}\frac{\partial P}{\partial t} = 0 \qquad (2.17)$$

donde se ha tomado en cuenta que $\boldsymbol{q}_r$ es un caudal específico relativo del flujo respecto del soluto, además:

$$\rho\frac{\partial \eta}{\partial t} = \rho\frac{\partial \eta}{\partial p}\frac{\partial p}{\partial t} = \rho(1-\eta)\alpha\frac{\partial p}{\partial t}$$

o bien;

$$\nabla\rho\boldsymbol{q_r} + \rho\eta\nabla\cdot\boldsymbol{v_s} + \eta\boldsymbol{v_s}\cdot\nabla\rho + \rho\boldsymbol{v_s}\cdot\nabla\eta + \rho\{\eta\beta + (1-\eta)\alpha\}\frac{\partial p}{\partial t} = 0\,;$$

(según Bear y Verruijt; pp´59, 1987).

con $\nabla\boldsymbol{v_s}$ definida como $(\partial\,{}^5E_b/\partial\,t)$, $E_b = \nabla\boldsymbol{w}$;

además, α está definida como:

$$\frac{1}{1-n}\frac{\partial \eta}{\partial p},$$

entonces la ecuación 2.17 se convierte en:

$$\nabla \cdot \rho \boldsymbol{q}_r + \rho(\alpha+\eta\beta)\frac{\partial^5 (p)}{\partial t} = 0;$$

$$\frac{\partial (p)}{\partial t} = \frac{\partial (p)}{\partial t} + v_s \bullet \nabla (p) \tag{2.18}$$

considerando que $\left|\frac{\partial p}{\partial t}\right| >> |v_s \cdot \nabla p|$ se obtiene:

$$\nabla \rho \boldsymbol{q}_r + \rho(\alpha+\eta\beta)\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \tag{2.19}$$

Para $\left|\eta\frac{\partial p}{\partial t}\right| >> |q_r \bullet \nabla \rho|$ se determina la expresión:

$$\nabla \boldsymbol{q}_r + (\alpha+\eta\beta)\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \tag{2.20}$$

otra forma de expresar esta ecuación es:

$$\nabla \boldsymbol{q}_r + \rho g\,(\alpha+\eta\beta)\frac{\partial \phi^*}{\partial t} = 0 \tag{2.21}$$

Si en este punto se introduce la definición de almacenamiento específico S_o, el cual se define como $S_o = \rho g\,(\alpha+\eta\beta)$ y considerando que esta definición está basada sobre la

suposición de que no hay cambio en el esfuerzo total, es decir $d\sigma = 0$, y que rige la ecuación:

$$\frac{\partial(\eta\rho)}{\partial t} = \rho\{\eta\beta + (1-\eta)\alpha\}\frac{\partial p}{\partial t} \tag{2.22}$$

Con el almacenamiento específico como se estableció anteriormente, se puede ahora escribir la ecuación 2.20 en la forma:

$$\nabla\rho\,\boldsymbol{q_r} + \rho S_o\frac{\partial \phi^*}{\partial t} = 0 \tag{2.23}$$

Así también la ecuación 2.21 se expresa como:

$$\nabla\boldsymbol{q_r} + S_o\ \ \frac{\partial \phi^*}{\partial t} = 0 \tag{2.24}$$

En el caso de existir una fuente, $\boldsymbol{I} = I(\boldsymbol{x},t)$, (un volumen adicional por unidad de volumen de medio poroso y por unidad de tiempo) entonces la ecuación 2.24 se convierte en:

$$-\nabla\boldsymbol{q_r} + \boldsymbol{I} = S_o\frac{\partial \phi^*}{\partial t} \tag{2.25}$$

Se ha definido también S_o, como el volumen de agua adicional almacenado, por unidad de volumen de medio poroso, por unidad de levantamiento de carga piezométrica bajo condiciones equivalentes que son determinadas por una prueba no drenada. Con tales suposiciones y la definición de S_o, la ecuación 2.19 se convierte en:

$$\nabla\rho\frac{K}{\mu}(\nabla p + \rho g\nabla z) = \frac{S_o}{g}\frac{\partial p}{\partial t} \tag{2.26}$$

o bien si $\rho = \rho(p)$ solamente se obtiene:

$$\nabla(\rho \boldsymbol{K} \cdot \nabla \phi^*) = \rho S_o \frac{\partial \phi^*}{\partial t} \tag{2.27}$$

esta ecuación se puede aún simplificar más, suponiendo que:

- la conductividad hidráulica $\boldsymbol{K}$, es prácticamente independiente de los cambios de presión, considerando $\rho = \rho(p)$;
- S_0 definida como $S_o = \rho g(\alpha+\eta\beta)$ y $\boldsymbol{K}$, normalmente no son afectadas por variaciones en la porosidad η, considerando que se tiene supuesto un medio poroso deformable;
- $|q_r \nabla \rho| << \left|\eta \frac{\partial \rho}{\partial t}\right|$ tal que $\nabla \rho \boldsymbol{q}_r \cong \rho \nabla \boldsymbol{q}_r$, es decir, se supone que las variaciones espaciales de ρ son muy pequeñas respecto a la local y las temporales;

Bajo estas suposiciones la ecuación 2.27 se reduce a:

$$\nabla\{\boldsymbol{K} \nabla \phi^*\} = S_o \frac{\partial \phi^*}{\partial t} \tag{2.28}$$

la cual es una ecuación única con una sola variable $\phi^* = \phi^* (x,y,z,t)$ cuando ϕ^* es reemplazada por ϕ en la ecuación 2.28. Con base en lo anterior se pueden establecer las siguientes opciones:

- para un medio poroso isotrópico homogéneo, la ecuación 2.28 se reduce a:

$$\boldsymbol{K} \nabla^2 \phi^* = S_o \frac{\partial \phi^*}{\partial t} \tag{2.29}$$

En coordenadas cartesianas la ecuación 2.29 toma la forma siguiente:

$$K\left\{\frac{\partial^2 \phi^*}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \phi^*}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \phi^*}{\partial z^2}\right\}=S_0\frac{\partial \phi^*}{\partial t} \tag{2.30}$$

- para un medio poroso isotrópico y no homogéneo, la ecuación 2.28 se convierte en coordenadas cartesianas en:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K\frac{\partial \phi^*}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K\frac{\partial \phi^*}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial \phi^*}{\partial z}\right)=S_o\frac{\partial \phi^*}{\partial t} \tag{2.31}$$

- para un medio anisotrópico y no homogéneo, donde los ejes principales están en las direcciones *x, y, z,* la ecuación 2.28 se transforma en:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial \phi^*}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial \phi^*}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial \phi^*}{\partial z}\right)=S_o\frac{\partial \phi^*}{\partial t} \tag{2.32}$$

Obviamente en las ecuaciones 2.31 y 2.32, la función $\boldsymbol{K} = K(x,y,z)$ debe ser continua y ser continua en la primera derivada para cualquier dominio de flujo considerado.

Por ultimo, si el flujo es permanente y/o donde ambos, matriz de agua y de sólidos son supuestos incompresibles, el lado derecho de la ecuación 2.28 a través de la ecuación 2.32 desaparece.

Por ejemplo, la ecuación 2.29 se puede simplificar a una ecuación conocida como "ecuación de Laplace", enunciada como:

$$\nabla^2\phi^* = \left(\frac{\partial^2 \phi^*}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \phi^*}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \phi^*}{\partial z^2}\right)=0 \tag{2.33}$$

Para un medio isotrópico y homogéneo, la ecuación de Laplace se puede obtener de la ecuación 2.14 suponiendo que $\boldsymbol{q} \approx \boldsymbol{q}_r$.

Bajo las mismas condiciones de $\alpha = \beta = 0$, la ecuación 2.20 se reduce a:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{q}_r = 0 \tag{2.34}$$

este es el caso cuando $\rho=\rho(c)$, es decir, para el estado del flujo en el cual la densidad ρ depende de la presión p, la concentración de varios componentes c y de la temperatura absoluta T, $\rho = \rho(p,c,T)$, es reducida a $\rho = \rho(c)$.

Ahora, si se introduce la ley de Darcy como $\boldsymbol{q}_r = -\frac{K}{\mu}(\nabla\rho + \rho g \nabla z)$ en la ecuación 2.34 (Bear y Verruijt; pp. 41, 1987), se obtiene:

$$\nabla \frac{K}{\mu}(\nabla p + \rho g \nabla z) = 0 \tag{2.35}$$

o bien:

$$\nabla\left(\frac{K}{\mu}\nabla p\right) = -\frac{\partial}{\partial z}\frac{K\gamma}{\mu} \tag{2.36}$$

en donde el lado derecho de la ecuación, juega un papel de una fuente distribuida (Josselin de Jong, 1969).

Hasta aquí se ha presentado las ecuaciones que gobiernan el movimiento del flujo subterráneo, sujeto a las diferentes características del medio poroso, considerado en parte como dominio del mismo flujo. La aplicación mediante la formulación de un modelo matemático y la solución de las ecuaciones de referencia, será presentado en los

próximos capítulos de la presente investigación, no sin antes mencionar que existen más tipos de ecuaciones que gobiernan el flujo en acuíferos, dependiendo del tipo de dominio, por ejemplo; en acuíferos fracturados, la ecuación gobernante del comportamiento del flujo, es diferente a las presentadas con anterioridad y de la cual, no se hace una más detallada presentación por estar fuera del contexto del presente trabajo.

CAPÍTULO III

LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DE FLUJO SUBTERRÁNEO

3.1 SOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES QUE RIGEN EL FLUJO EN ACUÍFEROS

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, posteriormente a la estructuración de un modelo matemático, se procede a plantear el modelo numérico, implicando con esto realizar la tarea de resolver las ecuaciones gobernantes de flujo según las condiciones de modelación. En el caso particular de este trabajo, se hace referencia a la presentación de la solución de la ecuación de flujo obtenida en el capítulo anterior, tomando en cuenta la variedad de técnicas y métodos numéricos que al aplicarse, proporcionen la solución de las ecuaciones gobernantes.

3.1.1 SOLUCIONES ANALÍTICAS DE LAS ECUACIONES QUE RIGEN EL FLUJO EN ACUÍFEROS

Normalmente en todos los modelos matemáticos creados para simular, estudiar o predecir el comportamiento de un acuífero, se tiene la posibilidad de encontrar una solución analítica de las ecuaciones que representan el fenómeno bajo estudio. En verdad, una variedad de técnicas numéricas y analíticas pueden ser aplicadas para

resolver las ecuaciones involucradas en cada modelo, por ejemplo, en lo que respecta a las técnicas analíticas, éstas son comúnmente utilizadas para las ecuaciones generales de: **"flujo subterráneo", "transporte de solutos" y "transporte de calor".** En este caso particular, se presenta solamente lo referente a la ecuación de flujo, pues, es la que tiene vinculación directa con el desarrollo del presente trabajo.

a) ECUACIÓN DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

La ecuación de flujo enunciada oportunamente en el capítulo anterior, comúnmente se expresa como:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{K} \cdot \nabla h + R = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \tag{3.1}$$

la cual describe el flujo de agua subterránea en un estado no permanente y tridimensional; donde:

- h = carga hidráulica;
- $\boldsymbol{K}$ = tensor de conductividad hidráulica;
- R = fuente general, sumidero o pozo, en términos de volumen de agua inyectada, por unidad de volumen de acuífero por unidad de tiempo;
- S_S = almacenamiento específico;
- ∇ = operador diferencial.

En problemas generales, $\boldsymbol{K}$, S_S, y R; pueden variar de un punto a otro dentro del acuífero (son funciones de las coordenadas espaciales utilizadas).

La ecuación (3.1) es conocida como ecuación de tipo "difusión", y es derivada mediante la combinación de las ecuaciones de "**conservación de masa**" (balance de flujo) y "**conservación de momento**" (ley de Darcy) (Mercer y Faust, 1981).

En una forma más explícita la ecuación 3.1 se puede escribir como:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)+R=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \tag{3.2}$$

Durante el desarrollo de esta ecuación, se asume que las principales componentes del tensor de conductividad hidráulica, son colineales con el sistema de coordenadas cartesianas. Cuando es necesario considerar el efecto de otros procesos, tales como transporte de solutos de densidad variable o transporte de calor, en el flujo de agua subterránea; una forma más general de la ecuación (3.1) en términos de la presión, es (Bredehoeft y Pinder, 1973):

$$\nabla\frac{\rho K}{\mu}\left(\nabla p+\rho g\nabla z\right)+\rho R=\frac{\partial\left(\phi\rho\right)}{\partial t} \tag{3.3}$$

En esta ecuación, ρ es la densidad del agua; g es la constante gravitacional, μ es la viscosidad dinámica, K es el tensor de permeabilidad intrínseca y ϕ, es la porosidad (adimensional). En general ρ, μ, R y ϕ pueden depender de la presión del fluido p, así también, de la concentración de materiales disueltos y la temperatura del fluido. Por lo tanto, la presión y la carga hidráulica se describe como (Hubbert, 1940)

$$h=z+\int_{p_0}^{p}\frac{dp}{g\rho} \tag{3.4}$$

donde z es la elevación sobre alguna referencia y p_0 es la presión de referencia (normalmente la atmosférica).

Comúnmente, en la solución de las ecuaciones diferenciales que se generan de la ecuación general de flujo subterráneo, se tendrán soluciones analíticas únicas (exactas), dependiendo de la formulación de las condiciones de frontera e iniciales.

3.1.2 CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA

Con la finalidad de obtener una solución única de una ecuación diferencial parcial, correspondiente a un proceso físico determinado, es necesario adicionar información sobre el estado físico del proceso, esta información es descrita por las "condiciones de frontera" e "iniciales". Para problemas de estado permanente, solamente las condiciones de frontera son requeridas, no así para problemas que involucran un estado transitorio, donde es necesario establecer tanto las condiciones iniciales como de frontera. Matemáticamente, las condiciones de frontera incluyen la geometría de la frontera y los valores de la variable dependiente, o su derivada normal para la frontera. En términos físicos, para aplicaciones de flujo subterráneo, las condiciones de frontera son generalmente de tres tipos:

- ***De valor especificado,*** incluyen los valores de carga, concentración o temperatura, que se especifica a lo largo de la frontera (en términos matemáticos esto es conocido como la **"condición de Dirichlet"**).

- ***De flujo especificado,*** comprende las tasas de flujo, concentración o temperatura especificada a lo largo de la frontera así como la derivada normal correspondiente. Por ejemplo, la tasa de flujo en volumen, por unidad de área de agua en un medio isotrópico determinado por:

$$q_n = -K\frac{\partial h}{\partial n} \tag{3.5}$$

donde el subíndice n se refiere a la dirección normal a la frontera. Una frontera sin flujo (impermeable) es un caso especial de este tipo, en el cual $q_n = 0$ (donde la derivada especificada sobre la frontera, es llamada una **"condición de Neumann"**).

- ***Flujo y valor especificado,*** es involucrado cuando el valor de la carga, concentración o temperatura, dependiendo de la ecuación, considera la tasa de flujo relacionada con la derivada normal y el valor. Por ejemplo, la tasa de flujo en volumen por unidad de área de agua, relacionada con la derivada normal de la carga y la carga misma por:

$$-K\frac{\partial h}{\partial n} = q_n(h_b) \qquad (3.6)$$

donde q_n es alguna función que describe la tasa de flujo en la frontera, disponiendo de una carga en la frontera h_b.

Referente a las condiciones iniciales, éstas son simplemente valores de la variable dependiente, especificada en todas partes del interior de la frontera. Por ejemplo, en un acuífero confinado para el cual, las ecuaciones son lineales; hay necesidad de imponer un sistema de flujo natural, desde que los abatimientos calculados puedan ser superpuestos sobre el sistema de flujo en referencia. En este caso, la condición inicial es el abatimiento (la variable dependiente) igual a cero en todos los lados.

Existen otras variables de la ecuación general de flujo subterráneo (Mercer y Faust, 1981), en las cuales se hacen presentes algunas suposiciones simplificatorias, que implican la deducción de ecuaciones diferenciales parciales lineales y no lineales, donde la solución analítica depende fundamentalmente, de las condiciones iniciales y de frontera establecidas.

3.2 MÉTODOS NUMÉRICOS

De la variedad existente de métodos numéricos, entre los de mayor aceptación se pueden mencionar: **"El método de diferencias finitas, método del elemento finito y método de elementos de frontera ".** En general, estos métodos numéricos consisten en ciertos procedimientos a través de los cuales, las ecuaciones diferenciales parciales son reemplazadas por una ecuación algebraica, o un sistema de ecuaciones algebraicas; que

corresponden a la obtención de un sistema de ecuaciones lineales, las cuales al resolverse, ya sea; a través de métodos directos o iterativos, permiten obtener la solución que corresponde al proceso que se representa en las ecuaciones establecidas.

Particularmente, los métodos de diferencias finitas y del elemento finito, son las mejores técnicas numéricas utilizadas en aplicaciones relacionadas con el agua subterránea. En forma condensada, en la figura 3.1 se ilustran los componentes y pasos importantes en el desarrollo de un modelo, utilizando las dos técnicas numéricas referidas.

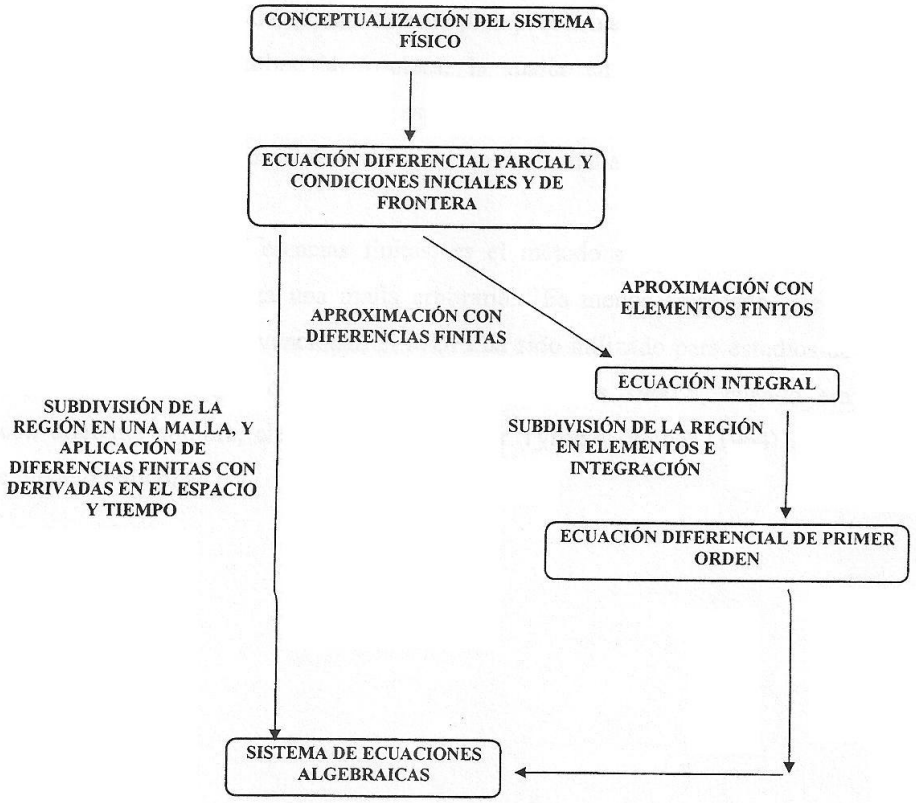


Figura 3.1. Desarrollo de un modelo generalizado por los métodos de diferencias finitas y elemento finito

ecuación diferencial parcial, es necesario establecer inicialmente una malla con base a la región de interés, para un caso bidimensional o problemas de superficie, se sobrepone un sistema de malla sobre un mapa del acuífero. Para tal situación, existen dos tipos de mallas, "red centrada" y "bloque centrado"; la figura 3.2 muestra estas opciones. Asociados con las mallas están los puntos nodales, los cuales representan la posición en la cual, la solución para los valores desconocidos (carga hidráulica por ejemplo) es obtenida.

La elección del tipo de malla para su uso, depende en gran medida de las condiciones de frontera. La malla de red centrada, es conveniente para problemas donde los valores de la carga, son especificados sobre la frontera, la malla en bloque centrado es recomendable en problemas donde el flujo es especificado dentro de la frontera. Desde un punto de vista práctico, la diferencia entre los dos tipos de malla es menor.

Una variante del método de diferencias finitas, es el método de diferencias finitas integradas (MDFI), el cual utiliza una malla arbitraria. Es menos empleado que el método de diferencias finitas convencional, el MDFI ha sido utilizado para estudios de problemas de agua subterránea desde principios de los años 1960'S, cuando era conocido con diferente nombre, siendo introducido por Tyson y Weber (1964) como "técnica de modelo poligonal".

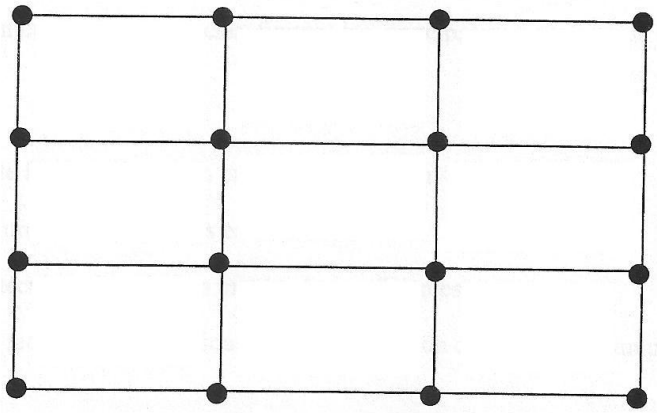


Figura 3.2 a. Esquema de diferencias finitas en red centrada

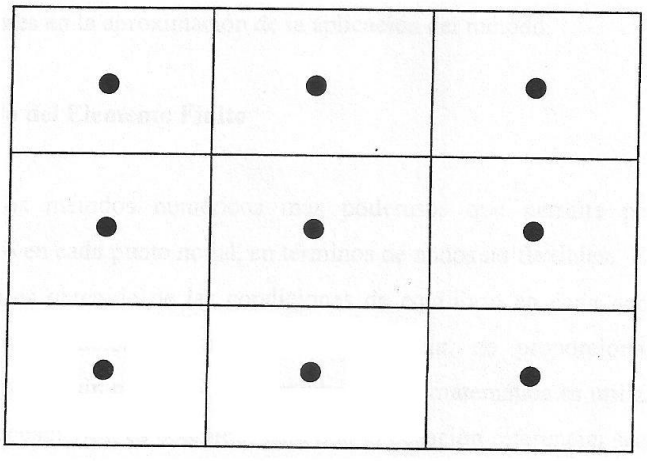


Figura 3.2 b. Esquema de diferencias finitas en bloque centrado

Como sucede con la mayoría de los métodos numéricos existentes, poseen ventajas que los hacen bastante utilizables, pero también tienen limitaciones y desventajas que deben tenerse siempre en consideración, para las condiciones de aplicación requeridas. Respecto al método de diferencias finitas, las principales ventajas que presenta este método son:

- es de fácil comprensión presentando también bases intuitivas;
- la introducción de datos es sencilla;
- las técnicas de solución matricial son eficientes;
- hay facilidad y versatilidad para la realización de cambios en un programa.

Referente a las desventajas o limitantes del método, éstas son las siguientes:

- para algunos problemas de aplicación tiene poca exactitud;
- debido a que la discretización espacial está constituida por mallas regulares, en problemas con la presencia de dominios con fronteras físicas irregulares, se aprecia la falta de ajuste de la malla al dominio, lo que provoca una fuente de errores en la aproximación de la aplicación del método.

b).- Método del Elemento Finito

Es uno de los métodos numéricos más poderosos que permite proporcionar el desplazamiento en cada punto nodal, en términos de nodos no flexibles. El sistema final de ecuaciones es obtenido de las condiciones de equilibrio en cada nodo. La forma usual de la presentación del método en referencia, no proporciona tal cual un razonamiento físico, sin embargo; una argumentación matemática es utilizada en la cual el sistema de ecuaciones, es obtenido, para que la ecuación diferencial sea satisfecha en forma aproximada, utilizando ciertas funciones de peso.

Al respecto, un bosquejo acerca del método de residuos pesados (MWR) puede ser presentado de la siguiente manera:

Considérese una ecuación diferencial escrita utilizando un operador general denotado como;

$$Lu(x) = f(x), \quad x \in \Omega \tag{3.9}$$

donde L es un operador diferencial [e.g., $L = D(d^2/dx^2) - V(d/dx)$; $L = \delta^2/\delta x^2 + \delta^2/\delta y^2 + \delta^2/\delta z^2$], $u(x)$ es la incógnita solución de interés, $f(x)$ es una función forzada conocida, Ω denota el dominio sobre el cual la ecuación diferencial es aplicada, $\delta\Omega$ es la frontera de Ω, así también, el número y tipo de condiciones de frontera que son especificadas a lo largo de $\partial\Omega$. Los procedimientos del método de residuos pesados (**MWR**) inician con la elección de una función de espacio finito-dimensional S_N , y una solución aproximada para la ecuación 3.9 se puede estimar. Este espacio es llamado *espacio verdadero.* Como se comento anteriormente, para S_N N-dimensional, con funciones base $\{\phi_1(x), \phi_2(x), \ldots, \phi_N(x)\}$, la solución aproximada puede ser algunas veces expresada como:

$$U(x) = \sum_{j=1}^{N} \gamma_j \phi_j(x) \tag{3.10}$$

La función $U(x)$ es llamada la función verdadera. La determinación de N escalares γ_j, para $j = 1, 2, \ldots, N$, es el objetivo del método referido (**MWR**).

El método de residuos pesados intenta minimizar la cantidad para el cual $U(x)$, falla al satisfacer la ecuación gobernante original. Una medida de esta falla puede ser definida por:

$$R(x) \equiv LU(x) - f(x) \tag{3.11}$$

donde $R(x)$ es llamado el residual. Considerando el problema original definido para la ecuación diferencial $Lu = f$, y sus condiciones de frontera asociadas con una buena ubicación. Entonces existe una única solución $u(x)$, la cual generalmente reside en un espacio infinito-dimensional. Cuando U pertenece a un espacio finito-dimensional, este es el caso en el que $U(x) \neq u(x)$ y por lo tanto, $R(x) \neq 0$. El método de residuos pesados intenta minimizar $R(x)$ con el forzamiento hasta cero, del promedio pesado en el sentido de la entrada del dominio. Matemáticamente esto es expresado como:

$$\int_{\Omega} R(\mathbf{x})\, w_i(\mathbf{x})\, d\mathbf{x} = 0 \tag{3.12}$$

donde $w_i(x)$ es un miembro de un juego de pesos, funciones o pruebas, $\{w_i(\mathbf{x})\}_{i=1}^{M}$. El número de funciones de peso M, está relacionado con N (número de coeficientes indeterminados γ_j) y el número además de su tipo, de condiciones de frontera especificadas, como se ilustró en párrafos anteriores.

Diferentes elecciones de funciones de peso conduce a diferentes aproximaciones del método de residuos pesados (**MWR**), a partir de que una función $w_i(x)$ es especificada, las integraciones en la ecuación 3.12 pueden ser realizadas en conjunción con las ecuaciones, 3.10 y 3.11, para producir una ecuación algebraica en términos de los coeficientes γ_j.

Para aplicar el **MWR**, deben hacerse dos elecciones, la primera es elegir un espacio verdadero S_N, con definición concomitante de funciones base $\{\phi_1, ..., \phi_N\}$. La segunda es la elección de una función de peso o prueba $\{w_i(x)\}$, cada una de estas elecciones son importantes, por lo que, las dos elecciones anteriores no son independientes.

De manera general, el sistema de ecuaciones obtenido en el método del elemento finito, tiene la misma estructura que el método de diferencias finitas. Realmente los dos métodos son muy similares y, para ciertos problemas, se ha demostrado que pueden ser considerados como dos representaciones del mismo modelo. Sin embargo, la forma usual de la derivación y desarrollo de las ecuaciones, introducen ciertas diferencias.

El método del elemento finito en su forma estándar, es algunas veces más flexible que el método estándar de diferencias finitas, esto explica su aceptación. Debe hacerse notar que sin embargo, las variantes que existen para el método de diferencias finitas, son muy similares para el método del elemento finito (e.g., Integrated Finite Differences, Narasimham y Witherspoon, 1976) pero, los dos métodos pueden ser considerados más o menos equivalentes. Sin embargo el método a ser utilizado para un problema determinado, puede ser definido por las características del problema, consideraciones y conveniencias para el desarrollo de un programa, disponibilidad y costo; así también el nivel de experiencia del usuario.

La forma de los elementos utilizados en el método del elemento finito, es diferente de dimensión a dimensión, por ejemplo, en el caso unidimensional; los elementos de la malla son líneas o barras (figura 3.3 a), para el bidimensional son triángulos o cuadriláteros (figura 3.3.b) y cuando es tridimensional, los elementos son tetraedros o prismas (figura 3.3.c).

Al igual que el método de diferencias finitas, el método del elemento finito presenta ventajas y desventajas, las cuales son las siguientes:

Ventajas:

- permite manejar geometrías en la malla de modelado con mayor flexibilidad, esto debido a la forma de los elementos de la malla que puede manejar;
- incluye sin ningún problema una alta aproximación;
- presenta una buena evaluación de los términos que representan los productos cruzados.

Desventajas:

- se requieren bases matemáticas avanzadas;
- no es fácil la introducción de datos;
- es complicada la etapa de programación.

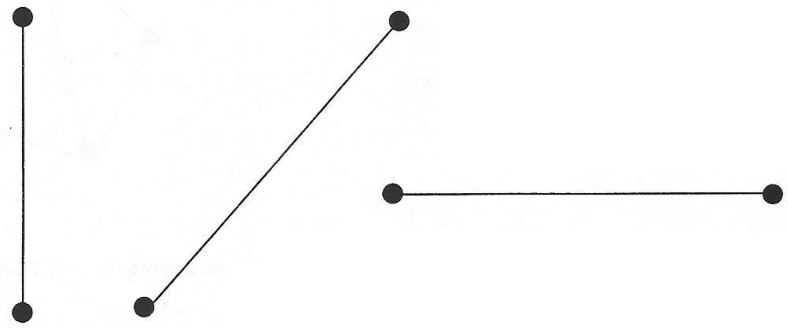


Figura 3.3.a. Esquema del elemento finito para el caso unidimensional

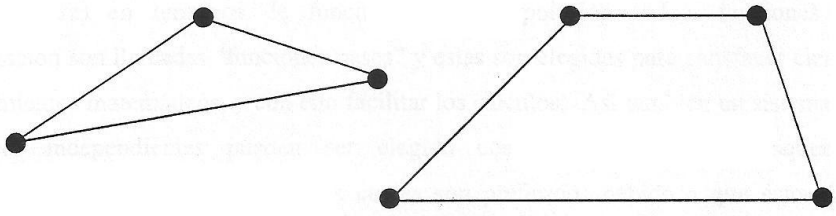


Figura 3.3.b. Esquema del elemento finito para el caso bidimensional

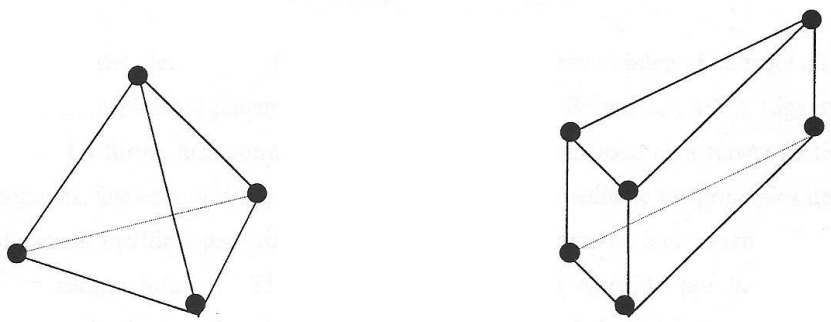


Figura 3.3.c. Esquema del elemento finito para el caso tridimensional

El primer paso en la aplicación del método del elemento finito, consiste en derivar una representación integral de una ecuación diferencial parcial, esto va acompañado por varios métodos, dos de los más populares son: "método de residuos pesados" (anteriormente comentado) y "método variacional". Para el primer método, ver por ejemplo a Finlayson (1972), Celia y Gray (1992) y respecto al segundo método, consultar a Zienkiewicz (1971).

El siguiente paso consiste en aproximar las variables dependientes (carga, concentración o temperatura) en términos de funciones de interpolación. Las funciones de interpolación son llamadas "funciones bases" y estas son elegidas para satisfacer ciertos requerimientos matemáticos, y con ello facilitar los cálculos. Así también un sistema de funciones independientes pueden ser elegido como funciones base, esquemas polinomiales totalmente continuos, los cuales son preferidos debido a que éstos son fáciles de integrar y diferenciar.

Los valores de todos los elementos son combinados, incluyendo condiciones de frontera, para proporcionar un sistema de ecuaciones diferenciales lineales de primer orden en el tiempo, y ésto a su vez pueda ser aproximado por alguna técnica de diferencias finitas, con objeto de producir un juego de ecuaciones algebráicas (Mercer y Faust, 1981).

c) Elementos de Frontera

El método del elemento de frontera o método de la ecuación integral de frontera, es una técnica numérica completamente diferente (Banerjee y Butterfield, 1977; Liggett y Liu, 1983). La forma más común de presentación de este método es a través de teoremas integrales, tales como la segunda identidad de Green o mediante los principios de ciertas soluciones analíticas para singularidades típicas, tales como un punto fuente, o un dipolo en un campo infinito. El sistema de ecuaciones es obtenido por la adición de la contribución de una singularidad de distribuciones en toda la frontera de entrada del dominio, es precisamente cuando se requiere que las condiciones de frontera correctas, sean satisfechas en cada una de las fronteras y conduzca a una aproximación.

Es preciso mencionar que una desventaja del método del elemento de frontera, es la de estar básicamente restringido para regiones con propiedades del fluido y suelo homogéneos, ya que se utiliza una solución fundamental para un campo homogéneo. Con algunos esfuerzos adicionales, el método puede ser generalizado para un grupo consistente de un número de pequeñas subregiones, donde cada una de ellas tiene propiedades físicas constantes.

3.3 MODELACIÓN DE FLUJO SUBTERRÁNEO EN ACUÍFEROS.

3.3.1 CRÍTICA GENERAL DE LOS MODELOS DE FLUJO SUBTERRÁNEO

Es una realidad que la modelación del flujo subterráneo, es una herramienta que puede ayudar a analizar muchos problemas en el área de referencia. Los modelos han resultado exitosos en estudios de reconocimiento y predicción en investigaciones de campo, estudios interpretativos que siguen un programa de campo y en estudios de predicción para la estimación de un comportamiento futuro en campo. Además de estas aplicaciones, los modelos son exitosos para estudiar el comportamiento de diferentes tipos de flujos, mediante la revisión de problemas hipotéticos de un acuífero. Sin embargo, los modelos para llegar a aplicarlos, implican considerar las limitaciones que

presente, de acuerdo a la conceptualización del problema a estudiar. Con base a lo anterior, particularmente los modelos numéricos son los que se han utilizado ampliamente, desde la segunda mitad de la década de los 1960'S, originando importantes avances en el área de modelación no solo en la disciplina de Hidrología, sino también en la mayoría de las que comprende la ciencia.

La aceptación de los modelos numéricos ha llegado a tal grado, que su evolución ha permitido establecer varios tipos de modelos de flujo subterráneo, los cuales son:**"modelos de flujo subterráneo", "modelos de transporte de soluto", "modelos de transporte de calor" y "modelos de deformación"**.

A cada tipo de modelo se le atribuyen diferentes aplicaciones, éstas se presentan en el cuadro 3.1.

Otros modelos combinan algunos de los modelos anteriormente enunciados, por ejemplo; un problema de conducción térmica puede requerir de un modelo de transporte de calor, en combinación con un modelo de deformación; el tipo de modelo a utilizar, dependerá indudablemente del tipo de aplicación que se pretenda. Para obtención de mayor información sobre la disponibilidad de modelos, se puede recurrir a Bachmat et al., (1978), Appel y Bredehoeft (1976).

Un aspecto importante dentro de la modelación numérica es la presencia de los errores en los parámetros, los cuales en gran parte provienen de los métodos de medición y del uso de valores muestreados, para estimar valores en lugares donde no han sido bien medidos.

Cuadro 3.1. Tipos de modelos y sus aplicaciones.

TIPO DE MODELO	*APLICACIÓN*
Modelo de flujo subterráneo	Suministro de agua
	Análisis regional de acuíferos
	Construcciones futuras de pozos
	Interacciones agua superficial - agua subterránea
	Operaciones de drenado
Modelo de transporte de soluto	Intrusión del agua salada
	Filtraciones en la tierra
	Inyección de desechos
	Almacenamiento de desechos radiactivos
	Estanques privados
	Contaminación de agua subterránea
Modelos de transporte de calor	Geotérmicos
	Almacenamientos térmicos
	Bombas de calor
	Contaminación térmica
Modelo de deformación	Asentamientos de tierra

En el desarrollo de un modelo de flujo subterráneo, normalmente el hidrogeólogo debe decidir cuando el dominio de entrada en interés, puede ser considerado como uniforme. Así también, cuando un número de subdominios localmente uniformes, pueden ser identificados con diferentes propiedades. Esta decisión es complicada por la presencia de errores de medición y de variación espacial.

Diversos estudios como el de Smith's (1981), ilustran que los resultados de un número extenso de mediciones en intervalos regulares a lo largo de una trayectoria, muestran la complejidad, la cual no es apreciable mediante unas cuantas mediciones, y debe ser importante la fuente del error para la modelación de flujo subterráneo. Existen métodos de análisis espacial disponibles, los cuales pueden ser aplicados para estimar valores de los parámetros, en puntos donde las mediciones no han sido bien hechas, tales métodos los presenta Peck y Gorelick, pp. 33; (1988). Algunos de ellos son el "método de interpolación espacial por Kriging", "reglas para promediación sobre áreas" y "zonificación" entre otras.

Otro aspecto importante dentro de la modelación numérica es el "efecto de los errores en la medición", los cuales dependen de las características de los instrumentos, los métodos de manejo de datos y los métodos de análisis de datos. Cada uno de estos factores contribuye, por ejemplo, a la estimación de la transmisividad T, y coeficiente de almacenamiento S en una prueba de bombeo.

El error en una salida de un modelo como resultado de errores en los parámetros de entrada, puede ser estimado por métodos convencionales, involucrando la identificación de variables independientes y la estimación de derivadas parciales. Esto es conocido esencialmente como método de análisis de sensibilidad (Peck y Gorelick, pp. 19; 1988). Los estudios de sensibilidad pueden ser utilizados para conocer la magnitud de la incertidumbre de los resultados de un modelo, causados por la incertidumbre de los parámetros, pero en muchas más formas limitadas. Ejemplo de estos estudios son: "Aproximaciones simplificatorias", "Estudios de agrupamiento", "Método de la adjunta", Análisis de incertidumbre de primer orden" y "Estudio de sensibilidad

mediante el análisis de Monte Carlo" (Peck y Gorelick; pp. 133-137, 1988). Algunos estudios concernientes con el método del problema inverso, como los que presenta McLaughlin (1996), consisten en el manejo de algoritmos inversos para flujo de agua subterránea, los cuales se emplean bajo dos métodos, los lineales y los no lineales.

A manera de conclusión, los modelos numéricos a pesar de sus restricciones, actualmente son los más apropiados para problemas generales, involucrados con un acuífero, donde se pueden apreciar fronteras irregulares, heterogeneidades o tasas de recarga y bombeo altamente variables.

3.4 ANÁLISIS CRÍTICO DE MODELOS PROBABLES DE APLICAR EN LA REGIÓN DE ESTUDIO

3.4.1 ELECCIÓN DEL MODELO PARA SU APLICACIÓN

La selección de un modelo numérico para flujo subterráneo, que reúna los elementos necesarios para llevar a cabo una aplicación, en un acuífero determinado, el cual pudiese presentar indicios de sobreexplotación, está basado en varias consideraciones, (Rundell y Bretzke, 1992), las cuales son:

- el modelo deberá estar suficientemente documentado y tener buena aceptación ante la comunidad científica, al grado de estar disponible para su consulta en forma accesible; implicando tener buen dominio público;

- el código deberá tener la capacidad para incluir una variedad de condiciones iniciales y de frontera, que puedan ser simuladas por el modelo (cargas especificadas, flujo especificados y condiciones de flujo con carga dependiente);

- el modelo debe tener las opciones para realizar las simulaciones de flujo, bajo condiciones transitorias o permanentes en tres dimensiones;

- el modelo debe tener capacidad para simular diferentes cálculos externos, incluyendo pozos de extracción, pozos de inyección, recarga superficial, drenes y ríos;

- debe disponer de opciones para simular acuíferos no confinados, con conductividades hidráulicas y espesores saturados variables.

En términos generales, se han considerado varios aspectos y elementos de la modelación, estrechamente relacionados con la aplicación de un modelo numérico, para la simulación de flujo en el acuífero de la Plana de Castellón.

La identificación de los referidos elementos, surge del establecimiento del modelo conceptual del acuífero de la Plana de Castellón, el cual se consideró apropiado, por lo que se considera necesario para realizar la aplicación de un modelo numérico, lo siguiente:

- facilidad en el manejo de la información general del acuífero, como es el número de espesores, la constitución de la malla de modelado (columnas y renglones) así como la introducción de los valores definidos en la discretización temporal, si es el caso de una simulación transitoria;

- flexibilidad en el manejo de las condiciones de frontera e iniciales, de tal manera que solamente se puedan realizar cambios en los sitios o lugares condicionantes y no en todo el grupo de datos;

- elementos de modelación tales como, pozos de extracción para el suministro de agua para consumo humano, uso industrial y agrícola, siendo este último el

de mayor demanda. Así también, el sistema de drenes. Otro elemento es la recarga superficial al acuífero, definida por la influencia de la lluvia, infiltración a través de los lechos de los cuerpos de agua como son los ríos y embalses, el retorno de las aguas utilizadas para regadíos, y alimentaciones laterales al acuífero propiciadas por acuíferos adyacentes y colindantes;

- que los parámetros que rigen de manera flexible la simulación del flujo en el acuífero y posteriormente en la etapa de calibración, sean los que definan el control del modelo aplicado, y se puedan manejar con la idea de lograr representar la variación de estos parámetros, en cada una de las celdas constituyentes de la malla de modelado;

- tal y como en la mayoría de los modelos de simulación de flujo subterráneo, en este caso particular, también se requieren formatos de salida de datos, idóneos para obtener con éstos, las representaciones gráficas convenientes que ilustran el comportamiento del flujo modelado.

3.4.2 PRESENTACIÓN DE LOS MODELOS POSIBLES DE APLICAR

En lo que se refiere al ámbito de la modelación del flujo subterráneo, en las últimas décadas se ha logrado desarrollar un gran número de modelos, con el propósito de utilizarlos como herramienta básica en el desarrollo de investigaciones, que en general contribuyen a la solución de algún problema vinculado; tal es el caso particular de la sobreexplotación de las aguas subterráneas. En gran medida, los modelos relacionados con la simulación del flujo subterráneo, son diseñados exclusivamente para su aplicación a una zona de modelado que se pretende estudiar. Sin embargo, también existe una buena cantidad de modelos que, por disponer de una estructura flexible y modular, pueden ser utilizados para su aplicación en diferentes sitios de estudio, tomando en cuenta siempre la concepción del modelo para el cual fue creado, y con ello, la posibilidad de realizar adaptaciones en el valor de los parámetros, modificaciones en los

archivos de entrada y salida de datos, además de establecer límites, y así mismo, obtener ventajas para algún caso particular de aplicación.

Es por lo anteriormente mencionado que, la comunidad científica ha tratado de aprovechar la mayoría de los modelos existentes, con el fin de encontrar aplicación en un mayor número de casos posibles y, de esta manera; lograr optimizar los esfuerzos y recursos invertidos en la creación de tales modelos.

En los siguientes párrafos, se presenta un análisis de algunos modelos disponibles y la definición de algunos de éstos, que se puedan utilizar para realizar la aplicación a una zona de estudio seleccionada. Algunos de estos modelos son el "Modflow" en sus versiones de 1983, 1987, 1989 y 1990; además del "Visual modflow", la cual es una versión muy completa para propósitos de modelación de flujo subterráneo y fenómenos vinculados como lo es, migración y transporte de contaminantes, remediación de acuíferos contaminados, etc.. Estos modelos, por su estructura modular resultan ser los más apropiados para su posible aplicación, en lo que se refiere a la simulación del flujo subterráneo en los acuíferos.

Existen algunos modelos tales como "Plasm" (Anderson, 1992), el cual es un código representado en diferencias finitas, capaz de simular problemas bidimensionales para ambas orientaciones, superficial y de perfil. Es un modelo que trabaja bajo discretizaciones espaciales en bloque centrado, pero se puede adaptar para condiciones de frontera con flujo en red centrada. "Plasm" requiere que el usuario asigne parámetros de almacenamiento tales como coeficiente de almacenamiento o almacenamiento especifico, inclusive en la versión original presentada por Prickett y Lonnquist en 1971; el usuario especifica los valores de la transmisividad o conductividad hidráulica, bajo la suposición de que la malla es regular, y si éste no es el caso, el mismo usuario deberá hacer una corrección de estos valores, a través de la aplicación de unos factores.

Posteriormente en una versión de 1981, se incorporó un código de transporte de soluto con unos factores de redondeo y en una versión para microcomputadoras compatibles con IBM, se realizaron cambios para que el usuario especificara los valores de la

conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y las dimensiones de las celdas de la malla.

Potter y Gburek (1987), modificaron "Plasm" para adaptar la descarga de agua a través de una pared filtrante y el proceso de filtración de flujo en un terraplen. Otro de los cambios realizados a este modelo, es el que realizó Walton en 1989, adaptando el modelo para simulaciones semi-tridimensionales en acuíferos multicapa y lechos confinantes, donde cada capa consiste de un acuífero confinado sobrepuesto por un lecho confinante. También se realizaron cambios consistentes en la adición de subrutinas para simular pozos penetrantes, efectos de almacenamiento alrededor de un pozo, pozos productores en un multiacuífero y flujo en pozos; bajo estas modificaciones Walton presentó el modelo con el nombre de "GWFL3D".

Este modelo finalmente no se consideró apropiado para la aplicación al acuífero de la Plana de Castellón por el manejo semi-tridimensional y los requerimientos de factores de corrección para dominios que no pueden suponerse con dimensionamiento regular.

Otro modelo considerado para su posible aplicación a la zona de estudio manejada, es el modelo "Aquífem-1"(Anderson, 1992) el cual está representado bajo un código del método de elemento finito en dos dimensiones, utilizando elementos triangulares para la discretización espacial de la malla de modelado. El número 1 indica que el código simula normalmente flujos horizontales en un acuífero de una capa, el acuífero puede ser confinado, no confinado y confinado-filtrante, también puede simular flujo en dos dimensiones en sección transversal.

Existe una nueva extensión del "Aquífem-1", denominada "Aquífem-n", la cual simula flujo en un estado semi-tridimensional en una secuencia de acuíferos y puede ajustarse a la frontera del nivel freático, utilizando un modelo de perfil, manejando elementos de deformación. "Aquífem-1" tiene la misma capacidad de simulación que "Plasm", a diferencia de que éste es un modelo representado con un método de aproximación de elemento finito, pues lo hace más flexible en el diseño de mallas de modelado y en la

simulación de fuentes y sumideros. También "Aquífem-1" puede simular el efecto de alguna falla geológica y otras fronteras internas. Sin embargo no es factible de aplicar debido a que trabaja bajo un dominio bidimensional, no satisfaciendo de ésta manera las necesidades de modelación.

Este modelo se considera importante para su aplicación en la simulación de flujo subterráneo, sin embargo cuando se requiere simular un acuífero libre, donde la presencia y efecto de la zona no saturada juega un papel importante en la evolución de las cargas piezométricas del acuífero, una simulación tridimensional es la más idónea para obtener con mayor aproximación, los comportamientos del flujo subterráneo, característica que no ofrece "Aquifen-1" ni "Aquífen-n".

Un modelo un tanto diferente a los anteriormente descritos es el "Modpath"/"Modpath-plot" (Walton, 1992) ambos en común aplicación son útiles para determinar, mediante las trayectorias de las partículas, la ubicación de fuentes y sumideros, así también las líneas de corriente de un flujo con migración de contaminantes advectivos.

"Modpath" realiza cálculos semi-analíticos de la trayectoria de una partícula en una línea de corriente y están basados en términos de flujo en celda por celda, generados por "Modflow" bajo la suposición de:

a) Las velocidades de flujo direccionales varían linealmente dentro de una celda.
b) El flujo en el lecho confinante es unidimensional, bajo un estado permanente y vertical.

"Modpath" no soporta condiciones de flujo transitorio y no puede ser usado para calcular líneas de corriente para red centrada, para mallas de diferencias finitas y modelos de elemento finito. "Modpath-plot" despliega las líneas de corriente calculadas con "Modpath" en forma gráfica.

Referente a este modelo, los propósitos de su aplicación son diferentes a los definidos para la realización de la aplicación, a la zona bajo estudio en el presente trabajo, pues no se requiere del cálculo de líneas de corriente que involucren las trayectorias de una partícula. Por lo anterior este modelo no es factible de considerar para su aplicación en la región de estudio.

Un modelo que se consideró con posibilidades de aplicación en este trabajo es el "Moc", (Walton, 1992) el cual es un modelo que simula el transporte de un soluto, conservativo o no conservativo en dos dimensiones, a través de un flujo de agua subterránea en un sistema acuífero de una sola capa. El espaciamiento manejado para las columnas y renglones constituyentes de la malla de modelado es uniforme, aunque el número de columnas y de renglones pueden diferir entre sí. Puede simular para acuíferos confinados o no confinados y éstos pueden ser homogéneos, heterogéneos, isotrópicos o anisotrópicos.

Las características de simulación para el modelo incluyen: cargas constantes, flujo variable y sin flujo, recarga y descarga a través de pozos, fronteras con distribución de carga variable o uniforme, filtraciones permanentes dentro o fuera de un acuífero, a través de un acuitardo, lecho de un río, lecho de un lago o lecho de una fuente contaminante, recarga o descarga superficial permanente o variable y pozos totalmente de recarga o producción con tasas de bombeo variables o constantes.

Con este modelo pueden ser simulados diferentes procesos como son: cambios en la distribución espacial de la concentración de un soluto con el tiempo causado por un transporte advectivo, dispersión hidrodinámica, dispersión o dilusión de recarga o por reacciones químicas, incluyendo tasas de reacción irreversibles de primer orden, tales como descomposición radioactiva.

"Moc" se acopla al método implícito de direcciones alternantes (ADI), procedimiento totalmente implícito (SIP) para diferencias finitas y el método de las características; para las ecuaciones de transporte de soluto. Comúnmente el modelo es utilizado para simular

el transporte de masa para flujos en un estado permanente o transitorio. Las alternativas de aplicación de este modelo son variadas, pero el enfoque es más apropiado para realizar estudios de transporte de contaminantes para el caso bidimensional, por lo que su aplicación para simular el flujo subterráneo en un acuífero libre, donde es indispensable una simulación en tres dimensiones, no satisface las necesidades prevalecientes.

También existe algunos modelos como "Sutra", (Walton, 1992) el cual simula el flujo y transporte de un único soluto en dos dimensiones, de un fluido con densidad dependiente en un único acuífero saturado o en depósitos no saturados. También puede simular para acuíferos confinados o no confinados, simula el flujo en sección transversal y superficial, movimientos de contaminantes con densidad variable y el movimiento de la intrusión del agua salada en sección transversal.

El modelo emplea el método de diferencias finitas integradas y el elemento finito híbrido en dos dimensiones, para aproximar las ecuaciones gobernantes de transporte y flujo interdependientes. Respecto a este modelo, también se descarta la posibilidad de utilizarlo, principalmente por el manejo bidimensional que presenta y el enfoque para el cual fue creado, lo que no permite lograr realizar aplicaciones con los propósitos que se pretenden en este trabajo.

Así también, se presenta el modelo "Intersat/Intertrans", (Walton, 1992) el cual era uno de los pocos paquetes para computadora que modelaban la migración de contaminantes en un flujo tridimensional en 1991. En lo que se refiere a "Intersat", es un modelo de flujo transitorio o permanente que trabaja bajo un esquema de diferencias finitas en punto o nodo centrado en tres dimensiones, fue patentada después de "Plasm" por Prickett y Lonnquist en 1971, la malla del modelo puede ser uniforme o variable, uno o varios sistemas de acuíferos pueden ser simulados utilizando porosidad uniforme, en acuíferos que pueden ser confinados o no confinados.

Las razones principales por las que se considera con posibilidad la aplicación del modelo en referencia, es por la organización de su estructura en paquetes que constituyen cada uno, la simulación de un elemento básico del sistema hidrológico, ofrece la flexibilidad de omitir o adicionar los modulos que sean necesarios durante la aplicación del mismo, además, permite ajustar el modelo de acuerdo a todos los elementos disponibles en la zona que se pretende modelar, por ejemplo, pozos, drenes, ríos, etc.

Algunas ventajas que ofrece esta versión son: permite cambiar solamente la magnitud de los datos en cada arreglo, si se tiene el propósito de modificar datos en el preprocesador después de cada aplicación del procesador, se dispone de flexibilidad para la salida de resultados, reflejada en las opciones para los formatos de salida en un módulo denominado "control de salidas".

También existen algunas desventajas, dentro de éstas se encuantran: la dificultad que en ocasiones se presenta, cuando se pretende reconocer la ubicación de un error, debido al cambio de posicionamiento de un dato dentro de su arreglo correspondiente, principalmente cuando se manejan arreglos de grandes dimensiones. La falta de reconocimiento durante el proceso de aplicación del modelo (procesador) de la existencia o no, de inconsistencia de unidades, por lo que el usuario debe tener la suficiente precaución en lo que se refiere a la declaración de unidades y por supuesto, en el manejo de las cantidades expresadas en las mismas, para cada uno de los módulos del modelo (McDonald y Harbaugh. 1984).

"Modflow" nos ofrece tres facetas durante su aplicación en la realización de alguna simulación del flujo subterráneo, por orden de operatividad se enuncia el **preprocesamiento, procesamiento y el postprocesamiento.** Respecto a los dos primeros, ya se ha analizado su estructura y atributos así como sus limitantes, en cambio el postprocesador por el momento se puede mencionar que, es una faceta en la cual se requiere de la preparación de los resultados obtenidos en el procesador, de acuerdo a las opciones que ofrece el postprocesador, tales como:

- Optimización de parámetros;
- Representación gráfica en planta de los resultados y mediante un paquete graficador, la obtención de mapas en planta de los resultados.

b) Modelo "Modflow" versión 2.0 (1987)

Esta versión se constituye por la misma estructura en el preprocesador, procesador y postprocesador, así también en los programas fuente, excepto que presenta las siguientes modificaciones:

- el preprocesador funciona a través de un menú de opciones, permite crear nuevos archivos de datos y modificar archivos existentes;
- el programa tiene la opción de enviar una señal en pantalla, advirtiendo al usuario que el valor introducido está fuera del rango predeterminado en el programa del modelo;

Por otra parte, las versiones de "Modflow" 1.0 y 2.0, siguen presentando sin alteración alguna, la posibilidad de aplicación del modelo para un estado **permanente** y un estado **transitorio.**

c) Modelo "Modflow" 2.7 (1989)

Es una de las versiones que se ha desarrollado con la finalidad de lograr un mejoramiento funcional en todas las facetas de "Modflow".(Walton, 1992).

Esta versión ofrece un refinamiento total en lo que corresponde al preprocesador, mismo que permite mayor flexibilidad en el manejo del menú, se logra con su aplicación ahorro de tiempo en la introducción de datos, modificación, cambio y sustitución de valores, así como la adición u omisión de los mismos. Tiene la posibilidad de lograr introducir valores de las características hidrogeológicas de un acuífero de manera no homogénea,

es decir, se pueden zonificar las características del acuífero de acuerdo al tipo de información y naturaleza del mismo, logrando de esta manera un mayor ajuste de datos disponibles al modelo.

En ésta versión se tiene la posibilidad de manejar discretizaciones espaciales que involucren la utilización de mallas con número de hasta 6000 celdas, lo que viene a ofrecer mayor potencial al modelo para su aplicación en zonas de estudio, donde se requieran discretizaciones espaciales más finas. La versión 2.7 es una de las más utilizadas por su estructura de facil manejo y flexibilidad, considerándose idónea para su aplicación en el presente trabajo.

3.4.2.2 ANÁLISIS DEL MODELO MODFLOW VERSIÓN MODIFICADA PARA MODINV (1990)

Una de las mejores innovaciones que se han realizado al modelo "Modflow", es la que presenta la versión modificada para "Modinv" presentada en 1990. El desarrollo correspondiente a esta versión lo realizó John Doherty, (1990); Investigador del Centro Australiano de Investigaciones sobre Agua Dulce Tropical; los trabajos principales correspondieron a la modificación de los códigos fuente, tanto del preprocesador como del procesador denominados "Premod" y "Modflow" respectivamente.

El propósito fundamental de la innovación del "Modflow", es el de lograr una compatibilidad total con un software denominado "Modinv", el cual es un paquete que tiene como función básica la optimización de parámetros, considerándose en este aspecto como una herramienta poderosa. Es preciso mencionar que la presente versión, además de disponer de un preprocesador dinámico, el procesador "Modflow" se ha estructurado de tal manera, que puede ser ejecutado con el preprocesamiento de los datos de entrada, preparados por paquetes compatibles como son "FDGIRD, INTMAP, REALMAP, MODINT y ARMATH"; estos son estructurados de tal forma, que los datos de entrada estarán preparados para ser utilizados en el procesador, bajo ciertas características para que posteriormente tengan una salida particular para "Modinv" o algún otro software compatible.

3.4.2.3 VERSIÓN "VISUAL MODFLOW 2.0"

Esta versión del "Modflow", es considerada por los modeladores de flujo subterráneo como el software más completo y de fácil manejo para aplicaciones prácticas de modelación de flujo subterráneo y transporte de contaminantes tridimensional. "Visual Modflow" tiene integrado lo que corresponde a "Modflow", "Modpath y "MT3D" con la más intuitiva y poderosa interface gráfica disponible.

Este modelo también posee la estructura estándar del modelo "Modflow", tanto en los archivos pertenecientes al preprocesador como al procesador.

Las características principales de entrada para "Visual Modflow" incluyen:

- manejo ilimitado del tamaño de la malla (miles de renglones y columnas si es necesario);
- acepta todas las unidades populares para el sistema métrico y británico;
- lee las coordenadas del lugar y dimensionamientos del sitio de un mapa de Auto CAD;
- depura 20 o más mapas de sitios a un solo modelo;
- importa completamente modelos tridimensionales de un juego de datos existentes en "Modflow";
- despliega en toda la pantalla vistas transversales y superficiales simultáneamente.

Referente a las características de calibración, "Visual Moflow" comprende un juego de herramientas para calibrar los resultados de la modelación con las condiciones observadas, tales como:

- los pozos de observación pueden ser asignados y modificados de manera fácil y clara, mientras los datos de observación pueden ser manualmente introducidos o importados;
- gráficas observadas contra resultados calculados (cargas y concentraciones);
- despliegues estadísticos de calibración, incluyendo error de la media, error de la media absoluta y error medio de la varianza;
- dibujos de los residuales de calibración en planta para los puntos de observación seleccionados;
- graficación de la variación del tiempo observado y los resultados calculados en puntos de observación múltiples (cargas y concentraciones).

De acuerdo con los atributos que presenta la versión de "Visual Modflow", se puede concluir que éste modelo es el idóneo para realizar la aplicación del mismo a la zona de estudio considerada en este trabajo, sin embargo la disponibilidad de este paquete implica solvencias económicas para su adquisición, ya que es un modelo que está a la vanguardia y por lo mismo, su costo es una limitante para disponer de éste.

3.4.2.4 VERSIÓN DEL MODELO MODFLOW SELECCIONADO

De acuerdo con los análisis de las diferentes versiones del modelo "Modflow", presentadas anteriormente, se puede dar respuesta en forma concreta a las interrogantes:

1.- ¿Que modelo es el que se utilizará en el desarrollo de las aplicaciones de simulación de flujo? y

2.- ¿Por que se elige tal modelo?

La respuesta a la primer pregunta resulta lógico responder que es el modelo "Modflow", considerando la versión más conveniente para los propósitos que se pretenden, la de "Modflow" 2.7, presentada por Andersen (1989) (Walton, 1992). Es evidente que el modelo "Visual Modflow" es una versión que podría presentar un campo de aplicación

atractivo, sin embargo, su aplicación se restringe por el alto costo que implica su adquisición.

Respecto a la segunda pregunta, ésta es contestada atinadamente en el apartado 3.4.2.1. inciso c), concluyendo que la versión 2.7, por disponer de una estructura de fácil manejo, flexibilidad de aplicación para diferentes casos de modelación y tener dinámica en el control de entradas, procesamientos, salidas y correcciones para cambios de datos en las aplicaciones, permitiendo que sea la versión más idónea para su utilización en el presente trabajo.

El cuadro 3.2 ilustra de forma general la clasificación de las versiones analizadas y las ventajas y desventajas persistentes. Referente al contenido del cuadro, se puede decir que la estructura básica del modelo "Modflow" no se pierde de una versión a otra, pero los cambios en el refinamiento y estructuración de los sistemas de manipulación de los datos de entrada y, la modificación de menús de control del paquete para el mejoramiento, tanto en capacidad, como en el proceso de manejo de todos los módulos constituyentes del modelo, hace la preferencia por la versión que ofrece mayores cualidades, siendo en este caso particular como anteriormente se había señalado, la versión de "Modflow" 2.7.

A manera de conclusión, el modelo "Modflow" en general, es uno de los modelos más completos y mejor estructurados para su aplicación a casos de simulación de flujo subterráneo, prueba de ello es la presencia del mismo en un gran número de aplicaciones desde su surgimiento hasta la fecha, lo que corrobora su aceptación por la comunidad científica en el ámbito de la modelación.

Cuadro 3.2. Clasificación por versión, según sus ventajas y desventajas del modelo

VERSIÓN DEL MODELO	VENTAJAS PRINCIPALES	LIMITANTES PRINCIPALES
MODFLOW 1.0 (1983)	1) estructuración modular 2) posibilidad de utilizar parte o el total de los paquetes que constituyen el preprocesador 3) posibilidad de condicionar la salida de los resultados	1) no hay identificación de inconsistencia de unidades durante la aplicación del modelo 2) no es aplicable en acuíferos con características de fracturación 3) no hay presencia de un menú de control de paquetes para el preprocesador
MODFLOW 2.0 (1987)	idem inciso 1) idem inciso 2) idem inciso 3) 4) utiliza un menú en el preprocesador, ofreciendo mayor dinamismo al modelo 5) los resultados del procesador se pueden adaptar a varios paquetes graficadores y optimizadores de parámetros. 6) ofrece mayor capacidad de memoria 7) incluye rango de valores predeterminados de los	idem inciso 1) idem inciso 2) 4) no presenta opciones de mensaje de error por el manejo de valores fuera de rango

Cuadro 3.2. Clasificación por versión, según sus ventajas y desventajas del modelo (continuación)

VERSIÓN DEL MODELO	VENTAJAS PRINCIPALES	LIMITANTES PRINCIPALES
	distintos parámetros que puede manejar el modelo	
MODFLOW 2.7 (1989)	idem inciso 1) idem inciso 2) idem inciso 3) idem inciso 4) idem inciso 5) idem inciso 6) 10) capacidad de manejo de hasta 6000 celdas en una discretización espacial	idem inciso 1) idem inciso 2)
MODFLOW MODIFICADO PARA MODINV (1990)	idem incisos 1) hasta 7)	idem inciso 1) hasta 3)
	11) ofrece mayor compatibilidad con software especializado, tanto en el preprocesador	6) su aplicación es preferible si se requiere del manejo del software modinv

Cuadro 3.2 Clasificación por versión, según sus ventajas y desventajas del modelo (continuación)

VERSIÓN DEL MODELO	VENTAJAS PRINCIPALES	LIMITANTES PRINCIPALES
	como en el postprocesador	
VISUAL MODFLOW 2.0	12) ofrece capacidad ilimitada para el dimensionamiento de la malla de modelado 13) integración de los modelos MODPATH y MT3D 14) presenta mayor versatilidad y variedad en la presentación gráfica de los resultados idem inciso 1) idem inciso 2) idem inciso 3) idem inciso 4) idem inciso 5) idem inciso 6) idem inciso 7, 8, 9, 10 y 11)	costo para adquisición

CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN DEL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN

4.1 CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DE LA ZONA DE MODELACIÓN

La región donde se localiza el acuífero de la Plana de Castellón, se encuentra ubicada en la zona central costera de la provincia de Castellón y colinda con las comarcas de la Plana de Baixa y parte de la Plana alta. La superficie es de forma aproximadamente triangular y corresponde a una llanura litoral con cotas comprendidas entre 0 y 130 msnm, y una superficie cuantificada en 480 Km^2 la cual, se extiende por la costa entre las poblaciones de Benicasim y Almenara (figura 4.1).

Los asentamientos humanos en la Plana de Castellón, están representados por las poblaciones de Benicasim, Almazora, Burriana, Villareal, Onda, Bechí, Chilches, Moncófar, La Llosa y Almenara; las cuales acumulan una población de 260565 habitantes bajo un crecimiento estival de aproximadamente 50000 habitantes. En la figura 4.2, se puede apreciar en forma general la geografía de la Plana de Castellón.

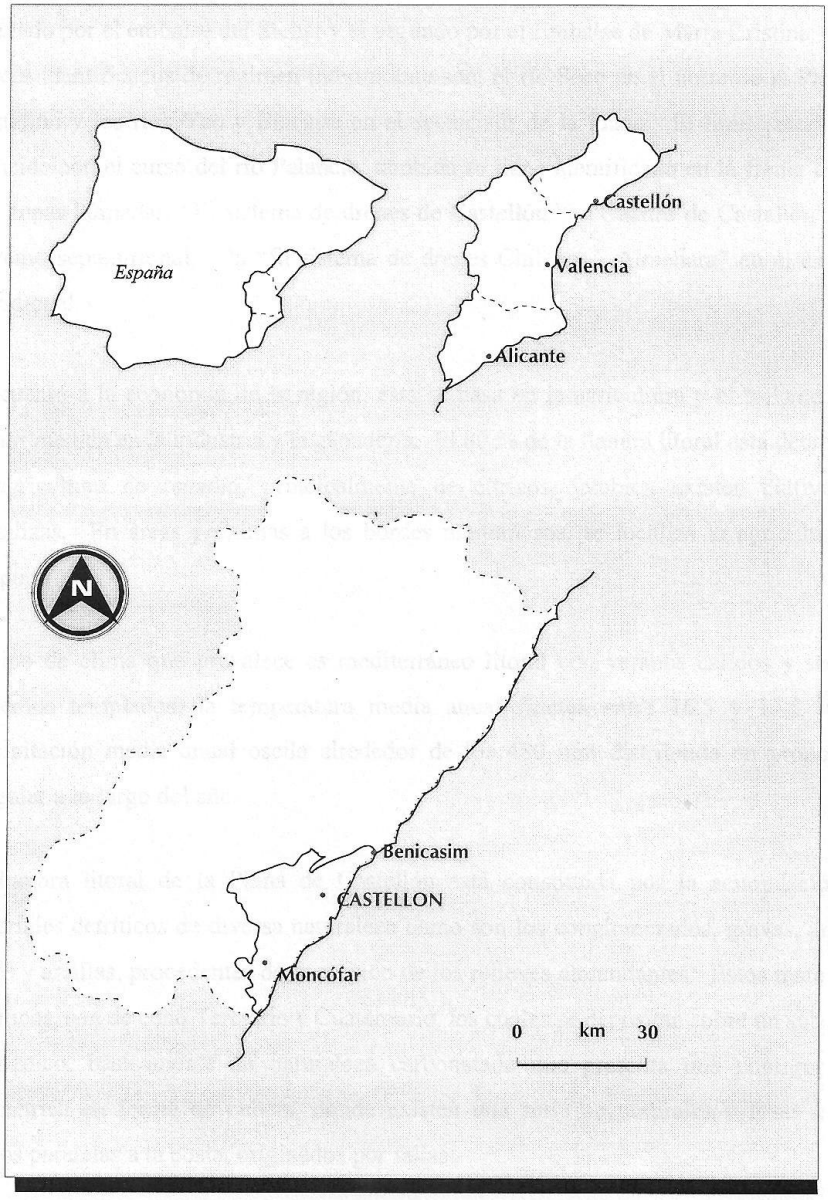


Figura 4.1 Situación geográfica de la Plana de Castellón

En referencia a la red de drenaje, ésta se constituye por el río Mijares y su afluente principal identificado como la Rambla de la Viuda. El primero que se enuncia es regulado por el embalse del Sichar y el segundo por el Embalse de María Cristina. Otros cauces identificados de régimen intermitente son, el río Seco en el norte de la Plana de Castellón y los ríos Veo y Belcaire en el sector sur de la Plana. El límite meridional coincide con el curso del río Palancia, también se tiene identificado en la franja costera dos zonas húmedas; "El sistema de drenes de Castellón" o "Cuadro de Castellón" en el extremo septentrional, y la "El sistema de drenes Chilches - Almenara" en el extremo meridional.

En cuanto a la economía de la región, ésta se basa en la agricultura y el turismo, y en menor medida en la industria y la ganadería. El 80 % de la llanura litoral está dedicada a la agricultura de regadío, principalmente de cítricos, también existen cultivos de hortalizas. En áreas próximas a los bordes montañosos, se localiza la agricultura de temporal.

El tipo de clima que prevalece es mediterráneo litoral con veranos cálidos y secos e inviernos templados, la temperatura media anual fluctúa entre 16.5 y 17.5 °C, la precipitación media anual oscila alrededor de los 480 mm distribuida en proporción irregular a lo largo del año.

La llanura litoral de la Plana de Castellón está constituida por la acumulación de materiales detríticos de diversa naturaleza como son los conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas, procedentes de la erosión de los relieves circundantes. Estos materiales detríticos, son de edad Terciario y Cuaternario, los cuales se depositan sobre un substrato mesozoico, básicamente de naturaleza carbonatada que presenta una configuración geométrica en forma de cubeta, donde existen una serie de umbrales y fosas más o menos paralelas a la costa, originados por fallas.

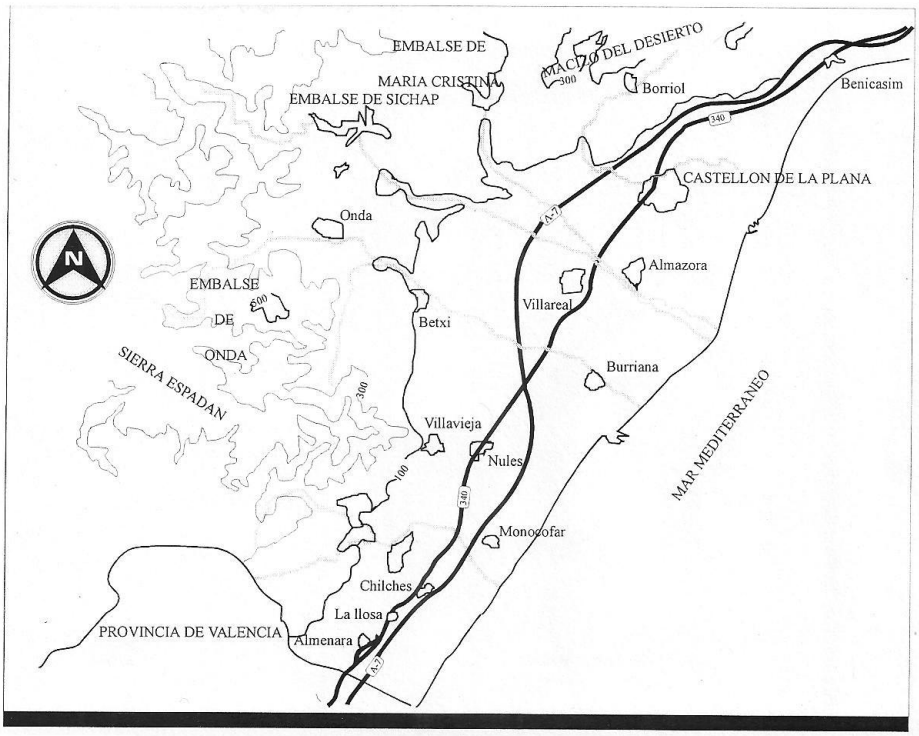


Figura 4.2. Rasgos geográficos de la Plana de Castellón

Los relieves mesozoicos que circundan la Plana de Castellón son: La Sierra de Oropesa, Sierra del Desierto de las Palmas, y la Sierra de Espadán .

Desde el punto de vista geológico el área estudiada es considerada (Sanchis et al., 1988) enmarcada dentro de la unidad estructural denominada "llanuras costeras", de clara orientación catalánide (figura 4.3).

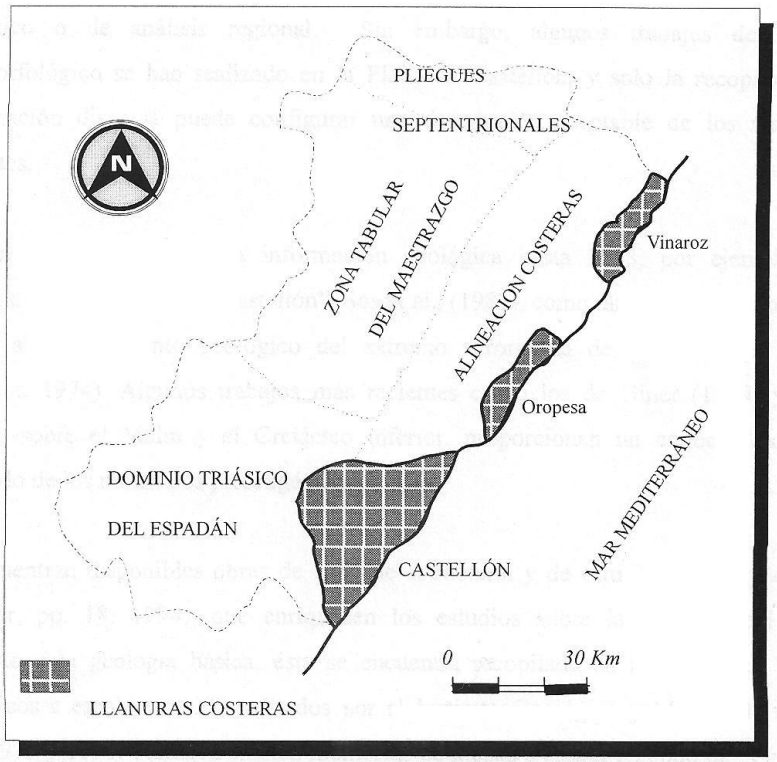


Figura 4.3. Situación geológica de la Plana de Castellón según Esteller (1994)

4.1.1 ANTECEDENTES GEOLÓGICOS DEL SECTOR DE LA PLANA DE CASTELLÓN

Existen numerosos trabajos realizados sobre el área de estudio, pero la mayor parte son enfocados en la descripción de los materiales de borde, debido a que son estudios de tipo tectónico o de análisis regional. Sin embargo, algunos trabajos de enfoque geomorfológico se han realizado en la Plana de Castellón, y solo la recopilación de información dispersa puede configurar una descripción aceptable de los materiales recientes.

Existen obras que recopilan información geológica hasta 1983, por ejemplo, "La geología de la Provincia de Castellón", Sos et al., (1983), como también existen obras de aporte al conocimiento geológico del extremo suroriental de la cordillera Ibérica, (Canerot, 1974). Algunos trabajos más recientes como los de Giner (1980) y Salas (1987), sobre el Malm y el Cretácico inferior, proporcionan un conocimiento más profundo de los materiales preorogénicos.

Se encuentran disponibles obras de enfoque estructural y de estudios más específicos, (Esteller, pp. 18; 1994), que enriquecen los estudios sobre la geología del lugar. Respecto a la geología básica, ésta se encuentra recopilada en memorias de mapas geológicos a escala 1:50000, editados por el Instituto Geológico y Minero de España entre 1973 y 1974. También existen memorias de mapas a escala 1:20000 de Vinaroz y Valencia del año 1985. El complemento de la información geológica y de gran interés en muchos proyectos de investigación, corresponde a las diferentes columnas litológicas de sondeos realizados en la Plana de Castellón y sus bordes, la mayor parte de estos trabajos corresponden a sondeos realizados por el Servicio Geológico de Obras Publicas (SGOP), El Instituto para la Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), todo esto es recopilado en informes internos como los del SGOP(1977) e IGME (1990). Otros datos complementarios se consideran factibles de recopilar a través de encuestas directas de campo.

4.2 HIDROGEOLOGÍA DEL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN

4.2.1 DESCRIPCIÓN DE NIVELES ACUÍFEROS

A partir de un enfoque hidrogeológico, la zona de estudio y áreas adyacentes, se encuentran ubicadas dentro del sistema acuífero No 56, La Sierra de Espadán - Plana de Castellón - Plana de Sagunto y el No 55, Javalambre - Maestrazgo (IGME, 1989).

En lo que respecta al sistema acuífero No 56, se definen varios subsistemas. Aquellos depósitos detríticos pliocuaternarios que forman el subsistema de la Plana de Castellón (56a), mientras que los materiales mesozoicos constituyen varios subsistemas, los cuales son: Onda (56e), Medio Palancia (56f) y Espadán (56h), que delimitan por el oeste al de la Plana de Castellón. Al norte de la Plana los materiales mesozoicos que afloran, forman parte de los subsistemas acuíferos del Maestrazgo (55c) y Javalambre (55e) (Esteller, 1994).

Las formaciones existentes de interés hidrogeológico que se pueden distinguir dentro de cada uno de estos subsistemas, son los siguientes.

A) ACUÍFEROS MESOZOICOS

Existen materiales mesozoicos que pueden ser definitivos para diferenciar varios niveles acuíferos, constituidos por calizas, dolomias y areniscas; así mismo, existen niveles acuitardos formados por depósitos calizo-margosos. Los tramos impermeables corresponden a margas y arcillas.

Precisamente los materiales mesozoicos que delimitan la Plana de Castellón, definen los siguientes acuíferos:

A.1 Subsistema Acuífero de la Sierra de Espadán (56h)

Se trata de un acuífero de carácter local, debido a su acompañamiento de escasa recarga con una explotación limitada. Su transmisividad presenta un elevado grado de variabilidad, típico de acuíferos fisurados

La alimentación se realiza casi en su totalidad por infiltración de agua de lluvia y eventualmente, por entradas laterales desde niveles acuíferos del MuschelKalk, con los que puede estar conectado hidráulicamente. La descarga se efectúa por bombeos, alimentación lateral a la Plana de Castellón y Sagunto, así también a través de manantiales. (Esteller, 1994).

A.2 Subsistema Acuífero del Medio Palancia (56f)

Dentro de este subsistema se definen una serie de acuíferos individualizados, bien por límites impermeables o por umbrales piezométricos. Estos acuíferos son los de Segorbe - Soneja, Azuebar, Vall d´ Uixó, Salto del Caballo, Algar - Quart, Comacó, Estivella y Gausa.

La alimentación se produce por infiltración de agua de lluvia, alimentación lateral desde acuíferos adyacentes e infiltración desde el cauce del Río Palancia. La descarga del acuífero se produce por bombeos, salidas laterales hacia el acuífero de la Plana de Castellón y Sagunto, así también; a través de manantiales, los cuales son: La Font de Sant Josep, La Font de Quart, La Llosa y Almenara. Los manantiales anteriores, se sitúan en el contacto entre los materiales carbonatados y los detríticos que constituyen la llanura litoral (Esteller, 1994).

A.3 Subsistema Acuífero de Onda (56e)

En este subsistema las entradas al acuífero se producen exclusivamente por infiltración de lluvia y las salidas por descargas a través de manantiales, por bombeos, salidas al río Mijares y salidas laterales hacia el acuífero de la Plana de Castellón. La transmisividad presenta valores que oscilan entre 200 y 400 m^2/día, aunque en las zonas de descarga se alcanzan cifras de 2000 m^2/día (IGME, op. cit.; Esteller, 1994).

A.4 Subsistema Acuífero del Javalambre (55e)

Está integrado dentro del Sistema Acuífero Javalambre - Maestrazgo. La alimentación de este subsistema se produce por infiltración del agua de lluvia y por entradas laterales ocultas desde acuíferos adyacentes. La descarga se efectúa por salidas a través de manantiales, hacia las cuencas de los ríos Mijares y Alfambra, también por descarga lateral hacia la Plana de Castellón.

A.5 Subsistema del Maestrazgo (55c)

En este subsistema la alimentación procede de la infiltración de agua de lluvia y por entradas laterales desde acuíferos vecinos. La descarga se efectúa por las cuencas de varios ríos, mediante bombeos, alimentación lateral a otros acuíferos y salidas al mar.

Como resultado de un ensayo de bombeo realizado en este acuífero, se obtuvo una transmisividad del orden de 250 - 450 m^2/día y un coeficiente de almacenamiento comprendido entre 1 y 5% (SGOP, op. cit.; Esteller, 1994).

B) ACUÍFEROS TERCIARIOS

En el borde septentrional de la Plana de Castellón se localizan afloramientos de materiales del Terciario. Su presencia se detectó mediante sondeos que atraviesan los

materiales cuaternarios, aunque la diferencia entre ambos tipos de depósitos, es muy compleja debido a su similitud litológica. Son sedimentos básicamente de origen continental, formados por conglomerados y arenas con cemento calcáreo que alternan con algunos tramos de arcillas. Los caudales de explotación oscilan alrededor de los 8 *l/s* y el caudal específico en 0.3 *l/s/m* (SGOP, op. cit). Los depósitos en referencia, forman parte del subsistema de la Plana de Castellón.

C) ACUÍFEROS CUATERNARIOS

Los materiales del Cuaternario son en su mayoría depósitos continentales, muy heterogéneos, dispuestos en niveles de gravas, arenas y conglomerados, todos ellos con proporciones diversas de arcillas y limos. Estos depósitos constituyen el acuífero detrítico de la Plana de Castellón, mismo que se tomará como zona para la aplicación del modelo "Modflow", definido en capítulos anteriores.

La potencia de los materiales detríticos es variable, aumentando de oeste a este. La base del acuífero la forman los materiales mesozoicos generalmente, aunque en algunos sectores se ha constatado la existencia de depósitos miocénicos de naturaleza impermeable.

Las entradas se producen por infiltración de agua de lluvia, alimentación lateral desde los acuíferos mesozoicos de borde, infiltración desde el cauce del Río Mijares y retorno de regadíos con aguas subterráneas y superficiales. Las salidas corresponden a bombeos, salidas al mar, sistemas de drenes y descargas a través de manantiales.

4.3 PRESENTACIÓN GENERAL DEL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN

4.3.1 CARACTERIZACIÓN LITOLÓGICA Y GEOMÉTRICA

El acuífero de la Plana de Castellón está formado por materiales detríticos marcadamente heterogéneos, con predominio de gravas, arenas y conglomerados, así también con una matriz arcillo-limosa. Este subsistema está formado por varios niveles acuíferos superpuestos, que constituyen un acuífero multicapa; la dificultad para realizar una diferenciación de los distintos niveles y, sobre todo; la factible conexión hidráulica existente entre ellos, aconseja que se le considere como una sola unidad acuífera (Esteller, 1994).

Con fundamento en estudios realizados y la disponibilidad de columnas litológicas por el IGME y el SGOP, es posible diferenciar un tramo superior donde predominan las gravas y conglomerados, con una potencia que varía entre 75 y 100 metros y otro inferior con un espesor entre 90 y 100 metros, constituido por arcillas y margas, así también algunos niveles de gravas y arenas, siendo ambos tramos de edad Cuaternario. Los materiales detríticos reposan sobre un zócalo mesozoico, aunque en algunos puntos se ha podido detectar la existencia como base impermeable del acuífero, de materiales de naturaleza margosa correspondientes al Mioceno. También se ha establecido la presencia por debajo de este nivel margoso, y de acuerdo con varios sondeos situados al este de la ciudad de Castellón, de un delgado acuífero detrítico confinado, probablemente de edad Mioceno, a una profundidad comprendida entre 160 - 170 metros y formado por areniscas de naturaleza marina o mixta. El agua de referido acuífero que no es objeto de explotación, presenta salinidad alta, con concentraciones de cloruros superiores a 600 *mg/l (Esteller, 1994).*

El espesor de los materiales detríticos es muy variable a consecuencia de las características geométricas del sustrato, aunque se puede definir a grandes rasgos, una

zona central con espesores de hasta 200 metros (sector del Río Mijares y NO de Nules), disminuyendo hacia los límites montañosos. También se comprueba que la potencia de estos materiales se incrementa de oeste a este, siendo máximo en el sector de Nules - Castellón, volviendo a disminuir hacia la costa. Los espesores más frecuentes quedan comprendidos entre 50 y 200 metros según la figura 4.4.

Los límites del acuífero son los siguientes:

- en los sectores central y meridional, los subsistemas acuíferos de la Sierra de Espadán y del Medio Palancia, definen un limite abierto. Localmente este limite puede ser cerrado a causa de la presencia de materiales impermeables del Keuper y Buntsandstein;

- también existe una comunicación hidráulica con el subsistema acuífero de Onda;

- en el borde septentrional, las sierras del Desierto de las Palmas y de Oropesa forman un límite de permeabilidad variable. Por este borde entra en contacto el acuífero detrítico con las calizas cretácicas que forman parte del Sistema Acuífero Javalambre - Maestrazgo;

- por el este del Mar Mediterráneo, que representa un limite permeable de potencial prácticamente constante.

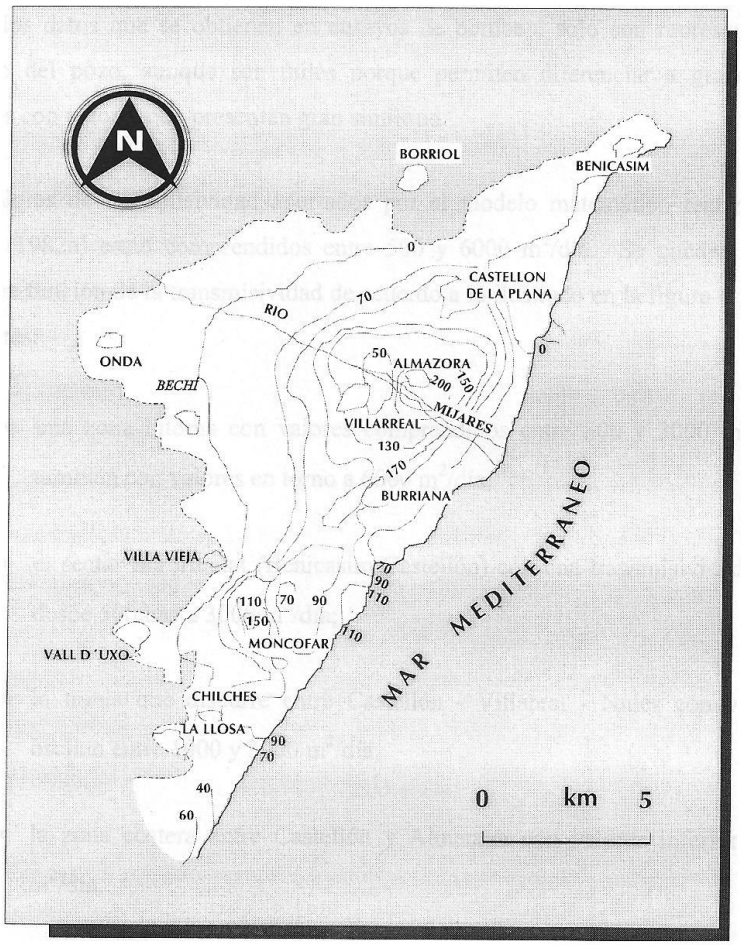


Figura 4.4. Mapa de isoespesores del acuífero de la Plana de Castellón (IGME, 1982a)

4.4 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

Los parámetros hidráulicos del acuífero de la Plana de Castellón, abarcan un amplio rango debido a la variabilidad tanto litológica como geométrica de los depósitos. Por tanto, los datos que se obtienen en ensayos de bombeo, sólo son representativos del entorno del pozo, aunque son útiles porque permiten diferenciar a grandes rasgos, sectores con valores que presenten gran similitud.

Los valores de transmisividad aportados por el modelo matemático realizado por el IGME (1982a) están comprendidos entre 500 y 6000 m^2/día. Se pueden diferenciar zonas en función de la transmisividad de acuerdo a lo ilustrado en la figura 4.5, y son las siguientes:

- una zona interna con valores comprendidos entre 500 y 3000 m^2/día, pero también con valores en torno a 6000 m^2/día;
- el sector nororiental (Benicasim Castellón) con una transmisividad que varía desde 500 hasta 3000 m^2/día;
- la franja que discurre entre Castellón - Villareal - Nules con valores que oscilan entre 1000 y 3000 m^2/día;
- la zona costera entre Castellón y Almenara con valores inferiores a 6000 m^2/día.

Con la finalidad de tener un conocimiento más preciso de las características hidráulicas en las áreas de Moncófar - Chilches y Benicasim, se realizaron los cálculos de transmisividades (Esteller, 1994) aplicando la fórmula estimativa de Galofré (T=100*Qs) donde Qs es el caudal específico (Custodio y Llamas, 1983).

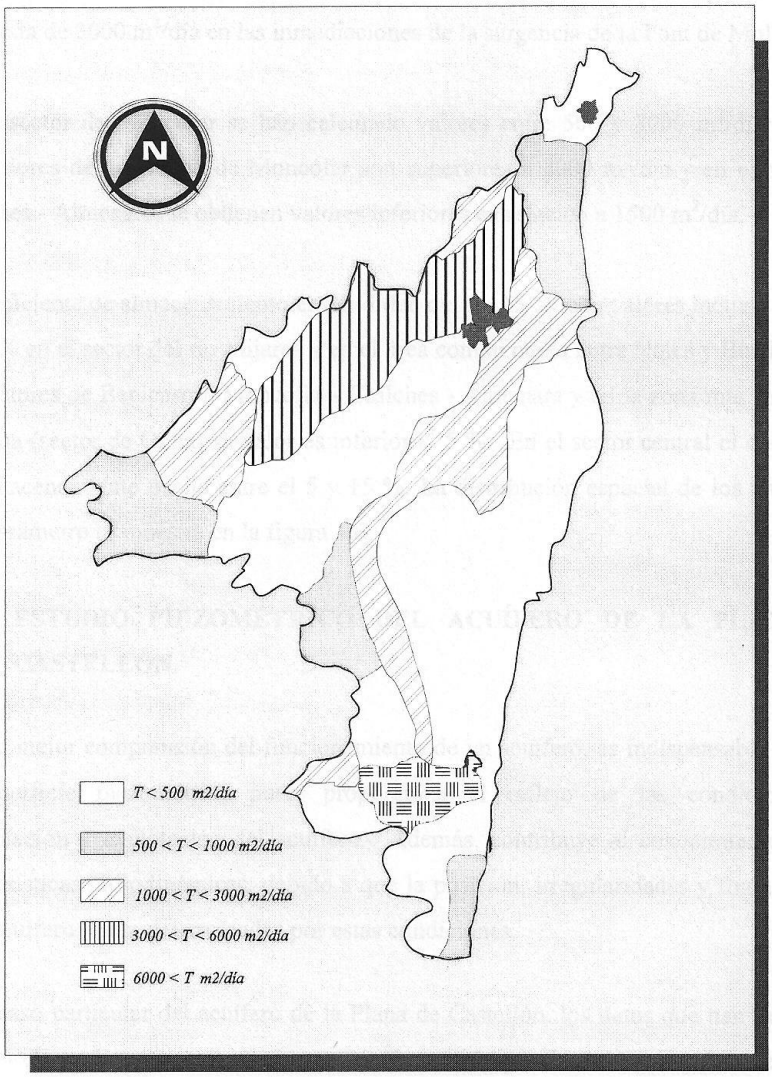


Figura 4.5. Mapa de transmisividades de la Plana de Castellón (IGME, 198a)

En el sector de Benicasim se obtuvo un amplio rango de 500 m^2/día hasta mayores a 2000 m^2/día. Al NE de Benicasim se obtienen valores entre 200 y 400 m^2/día. Así mismo, en el área comprendida entre Benicasim y Castellón, los valores que se obtienen son hasta de 3000 m^2/día en las inmediaciones de la surgencia de la Font de Moli.

En el sector de Moncófar se han calculado valores entre 500 y 8000 m^2/día. En los alrededores de la Ciudad de Moncófar son superiores a 2000 m^2/día y en el sector de Chilches - Almenara, se obtienen valores inferiores en relación a 1500 m^2/día.

El coeficiente de almacenamiento es del orden del 5 - 15 %, con valores incluso mayores al 15 % en el sector del río Mijares y en el área comprendida entre Nules y Burriana. En los sectores de Benicasim, Moncófar - Chilches - Almenara y en la zona más interna de la Plana (sector de Onda) su valor es inferior al 5 %. En el sector central el coeficiente de almacenamiento oscila entre el 5 y 15 %. La distribución espacial de los valores de este parámetro se muestra en la figura 4.6.

4.5 ESTUDIO PIEZOMÉTRICO DEL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN.

Para la mejor comprensión del funcionamiento de un acuífero, es indispensable estudiar la superficie piezométrica pues, proporciona el reflejo de las condiciones de alimentación y explotación del acuífero. Además, contribuye al conocimiento de las características hidrodinámicas; debido a que la posición, irregularidades y fluctuaciones en el acuífero, están determinadas por estas condiciones.

En el caso particular del acuífero de la Plana de Castellón, los datos que han permitido efectuar el estudio piezométrico de este acuífero, corresponden a las campañas de control realizadas por el Instituto Tecnológico y Geominero de España desde 1972 hasta la fecha. Los periodos de muestreo han variado con el tiempo. En los primeros años los periodos a manejar eran bimensuales y mensuales, a partir de los años 80, el muestreo se fue espaciando en el tiempo y actualmente se lleva a cabo semestralmente.

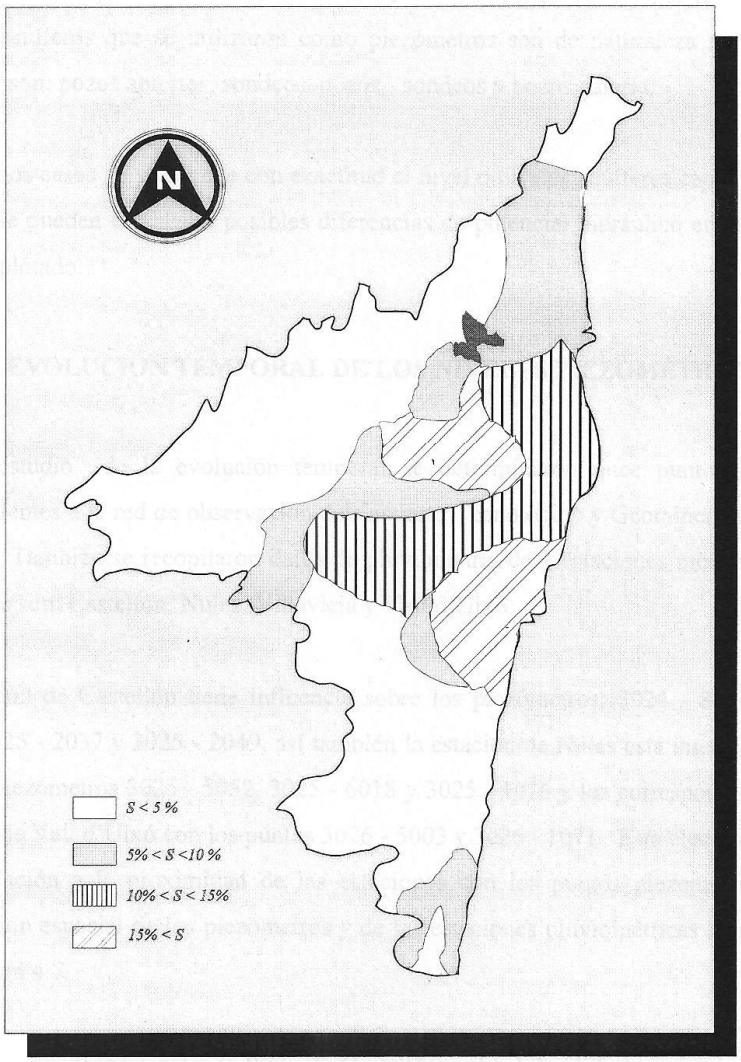


Figura 4.6. Mapa de distribución del coeficiente de almacenamiento (IGME, 1982a)

Existen algunos estudios como los de Esteller (1994), donde se han obtenido muestreos a través de campañas realizadas en los meses de Marzo, Julio y Diciembre de 1990; Marzo, Julio, Septiembre y Diciembre de 1991 y Marzo de 1992. Por lo general, los puntos acuíferos que se utilizaron como piezómetros son de naturaleza muy diversa, como lo son: pozos abiertos, sondeos, pozos - sondeos y pozos galería.

En algunos casos no se conoce con exactitud el nivel o niveles acuíferos captados, por lo que no se pueden establecer posibles diferencias de potencial hidráulico en función del nivel explotado.

4.5.1 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS

En un estudio de la evolución temporal se determinaron once puntos acuíferos, pertenecientes a la red de observación del Instituto Tecnológico y Geominero de España (ITGE). También se recopilaron datos de pluviometría de 4 estaciones meteorológicas, las cuales son: Castellón, Nules, Villavieja y Vall d´Uixó.

La estación de Castellón tiene influencia sobre los piezómetros: 3024 - 8006, 3024 - 7004, 3025 - 2037 y 3025 - 2049, así también la estación de Nules está interrelacionada con los piezómetros 3025 - 5052, 3025 - 6018 y 3025 - 1016 y los correspondientes a la estación de Vall d´Uixó con los puntos 3026 - 5003 y 3026 - 1071. Esta elección se basó en la relación a la proximidad de las estaciones con los puntos piezométricos. La distribución espacial de los piezómetros y de las estaciones pluviométricas se presentan en la figura 4.7.

Para su mayor identificación, la Plana de Castellón está subdividida por tres sectores, los que corresponden a: el sector de Benicasim, donde se localizan los puntos 3024 - 8006 y 3024 - 7004, igualmente el sector de Moncófar donde se sitúan los puntos 3026 - 5003 y 3026 - 1071; así mismo, el sector central correspondiente al área de Nules - Villa Real - Castellón, donde se encuentran los piezómetros restantes.

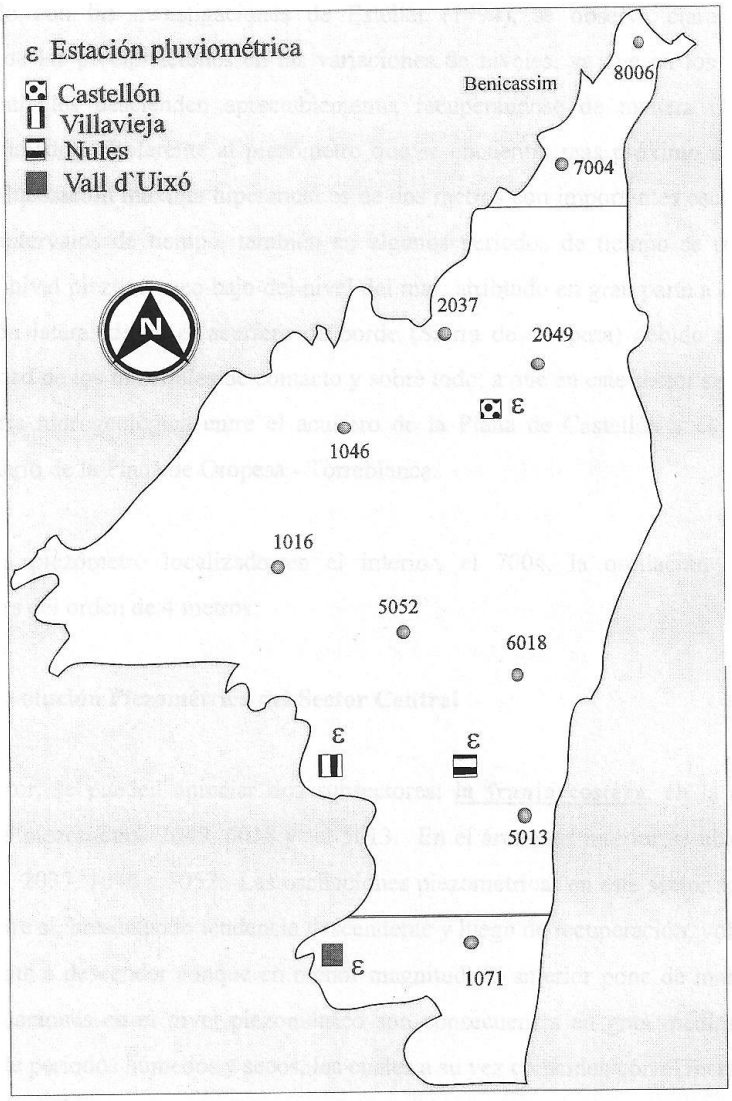


Figura 4.7. Ubicación de los piezómetros de control de las estaciones pluviométricas

4.5.1.1 Evolución Piezométrica del Sector de Benicasim

De acuerdo con las investigaciones de Esteller (1994), se observa claramente la influencia de las precipitaciones en las variaciones de niveles, ya que en los periodos secos los niveles descienden apreciablemente, recuperandose de manera rápida en periodos húmedos. Referente al piezómetro que se encuentra más próximo a la costa (8006), la fluctuación máxima hiperanual es de dos metros con importantes oscilaciones en cortos intervalos de tiempo, también en algunos periodos de tiempo se presentan valores del nivel piezométrico bajo del nivel del mar, atribuido en gran parte a la escasa alimentación lateral desde el acuífero de borde (Sierra de Oropesa) debido a la baja permeabilidad de los materiales de contacto y sobre todo, a que en este sector se localiza una divisoria hidrogeológica entre el acuífero de la Plana de Castellón y el acuífero pliocuaternario de la Plana de Oropesa - Torreblanca.

Respecto al piezómetro localizado en el interior, el 7004, la oscilación máxima hiperanual es del orden de 4 metros.

4.5.1.2 Evolución Piezométrica del Sector Central

En este sector, se pueden apreciar dos subsectores: **la franja costera**, en la cual se localizan los piezómetros 2049, 6018 y el 5013. En el área más interior se ubican los puntos 1016, 2037, 1046 y 5052. Las oscilaciones piezométricas en este sector son muy similares entre si, presentando tendencia descendente y luego de recuperación, volviendo posteriormente a descender aunque en menor magnitud, lo anterior pone de manifiesto que las oscilaciones en el nivel piezométrico son consecuencia en gran medida de la alternancia de periodos húmedos y secos, los cuales a su vez coinciden con el incremento y disminución de los volúmenes de agua extraídos del acuífero en ese sector.

La oscilación hiperanual está comprendida entre los dos metros para los piezómetros 2049 y 5013 y 4 metros para el 6018; respecto al piezómetro 5013, las fluctuaciones dan

lugar a que durante un largo intervalo de tiempo, el nivel piezométrico se localice por debajo del nivel del mar, con cotas hasta de -2 msnm.

El otro subsector en referencia, es el que corresponde al área situada entre las poblaciones de Castellón, Villa - real, Bechí y Nules. La característica general de todos los piezómetros ubicados en esta área; es la amplia fluctuación del nivel piezométrico con un máximo de 20 metros, comprendiendo rangos desde -2 msnm cuando no hay lluvias, hasta 15 ó 20 metros cuando las intensidades de las precipitaciones son muy importantes.

En las áreas donde se ubican estos piezómetros, la explotación de aguas subterráneas es relativamente elevada. Estas extracciones pueden dar lugar a que, en periodos de sequía el efecto de la infiltración del agua de lluvia, no sea tan significativo y/o solamente se denote cuando estas lluvias son más regulares en el tiempo. La ubicación de los piezómetros 1046 y 1016, corresponden a un sector de fuerte explotación, pero de importante alimentación lateral desde el acuífero mesozoico. Las oscilaciones no suelen superar los 5 metros a lo largo del periodo que comprende los referidos estudios, manteniéndose el nivel piezométrico en torno a 40 msnm y 55 a 60 msnm para cada piezómetro respectivamente.

4.5.1.3 Evolución Piezométrica en el Sector de Moncófar

En lo correspondiente a este sector, se controlan dos piezómetros, el 1071 ubicado más al interior y el 5003, localizado muy cerca de la costa. La evolución de ambos piezómetros durante el periodo 1972 - 1991, presenta para el primero; una fluctuación hiperanual de más de 10 metros con valores que oscilan entre -6 msnm y los 5 msnm, respecto al piezómetro 5003, la oscilación hiperanual máxima es de 1 metro, alcanzando cotas ligeramente por debajo del nivel del mar, especialmente en el periodo 1978 - 1985.

Como conclusión respecto a la variación piezométrica que se presenta en el acuífero de la Plana de Castellón, se puede decir que las máximas oscilaciones hiperanuales, que pueden superar los 20 metros, se presentan en los piezómetros más alejados de la costa y las mínimas, en los puntos situados en la franja costera, con variaciones inferiores a 2 metros.

De acuerdo con estudios de Esteller (1994), se ha podido comprobar que a partir de 1978, se inició un descenso generalizado del nivel piezométrico en toda la Plana de Castellón, que se mantuvo hasta el año de 1986 como consecuencia de un largo periodo de escasez de lluvias. Con posterioridad aparentemente se produce la recuperación del nivel piezométrico debido a la presencia de temporadas de lluvias, provocando con ello la recuperación de las tasas de recarga superficial al acuífero referido. Con la finalidad de representar la evolución temporal de los piezómetros de control manejados en este trabajo, se presenta la figura 4.8, en la cual se muestran los valores de la piezometría para tres piezómetros, donde cada uno representa los valores observados para la franja costera, franja interior media y franja interior alta. Así también se presentan las figuras 4.9, 4.10, y 4.11; las cuales ilustran el comportamiento piezométrico mensual general, en el acuífero de la Plana de Castellón.

4.6 EVOLUCIÓN DE CARÁCTER ESPACIAL DE FLUJO SUBTERRÁNEO EN EL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN.

Con base a las campañas de control efectuadas por el ITGE e información obtenida de diferentes proyectos y estudios (Esteller, 1994), se puede comprobar que en todos los mapas piezométricos, el flujo del agua subterránea en la Plana de Castellón es perpendicular al mar, aunque existen algunos puntos en donde se ha producido inversión del flujo en determinados periodos de tiempo, como es el caso de las áreas de Moncófar, Villa-Real y Benicasim, precisamente en estas áreas, acentuando las de Benicasim y Moncófar se refleja la existencia de niveles freáticos por debajo del nivel del mar (figuras 4.9, 4.10 y 4.11).

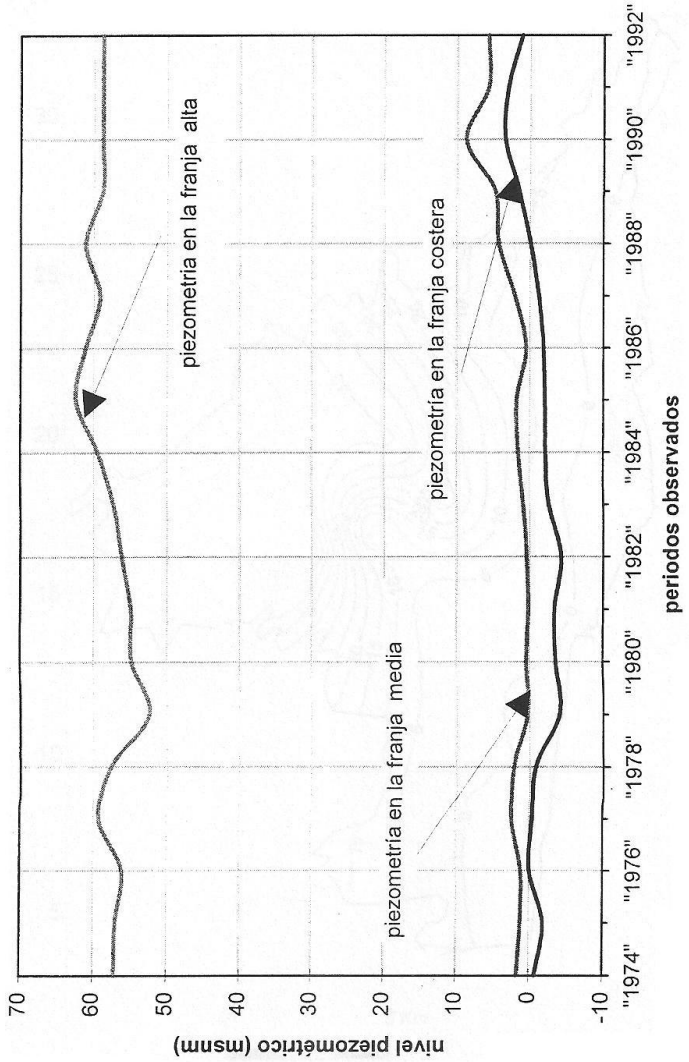


Figura 4.8. Evolución del nivel freático observado en el acuífero de la Plana de Castellón

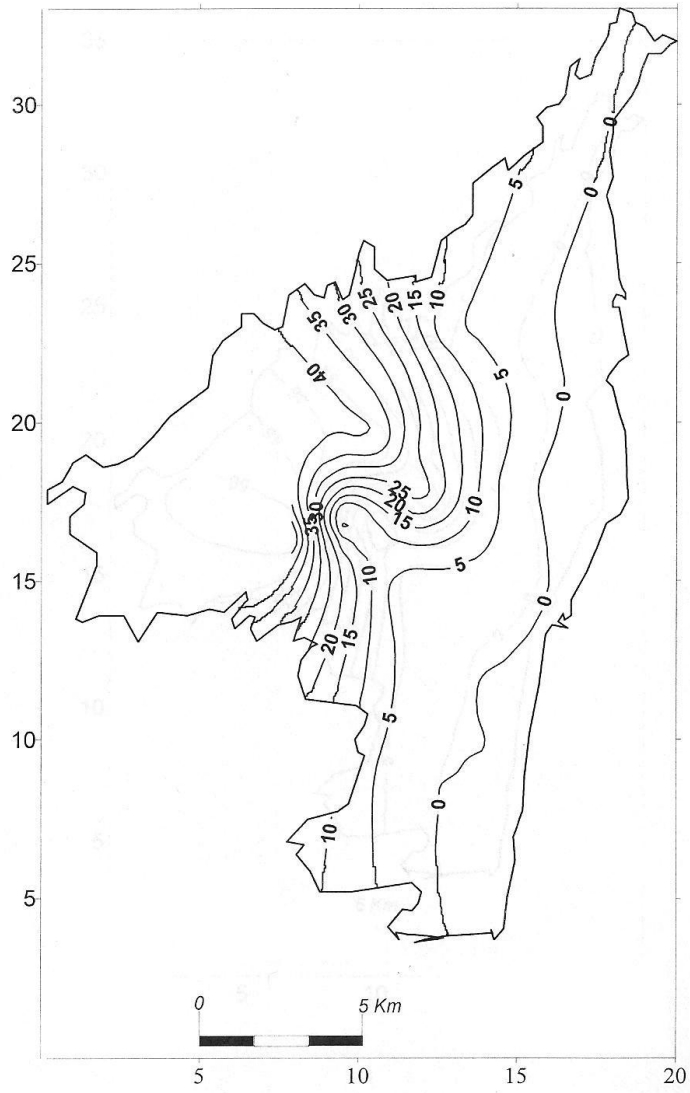


Figura 4.9. Piezometría observaba para el mes de septiembre de 1975

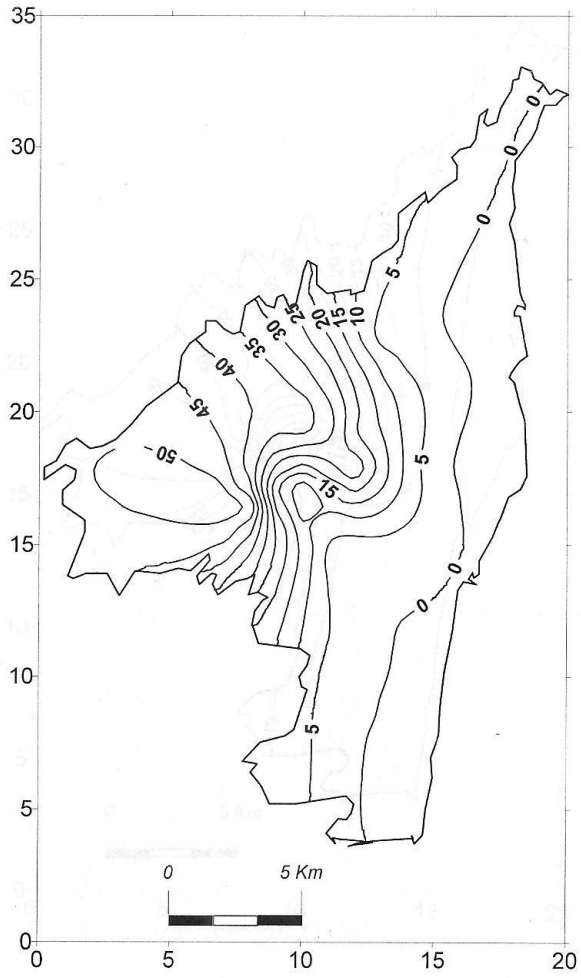


Figura 4.10. Piezometría observada para el mes de septiembre de 1979

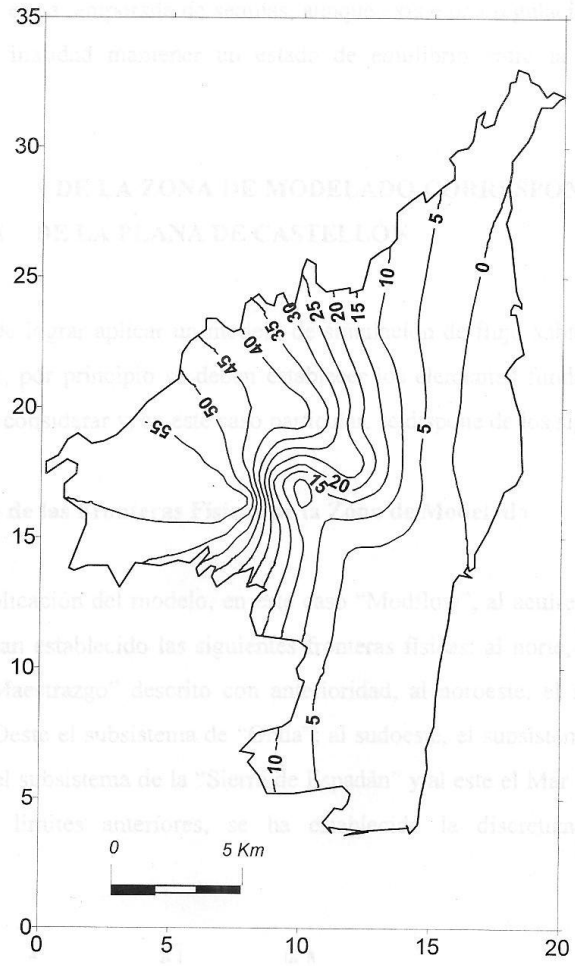


Figura 4.11. Piezometría observada para el mes de septiembre de 1989

Es importante mencionar que los volúmenes de bombeo en los diferentes pozos de captación, tienen influencia importante en el comportamiento de los niveles, siendo de mayor proporción en la temporada de sequías, aunque existe una regulación al respecto, que tiene como finalidad mantener un estado de equilibrio entre la recarga y las extracciones.

4.7 DEFINICIÓN DE LA ZONA DE MODELADO CORRESPONDIENTE AL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN

Con la finalidad de lograr aplicar un modelo de simulación de flujo subterráneo, a una zona en particular, por principio se deben establecer los elementos fundamentales que todo modelo debe considerar y, en este caso particular, se dispone de los siguientes:

4.7.1 Definición de las Fronteras Físicas de la Zona de Modelado

Para realizar la aplicación del modelo, en este caso "Modflow", al acuífero de la Plana de Castellón, se han establecido las siguientes fronteras físicas: al norte, lo delimita el subsistema del "Maestrazgo" descrito con anterioridad, al noroeste, el subsistema de "Javalambre", al Oeste el subsistema de "Onda"; al sudoeste, el subsistema del "Medio Palancia", al sur, el subsistema de la "Sierra de Espadán" y al este el Mar Mediterráneo. Con base a los limites anteriores, se ha establecido la discretización espacial correspondiente.

4.7.2 Discretización Espacial de la Malla de Modelado

Con fundamento en la configuración de la superficie topográfica, la distribución de los elementos interactuantes en el balance del acuífero (pozos, drenes, ríos, etc.) y los límites acuíferos que se conocen, además de la información obtenida por otros trabajos realizados en la misma Plana de Castellón, se ha diseñado una malla que está constituida por las siguientes dimensiones: ancho de columnas igual a 3000 metros, estableciendo

14 para el total de la malla, ancho de renglón de 1000 metros, constituyendo la malla de 24 renglones como se muestra en la figura 4.12. Cabe señalar que esta configuración ha sido adaptada, según eñ desarrollo de una serie de simulaciones cuyo resultado ha permitido establecer la adaptación definitiva de referida configuración.

4.7.3 Definición de los Elementos Componentes del Ciclo Hidrológico que Intervienen en el Modelo.

De acuerdo con la información disponible del acuífero de la Plana de Castellón, los elementos que intervienen en la aplicación del modelo y, que se manejarán de acuerdo a las circunstancias de la aplicación del mismo, son:

- **Recarga superficial**. Este elemento comprende lo correspondiente al agua de lluvia que se infiltra hasta alcanzar el manto acuífero, infiltración por retorno de regadíos, siendo ésta con aguas superficiales, aguas subterráneas y aguas residuales. Así también, debido a cuerpos de agua (embalses de María Cristina y del Sichar considerados en la alimentación lateral), lo que propicia una recarga a través de los lechos de los mismos.

- **Drenes de descarga**. Corresponde a todos los elementos que conducen el flujo que emerge, ya sea de ríos, manantiales, cuerpos de agua intermitentes y todas las zonas de drenes definidas con anterioridad sobre algunos sitios de la Plana.

- **Pozos de bombeo y recarga**. Estos elementos son los más numerosos y definen en gran parte el balance de un acuífero, por lo que sus caudales de extracción o recarga serán tomados en cuenta con cautela durante la aplicación del modelo.

- **Infiltración a través de lechos de ríos**. Este elemento es muy parecido al de recarga superficial, pero tiene sus particularidades y sólo se tomará en cuenta si en el área de modelado, se cuenta con ríos caudalosos ubicados sobre terrenos con características hidráulicas, que propicien una infiltración que amerite ser tomada en cuenta dentro de la simulación.

En el caso particular de este trabajo, es indispensable considerar las salidas al mar, por lo que se incluye en el elemento componente del modelo que mejor lo adapte, o bién manejando una serie de celdas con carga constante, que permita establecer una condición de frontera de flujo especificado. Así mismo, es preciso mencionar que la aplicación del modelo implicará ajustes en los elementos anteriormente considerados y los complementarios a éstos, por lo que estará sujeto a todos los ajustes pertinentes.

Por último, se tiene considerado para la calibración del modelo, la comparación de resultados de "Modflow", con los datos de un balance hidráulico que realizaron diversos organismos en 1977, 1982 y 1989, los cuales se presentarán en los capítulos posteriores. Con todos los elementos presentados en este capitulo se intenta realizar la aplicación formal del modelo "Modflow", la cual se detallará con oportunidad en los próximos apartados.

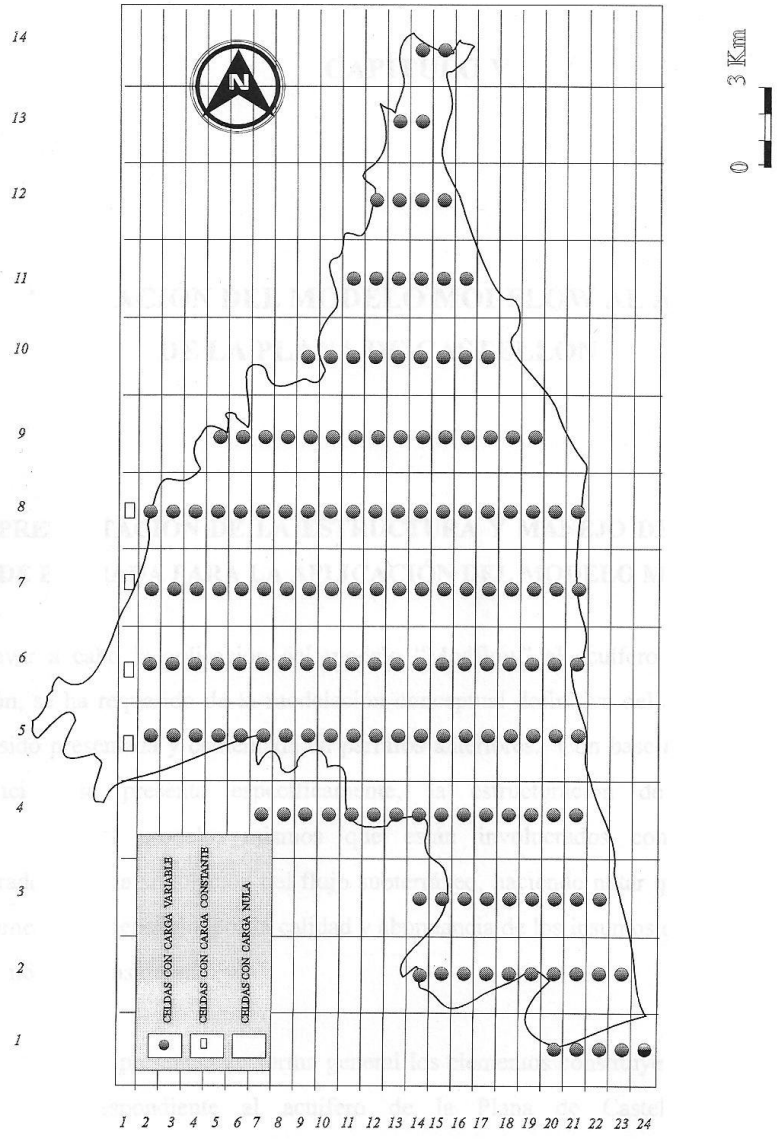


Figura 4.12. Malla de modelado del acuífero de la Plana de Castellón

CAPÍTULO V

APLICACIÓN DEL MODELO MODFLOW AL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN

5.1 PRESENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA Y MANEJO DE LOS DATOS DE ENTRADA PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO MODFLOW

Para llevar a cabo la aplicación del modelo "Modflow" al acuífero de la Plana de Castellón, se ha requerido de la modelación conceptual definitiva del acuífero, misma que ha sido presentada y comentada en párrafos anteriores. Con base en lo anterior, a continuación se presenta específicamente, la estructuración de los módulos constituyentes del modelo, mismos que están involucrados con los procesos considerados para la simulación del flujo subterráneo, haciendo notar que también está estrechamente influenciado, por la calidad y abundancia de los insumos que se requieren en cada módulo considerado.

En la figura 5.1 se presentan en forma general los elementos constituyentes del modelo conceptual, correspondiente al acuífero de la Plana de Castellón, vinculado estrechamente con la estructura del modelo "Modflow", para la realización de la aplicación del mismo, en lo que corresponde a la simulación del flujo subterráneo en el acuífero referido.

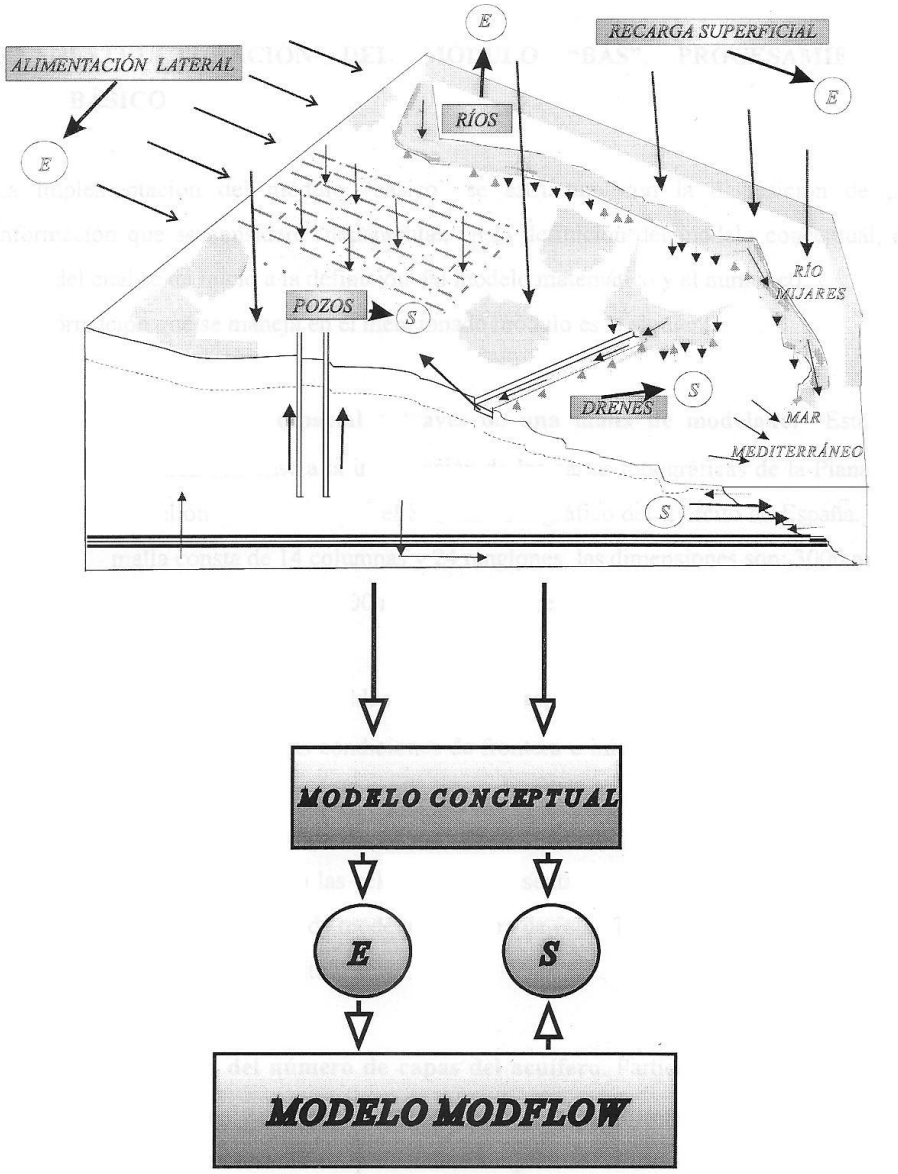


Figura 5.1. Modelo conceptual del acuífero de la Plana de Castellón

5.1.1 ESTRUCTURACIÓN DEL MÓDULO "BAS", PROCESAMIENTO BÁSICO

La implementación del módulo "básico" se estructura con la disposición de la información que se considera fundamental, en la definición del modelo conceptual, a partir del cual se da inicio a la definición del modelo matemático y el numérico.
La información que se maneja en el mencionado módulo es la siguiente:

- **discretización espacial a través de una malla de modelado.** Esta es obtenida con base a la información de las cartas topográficas de la Plana de Castellón, publicadas por el Servicio Geográfico del Ejercito de España. La malla consta de 14 columnas y 24 renglones, las dimensiones son: 3000 m de ancho de columna y 1000 m de ancho de renglón (figura 5.2);

- **codificación de las celdas como activas, inactivas y de carga constante**. De acuerdo con las condiciones de frontera e iniciales que corresponden, se determinó el número de celdas que se manejarán durante todo el proceso de modelado, tanto en el espacio como en el tiempo, respecto a la piezometría. Se incluye también las celdas que representan piezometría nula por estar en la frontera del área de modelado o fuera de ésta. Tal situación se ilustra en la figura 4.12 del capítulo anterior;

- **definición del número de capas del acuífero**. Particularmente el acuífero de la Plana de Castellón está estrictamente conformado por una serie de capas interconectadas que hacen complicado su manejo, para efectos de modelación de este acuífero multicapa, se considera recomendable manejarlo como un acuífero de una sola capa y libre;

- **definición de las condiciones iniciales de carga**. Los valores de la piezometría que integran las condiciones iniciales, se definieron con base a la información existente de los piezómetros de control, estando estos distribuidos en la Plana de acuerdo a su presentación en la figura 5.2. Tales valores de las condiciones iniciales, varían en el proceso de ajuste para un estado de simulación "**estacionario o permanente**", siendo definitivos para el estado de simulación "**transitorio o no permanente**", bajo el cual, se determinaron todas las etapas de la modelación consideradas en el presente trabajo, sufriendo algunos cambios únicamente, al dejar de manejar en el proceso de modelación, para un estado estacionario a un estado transitorio;

- **discretización temporal**. La distribución del tiempo total de simulación, el cual se determinó en 365 días, se ha formulado de acuerdo a la expresión requerida para el modelo "Modflow" (McDonald y Harbaugh, 1989) y bajo la decisión de manejar 12 periodos de cálculo, estos tienen las siguientes magnitudes:

    - periodo de cálculo 1 30.41 días;
    - periodo de cálculo 2 30.41 días;
    - periodo de cálculo 3 30.41 días;
    - .
    - .
    - .
    - periodo de cálculo 12 30.41 días.

Cabe mencionar que, para cada periodo de cálculo definido para un estado de simulación transitorio, se requiere introducir todas las características definidas para el acuífero, que tengan variación temporal, como lo es la transmisividad, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, etc.

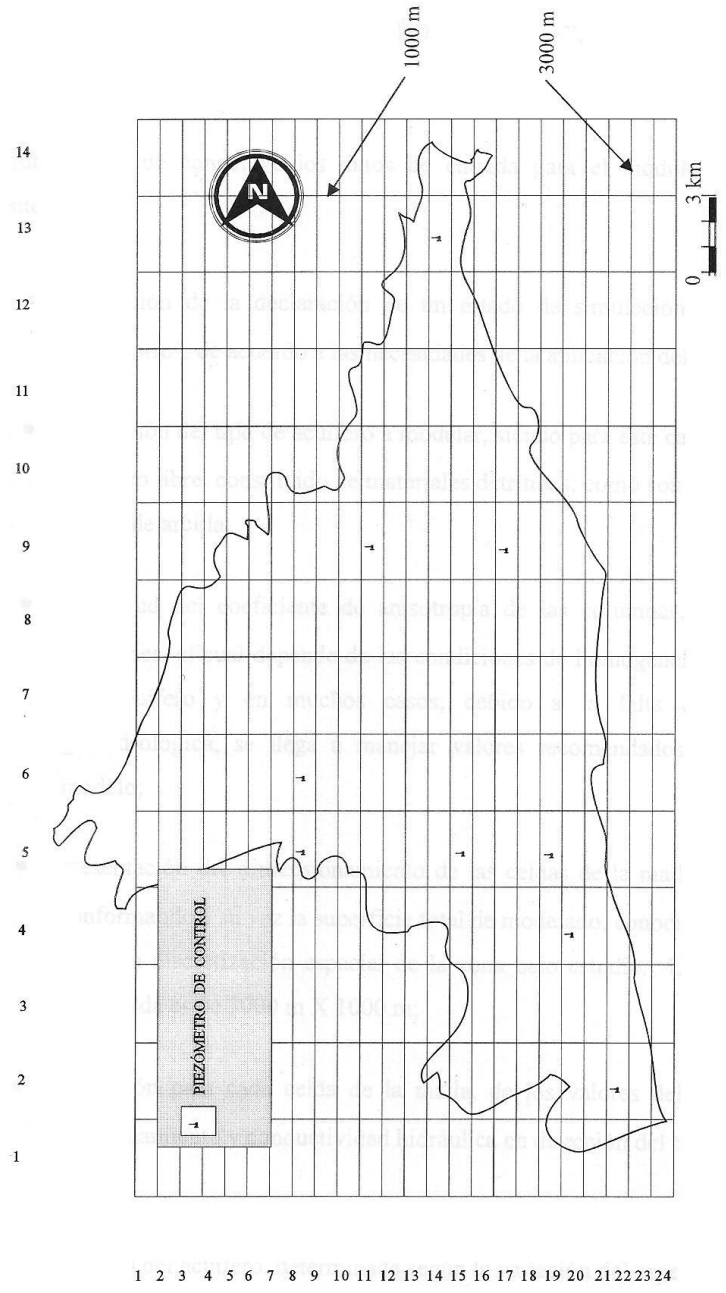


Figura 5.2. Ubicación de los piezómetros de control del acuífero de la Plana de Castellón

5.1.2 ESTRUCTURACIÓN DEL MÓDULO "BCF", FLUJO EN BLOQUE CENTRADO

La información que constituye los datos de entrada para el módulo "BCF", es la siguiente:

- definición de la declaración de un estado de simulación "permanente o transitorio", de acuerdo a las necesidades de la aplicación del modelo;

- definición del tipo de acuífero a modelar, siendo para este caso particular, un acuífero libre, constituido de materiales detríticos, como son gravas, arenas y lentes de arcilla;

- magnitud del coeficiente de anisotropía de las columnas, respecto a los renglones, el cual depende de las condiciones de homogeneidad del espesor del acuífero y en muchos casos, debido a la falta de información geohidrológica, se llega a manejar valores recomendados por el mismo modelo;

- presentación del dimensionamiento de las celdas de la malla de modelado, conformando a su vez la superficie total de modelado, conocido comúnmente como la discretización espacial de la zona bajo estudio. La dimensión de cada celda es de 3000 m X 1000 m;

- definición para cada celda de la malla, de los valores del coeficiente de almacenamiento y conductividad hidráulica en dirección del renglón;

- definición para cada celda de la malla, del valor de la elevación de la plantilla del acuífero, determinada según la variación del espesor del acuífero en el área de modelado. Tales valores se tomaron como referencia del mapa de isoespesores de la Plana de Castellón (IGME, 1982).

5.1.3 ESTRUCTURACIÓN DEL MÓDULO "WELL", POZOS

El bombeo es considerado como uno de los más importantes parámetros que influyen en el comportamiento de la piezometría, tanto en el espacio como en el tiempo. Por tal situación, se determinó con base a la ubicación de pozos, pozos-sondeo y piezómetros de control, localizados en las cartas topográficas de la Plana de Castellón; un número de pozos de bombeo para extracción, el cual fue depurado y reducido según la aceptación del modelo, el número definitivo de pozos de extracción es de 50 y la distribución de los mismos se ilustra en la figura 5.3, así también, el orden de las tasas manejadas es variable de acuerdo al periodo simulado, excepto en la etapa de calibración. Cabe mencionar que el número de pozos no representa el número real existente en la Plana de Castellón, pero, como en todo modelo, siempre existen restricciones que se tienen que adaptar a las condiciones de la zona de modelado, por lo que la función principal de los pozos considerados, radica en hacer presente la influencia de las tasas de bombeo por extracción, que repercuten directamente en el comportamiento del nivel piezométrico.

5.1.4 ESTRUCTURACIÓN DEL MÓDULO "DRN", DRENES

Otro elemento que considera el modelo "Modflow" para la simulación del flujo subterráneo, es la salida de flujo a través de drenes, los cuales de la misma manera que el paquete pozos, se identificaron de acuerdo a la ubicación en las cartas topográficas correspondientes al sitio de estudio, los cuales constituyen en su totalidad, a dos zonas húmedas correspondientes al "Cuadro de Castellón" y al "sistema de drenes de Chilches-Almenara". La distribución de drenes se presenta en la figura 5.4, siendo el número máximo permitido por el modelo "Modflow", de 50 drenes, haciendo notar que los valores de las elevaciones del nivel freático, de cada dren, es variable para cada simulación en los periodos de tiempo considerados, debido a la dependencia de la evolución del nivel freático en el tiempo.

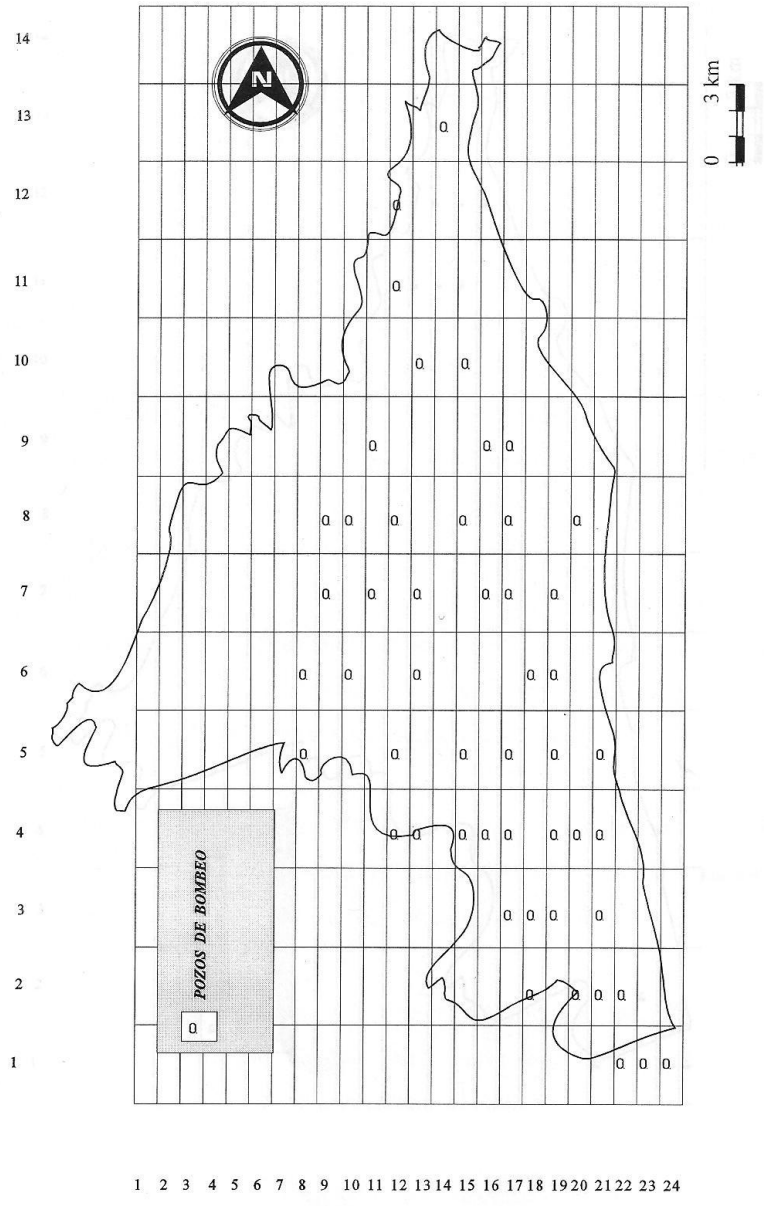


Figura 5.3. Ubicación de los pozos de bombeo en el acuífero de la Plana de Castellón

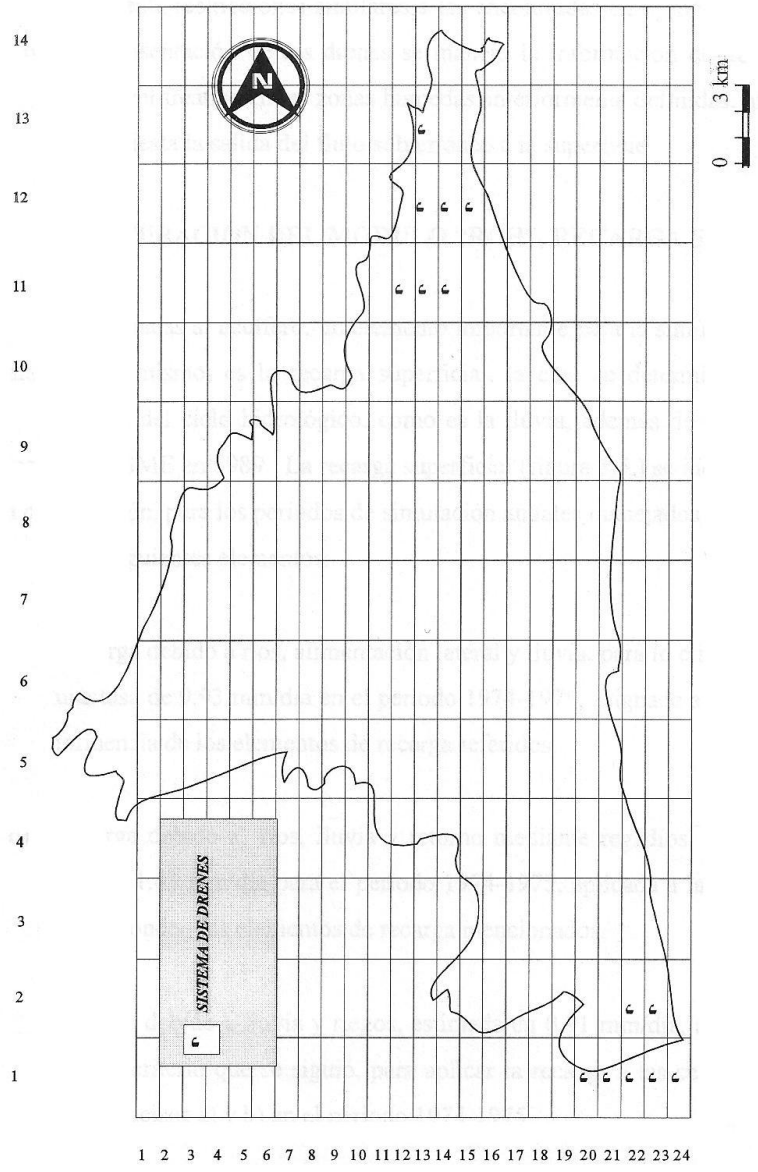


Figura 5.4. Ubicación de los drenes de salida en el acuífero de la Plana de Castellón

A cada dren le corresponde la elevación existente en la topografía de la Plana de Castellón, estando en función de la ubicación de cada dren dentro de la misma Plana. Este módulo presenta restricciones similares a las encontradas en el módulo pozos, por lo que, para la presentación de los drenes se manejó la información de ubicaciones y elevaciones del nivel freático en las zonas húmedas anteriormente definidas, que a través de drenes se manifiesta la salida del flujo subterráneo a la superficie.

5.1.5 ESTRUCTURACIÓN DEL MÓDULO "RCH", RECARGA SUPERFICIAL

Referente a las entradas al acuífero, un elemento importante para la simulación del flujo subterráneo en el mismo, es la recarga superficial, la cual se determinó con base a algunos elementos del ciclo hidrológico, como es la lluvia, además de todos los datos obtenidos por el IGME en 1989. La recarga superficial (figura 5.5.) se identificó en toda la Plana de Castellón, para los periodos de simulación anuales manejados en este trabajo, de acuerdo a los siguientes elementos:

a).- Recarga debido a ríos, alimentación lateral y lluvia, para lo cual se determinó una tasa de 9.93 mm/día en el periodo 1974-1975, asignada a las celdas bajo influencia de los elementos de recarga referidos.

b).- Recarga debido a ríos, lluvia y retorno mediante regadíos, resultando una tasa de 1.43 mm/día para el periodo 1974-1975, aplicada a las celdas que le corresponden los elementos de recarga mencionados.

c).- Recarga debido a lluvia y riegos, estimada en 0.91 mm/día, asignada con el mismo criterio que se siguió, para aplicar la recarga a las celdas manejadas en los incisos a) y b) en el periodo 1974-1975.

d).- Recarga originada solamente por lluvia, estimada en 0.27 mm/día, asignada a las celdas donde únicamente se cuenta con la influencia de la lluvia, para efectuarse la recarga superficial, correspondiente al lapso de tiempo 1974 - 1975..

Cabe mencionar que las anteriores tasas de recarga superficial obtenidas, sólo corresponden al periodo de calibración 1974 - 1975, y de la misma manera se obtuvieron otros valores para los diferentes periodos de simulación considerados.

5.1.6 ESTRUCTURACIÓN DEL MÓDULO "SIP", PROCEDIMIENTO TOTALMENTE IMPLÍCITO

El modelo Modflow presenta dos alternativas de solución del sistema de ecuaciones, generado por la aplicación del método de diferencias finitas centradas a la ecuación diferencial parcial, la cual representa el comportamiento del flujo en el acuífero, las dos opciones son:

a).- El procedimiento totalmente implícito y.
b).- El método de sobrerelajación en pasos sucesivos.

El primer método es el que se utiliza en la presente aplicación, y las condiciones del mismo se incorporan automáticamente al módulo, pudiendo ser las que propone el propio módulo o un arreglo ajustado de acuerdo a las condiciones particulares de solución de las ecuaciones.

Referente al segundo método, también es bien aceptado para la solución de grandes sistemas de ecuaciones lineales, sin embargo, a mayor número de iteraciones, se incrementa gradualmente el error por redondeo o truncamiento que, aunque es pequeño relativo a otros métodos de solución, es menos recomendable que el primer método.

5.1.7 ESTRUCTURACIÓN DEL MÓDULO "OC", CONTROL DE ENTRADAS Y SALIDAS

"Modflow" permite de manera opcional, controlar las salidas de los resultados con base a las entradas mismas del modelo, las características de control se especifican para cada capa de acuífero declarada y para cada periodo de cálculo establecido en el periodo de simulación total. Esto permite obtener diferentes formatos de salida de los resultados, mismos que son útiles para las diferentes aplicaciones de los datos de salida, a un postprocesador o algún paquete graficador o lo que muchas veces se hace, transferir los resultados a un software compatible con "Modflow", para realizar entre otras cosas, la estimación de parámetros.

5.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO MODFLOW

Una vez que se han logrado estructurar todos los módulos de entrada de datos, los cuales intervienen en la aplicación del modelo "Modflow", así como la adaptación definitiva de los paquetes, que constituyen la aportación total de los elementos que intervienen en el balance del acuífero, que se pretende modelar. Se consideró necesaria la realización de una serie de ensayos para identificar el funcionamiento del modelo bajo las condiciones de entrada del mismo, tales ensayos ayudaron a iniciar la etapa de calibración con mejores referencias para obtener las aplicaciones definitivas, que posteriormente permitieron realizar la validación del modelo.

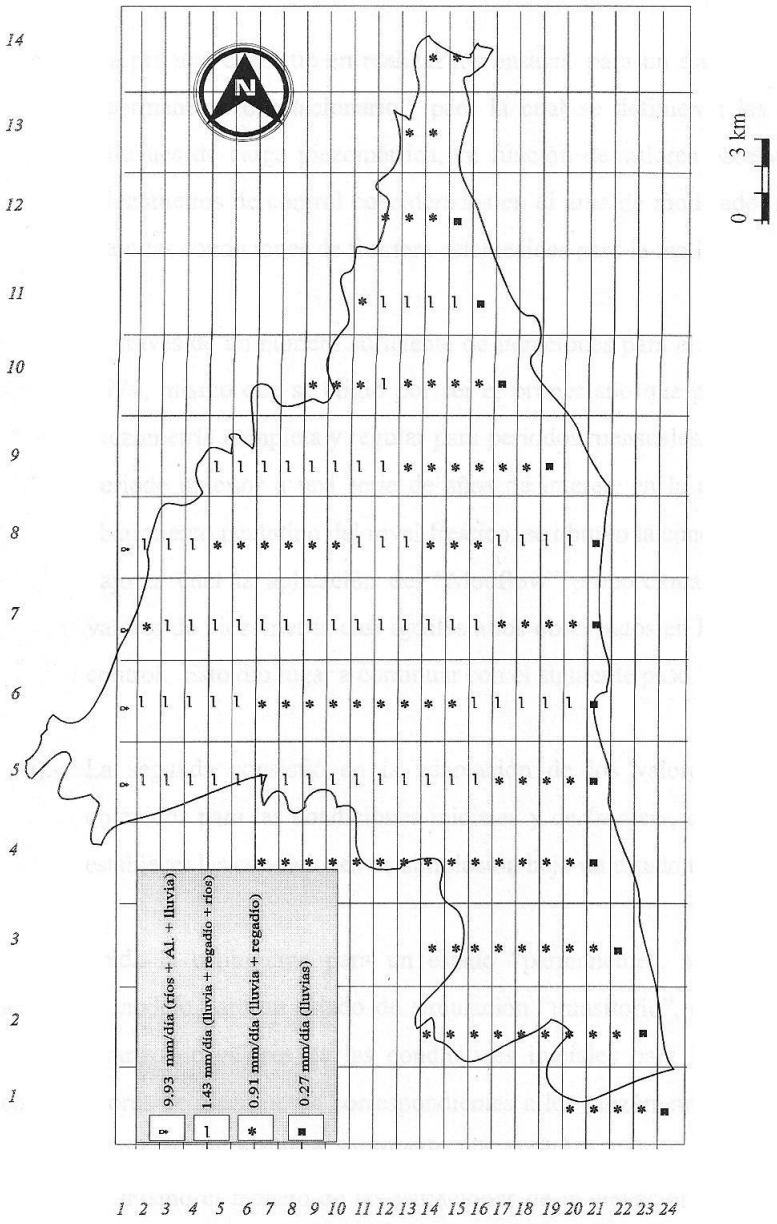


Figura 5.5. Distribución de los valores de la tasa de recarga superficial en la Plana de Castellón

La etapa de calibración se realizó en dos etapas:

a) - La primera consistió en realizar los ensayos para un estado de simulación "permanente o estacionario", para la cual se definieron las condiciones iniciales de carga piezométrica, en función de valores observados en los piezómetros de control considerados en el área de modelado, así también, bajo las condiciones de frontera establecidas para la malla de modelado.

A través de un número suficiente de iteraciones para el periodo de cálculo 1974, mismo que se eligió por ser el primer año que presenta valores de piezometría completa y regular para periodos mensuales, además de ser un periodo anterior a una serie de años de interés, en la cual se aprecia un abatimiento paulatino del nivel freático, se obtuvo la condición estacionaria bajo la cual la aplicación del "Modflow" proporciona como resultados, valores de piezometría casi iguales a los observados en los piezómetros de control. Esto dio lugar a continuar con el siguiente paso.

b).- La segunda consistió en la adaptación de los valores de piezometría, obtenidos para las condiciones iniciales y de frontera, con el propósito de establecer las condiciones de simulación bajo un estado transitorio.

Una vez obtenida la calibración para un estado "permanente", se continuó con la calibración del modelo para un estado de simulación "transitorio", en la cual se tomó como base el rango de valores de las condiciones iniciales para la piezometría, así también los valores de piezometría correspondientes a los piezómetros de control, para tal situación, también se hicieron intervenir los módulos "pozos, drenes y recarga superficial", así mismo el manejo de las variaciones de la elevación de la plantilla del acuífero, conductividad hidráulica en dirección del renglón y transmisividades, todo ello para los diferentes periodos de cálculo derivados de la discretización temporal. Los ensayos de calibración realizados bajo estas condiciones, necesitaron mayor cautela en el

análisis de la evolución de la piezometría, obtenida en cada aplicación del modelo, debido a la intervención de un número mayor de parámetros.

Después de un número suficiente de ensayos de calibración, los cuales implicaron cambios en las tasas de bombeo, carga piezométrica en las fronteras, conductividad hidráulica en dirección del renglón, transmisividades y coeficientes de almacenamiento, se logró obtener valores aceptables de la carga piezométrica al final del tiempo total de simulación, con lo cual, se obtuvo la calibración del modelo en forma plena para el año de 1974. Tales resultados se manejaron como base para realizar posteriormente la validación del mismo.

Los valores de los parámetros conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento, utilizados para realizar la aplicación del modelo "Modflow" referidos a las figuras 4.5 y 4.6 del capítulo anterior, se presentan en el cuadro 5.1. Así también, los resultados de la calibración se muestran en el cuadro 5.2. para los piezómetros de control definidos en la Plana de Castellón.

Cuadro 5.1. Valores de la transmisividad T y coeficiente de almacenamiento S, aplicables al modelo "Modflow"

PARÁMETRO (rango de valores referidos a figura 4.5)	PARÁMETRO (rango de valores referidos a figura 4.6)
Transmisividad m^2/día	**Coeficiente de almacenamiento**
T < 500	**S < 5%**
500 < T < 1000	**5% < S < 10%**
1000 < T < 3000	**10% < S < 15%**
3000 < T < 6000	**15% < S**
6000 < T	

Cuadro 5.2 Valores de la piezometría calibrada para el periodo 1974-1975

PIEZÓMETRO	UBICACIÓN EN MALLA (R,C)	PIEZOMETRÍA OBSERVADA msnm	PIEZOMETRÍA CALIBRADA msnm
1016	(8, 5)	56.95	56.96
1046	(8, 6)	41.79	41.83
2037	(11, 9)	6.0	5.99
8006	(14, 13)	-0.50	-0.54
5052	(15, 5)	1.15	1.17
2049	(17, 9)	0.99	1.01
6018	(19, 5)	0.98	0.957
5013	(20, 4)	-0.02	0.036
1071	(22, 2)	-1.89	-1.865

5.3 VALIDACIÓN DEL MODELO MODFLOW

Posterior a la etapa de calibración del modelo, desarrollada para la obtención de la simulación del flujo en el acuífero de la Plana de Castellón, se puede llevar a cabo la siguiente etapa de la modelación de flujo, la cual consiste en la "validación del modelo". En dicha etapa, se consideraron definitivos los valores obtenidos mediante la calibración, de:

- condiciones iniciales de piezometría;
- variación de espesor del acuífero en el espacio;
- valores de transmisividad en el acuífero;
- valores del coeficiente de almacenamiento;
- condiciones de frontera.

Con el establecimiento de los valores de los parámetros de control y condiciones de simulación, surgidos de la etapa de calibración, se realizaron las aplicaciones del modelo bajo las condiciones señaladas, obteniendo con ello la validación para los periodos de simulación 1974-1975, 1975-1976, y 1988-1989. Para estos mismos periodos se obtuvieron valores de piezometría bastante aproximados a los registrados en los piezómetros de control, lo que confirma la buena resolución en la etapa de calibración, reflejada en la etapa de validación.

Los resultados de la validación se presentan para cada periodo de simulación, en los cuadros 5.3, 5.4 y 5.5.

Cuadro 5.3 Valores de la piezometría validada para el periodo 1975

PIEZÓMETRO	UBICACIÓN EN MALLA (R, C)	PIEZOMETRÍA OBSERVADA msnm	PIEZOMETRÍA VALIDADA msnm
1016	**(8, 5)**	**56.948**	**56.96**
1046	**(8, 6)**	**41.7987**	**41.8**
2037	**(11, 9)**	**6.0**	**5.90**
8006	**(14, 13)**	**-0.505**	**-0.54**
5052	**(15, 5)**	**1.155**	**1.17**
2049	**(17, 9)**	**0.9966**	**1.01**
6018	**(19, 5)**	**0.9844**	**0.96**
5013	**(20, 4)**	**-0.0211**	**0.04**
1071	**(22, 2)**	**-1.8933**	**-1.86**

Cuadro 5.4 Valores de la piezometría validada para el periodo 1976

PIEZÓMETRO	UBICACIÓN EN MALLA (R, C)	PIEZOMETRIA OBSERVADA msnm	PIEZOMETRÍA VALIDADA msnm
1016	(8, 5)	56.10	56.06
1046	(8, 6)	39.53	39.58
2037	(11, 9)	11.40	11.43
8006	(14, 13)	0.0	-0.02
5052	(15, 5)	1.12	1.09
2049	(17, 9)	1.07	1.08
6018	(19, 5)	0.61	0.66
5013	(20, 4)	0.82	0.80
1071	(22, 2)	-0.04	-0.02

Cuadro 5.5 Valores de la piezometría validada para el periodo 1989

PIEZÓMETRO	UBICACIÓN EN MALLA (R, C)	PIEZOMETRIA OBSERVADA msnm	PIEZOMETRÍA VALIDADA msnm
1016	(8, 5)	58.84	58.92
1046	(8, 6)	43.89	43.88
2037	(11, 9)	10.25	10.12
8006	(14, 13)	0.3875	0.43
5052	(15, 5)	4.76	4.67
2049	(17, 9)	0.0	0.03
6018	(19, 5)	2.21	2.27
5013	(20, 4)	1.9175	1.81
1071	(22, 2)	1.4525	1.37

5.4 ETAPA DE SIMULACIÓN DE FLUJO EN EL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN, APLICANDO EL MODELO MODFLOW

Se puede considerar como una de las últimas etapas de la modelación para la simulación del flujo subterráneo, y representa la consistencia de una aplicación exitosa o inadecuada del modelo, pues de ello depende la posibilidad de obtener resultados aproximados a la realidad, y también la oportunidad de llegar a predecir comportamientos del flujo en periodos futuros, etapa que para el caso particular de este trabajo, se efectuará si así se requiere para el acuífero bajo estudio. Sin embargo, en muchos modelos de simulación, la predicción a futuro del flujo subterráneo es el objetivo fundamental de la modelación, ya que el interés de su aplicación es el de conocer los comportamientos a futuro del flujo subterráneo.

Particularmente, en lo que se refiere a la aplicación del modelo "Modflow" al acuífero de la Plana de Castellón, se realizaron una serie de simulaciones para los años 1975, 1976, 1979 y 1989. Los resultados del balance del acuífero para cada periodo de simulación, proporcionan indicios de que el acuífero a pesar de tener grandes volúmenes de salidas, presenta déficits pequeños, siendo más notable en el periodo de simulación correspondiente al año de 1979, caracterizado por tener grandes volúmenes extraídos, debido a que este año es el que presenta demandas mayores de consumo de agua proveniente del acuífero, consecuencia de la presencia de la sequía.

Respecto a los abatimientos del nivel freático, se aprecia en cada simulación que las zonas con valores de piezometría por abajo del nivel del mar, se abaten aún más en épocas de sequía, comprendida de 1976 hasta 1979; presentándose una notable recuperación de la piezometría a partir de 1979 hasta 1989. Esto conduce a concluir que el acuífero tiene buenas recuperaciones de piezometría con la presencia de periodos de lluvia, sucediendo lo contrario para periodos donde existe escasez de precipitación pluvial.

Lo anterior da lugar a concluir que el funcionamiento hidráulico del acuífero, está principalmente influenciado por las etapas de sequía y lluvia, acompañadas de los volúmenes de extracción de agua por medio del bombeo, por lo que se considera factible que el acuífero pueda tener regulación en su balance hidráulico, considerando tales circunstancias además de tomar en cuenta la permanencia del abasto del recurso agua, para consumo en los diferentes sectores socioeconómicos de la Plana de Castellón.

Hasta este punto de desarrollo del presente trabajo, se ha determinado la calibración del modelo "Modflow", así como la validación del mismo, presentando resultados que se pueden considerar satisfactorios para lograr una continuación, con lo que corresponde a la aplicación del modelo para las diferentes alternativas de simulación de flujo referente a los periodos de cálculo 1975, 1976, 1979 y 1989.

El análisis y presentación de resultados de la etapa correspondiente a la simulación de flujo, se detalla en forma parcial en los próximos párrafos, junto con las alternativas de bombeo que forman parte de la propuesta de solución planteada en el siguiente capítulo.

5.5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Hasta el momento, de acuerdo con los resultados que se obtuvieron de la validación del modelo "Modflow" para los periodos de simulación del acuífero considerado, se han determinado tres situaciones particulares respecto al comportamiento de la piezometría correspondiente al acuífero de la Plana de Castellón.

La primera situación se ubica en el periodo de cálculo correspondiente a 1975 - 1976, en donde se aprecian importantes salidas causadas principalmente por las tasas de bombeo, cabe mencionar que la recarga al acuífero correspondiente, es importante debido a que es un periodo en el cuál no se aprecia escasez de lluvia en el lugar. Sin embargo, este periodo es de cierto interés porque a partir de éste se inicia un paulatino abatimiento del nivel freático hasta el periodo crítico de 1978 - 1979, donde se presenta en la mayoría de

los piezómetros de control considerados en este estudio, un evidente descenso del nivel freático, provocado por la disminución de recarga al acuífero, originado principalmente por la escasez de lluvia y el notable incremento de las tasas de bombeo para el suministro de agua correspondiente al uso agrícola, consumo humano, uso industrial y turismo, principalmente.

El segundo caso al que se hace referencia, corresponde al observado en el periodo 1978 - 1979, este lapso de tiempo es de particular interés, principalmente porque presenta el mayor descenso del nivel freático, iniciándose posteriormente a éste una paulatina recuperación de la piezometría hasta el periodo de 1989.

El tercer caso corresponde al periodo 1988 - 1989 en donde se confirma en la totalidad de los piezómetros de control, la recuperación de los niveles piezométricos, por lo que se consideró importante para las valuaciones de las tasas de bombeo que se manejan.

Con la disposición de la información existente sobre los tres periodos anteriormente comentados, además de los resultados obtenidos de la validación para los mismos periodos, se estableció una identificación de zonas que involucran las concentraciones de los pozos que se ubican en la zona costera, zona interior media y zona interior alta; representadas en la figura 5.6.

a).- FRANJA COSTERA DE LA PLANA DE CASTELLÓN

Respecto a esta zona, se encuentran ubicados 9 pozos de extracción, de los cuales 4 de ellos manejan tasas de bombeo relativamente altas respecto a los 5 restantes, los cuales sólo presentan incrementos en sus tasas en el periodo de 1978 - 1979, (cuadro 5.6).

b).- FRANJA INTERIOR MEDIA DE LA PLANA DE CASTELLÓN

Esta región corresponde a la mayor superficie central de la Plana de Castellón y en ésta se manifiesta la mayor actividad de bombeo, detectándose una marcada heterogeneidad en los valores de las tasas de bombeo durante los tres periodos de validación mencionados.

Cuadro 5.6. Bombeo manejado en la franja costera de la Plana de Castellón

No DE POZO	UBICACIÓN EN MALLA	BOMBEO 1975 m^3/día	BOMBEO 1976 m^3/día	BOMBEO 1979 m^3/día	BOMBEO 1989 m^3/día	BOMBEO PROMEDIO m^3/día
	R / C					
B	23.1	2,322	2,534	4105.94	3114.85	3,019
C	24.1	2,775	2605.15	2944.95	3114.85	2860
1071	22.2	10,732	7,787	15545.95	7,037	10,275
1056	21.3	4247.527	3398.021	4247.526	3652.87	3886.486
5013	20.4	6994.261	1061.881	10463.07	283.168	4700.596
I	21.4	2661.783	1982.179	3369.7	1982.18	2498.96
K	21.5	2548.516	2090.1	3114.853	1076.04	2207.377
U	20.8	12997.43	12997.43	12997.43	13082.38	13018.66
8006	14.13	8495.054	4813.864	7532.281	4275.844	6279.26

c).- FRANJA INTERIOR ALTA DE LA PLANA DE CASTELLÓN

Esta región representa la parte donde se aprecia la más importante recarga y alimentación lateral al acuífero, pero también se caracteriza por tener las tasas de extracción más altas al igual que algunos pozos de la franja media y que normalmente se mantiene casi permanente en los tres periodos analizados. Los valores de los bombeos manejados para las franjas media y alta se presentan en los cuadros 5.7 y 5.8.

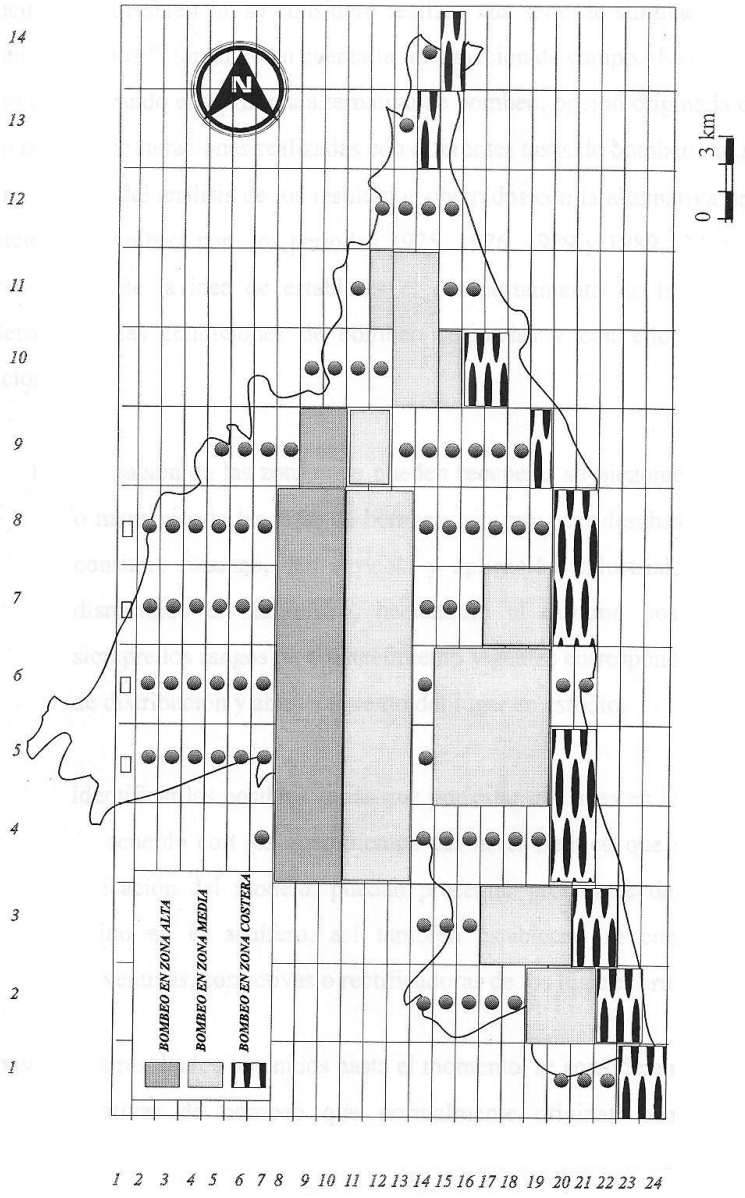


Figura 5.6. Representación de las regiones críticas de bombeo en las zonas costera, media y alta

Continuando con lo referente a la propuesta de gestión y manejo del recurso hidráulico del acuífero en referencia, se consideró realizar una serie de simulaciones mediante el modelo "Modflow", tomando en cuenta la información de campo. La aplicación se llevó a cabo considerando una primera alternativa de bombeo, opción originada después de un cierto número de iteraciones realizadas con diferentes tasas de bombeo, tal simulación se origina a partir del análisis de los resultados obtenidos con la alternativa original para la condición de bombeo, para los periodos 1975, 1976, 1979 y 1989. El manejo de tales valores surgió de la idea de establecer el comportamiento de la piezometría en el acuífero, bajo las condiciones de bombeo señaladas y con ello lograr definir dos situaciones:

1. Ubicación de las zonas que pueden recuperar su piezometría, disminuyendo o manteniendo las tasas de bombeo, sin provocar desabasto del recurso para consumo humano, uso agrícola y aplicación industrial, o en caso de ser disminuido el suministro, haciéndolo al mínimo posible, considerando siempre los rangos de abastecimiento vigentes correspondientes a las normas de distribución y abastecimiento del lugar en estudio.

2. Identificar las posibles zonas que por estar ubicadas en los límites del mar y de acuerdo con los abatimientos del nivel freático que se ilustren en cada aplicación del modelo, puedan presentar problemas de avance del frente salino en el acuífero, así también establecer un conjunto de medidas preventivas, correctivas o rectificadoras de los lugares críticos identificados.

Con base en los resultados obtenidos hasta el momento, se considera el planteamiento de algunas alternativas de bombeo que normalmente originan una disminución del abatimiento del nivel freático en el sitio de modelado, y para tal efecto, el análisis de tales alternativas se presentará en el próximo capítulo.

Cuadro 5.7. Bombeo correspondiente a la franja interior media de la Plana de Castellón

No DE POZO	UBICACIÓN EN MALLA R / C	BOMBEO 1975 m^3/día	BOMBEO 1976 m^3/día	BOMBEO 1979 m^3/día	BOMBEO 1989 m^3/día	BOMBEO PROMEDIO m^3/día
A	22.1	2406.932	2265.347	4162.57	3114.85	2987.424
D	18.2	2831.685	2916.635	3114.85	3398.021	3065.297
1069	20.2	6682.776	5691.686	5380.2	6484.557	6059.804
1009	21.2	8211.885	4474.061	9344.56	7022.578	7263.271
5035	17.3	7645.549	6909.31	8070.301	7362.38	7496.885
5036	18.3	5238.616	4445.745	5521.78	4898.81	5026.237
1090	19.3	3114.853	3058.219	3256.437	3681.19	3277.67
E	12.4	4955.45	5663.37	7645.55	6314.656	6144.756
5025	13.4	15007.93	14781.39	17839.61	14583.17	15553.02
F	15.4	5153.666	4190.89	8211.885	6937.627	6123.517
5026	16.4	7503.964	7135.845	7985.35	7900.4	7631.389
G	17.4	2973.269	2831.684	3539.605	3256.437	3150.248
H	19.4	920.2975	1070.377	707.9211	4417.43	1779
5070	12.5	8070.301	8466.737	8495.053	20076.64	11277.18
5052	15.5	16168.91	15262.78	18519.21	5663.37	13903.57
J	17.5	10080.79	10080.8	10194.06	9033.074	9847.183
6018	19.5	141.584	1976.516	5.6633	3567.92	1422.92
L	13.6	12969.11	12969.11	13054.06	15744.16	13684.11
6028	18.6	12742.58	12742.58	12742.58	12997.43	12806.29
6027	19.6	10760.40	10788.71	10477.23	9571.094	10399.36
1021	11.7	16990.10	15999.02	20303.17	21860.60	18788.22
N	13.7	8495.05	8778.222	9910.896	11751.49	9733.914
0	16.7	23219.81	23219.81	23219.81	23219.81	23219.81
6007	17.7	15007.93	15007.93	15007.93	15999.02	15255.70
P	19.7	8495.054	8495.054	8495.054	8976.44	8615.4
R	12.8	21294.26	14158.42	21520.8	22653.47	19906.74
S	15.8	5578.418	5578.418	5578.42	5889.9	5656.289
T	17.8	2491.882	2491.882	2491.88	4304.16	2944.951
2037	11.9	24210.90	5635.052	27269.12	23757.83	20218.22
2048	16.9	693.763	761.723	659.782	6059.805	2043.768
2049	17.9	4615.646	4445.745	4389.111	11298.42	6187.230
V	.13,10	22370.31	22087.14	22370.31	19821.79	21662.38
W	.15,10	22370.31	22370.31	22370.31	22370.31	22370.31
X	12.11	9967.53	9627.728	10137.43	11411.68	10286.09
7004	12.12	6796.043	6796.043	6955.94	7928.717	7119.185

Cuadro 5.8. Bombeo correspondiente a la franja interior alta de la Plana de Castellón

No DE POZO	UBICACIÓN EN MALLA R / C	BOMBEO 1975 m^3/día	BOMBEO 1976 m^3/día	BOMBEO 1979 m^3/día	BOMBEO 1989 m^3/día	BOMBEO PROMEDIO m^3/día
1016	8.5	28.3168	5663.37	21407.53	14158.42	10314.41
1046	8.6	3964.358	9086.676	12317.83	6654.458	8005.830
1059	10.6	11893	13592.08	12742.58	18037.83	14066.37
M	9.7	19538.62	19538.62	19595.25	22455.26	20281.94
2042	9.8	28033.67	22313.67	28033.68	22653.47	25258.62
Q	10.8	22228.72	17358.22	21888.92	22228.72	20926.14

CAPÍTULO VI

PROPUESTA DE SOLUCIONES ALTERNATIVAS RELACIONADAS CON LA GESTIÓN DEL USO Y EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO

6.1 INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de establecer algunas propuestas de solución, relacionadas con la explotación, regulación y utilización del agua proveniente del acuífero bajo estudio, en el capítulo anterior, con base a los resultados de la simulación, se consideró necesario la realización de una identificación de zonas, que por su actividad de bombeo, se consideran criticas y las más idóneas para que, con base a las circunstancias del comportamiento de niveles freáticos prevalecientes en función de la explotación existente, se dé lugar al establecimiento de algunas alternativas de bombeo, con la finalidad de mejorar los niveles freáticos de la zona de estudio. Tales alternativas están basadas en el manejo de una redistribución iterativa de las tasas de bombeo, establecidas con base a los valores de las tasas de bombeo originales.

En los próximos párrafos se presenta el establecimiento de las alternativas de bombeo y el fundamento de tales propuestas.

6.2 ALTERNATIVAS DE BOMBEO PROPUESTAS

En las zonas costera, media y alta, se ha considerado la distribución de las tasas de bombeo existentes, con la finalidad de lograr con base a estos valores, propuestas de nuevas tasas de bombeo para obtener bajo ciertas condiciones, una simulación de flujo que muestre una recuperación de los niveles freáticos para las zonas establecidas. Las modificaciones de las tasas de bombeo que se realizaron, originaron una alternativa inicial de bombeo, la cual, de acuerdo a los valores de las tasas de bombeo empleadas, está definida como una alternativa que utiliza un "valor medio" para cada pozo considerado, tomando en cuenta la información del bombeo original correspondiente a los periodos de tiempo 1975, 1976, 1979 y 1989.

Los resultados obtenidos con esta alternativa se presentan y analizan en los próximos apartados, no sin antes establecer que, con base a los mismos resultados de la alternativa 1, se llegó a la necesidad de proponer una segunda alternativa de bombeo, la cual se realiza aplicando un ajuste de las tasas de bombeo, a diferencia de que en este último, el ajuste del bombeo se aplica tomando en cuenta las zonas localizadas, que siguen presentando "recuperación nula" de los niveles freáticos o bien, abatimiento de los mismos, a pesar de la aplicación de la alternativa 1. Además, los valores de bombeo adaptados son comparados secuencialmente con las dotaciones reducidas (anexo II) que implicaron su empleo, de tal manera que los valores de los volúmenes de salidas no rebasen los valores mínimos de dotación.

6.2.1 ALTERNATIVA 1

La aplicación del modelo "Modflow" utilizando la alternativa 1 está basada en la necesidad de establecer una condición base de bombeo, que permita evaluar en forma global las magnitudes de bombeo requeridas, para lograr una recuperación del nivel freático en el acuífero aplicando en este caso, tasas de bombeo medias para cada piezómetro, siendo calculadas con referencia a los periodos de tiempo considerados. La

alternativa en referencia permite obtener como resultado, los valores de piezometría para los diferentes piezómetros de control considerados, tales valores se presentan en el cuadro 6.1.

También se condensaron los valores de la piezometría obtenida, a través de las aplicaciones para los periodos de simulación original, tomando en cuenta los valores de la piezometría observada en los piezómetros de control referidos. Los valores se presentan en el mismo cuadro 6.1.

Los resultados de la simulación original y la alternativa 1, hacen notar lo siguiente:

a).- En el periodo de simulación 1975, la piezometría obtenida manejando la alternativa 1, resulta ser menor para los piezómetros1016, 1046 y 2049; es mayor para los piezómetros 2037, 8006, 5052 y 5013, y muy similares para la simulación original de cada periodo, para los piezómetros 1071 y 6018.

b).- Referente al periodo de simulación 1976, utilizando la alternativa 1, el nivel freático resultó mayor que el obtenido con la simulación original para el piezómetro 1046, además resultó menor para los piezómetros 1016, 2037, 2049, 5013 y 1071. También se observaron valores muy similares en los piezómetros 8006, 5052 y 6018.

c).- En lo que respecta al periodo 1979, la piezometría obtenida utilizando la alternativa 1, presenta el siguiente comportamiento: es mayor en los piezómetros 1016, 1046, 2037, 5052, 5013 y 1071. Es menor para los piezómetros 2049 y muy similar para el 8006 y el 6018.

d).- En lo que corresponde al periodo de simulación 1989, los resultados originados para el nivel freático con la alternativa 1, son los siguientes:

- los valores son mayores para los piezómetros 1016, 2037 y 2049;
- son menores para los piezómetros 1046, 5052, 5013 y 1071;
- los valores resultan ser muy similares en los piezómetros 8006 y 6018.

Con la aplicación del modelo "Modflow" correspondiente a la simulación original de bombeo para los periodos 1975, 1976, 1979 y 1989; se calcularon los volúmenes parciales y totales correspondientes a las salidas para cada periodo referido, tales resultados se compararon con los obtenidos manejando la alternativa 1.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los periodos 1975 y 1976, los volúmenes de extracción con la alternativa 1, resultan ser ligeramente mayores a los volúmenes alcanzados para la condición de bombeo perteneciente a la simulación original, ésto es lógico pues en estos periodos las tasas de bombeo utilizadas en la alternativa 1, resultan ser mayores a las tasas de bombeo originales. Referente al periodo 1979, los volúmenes obtenidos con bombeos correspondientes a la alternativa 1, resultaron ser menores que los obtenidos con la simulación original de bombeo. Por último, en el periodo 1989 los volúmenes conseguidos con bombeos propuestos en la alternativa 1, resultaron ser ligeramente menores que los obtenidos con bombeos manejados en la simulación original. Los valores de los volúmenes conseguidos para ambas condiciones de bombeo se presentan en los cuadros 6.2 y 6.3.

Cuadro 6.1. Piezometría correspondiente a los pozos ubicados en la franja costera, manejando los resultados de la simulación original y alternativa 1 (msnm)

No DE POZO	UBICACIÓN EN LA MALLA (X,Y)	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1975	ALTERNATIVA 1 (m) 1975	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1976	ALTERNATIVA 1 (m) 1976	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1979	ALTERNATIVA 1 (m) 1979	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1989	ALTERNATIVA 1 (m) 1989
B	23.1	0.045	-0.701	0.759	-0.88	-3.59	-1.12	2.87	2.83
C	24.1	-2.06	-2.7	-1.62	-2.99	-4.85	-3.11	0.481	0.73
1071	22.2	-1.835	-1.597	0.033	-1.59	-4.11	-1.87	1.487	0.70
1056	21.3	-0.128	0.0	0.53	-0.024	-0.762	-0.152	1.44	1.27
5013	20.4	0.027	0.243	0.822	0.116	-0.81	0.109	1.856	1.44
I	21.4	-0.289	-0.192	0.073	-0.267	-0.682	-0.253	0.576	0.378
K	21.5	-0.024	0.0	-0.097	-0.106	-0.69	-0.058	0.591	0.472
U	20.8	-0.484	-0.50	-0.56	-0.579	-1.83	-0.576	-0.09	-0.039
8006	14.13	-0.527	-0.71	-0.012	-0.231	-0.46	-0.028	0.441	0.173

Cuadro 6.1. Piezometría correspondiente a los pozos ubicados en la franja interior media, manejando los resultados de la simulación original y alternativa 1 (msnm) (continuación)

No DE POZO	UBICACIÓN EN LA MALLA (X,Y)	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1975	ALTERNATIVA 1 (m) 1975	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1976	ALTERNATIVA 1 (m) 1976	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1979	ALTERNATIVA 1 (m) 1979	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1989	ALTERNATIVA 1 (m) 1989
A	22.1	0.95	0.567	2.16	0.478	-2.23	0.15	4.28	4.01
D	18.2	1.64	1.77	2.95	1.94	0.368	1.43	4.87	4.69
1069	20.2	-0.448	-0.189	1.26	-0.137	-2.05	-0.50	2.9	2.53
1009	21.2	-1.365	-1.07	0.60	-1.06	-11.04	-1.37	2.03	1.47
5035	17.3	1.14	1.237	2.04	1.252	0.076	0.95	3.93	3.75
5036	18.3	0.75	0.862	1.67	0.86	-0.277	0.594	3.39	3.21
1090	19.3	0.54	0.652	1.41	0.64	-0.41	0.41	2.92	2.76
E	12.4	16.8	15.95	14.24	13.82	14.71	15.88	18.7	18.85
5025	13.4	4.99	4.48	0.957	0.356	2.11	3.70	6.82	6.33
F	15.4	1.23	1.15	1.46	0.783	-0.112	0.88	3.43	3.2
5026	16.4	0.89	0.856	1.17	0.57	-0.234	0.62	3.05	2.84
G	17.4	0.896	0.90	1.24	0.66	-0.082	0.68	2.98	2.78
H	19.4	0.588	0.661	1.146	0.496	-0.225	0.49	2.31	2.18

Cuadro 6.1. Piezometría correspondiente a la franja interior media, utilizando los resultados de la simulación original y la alternativa 1 (msnm) (continuación)

No DE POZO	UBICACIÓN EN LA MALLA (X,Y)	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1975	ALTERNATIVA 1 (m) 1975	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1976	ALTERNATIVA 1 (m) 1976	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1979	ALTERNATIVA 1 (m) 1979	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1989	ALTERNATIVA 1 (m) 1989
5070	12.5	17.14	16.09	17.77	16.85	16.79	16.0	16.29	19.04
5052	15.5	1.17	1.487	1.09	1.09	0.137	1.19	4.70	3.35
J	17.5	0.80	0.914	0.58	0.506	0.14	0.685	3.13	2.56
6018	19.5	0.945	0.896	0.66	0.585	0.505	0.734	2.28	2.19
L	13.6	5.3	5.0	4.51	4.2	4.28	4.12	5.80	6.56

Cuadro 6.1. Piezometría correspondiente a la franja interior media, utilizando los resultados de la simulación original y la alternativa 1 (msnm) (continuación)

No DE POZO	UBICACIÓN EN LA MALLA (X,Y)	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1975	ALTERNATIVA 1 (m) 1975	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1976	ALTERNATIVA 1 (m) 1976	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1979	ALTERNATIVA 1 (m) 1979	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1989	ALTERNATIVA 1 (m) 1989
6028	18.6	0.496	0.51	-0.054	-0.07	0.106	0.225	1.90	1.79
6027	19.6	0.17	0.195	-0.029	-0.292	-0.121	-0.027	1.457	1.33
1021	11.7	12.97	11.54	8.22	5.51	7.1	8.48	8.76	11.49
N	13.7	9.37	8.73	7.48	6.9	5.72	5.84	6.78	7.89
O	16.7	-0.82	-0.88	-1.83	-1.89	-1.44	-1.45	0.048	0.18
6007	17.7	-1.11	-1.176	-1.966	-2.04	-1.57	-1.59	-0.25	-0.09
P	19.7	-0.45	-0.48	-0.935	-0.97	-0.68	-0.69	0.362	0.445
R	12.8	-2.16	0.04	2.78	-5.25	-5.35	-2.61	-0.24	2.71
S	15.8	3.37	3.34	2.86	2.58	2.27	2.27	4.06	4.38
T	17.8	1.86	1.73	1.65	1.49	1.53	1.4	2.22	2.63
2037	11.9	5.90	7.65	11.5	5.92	2.91	5.72	10.07	11.25
2048	16.9	3.33	2.77	3.58	2.68	2.61	2.06	1.91	3.93
2049	17.9	1.03	0.625	1.09	0.591	0.795	0.356	0.0	1.33

Cuadro 6.1. Piezometría correspondiente a la franja interior media, utilizando los resultados de la simulación original y la alternativa 1 (msnm) (continuación)

No DE POZO	UBICACIÓN EN LA MALLA (X,Y)	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1975	ALTERNATIVA 1 (m) 1975	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1976	ALTERNATIVA 1 (m) 1976	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1979	ALTERNATIVA 1 (m) 1979	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1989	ALTERNATIVA 1 (m) 1989
V	.13,10	2.20	2.97	3.49	1.40	-0.021	1.136	5.98	6.16
W	.15,10	-5.39	-5.14	-6.01	-6.78	-6.82	-6.43	-3.10	-2.97
X	12.11	4.11	4.35	4.69	3.34	2.28	2.79	6.78	7.36
7004	12.12	1.66	1.57	1.856	1.09	0.292	0.402	3.36	4.1

Cuadro 6.1 Piezometría correspondiente a la franja interior alta, manejando los resultados de la simulación original y la alternativa 1 (msnm) (continuación)

No DE POZO	UBICACIÓN EN LA MALLA (X,Y)	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1975	ALTERNATIVA 1 (m) 1975	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1976	ALTERNATIVA 1 (m) 1976	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1979	ALTERNATIVA 1 (m) 1979	SIMULACIÓN ORIGINAL (m) 1989	ALTERNATIVA 1 (m) 1989
1016	8.5	56.85	52.61	55.96	54.07	52.14	56.74	58.72	60.28
1046	8.6	41.82	39.58	39.48	39.95	39.13	41.45	43.88	43.35
1059	10.6	22.90	21.01	19.26	18.85	22.90	21.99	21.5	24.7
M	9.7	27.23	27.19	26.33	25.24	27.50	27.72	30.41	31.27
2042	9.8	11.94	13.66	15.44	11.40	11.16	13.10	18.45	18.73
Q	10.8	8.27	10.16	12.33	7.41	6.86	9.11	14.12	14.86

Cuadro 6.2. Volúmenes obtenidos para la simulación original

PERIODO DE CÁLCULO	VOLUMEN TOTAL ANUAL
1975	**245164426 m^3**
1976	**212070528 m^3**
1979	**247143774 m^3**
1989	**298544513 m^3**

Cuadro 6.3. Volúmenes obtenidos para la alternativa 1 de bombeo

PERIODO DE CÁLCULO	VOLUMEN TOTAL ANUAL
1975	**248491656 m^3**
1976	**220755304 m^3**
1979	**233251529 m^3**
1989	**292229857 m^3**

De acuerdo con estos resultados se concluye que, el manejo de la alternativa 1 sólo es factible para periodos cercanos al 1979 - 1989 y, por lo tanto, se considera conveniente realizar un ajuste de las tasas de bombeo para los periodos de cálculo manejados en este trabajo. Esto implicó realizar otra simulación, considerando una segunda alternativa aplicando el modelo "Modflow", utilizando los mismos periodos de simulación señalados anteriormente.

6.2.2 ALTERNATIVA 2

La presente alternativa se realizó con base a los resultados que no fueron satisfactorios para la alternativa 1, el propósito es el de mejorar el comportamiento de los niveles freáticos que no se lograron recuperar con la propuesta de bombeo de la alternativa 1. La diferencia entre las dos alternativas manejadas consiste principalmente en que, para la alternativa 1 se emplean tasas de bombeo promediadas en forma individual para cada pozo, de acuerdo a los registros de los años disponibles, y la segunda alternativa, maneja un ajuste del bombeo manejado en la alternativa inicial, disminuyendo en forma proporcional, tomando en cuenta que tanto se reducen los volúmenes de extracción debido al ajuste del bombeo, revisando si las reducciones reflejadas en las dotaciones manejadas en el anexo II, no salen del rango manejado por las normas de suministro de agua vigentes en el lugar. Mantener siempre los valores de dotación reducida dentro del rango establecido, es el criterio que rige el ajuste del bombeo para las zonas donde no se obtuvieron recuperaciones del nivel freático. Los resultados obtenidos para tales circunstancias son los siguientes:

a).- Los valores de la piezometría obtenidos con la simulación realizada utilizando la alternativa 2 de bombeo, se presentan en los cuadros 6.4a, 6.4b y 6.4c, ejemplificando sólo para el año 1979, pero se realizó la aplicación para todos los años de estudio, presentándose en el cuadro 6.1 tales valores. Respecto a los cuadros 6.4, también se encuentran anexos los valores de la piezometría obtenida de la simulación original. Tales resultados se especifican para la regionalización definida por las franjas costera, media y alta.

b).- Los valores de la piezometría correspondientes a la simulación manejada con la alternativa 2, representan una notable recuperación, sin embargo, algunos piezómetros como lo son el 1059, 1071, 5070, L y T, presentan un ligero descenso debido al ajuste de las tasas de bombeo realizada. Esta situación en realidad no representa complicación alguna, pues el abatimiento del nivel freático

en estos puntos de extracción, no afecta significativamente la tendencia general de la piezometría de la región.

Cuadro 6.4a. Piezometría correspondiente a la franja costera, utilizando la alternativa 2 (msnm)

No DE POZO	UBICACIÓN EN LA MALLA (X,Y)	SIMULACIÓN ORIGINAL 1979	ALTERNATIVA 2 1979
B	23 - 1	-3.59	-0.493
C	24 - 1	-4.85	-2.493
1071	22 - 2	-4.11	-1.548
1056	21 - 3	-0.762	-0.039
5013	20 - 4	-0.81	0.146
I	21 - 4	-0.682	-0.225
K	21 - 5	-0.21	-0.042
U	20 - 8	-0.557	-0.377
8006	14 - 13	-0.46	-0.231

Cuadro 6.4b. Piezometría correspondiente a la franja interior media, utilizando la alternativa 2 (msnm)

No DE POZO	UBICACIÓN EN LA MALLA (X,Y)	SIMULACIÓN ORIGINAL 1979	ALTERNATIVA 2 1979
A	22 - 1	-2.23	0.527
D	18 - 2	0.368	1.63
1069	20 - 2	-2.048	-0.57
1009	21 - 2	-3.36	-1.039
5035	17 - 3	0.076	1.03
5036	18 - 3	-0.277	0.686
1090	19 - 3	-0.414	0.515
E	12 - 4	14.71	15.91
5025	13 - 4	2.11	3.618
F	15 - 4	-0.112	0.932
5026	16 - 4	-0.234	0.67
G	17 - 4	-0.082	0.728
H	19 - 4	-0.225	0.533
5070	12 - 5	16.79	16.04
5052	15 - 5	0.137	1.216
J	17 - 5	0.14	0.704
6018	19 - 5	0.506	0.759
L	13 - 6	4.28	4.20

Cuadro 6.4b. Piezometría correspondiente a la franja interior media, utilizando la alternativa 2 (msnm) (continuación)

No DE POZO	UBICACIÓN EN LA MALLA (X,Y)	SIMULACIÓN ORIGINAL 1979	ALTERNATIVA 2 1979
6028	18 - 6	0.106	0.259
6027	19 - 6	-0.122	0.003
1021	11 - 7	7.09	8.66
N	13 - 7	5.72	5.97
O	16 - 7	-1.44	-1.328
6007	17 - 7	-1.566	-1.50
P	19 - 7	-0.68	-0.62
R	12 - 8	-5.34	-2.63
S	15 - 8	2.27	2.35
T	17 - 8	1.53	1.48
2037	11 - 9	2.91	5.77
2048	16 - 9	2.62	2.18
2049	17 - 9	0.795	0.423
V	13 -10	-0.02	1.63
W	15 - 10	-6.82	-2.40
X	12 - 11	2.28	3.02
7004	12 - 12	0.29	0.588

Cuadro 6.4c. Piezometría correspondiente a la franja alta, utilizando la alternativa 2 (msnm)

No DE POZO	UBICACIÓN EN LA MALLA (X,Y)	SIMULACIÓN ORIGINAL 1979	ALTERNATIVA 2 1979
1016	8 - 5	52.14	56.90
1046	8 - 6	39.13	41.56
1059	10 - 6	22.90	22.14
M	9 - 7	27.50	27.7
2042	9 - 8	11.16	13.15
Q	10 - 8	6.86	9.06

En los siguientes párrafos se presenta el desarrollo de las aplicaciones realizadas para los periodos de simulación, la definición de zonas dentro de los sectores costeros, medio y alto anteriormente descritos y la propuesta del manejo, disposición y explotación del agua subterránea del acuífero de la Plana de Castellón, tomando como criterio las necesidades prioritarias de consumo para la ciudadanía, uso agrícola, industrias y turismo; evaluadas para cada zona identificada en los sectores de referencia.

6.3 ANÁLISIS DE LA PIEZOMETRÍA SIMULADA CONSIDERANDO LAS ALTERNATIVAS DE BOMBEO PROPUESTAS

6.3.1 SIMULACIÓN DEL FLUJO CORRESPONDIENTE A LA FRANJA COSTERA CONSIDERANDO LA SIMULACIÓN ORIGINAL

Referente al periodo 1975, la piezometría hace notar tres regiones donde predominan los niveles freáticos por debajo del nivel del mar dentro de esta franja costera, tales regiones van desde la zona de Benicassim hasta la región de Moncófar - Chilches. Los niveles freáticos oscilan entre -1.83 m bajo nivel del mar hasta el nivel cero de costa. También

se aprecia un marcado abatimiento del nivel freático entre los límites de la franja costera y la interior media (celda 15 - 10), observando un valor de -5.18 m bajo el nivel del mar.

En lo que corresponde al periodo de 1976, éste presenta la misma tendencia de la piezometría que en 1975, a diferencia que es más notable en la parte central, debido principalmente a la ubicación de pozos que representan una fuerte tasa de bombeo permanente, influyendo adicionalmente el inicio de un periodo de sequía. Así también en 1979, considerado el año en que se registra los mayores valores de abatimiento del nivel freático, los resultados de la simulación muestran un incremento de los niveles freáticos, mismos que presentaban cotas por debajo del nivel del mar en las zonas identificadas dentro del sector costero. Tal piezometría se extiende superficialmente en una parte correspondiente a la franja interior media, principalmente en la región de Moncófar - Chilches, en la desembocadura del Río Mijares y en la zona de Benicassim (referido a la figura 5.7). La piezometría oscila entre -4.26 m bajo nivel del mar hasta el cero de la costa, haciendo notar un punto crítico (celda 15 - 10) donde se presenta una piezometría de -6.7 m bajo nivel del mar.

Referente a la región de Benicassim, es un tanto menor el área donde se presenta una piezometría por debajo del nivel del mar, pero es permanente en los cuatro periodos considerados, lo que demuestra que es una zona propensa al avance del frente salino.

Por último, en lo que corresponde al periodo de recuperación del nivel piezométrico 1989, la piezometría que presenta cotas por debajo nivel del mar, se reduce a tal grado que en la zona de Moncófar .- Chilches el nivel oscila entre 0 y 1.83 m sobre nivel del mar, excepto en la desembocadura del Río Mijares donde se presentan cotas entre -0.6 y 0 m bajo nivel del mar. También en la región de Benicassim se presentan cotas ligeramente por encima del nivel del mar, lo que hace pensar que es una zona donde se puede recuperar con constante recarga, al acuífero, pudiendo ser ésta en forma zonificada.

6.3.2 SIMULACIÓN DEL FLUJO CORRESPONDIENTE A LA FRANJA COSTERA, CONSIDERANDO LA ALTERNATIVA 1

Con la finalidad de obtener una respuesta simulada del acuífero utilizando tasas de bombeo correspondientes a la alternativa 1, así como, para tratar de establecer hasta que punto se puede disminuir las tasas de bombeo con el propósito de obtener recuperaciones de la piezometría, tanto en los periodos donde inician los abatimientos de la misma, como en los periodos críticos como lo es el año de 1979, se realizaron las simulaciones correspondientes para los años 1975, 1976, 1979 y 1989, de donde se obtienen los siguientes resultados:

En el periodo de 1975, los niveles freáticos tienen la misma tendencia que la presentada en la simulación original de bombeo, inclusive guardan una estrecha similitud de valores que se encuentran bajo nivel del mar en toda la franja costera, incluyendo un punto crítico el cual presenta un máximo de -5.18 m bajo el nivel del mar. La región central cercana a las riberas del Río Mijares presenta piezometrías por debajo del nivel del mar que se extiende hasta la franja interior media en aproximadamente 3 kilómetros, como consecuencia de la presencia de pozos que manejan altas tasas de bombeo de manera permanente.

Para el periodo de 1976 el comportamiento de la piezometría, respecto a la realizada con la simulación original descrita con anterioridad, presenta una tendencia similar, excepto que en las regiones limitantes con la franja interior media y donde se localizan las concentraciones de pozos con altas tasas de bombeo, el nivel freático se mantiene en cotas por debajo del nivel del mar.

En el periodo de 1979, la piezometría simulada muestra valores con cotas apreciablemente más altas que las obtenidas en la simulación original, sin dejar de presentar niveles más bajos que el cero costero, aunque en una superficie más reducida, siendo difícil de obtener por ser un periodo donde existe mayor demanda de bombeo y en consecuencia el marcado descenso del nivel freático, resultado de la alta explotación.

Referente al periodo de 1989, el comportamiento de la piezometría es sumamente parecido al periodo simulado originalmente, caracterizado por un notable ascenso del nivel freático, haciéndose notar la presencia de cotas ligeramente por arriba del nivel del mar, sin embargo, en la región correspondiente a Moncófar - Chilches y en la región de Benicassim, solamente se presenta un valor de 0.61 m por debajo el nivel del mar.

6.3.3 SIMULACIÓN DEL FLUJO CORRESPONDIENTE A LA FRANJA INTERIOR MEDIA

Para este caso particular, la comparación de los periodos de simulación realizados con la simulación original, y los manejados con la alternativa 1, hace identificable que, cuando las tasas de bombeo son más bajas en periodos como el de 1979, el nivel freático toma valores más altos, tal recuperación de los niveles se aprecia en menor proporción para los periodos de descenso y de recuperación (1975 a 1978 y 1980 a 1989), ésto debido a que, en un buen número de pozos, los bombeos manejados en la alternativa 1 resultaban más altos que los bombeos empleados en la simulación original, por lo que al respecto, se consideran más aceptables los resultados obtenidos con los bombeos empleados en la alternativa 2, situación que se presentará más adelante.

Bajo tales circunstancias y considerando que es una zona donde la principal actividad es la agricultura, tanto intensiva como temporal y que es la principal fuente de consumo del agua subterránea en el sitio, se considera factible pensar en una solución complementaria que optimice el funcionamiento hidráulico del acuífero, y que esté encaminada a disminuir las tasas de bombeo en un rango comprendido entre las tasas de bombeo correspondientes a la alternativa 1, alternativa 2 y las originales, ya que el porcentaje en que se disminuyeron las salidas se puede cubrir con la disminución en las dotaciones para consumo humano, agrícola e industrial, siempre y cuando se encuentre dentro del rango de dotaciones vigentes en las normas de uso y distribución de aguas del sitio bajo estudio.

6.3.4 SIMULACIÓN DEL FLUJO CORRESPONDIENTE A LA FRANJA ALTA

La piezometría en esta zona se ve influenciada directamente por el número de pozos de extracción, considerados en su totalidad de alta tasa de bombeo, lo que confirma una situación idéntica a la franja interior media, proporcionando como respuesta, valores de la piezometría sensiblemente altos en los periodos de alto bombeo, como el año 1979, ésto respecto a la simulación original. Así también, para los periodos de descenso y recuperación, los valores son estrechamente mayores y menores respectivamente, esto indujo a realizar una aplicación más, tomando en cuenta un ajuste de las tasas de bombeo, principalmente en los pozos que presentaban cotas por debajo del nivel del mar. En esta región se ha definido una zona de concentración de las mayores tasas de bombeo y que complementa a la cuarta zona definida en la franja interior media (referida a figura 5.7).

6.4 SIMULACIÓN DEL FLUJO UTILIZANDO LA ALTERNATIVA 2

6.4.1 SIMULACIÓN DEL FLUJO EN LA FRANJA COSTERA

En el periodo de cálculo que corresponde a 1975, las tres zonas que se definieron por presentar piezometrías por debajo del nivel del mar, tanto para la simulación original, como la alternativa 1, ahora, bajo una nueva condición de bombeo ajustado (alternativa 2), el nivel freático se recupera notablemente en mencionadas zonas, lo que pone de manifiesto que, bajo una reducción del bombeo para diferentes piezómetros, se puede alcanzar la recuperación de los niveles freáticos, con la salvedad de que esta reducción en el bombeo, tenga repercusiones con el suministro del agua, pudiendo ser en una mínima parte, lo que en apartados posteriores se tratará de demostrar. Esto último enunciado tiene relación directa con los rangos de dotaciones, utilizados para el suministro del agua proveniente del acuífero.

La situación descrita para el periodo 1975, se presenta casi idéntica para el periodo 1976 y, en lo que se refiere al periodo 1979, en éste se aprecia un mejor ajuste de los piezómetros y pozos de bombeo a valores de piezometría, que significan una reducción substancial de las salidas para periodos de alto bombeo como éste, en el cual se presenta una reducción del 5.6% y 6.5% para dos condiciones particulares del mismo periodo, mismas que pueden proporcionar resultados favorables para periodos de cálculo inmediatamente antes y después del referido.

Finalmente para el periodo de 1989, la franja costera presenta casi en su totalidad de regiones, niveles freáticos positivos, es decir, por encima de la cota del nivel del mar, ésto contribuye sin lugar a dudas a una posible solución para la recuperación del acuífero en forma más racional, principalmente en periodos de mayor demanda de agua como el de 1979.

6.4.2 SIMULACIÓN DEL FLUJO EN LA FRANJA MEDIA

En lo que se refiere a esta zona, el nivel freático en todos los sitios presenta cierta recuperación que no es uniforme en todos los piezómetros, pero es lo suficiente para considerar las reducciones en los volúmenes de salidas, lo anterior implica llegar a verificar si éstas no provocan cambios perjudiciales en el suministro de agua, indicados directamente en los rangos de las dotaciones que se manejan (ver tabla de dotaciones de agua en el anexo II). Con base en esto, se realizó un cálculo de nuevas dotaciones que consideran tales reducciones y se verificó si es factible tal modificación al bombeo o se debe optar por tomar otra alternativa.

6.4.3 SIMULACIÓN DEL FLUJO EN LA FRANJA ALTA

El comportamiento del nivel freático en esta región, presenta las fluctuaciones correspondientes a una tendencia de recuperación, presentando valores de niveles freáticos relativamente altos en comparación con los obtenidos en la franja interior media. Esto se debe en parte, a que esta zona es la que recibe los mayores volúmenes

por recarga y alimentación lateral, además, por la ubicación en la parte alta de la cuenca hidrográfica de la Plana de Castellón.

6.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

En la figura 6.1 se ilustran los comportamientos de las salidas anuales del acuífero bajo las tres condiciones consideradas, las cuales son, simulación original, alternativa 1 y alternativa 2 . También se presenta el cuadro 6.5, correspondiente a la presentación de las salidas anuales y los cuadros 6.6, 6.7, 6.8 y 6.9, que representan los niveles freáticos obtenidos en la simulaciones que involucran las tasas de bombeo correspondientes a las alternativas 1 y 2.

Cuadro 6.5. Valores de los volúmenes para la alternativa 2

PERIODO DE CÁLCULO	VOLUMEN DE SALIDAS ANUAL
1975	**245592010 m^3**
1976	**217824511 m^3**
1979	**230235785 m^3**
1989	**290445896 m^3**

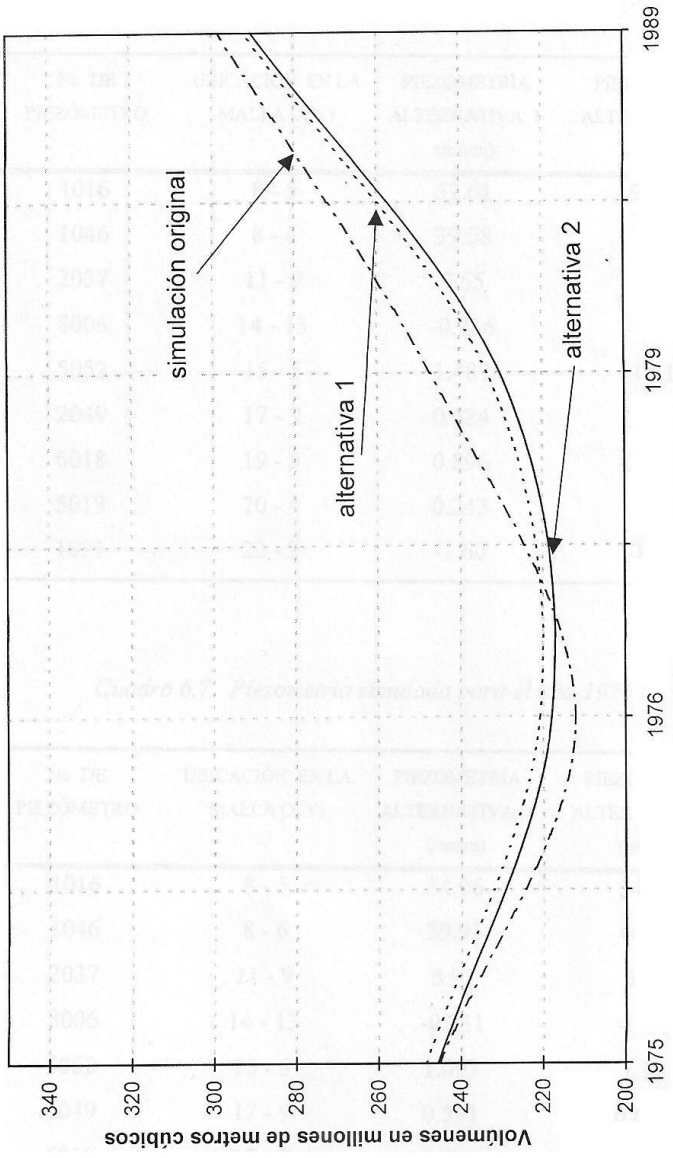


Figura 6.1. Comportamiento de los volúmenes de las salidas anuales

Cuadro 6.6. PiezometrÍa simulada para el año 1975

No DE PIEZÓMETRO	UBICACIÓN EN LA MALLA (X,Y)	PIEZOMETRÍA ALTERNATIVA 1 (msnm)	PIEZOMETRÍA ALTERNATIVA 2 (msnm)
1016	8 - 5	52.61	52.78
1046	8 - 6	39.58	39.69
2037	11 - 9	7.65	7.70
8006	14 - 13	-0.216	-0.164
5052	15 - 5	1.487	1.51
2049	17 - 9	0.624	0.691
6018	19 - 5	0.896	0.923
5013	20 - 4	0.243	0.28
1071	22 - 2	-1.60	-1.28

Cuadro 6.7. Piezometria simulada para el año 1976

No DE PIEZÓMETRO	UBICACIÓN EN LA MALLA (X,Y)	PIEZOMETRÍA ALTERNATIVA 1 (msnm)	PIEZOMETRÍA ALTERNATIVA 2 (msnm)
1016	8 - 5	54.06	54.23
1046	8 - 6	39.95	40.05
2037	11 - 9	5.92	5.96
8006	14 - 13	-0.231	-0.18
5052	15 - 5	1.097	1.12
2049	17 - 9	0.591	0.658
6018	19 - 5	0.585	0.61
5013	20 - 4	0.115	0.152
1071	22 - 2	-1.59	-1.277

Cuadro 6.8. Piezometria simulada para el año 1979

No DE PIEZÓMETRO	UBICACIÓN EN LA MALLA (X,Y)	PIEZOMETRÍA ALTERNATIVA 1 (msnm)	PIEZOMETRÍA ALTERNATIVA 2 (msnm)
1016	8 - 5	56.7	56.90
1046	8 - 6	41.45	41.56
2037	11 - 9	5.72	5.77
8006	14 - 13	-0.28	-0.231
5052	15 - 5	1.19	1.216
2049	17 - 9	0.356	0.423
6018	19 - 5	0.734	0.759
5013	20 - 4	0.109	0.146
1071	22 - 2	-1.868	-1.548

Cuadro 6.9. Piezometria simulada para el año 1989

No DE PIEZÓMETRO	UBICACIÓN EN LA MALLA (X,Y)	PIEZOMETRÍA ALTERNATIVA 1 (msnm)	PIEZOMETRÍA ALTERNATIVA 2 (msnm)
1016	8 - 5	60.28	60.4
1046	8 - 6	43.3	43.4
2037	11 - 9	11.25	11.30
8006	14 - 13	0.173	0.225
5052	15 - 5	3.35	3.37
2049	17 - 9	1.338	1.40
6018	19 - 5	2.19	2.21
5013	20 - 4	1.44	1.481
1071	22 - 2	0.704	1.01

De acuerdo con los resultados presentados en la figura 6.1, la opción de simulación que involucra las tasas de bombeo correspondientes a la alternativa 2, minimiza el volumen de salidas para los periodos de cálculo 1975, 1979 y 1989, no así en 1976, donde la opción que lo minimiza, es la presentada bajo condiciones de bombeo pertenecientes a la simulación original, es decir; los bombeos propios de la simulación. Sin embargo, se tendrá que demostrar que las reducciones en los volúmenes, provocados por los ajustes del bombeo, no cambien significativamente los valores de las dotaciones asignadas al consumo urbano, agrícola e industrial, esperando que los nuevos valores de las dotaciones se encuentren en el rango vigente, establecido en las normas de uso y distribución de aguas del lugar (ver tabla de anexo II).

A continuación se presenta el cuadro 6.10, donde se presentan los balances obtenidos de las aplicaciones para la simulación original, alternativa 1 y alternativa 2. Estos balances servirán de base para obtener el porcentaje de reducción en las salidas.

También se representa en el cuadro 6.11 los resultados obtenidos de las aplicaciones del modelo, para simulaciones a futuro que comprenden periodos de 5 y 10 años. Al respecto se consideraron dos condiciones de simulación, la primera consiste en simular a futuro para condiciones en las que el acuífero presenta una recuperación del nivel freático, la segunda condición es la que se presenta cuando el acuífero sufre mayores descensos de la piezometría. Tales opciones de simulación permiten predecir para ciertas condiciones de explotación del acuífero, el comportamiento del sistema, ofreciendo de esta manera una idea de las respuestas que se pueden presentar bajo las condiciones de explotación impuestas. Las simulaciones realizadas para un futuro de 5 y 10 años indican lo siguiente:

a) Condición de recuperación para un periodo de 5 años. En esta situación los resultados del balance calculado muestran que efectivamente se espera una recuperación del nivel freático, siempre y cuando las condiciones de explotación no cambien en el tiempo señalado.

Cuadro 6.10 Representación de los balances anuales para las diferentes condiciones de simulación

BALANCES EN EL ACUÍFERO			
AÑO	**ENTRADAS m^3**	**SALIDAS m^3**	**ENTRADAS - SALIDAS m^3**
	SIMULACIÓN ORIGINAL		
1975	245`163933 m^3	245`164426 m^3	-493 m^3
1976	212`072000 m^3	212`070528 m^3	1472 m^3
1979	247`143360 m^3	247`143774 m^3	-414 m^3
1989	298`544397 m^3	298`544514 m^3	-117 m^3
	ALTERNATIVA 1		
1975	248`491365 m^3	248`491656 m^3	-291 m^3
1976	220`756363 m^3	220`755304 m^3	1059 m^3
1979	233`251572 m^3	233`251529 m^3	43 m^3
1989	292`230000 m^3	292`229857 m^3	143 m^3
	ALTERNATIVA 2		
1975	245`591749 m^3	245`592010 m^3	-261 m^3
1976	217`825424 m^3	217`824511 m^3	913 m^3
1979	230`235958 m^3	230`235785 m^3	173 m^3
1989	290`445954 m^3	290`445896 m^3	58 m^3

Cuadro 6.11 Presentación de los balances a futuro para periodos de tiempo de 5 y 10 años, bajo las condiciones de recuperación y descenso del nivel freático

BALANCES A FUTURO			
SIMULACIÓN A 5 AÑOS		**CONDICIÓN DE RECUPERACIÓN**	
AÑO	**ENTRADAS m^3**	**SALIDAS m^3**	**ENTRADAS - SALIDAS m^3**
1990-1995	**1344`997175 m^3**	**1344`993579 m^3**	**3596 m^3**
SIMULACIÓN A 10 AÑOS.		**CONDICIÓN DE RECUPERACIÓN**	
AÑO	**ENTRADAS m^3**	**SALIDAS m^3**	**ENTRADAS - SALIDAS m^3**
1990-2000	**2605`356223 m^3**	**2605`348104 m^3**	**8119 m^3**
SIMULACIÓN A 10 AÑOS		**CONDICIÓN DE DESCENSO**	
AÑO	**ENTRADAS m^3**	**SALIDAS m^3**	**ENTRADAS - SALIDAS m^3**
1990-1995	**2177`591500 m^3**	**2177`593820 m^3**	**-2320 m^3**

b) Para el caso de la simulación a futuro en un periodo de 10 años, el comportamiento del nivel freático para la condición de recuperación del mismo, también presenta un balance positivo que en condiciones permanentes de explotación y sin incremento de las demandas.

c) La simulación a futuro para la condición de explotación del acuífero regida por la mayor demanda para consumo, se llevó a cabo para un periodo de simulación de 5 años, indicando en el cuadro 6.11 un balance negativo que se puede esperar en los próximos años, esta situación prevalecerá siempre y cuando las condiciones de alimentación al acuífero no aporten las cifras que permitan favorecer al balance, además de permanecer las altas tasas de bombeo consecuencia de las exigencias de consumo en mayor cantidad.

De acuerdo con los balances registrados, las opciones a considerar para el análisis de la reducción de los volúmenes de salidas, son las siguientes:

Cuadro 6.12. Reducciones en los volúmenes de salidas del acuífero presentadas por las alternativas 1 y 2

PERIODO DE CÁLCULO	SIMULACIÓN ÓPTIMA	% DE REDUCCIÓN O INCREMENTO DE LOS VOLÚMENES DE SALIDAS (respecto a la simulación original)
1975	Alternativa 2	- 0.170 %
1976	Alternativa 2	- 2.70 %
1979	Alternativa 2	6.84 %
1989	Alternativa 2	2.71 %

Los resultados mostrados en el cuadro 6.13 indican que la alternativa 2 representa el mayor porcentaje de volúmenes de salidas para cada año de simulación, sin embargo, en el año 1975 y 1976 las salidas resultan ser ligeramente mayores que las correspondientes a las salidas en las simulaciones originales, en parte se debe la respuesta misma del modelo, la cual quedó definida con la calibración correspondiente y que fue la más refinada posible. Sin embargo, la alternativa 2 muestra que se puede manejar una reducción en los volúmenes de salida de hasta el 6.84 %, logrando recuperaciones substanciales del nivel freático, principalmente en años donde se observan importantes descensos.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, se han cuantificado los valores de las dotaciones, correspondientes a consumos urbanos, agrícolas e industriales, definiendo valores de dotaciones reducidas en un 6.84 % y verificando si es factible de utilizarlas, con base a la permanencia dentro del rango permisible por las normas de regulación, explotación y suministro de agua en la región bajo estudio. Bajo tal circunstancia, si se obtienen buenos resultados implicará que es también factible de obtenerlos para el caso de un manejo de reducciones menores al porcentaje, en referencia (ver tabla de dotaciones en el anexo II).

6.6 ANÁLISIS DE LOS RANGOS MANEJADOS PARA EL SUMINISTRO DE AGUA EN LOS DIFERENTES CONCEPTOS DE CONSUMO DEL LUGAR

De acuerdo a los valores de dotaciones presentados en el anexo II, se ha propuesto con la finalidad de comprobar si los volúmenes reducidos en un 8.84 % proporcionan una solución factible, de acuerdo a las simulaciones de flujo realizadas. En este caso particular, la dotación reducida se calcula con base a la dotación media correspondiente a cada rango de dotaciones vigentes.

Respecto a las dotaciones para la agricultura, se maneja la dotación media de 8000 m^3/Ha anual, lo que equivale a 0.80 m^3/m^2, el área definida para riegos es de 225 Km^2, por lo tanto el volumen anual para regadíos se estima en $180x10^6$ m^3.

Transformando los volúmenes a caudales, tomando en cuenta el rango de dotaciones de 7000 a 9000 m^3/Ha, se obtienen los siguientes valores:

- rango de dotaciones: 431506.85 m^3/día - 554794.52 m^3/día;
- dotación media: 493150.685 m^3/día;
- dotación reducida en un 6.84 % respecto a la dotación media: 461578.7 m^3/día.

De acuerdo a estos últimos resultados, la dotación reducida destinada para usos agrícolas, esta dentro del rango vigente de dotaciones en la Plana de Castellón.

A continuación se presenta para cada franja que divide la superficie total de la Plana de Castellón, una propuesta de soluciones alternativas para la optimización del funcionamiento hidráulico del acuífero de la Plana de Castellón, tomando como principal criterio la prioridad de satisfacer las necesidades de consumo de agua subterránea para las actividades prevalecientes en cada zona identificada.

6.7 PROPUESTA DE SOLUCIONES PARA LA GESTIÓN EN EL USO Y APROVECHAMIENTO DEL ACUÍFERO DE PLANA DE CASTELLÓN

6.7.1 PROPUESTA CORRESPONDIENTE A LA FRANJA COSTERA

Referente a esta región, se considera factible el manejo de las reducciones en los volúmenes de salidas, a través de la modificación de las tasas de bombeo, sin embargo, el comportamiento de la piezometría en las proximidades de la costa, indica en algunas

zonas, la existencia de valores inferiores al nivel del mar, por lo anterior, se considera conveniente que sean tomadas algunas medidas complementarias como son:

a).- Manejar las reducciones de volumen que se extrae en forma permanente, si las circunstancias así lo permiten, en caso contrario, solamente bajo las condiciones de explotación que lo limiten.

b).- Declarar como zonas de veda aquellas que presentan niveles freáticos con cotas inferiores al nivel del mar, mismas que propician el surgimiento o en su defecto el progreso del avance salino, pudiendo ser la veda permanente o temporal, de acuerdo a las circunstancias de suministro de agua subterránea prevalecientes en tales sitios.

c).- Proponer a los agricultores económicamente solventes, la adaptación de sistemas de riego más eficientes, que permitan ahorrar por lo menos, el porcentaje propuesto en la reducción de las dotaciones manejadas para la agricultura.

d).- Establecer campañas de ahorro del agua, dirigida a todos los sectores involucrados con el consumo del agua, promoviendo actividades de control del suministro y distribución del líquido.

6.7.2 PROPUESTA CORRESPONDIENTE A LA FRANJA MEDIA

Como ya se mencionó con anterioridad, esta zona se caracteriza por presentar la mayor actividad de bombeo para extracción, por lo que se considera importante mantener constante las tasas de bombeo que corresponden a la alternativa 2, con el fin de que de manera permanente, se deje de extraer el porcentaje establecido en el apartado 6.4 y con ello, propiciar la recuperación constante de los niveles freáticos del lugar.

También se considera importante sustituir hasta donde sea posible, algunas fuentes de abastecimiento de flujo subterráneo por fuentes superficiales, tratando de aprovechar al máximo (por ejemplo) el paso del Río Mijares y manantiales existentes. Cabe mencionar que sigue siendo válida la propuesta de adoptar mejores sistemas de riego, que permitan optimizar el agua de riego, pues en esta zona es donde más se realiza la actividad agrícola.

6.7.3 PROPUESTA CORRESPONDIENTE A LA FRANJA ALTA

Las alternativas de solución para la recuperación del nivel freático correspondiente a esta zona, son las mismas que se plantearon para la franja interior media, esto se debe a que la parte alta también es una región con una importante concentración de pozos, que manejan por lo general altas tasas de bombeo de manera permanente. Así también, se encuentran localizadas importantes superficies destinadas a la agricultura intensiva, la cual requiere grandes cantidades de agua, proveniente del acuífero.

Adicional a esta propuesta, en esta zona, por ser donde se manifiesta la principal recarga y alimentación lateral al acuífero, se considera importante establecer un sistema de pozos de recarga, para que a través de estos, se logre impulsar con mayor rapidez la recuperación de la piezometría mediante la recarga artificial, logrando así, evitar que se abata en forma importante los niveles freáticos, en periodos donde se presenta escasez de lluvias.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

El desarrollo del presente trabajo ha involucrado considerar ciertas etapas del proceso de modelación de flujo subterráneo, teniendo siempre en cuenta las restricciones que en éste como en muchos trabajos de aplicación de un modelo numérico, se presentan y deben ser canalizadas de la mejor manera para aplicar adecuadamente un determinado modelo. Particularmente en este trabajo, se ha dispuesto de información de la zona de modelado, si bien no la suficiente para lograr conjuntar información de entrada al modelo de calidad idónea; pero si la fundamental para lograr desarrollar plenamente un modelo conceptual de la zona de modelado, siendo esto fundamental en las etapas subsecuentes de la modelación.

Los resultados y objetivos perseguidos con el desarrollo del presente estudio, se han logrado proporcionalmente a los insumos tanto de información básica, como de la experiencia del modelador. Esto lleva implícito la aceptación de la posibilidad de incurrir a inexactitudes y aproximaciones a los procesos interactuantes en un balance hidráulico de un acuífero, como consecuencia de los puntos de partida anteriormente señalados. Sin embargo, los resultados se consideran bien logrados, tomando en cuenta las tendencias de los valores que se tienen de algunos estudios e información de campo.

Se puede decir que los objetivos fundamentales se tienen alcanzados y esta experiencia sobre la modelación de flujo aporta una importante visión en el ámbito de la investigación de la sobreexplotación de acuíferos, por lo que se considera una importante contribución tanto personal como lo que a investigación se refiere.

Se realizó aceptablemente el análisis crítico de los modelos de simulación de flujo subterráneo, dando lugar a la elección de uno de ellos, el cual se adaptó correctamente a las necesidades de aplicación y estudio, siendo éste el modelo "Modflow". Una vez definido el modelo a aplicar, se plantearon y desarrollaron las etapas necesarias para lograr un estudio de modelación, desde el modelo conceptual, hasta la simulación de flujo. Logrando así, una propuesta con base a los resultados obtenidos de la aplicación del modelo "Modflow", de una solución alternativa referente a la sobreexplotación del acuífero de la Plana de Castellón o bien, a algún problema detectado con el equilibrio recarga - extracción del acuífero bajo estudio.

Particularmente la etapa de calibración y validación, constituye el punto de partida para establecer en forma adecuada, la simulación de alternativas de gestión correspondiente al acuífero de la Plana de Castellón. Los resultados han indicado que el acuífero sufre sensibles abatimientos del nivel freático con la presencia de periodos de sequía y escasez de agua, implicando con ello el incremento de las tasas de bombeo para extracción. Al respecto se han determinado algunas alternativas de modificación en las tasas de bombeo, con base a resultados obtenidos de la evaluación de una simulación básica donde se hace notar de manera importante el factor bombeo, como elemento preponderante en el balance hídrico. Lo anteriormente expuesto trae consigo la finalidad de lograr establecer una propuesta de solución, que permita la obtención de la recuperación de los niveles freáticos, para los periodos de abatimiento piezométrico.

En este sentido, se estableció una primera alternativa de bombeo, la cual surge de varios intentos y aplicaciones del modelo con diferentes tasas de bombeo. En este caso, con base a los valores de referencia de los registros en los pozos, se realizaron una serie de

simulaciones tomando valores próximos al valor medio de bombeo, tomando siempre en cuenta los rangos de las tasas de bombeo iniciales disponibles observadas correspondientes a cada periodo de cálculo. Sin embargo, con esta alternativa, algunos pozos no presentaron recuperación substancial, lo que indujo a la búsqueda de una segunda opción.

En la segunda alternativa, se opto por realizar una redistribución de las tasas de bombeo, pero esta vez considerando como límites, los valores de dotaciones establecidos por las normas (anexo II). Esta alternativa se aplico principalmente en las regiones media y costera, donde se observa una mayor extracción, y las características de explotación impedían la posibilidad de establecer una solución idónea de balance hidráulico en el acuífero, tomando en cuenta los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con el modelo "Modflow".

Con las alternativas anteriormente señaladas, se logró establecer los periodos para los cuales las mismas propuestas ofrecen un ahorro en los volúmenes de salidas anuales, esto implica una recuperación del nivel freático en periodos críticos de abatimiento, con el único inconveniente o restricción, el de establecer una reducción de las tasas de bombeo generalizadas, que van del orden del 5 al 6.5% como máximo, pues con ello, se logra detener el abatimiento en los piezómetros sin representar un índice de desabasto de agua en los diferentes sectores productivos y socioeconómicos de la región de estudio. Los límites de desabasto han sido fijados con base a las dotaciones establecidas en las normas.

Finalmente, con los resultados obtenidos de la aplicación del modelo "Modflow", y para verificar la viabilidad del planteamiento, se ha tomado como principal parámetro indicador de la recuperación del acuífero, los niveles freáticos obtenidos bajo las diferentes alternativas de bombeo propuestas. Respecto al balance hidráulico, éste se presenta con cifras favorables para los periodos críticos, implicando con esto, la presencia de una recuperación generalizada de los niveles freáticos, objetivo propuesto al

realizar la aplicación del modelo "Modflow", para simular el comportamiento del nivel freático; en respuesta a las condiciones de recarga y explotación del acuífero, para los periodos de tiempo manejados en este trabajo.

Con lo anteriormente expuesto, se ha logrado uno de los propósitos fundamentales del presente trabajo, enunciándose como el aporte de una solución alternativa para la recuperación del nivel piezométrico en el acuífero de la Plana de Castellón, implicando con ello, una serie de aplicaciones de un modelo. Así también, se dio lugar al desarrollo de una de las etapas fundamentales de la modelación, la cual es la predicción, que simultáneamente se considera como uno de los objetivos más importantes en todo estudio de modelación.

De acuerdo con estas conclusiones, naturalmente tomadas con la debida prudencia que requiere toda estimación de esta índole, una redistribución iterativa media de las tasas de bombeo, asociada a una redistribución basada en las dotaciones establecidas por las normas, constituye una propuesta atractiva de remediación parcial de la sobreexplotación, para las características del acuífero bajo estudio. Existen, no obstante algunas objeciones que pueden aducirse cara a la correcta aplicación de estas técnicas, y es que en ocasiones muestran escasa relación con las hipótesis de partida. Por ello, actualmente en los estudios de modelación se tiende a tener en consideración la información global, tanto física como numérica del proceso, de manera que el conjunto de estas características contribuya a optimizar la simulación de flujo en el acuífero.

BIBLIOGRAFÍA

- **Anderson, M. P., and Woessner, W. W.,** 1992. "Applied groundwater modeling", simulation of flow and advective transport, Academic Press.

- **Appel, C. A., and Bredehoeft, J. D.,** 1976. "Status of Groundwater Modelling", U. S. Geological Survey, circular 737. 9 pp.

- **Bachmat, Y., and Bredehoeft, J.,** 1980. "Groundwater management: The use of numerical models, Water Resources Monograph 5". American Geophysical Union, Washington, D. C.

- **Bachmat, Y., and Andrews B.,** 1978. "Utilization of Numerical Groundwater Models for Water Resource Management", U. S. Environ. Prot. Agency Report EPA-600/8 -78-012. 178 pp.

- **Banerjee, P. K., and Butterfield, R.,** 1977. "Boundary Element Methods in Geomechanics, in G. Gudehus (de.)", Finite Elements in Geomechanics, Wiley, London, pp. 529-570.

- **Bear, J.,** 1972. "Dynamics of fluids in porous media". American Elsevier, New York.

- **Bear, J., and A. Verruijt,** 1987. "Modeling groundwater flow and pollution". D. Reidel Publishing Company.

- **Carenot, J.,** 1974. "Recherches geológiques aux confins des Chaines Ibérique et Catalane", Tesis Doctoral. Edit: ENADIMSA. 571 pp.

- **Carenot, J., and Ramal, M.,** 1985. "Massif du Desierto de las Palmas (Castellón): Le Jurassique réduit de la zone de transition du Maestrazgo meridional". Strata, 2 (2-3), pp. 85-100.

- **Custodio E., y Llamas, M. R.,** 1983. "Hidrogeología subterránea", 2 tomos segunda edición. Editorial Omega. Barcelona, 2359 pp.

- **Dagan, G.,** 1986. "Statistical theory of ground-water flow and transport pore to laboratory". Water Resources Research, vol. 22, no 9, pp. 120s-134s.

- **Doherty, J.,** 1990. "Manual for MODINV". suite of software for MODFLOW pre-processing, post-processing and parameter optimization, Centre for Tropical Freshwater Research.

- **Esteller, M. V.,** 1994. "Consideraciones sobre el aprovechamiento de los recursos hídricos en la Plana de Castellón". Utilización de aguas residuales para riego, Tesis doctoral, Universidad de Granada; Departamento de Geodinámica. España.

- **Finlayson, B. A.,** 1972, "The Method of Weighted Residuals and Variational Principles". Academic Press, New York, 412 pp.

- **Forsythe, G. E., and Wasow, W. R.,** 1969. "Finite Difference Methods for Partial Differential Equations", Wiley, New York.

- **Fox, L.,** 1962. "Numerical Solution of Ordinary and Partial Differential Equations". Pergamon Press, New York.

- **Freeze, R. A., and J. A. Cherry.,** 1979. "Groundwater". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.

- **Giner, P.,** 1980. "Estudio sedimentológico y diagenético de las formaciones carbonatadas del Jurásico de las Catalánides, Maestrazgo y rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica". Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona, España.

- **Gobierno de la Provincia de Valencia.,** 1992. "Estudio de los acuíferos costeros de la provincia de Castellón de la Plana". Proposiciones para la optimización de la gestión integral de sus recursos hidráulicos. BJ1133-No73, Diciembre, 1992, Valencia.

- **Gomez, J. M.,** 1989, "Ingeniería Sanitaria Ambiental, Abastecimiento de agua potable". Tomo 1. Universidad de Cantabria. Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Servicio de Publicaciones E. T. S. de Ingenieros de Caminos, CC. y PP. Santander España.

- **Greenwald, R. M., and Herweijer J. C.,** 1992. "Optimization of well locations and rates for containment of contaminants utilizing an automated management routine coupled to MODFLOW: A case history". The solving groundwater problems with models conference, February 11-13, 1992.

- **Hall, P. J.,** 1991. "Application of a numerical groundwater flow model for evaluating remedial alternatives at a contaminated landfill site". Focus conference on eastern regional groundwater issues, October 29-31, 1991. ABB Environmental Services, Inc., Portland.

- **Heijde, P. V. D., and Bachmat Y.,** 1985. "Groundwater management: the use of numerical models". Water Resources Monograph 5, American Geophysical Union, Washington, D. C.

- **Hoeksema, J. R., and P. K. Kitanidis.,** 1985. "Analysis of the spatial structure of properties of selected aquifers". Water Resources Research, vol. 21, no 4, pp. 562-572.

- **Huyakorn, P. S., and G. F. Pinder.,** 1983. "Computational Methods in subsurface flow". Academy Press, New York.

- **IGME (1973a).** "Mapa geológico de España". Escala 1: 50.000. Villafamés, hoja 30-24 (616).

- **IGME (1974a)** "Mapa geológico de España". Escala 1: 50.000. Castellón de la Plana, hoja 30-25 (641).

- **IGME (1974b)** "Mapa geológico de España". Escala 1: 50.000. Sagunto, hoja 29-26 (668).

- **IGME (1974d)** "Mapa geológico de España". Escala 1: 50.000. Moncófar, hoja 30-26 (669).

- **Josseling de Jong, G. de,** 1969. "Generating Functions in the Theory of Flow through Porous Media", Flow through porous media, Academic Press. New York, pp. 377-400.

- **Kantorovich, L. V. and Krylov, V. Y.,** 1964. "Approximate Methods of Higher Analysis", translated by C. D. Benster, Intersciense Publishers, New York.

- **Keckler, D.,** 1994. "SURFER for Windows manual". Golden Software, Inc., February 1994.

- **McDonald, M. G., and A. W. Harbaugh.,** 1988. "A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model". Chapter A1, Book 6, Modeling techniques; U. S. Geological Survey.

- **McDonald, M. G., and A. W. Harbaugh.,** 1984. "A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model". U. S. Departament of the interior U. S. Geological Survey, National Center Reston, Virginia.

- **McLaughlin, D.,** 1996, "A reassessment of groundwater inverse problem". Water Resources Research. vol. 22, no 5, pp. 1131-1161.

- **Mercer, J. W., and Faust, C. R.,** 1981. "Groundwater modeling". National Water Well Association and National Groundwater Association, 1996.

- **Narasimham, T. N., and Witherspoon, P. A.,** 1976. "An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media", Water Resources Research, No 12, pp. 57-64.

- **National Ground Water Association.,** 1993. "Applications of the modular finite difference model (MODFLOW) to groundwater remediation". July, 1993.

- **Peck, A., and Gorelick, S.,** 1988. "Consequences of spatial variability in aquifer properties and data limitations for groundwater modelling practice". Published by the International Association of Hydrological Sciences, No 175.

- **Prickett, T. A., and Lonnquist, C. G.,** 1971. "Selected Digital Computer Techniques for Groundwater Resource Evaluation". Illinois State Water Survey. Bulletin 55.

- **Remson, L., and Hornberger, G. M.,** 1971. "Numerical methods in subsurface hydrology". Wiley-Intercience, New York.

- **Rundell, B. D., and Bretzke, V. L.,** 1992. "Optimizing an existing groundwater extraction system in the alluvium of Major River restoration session". Conference on petroleum hydrocarbons and organics chemicals in groundwater: prevention, detection and restoration; November 4-6, 1992.

- **Skipp, D. C., and Faust, C. R.,** 1992. "Phased use of groundwater models in the design of a pump and treat system". Solving groundwater problems with models conference, February 11-13, 1992.

- **Sanchis, E.; Rodriguez T. y Morell, I.,** 1988. "Guía de la naturaleza de la Comunidad Valenciana. Capítulo 1: Geología de la Comunidad Valenciana". Institución Valenciana de Estudios e Investigación. Generalitat Valenciana. Editions Alfons el Magnánim.

- **Sos, V. y Sanfeliu, T.,** 1983. "La geología de Castellón y su bibliografía". Sociedad Castellonense de Cultura, 224 pp.

- **Southwell, R. V.,** 1940. Relaxation Methods in Engineering Science, Oxford University Press, London.

- **Smith, L.,** 1981. "Spatial variability of flow parameters in a stratified sand". Journal of Mathematical Geology, no 13, pp. 1-21.

- **Speake, R. C., and Trojan, M.,** 1991. "Modeling the performance of a horizontal groundwater recovery well". Fifth national outdoor action conference on aquifer restoration, groundwater monitoring, and geophysical methods. May 13-16, 1991.

- **Walton, W. C.,** 1992. "Groundwater modeling utilities". Lewis Publishers Inc.

- **Wang, H. F., and Anderson, M. P.,** 1982. "Introduction to groundwater modeling". Edited by Freeman, San Francisco.

- **Ward, D. S., and Buss, D. R.,** 1987."Evaluation of a groundwater corrective action at the Chem-Dyne hazardous waste site using a telescopic mesh refinement modeling approach". Water Resources Research, vol. 23, no 4, pp. 603-617.

- **Water Science and Technology Board, and Committee on Groundwater Modeling Assessment,** 1990. "Groundwater models". Scientific and Regulatory Applications. National Academy Press, Washington, D. C.

- **Welty, C., and Joss, C. J.,** 1991. "Use of a three-dimensional airflow model coupled with an optimization algorithm to aid in the design of soil venting systems". Conference on petroleum hydrocarbons and organic chemicals in ground-water: prevention, detection, and restoration, November 20-22, 1991.

- **White, F. M.,** 1974. "Viscous fluid flow". McGraw-Hill, New York.

- **Yeh, W. W.,** 1986. "Review of parameter identification procedures in groundwater Hydrology: The inverse problem". Water Resources Research. vol. 22, no 2, pp. 95-108.

- **Zienkiewicz, O. C.,** 1977. "The Finite Element Method", 3rd ed, McGraw-Hill, London.

ANEXO I

ECUACIONES BÁSICAS DEL MODELO "MODFLOW"

En el modelo "Modflow" el movimiento tridimensional del agua subterránea a través de un material poroso de densidad constante, está considerado por la ecuación diferencial parcial:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-W=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (1)$$

donde:

K_{xx}, K_{yy} y K_{zz} son los valores de la conductividad hidráulica a lo largo de los ejes coordenados x, y, z, los cuales son supuestos paralelos a los ejes principales de la conductividad hidráulica ($L\ t^{-1}$), h es la carga piezométrica (L), W es un gasto por unidad de volumen y representa las fuentes y/o sumideros de agua (t^{-1}) por ejemplo, pozos de recarga, pozos de extracción, drenes, etc., S_s es el almacenamiento especifico 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 ($S_s = S_s(x,y,z)$, $K_{xx} = K_{xx}(x,y,z)$, etc) y W puede ser función del espacio y tiempo ($W = W(x,y,z,t)$).

La ecuación (1) describe el flujo de agua subterránea bajo condiciones transitorias en un medio heterogéneo y anisotrópico. Así también, en la mencionada ecuación, h es una función del tiempo y del espacio, por lo que, en la formulación de diferencias finitas se requiere de la discretización del dominio para el tiempo.

Por otra parte, el desarrollo de la ecuación de flujo de agua subterránea en la forma de diferencias finitas, considera la aplicación de la "ecuación de continuidad", bajo la

suposición de que la densidad del agua subterránea es constante. Expresando así el balance de flujo para una celda de la malla de modelado como:

$$\Sigma Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta V} \qquad (2)$$

donde:

Q_i es el caudal de flujo en la celda ($L^3\ t^{-1}$), S_s definido al igual que en la ecuación (1) como el almacenamiento especifico (L^{-1}), ΔV es el volumen en la celda (L^3) y Δh es el cambio en la carga sobre un intervalo de tiempo de longitud Δt.

Los diferentes elementos que constituyen las entradas y salidas del acuífero, por ejemplo bombeo, drenes, recarga superficial, etc., son considerados en el modelo "Modflow" por medio de los módulos "DRN", "WELL" y "RCH", siendo éstos los que se encargan de simular un sistema de drenes, pozos de extracción o recarga y recarga superficial, respectivamente. Estos elementos son incluidos directamente en el termino W en la ecuación general del movimiento de flujo subterráneo (ecuación 1).

MÓDULO DRENES "DRN"

En lo que se refiere a la conceptualización de los drenes para el módulo correspondiente, el dren es supuesto que funciona parcialmente lleno, de tal manera que la carga dentro del dren es aproximadamente igual a la elevación media del dren, $d_{i,j,k}$. La carga calculada por el modelo para una celda de coordenadas *i, j, k.* ($h_{i,j,k}$) es actualmente un valor medio para la celda y se supone que prevalece a la misma distancia en el dren. Entre el dren y el área en la cual la carga $h_{i,j,k}$ prevalece, existe un patrón de flujo radial o semiradial en el plano vertical, normalmente caracterizado por la progresiva inclinación de los gradientes de carga aproximados al dren. Las pérdidas de carga dentro de los patrones de flujo convergente forman una parte de la diferencia de carga $h_{i,j,k.} - d_{i,j,k}$ y está constituido por el flujo convergente hacia arriba del dren, flujo a través del

material de diferente conductividad inmediatamente alrededor del dren y flujo a través de la pared del dren, los cuales pueden ser proporcionales a un caudal QD. Lo anterior constituye el método de simulación manejado en el "módulo drenes". Esto es, se supone que la función del dren es descrita por la ecuación:

$$QD_{i,j,k,} = CD_{i,j,k.}\,(h_{y,j,k.} - d_{i,j,k}) \qquad \text{para } h_{i,j,k.} > d_{i,j,k} \qquad (3)$$

$$QD_{i,j,k} = 0 \qquad \text{para} \quad h_{i,j,k.} \leq d_{i,j,k} \qquad (4)$$

El coeficiente $CD_{i,j,k.}$ de la ecuación (3) es la conductancia equivalente que describe todas las pérdidas entre el dren y la región de la celda *i,j,k,* en la cual se supone que prevalece la carga $h_{i,j,k.}$

La conductancia para cada proceso puede ser basada en la formulación de la ecuación de flujo unidimensional, pero varía significativamente dependiendo del sistema de dren especifico a simular.

En muchas situaciones una formulación específica puede requerir información detallada que normalmente no está disponible, tal es el caso de la distribución de carga alrededor del dren, conductividad hidráulica del acuífero próxima al dren, distribución de materiales de relleno, dimensión de la longitud del dren, etc. Es más común calcular *CD* de las mediciones de *QD* y de *h-d* utilizando la ecuación (3). Si *h-d* no es aproximadamente conocida, *CD* es normalmente ajustado durante la calibración del modelo con la finalidad de relacionar los valores medidos de *QD*, con los valores calculados por el modelo.

MÓDULO POZOS "WELL"

Este módulo está diseñado para simular diversas condiciones tales como, pozos con abatimiento de agua en un acuífero, adicción de agua mediante pozos (recarga) para

diferentes periodos de cálculo y otras más aplicaciones que se pueden ajustar a diversas circunstancias de modelación, donde el bombeo es un factor importante para realizar exitosamente la simulación.

RECARGA SUPERFICIAL

El módulo recarga (RCH) está diseñado para simular la recarga superficialmente distribuida en un sistema de agua subterránea. La recarga más común es la que ocurre como el resultado de la precipitación que se percola al sistema de agua subterránea.

La recarga aplicada en el modelo está definida como:

$$Q_{R\,i,j.} = I_{i,j.} * DELR_j * DELC_i \qquad (5)$$

donde:

$Q_{R\,i,j}$ es el caudal de recarga aplicado en el modelo, sobre la horizontal de la celda que tiene una ubicación (i,j), expresado como el volumen del fluido por unidad de tiempo. $DELR_i$ es la dimensión de la celda en la dirección del renglón, $DELC_j$ es la dimensión de la celda en dirección de la columna, $I_{i,j}$ es la tasa de recarga aplicable en la superficie de las celdas que tienen una área: $DELR_j * DELC_i$. El caudal de recarga $Q_{R\,i,j.}$ es aplicado en cada una de las celdas dentro de la columna vertical, en la posición (i, j).

El módulo de recarga (RCH) permite manejar tres opciones de recarga, éstas son las siguientes:

1.- Aplicación de la recarga a la capa superior de la malla.
2.- Aplicación de la recarga para una celda en la columna vertical, para el número de capas especificadas y contenidas en el arreglo bidimensional.
3.- Aplicación de recarga en la celda activa más alta en la columna vertical, teniendo una carga no constante sobre la celda de esta columna.

ANEXO II

Consumo de agua estimado en diferentes tipos de establecimientos (Gómez, 1989).

TIPOS DE ESTABLECIMIENTO	GASTO L/D/Hab.	GASTO L/D/Hab..	GASTO L/D/Hab..
	DOTACIÓN REAL	**DOTACIÓN MED.IA**	**DOTACIÓN REDUC.IDA**
UNIDADES DE VIVIENDA RESIDENCIAL:			
Viviendas privadas con depósitos individuales con suministro por contador	**190 - 285**	**240**	**224.6**
Casas de apartamentos con depósitos individuales	**285 - 380**	**335**	**313.5**
Viviendas privadas con abastecimiento público de agua, sin contador	**380 - 760**	**570**	**533.5**
edificios de apartamentos con abastecimiento público, sin contador	**380 - 760**	**570**	**533.5**
Viviendas dormitorio con depósito individual, o suministro por contador, por dormitorio	**570**	**570**	**533.5**
Viviendas dormitorio, con suministro público de agua, sin contador, por dormitorio	**760**	**760**	**711.3**
UNIDADES DE VIVIENDA SERVICIO:			
Hoteles	**190 - 380**	**285**	**266.7**
Pensiones	**190**	**190**	**177.8**
Casas de huéspedes y residencias turísticas	**150**	**150**	**140.3**
Moteles sin cocina, por unidad	**380 - 570**	**475**	**444.6**
CAMPAMENTOS:			
Tipo explorador	**95**	**95**	**88.9**
De niños, baños y sanitarios centrales	**150 - 190**	**170**	**158.1**
Diurno, sin comidas	**285 - 380**	**335**	**313.5**
De lujo, baño privado	**285 - 380**	**335**	**313.5**
De trabajo	**135 - 190**	**165**	**154.4**
Para remolques con baño y sanitarios privados, por unidad (2 ½ personas)	**475 - 570**	**525**	**491.4**
RESTAURANTES (INCLUYENDO LAVABOS Y SANITARIOS):			
Por término medio	**25 - 40**	**35**	**32.7**
Consumos de cocina, únicamente	**10 - 12**	**11**	**10.3**
Servicio rápido (barra)	**15**	**15**	**14.03**
Servicio rápido (barra), servilleta de papel	**4 - 8**	**6**	**5.6**
Bares y salones de cóctel	**8**	**8**	**7.48**
Tipo medio, por asiento	**135**	**135**	**126.3**

continuación

Consumo de agua estimado en diferentes tipos de establecimientos (Gómez 1989).

TIPOS DE ESTABLECIMIENTO	GASTO L/D/Hab.	GASTO L/D/Hab.	GASTO L/D/Hab.
Tipo medio, 24 horas , por asiento	190	190	177.8
Taberna, por asiento	75	75	70.19
Área de servicio, por asiento de mostrador (carretera de peaje)	1325	1325	1240.
Área de servicio, por asiento de mesa (carretera de peaje)	570	570	533.5
INSTITUCIONES:			
Tipo medio	285 - 475	380	355.6
Hospitales	570 - 950	760	711.3
ESCUELAS:			
Diurna con cafetería o comedor	40 - 60	50	46.8
Diurna con cafetería y mostradores	60 - 80	70	65.5
Internado	285	285	266.7
TEATROS:			
En sala, por asiento, dos sesiones por día	12	12	11.22
Al aire libre, incluyendo puesto de alimentos, por coche (3 ½ personas	12 - 20	16	14.97
ESTACIONES DE SERVICIO DE AUTOMÓVILES:			
Por vehículo servido	40	40	37.4
Por conjunto de bombas	1900	1900	1778.3
ALMACENES:			
Primeros 7.5 m de fachada	1700	1700	1591.1
Cada 7.5 m adicionales de fachada	1520	1520	1422.6
CLUBES DE CAMPO:			
De socios con residencia	390	390	365.0
De transeúntes, con servicio de comidas	65 - 95	80	74.8
Oficinas	40 - 60	50	46.8
Factorías, consumos sanitarios, por turno	60 - 135	98	91.7
Lavanderías, autoservicio, por máquina	950 - 1900	1425	1333.7
Boleras, por pista	760	760	711.3
Piscinas y playas, sanitarios y duchas	20 - 40	30	28.08
Parques de "picnis", con sanitarios limpiados, por chorro de agua	40 - 60	50	46.8
Parques de atracciones y recintos de feria	4	4	3.74

continuación

Consumo de agua estimado en diferentes tipos de establecimientos (Gómez, 1989)

TIPOS DE ESTABLECIMIENTO	GASTO L/D/Hab.	GASTO L/D/Hab.	GASTO L/D/Hab.
Salas de congreso, convenciones, etc., por asiento	8	8	7.48
Aeropuertos, por pasajero	12	12	11.23

Consumo de agua en industrias tipo (Gómez, 1989).

PROCESO	CONSUMO * L/T O L.	CONSUMO L/T O L. *	CONSUMO L/T O L. *
FABRICA DE CONSERVAS:			
Judías verdes, l/t	75700	75700	70853.6
Melocotones y peras, l/t	20000	20000	18719.5
Otros frutos y vegetales, l/t	7570-37850	22710	21256.0
INDUSTRIAS QUÍMICAS:			
Amoniaco, l/t	142000	142000	132909.0
Anhídrido carbónico, l/t	92750	92750	86812.05
Gasolina, l/1000 l	7000-34000	27000	25271.5
Lactosa, l/t	890000	890000	833021.3
Sulfuro, l/t	11400	11400	10670.16
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS Y DE BEBIDAS:			
Cerveza, l/1000 l	15000	15000	14039.7
Pan, l/t	2270	2270	2124.7
Enpaquetado y envasado de carne, l/t de peso en vivo	19000	19000	17783.6
Productos lácteos, l/t	15000-19000	17000	15911.6
Whisky, l/1000 l	80000	80000	74878.3
PULPA Y PAPEL:			
Pulpa, l/t	$310E^3$ - $870E^3$	590000	552227.6
Papel, l/t	178000	178000	166604.2
TEXTILES:			
Blanqueo, l/t de algodón	$275E^3$ - $365E^3$	320000	299513.3
Tintura, l/t de algodón	36000 - 72000	54000	50542.8

* unidades en litros/tonelada de producto o bien en litros, según la especificación.