

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Actividad 7:
Establecimiento de indicadores de
intrusión marina y cálculo de los
volúmenes ambientales al mar

Volumen II
Estudio piloto para el cálculo de
descargas ambientales al mar en las
masas de agua subterránea costeras
de la provincia de Castellón
(Cuenca del Júcar)



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL Y MARINO



Instituto Geológico
y Minero de España

DIRECCIÓN GENERAL
DEL AGUA



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL Y MARINO



Instituto Geológico
y Minero de España

DIRECCIÓN GENERAL
DEL AGUA

*Estudio piloto para el cálculo de
descargas ambientales al mar en las
masas de agua subterránea costeras
de la provincia de Castellón
(Cuenca del Júcar)*

Septiembre, 2009



Con fecha 27 de mayo de 2008 el Instituto Geológico y Minero de España y la Universitat Jaume I de Castellón formalizaron un contrato para la realización de los trabajos necesarios para el establecimiento de indicadores de intrusión marina y cálculo de volúmenes ambientales de descarga al mar en tres masas de agua subterránea que corresponden a las tres planas costeras de la provincia de Castellón. Este trabajo se enmarca dentro de la Actividad 7 del acuerdo de Encomienda de Gestión entre el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (Dirección General del Agua) y el Instituto Geológico y Minero de España. El correspondiente proyecto del IGME está dirigido por Juan de Dios Gómez Gómez, y coordinado desde la DGA por Manuel Varela Sánchez.

Por parte de la Universitat Jaume I, el equipo encargado de elaborar estos trabajos es el Grupo de Investigación de Gestión de Recursos Hídricos, perteneciente al Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas, bajo la dirección del profesor Ignacio Morell, Catedrático de Hidrogeología.

El presente documento es la memoria que se presenta con los resultados obtenidos de los trabajos encaminados a establecer los volúmenes de descarga al mar.

EQUIPO DE TRABAJO

Universitat Jaume I

Ignacio Morell Evangelista

Arianna Renau Pruñonosa

Jorge Mateu Mahiques

Instituto Geológico y Minero de España

Juan de Dios Gómez Gómez

Bruno J. Ballesteros Navarro

Juan Antonio López Geta

David Pulido Velázquez

Dirección General del Agua

Manuel Varela Sánchez

Isaac Sánchez Navarro

Índice general

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	11
2. ACUÍFEROS ESTUDIADOS	12
3. NECESIDAD DE PRESERVAR SALIDAS AL MAR.....	14
4. METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LOS VOLÚMENES AMBIENTALES DE DESCARGA AL MAR	16
5. MODELO MATEMÁTICO DE SIMULACIÓN.....	18
5.1. Código MODFLOW	18
5.2. Régimen estacionario	18
5.3. Topografía y espesor de los acuíferos	19
5.4. Discretización espacial (mallado).....	19
5.5. Permeabilidad y almacenamiento	19
5.6. Entradas	19
5.6.1. Recarga (infiltración de lluvia y retorno de riego)	19
5.6.2. Alimentación lateral subterránea	20
5.7. Salidas.....	20
5.7.1. Bombeos	20
5.7.2. Drenes	20
5.8. Puntos de control	21
5.9. Calibración	21
6. MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANA DE OROPESA - TORREBLANCA. 22	
6.1. Modelo hidrogeológico conceptual	22
6.2. Geometría del acuífero	24
6.3. Balance hídrico	27
6.3.1. Cálculo de las entradas	27
6.3.2. Cálculo de las salidas.....	28
6.3.3. Balance	29
6.4. Establecimiento del modelo matemático	30
6.4.1. Diseño de la malla	30
6.4.2. Conductividad hidráulica.....	31
6.4.3. Almacenamiento	31
6.4.4. Condiciones de contorno	31
6.4.5. Recarga	33
6.4.6. Pozos.....	34
6.4.7. Calibración del modelo.....	37
6.5. Resultados obtenidos	39
6.5.1. Piezometría	39
6.5.2. Balance hídrico calculado.....	39
6.6. Discriminación espacial de los volúmenes ambientales de descarga.....	40
6.7. Escenarios de actuación en la Plana de Oropesa - Torreblanca	42
6.7.1. Objetivos.....	42
6.7.2. Escenario 0: situación de partida	43
6.7.3. Escenario 1: Reducción del 20% de los bombeos en el sector norte....	44
6.7.4. Escenario 2: reducción del 40% de los bombeos en el sector norte	46
6.7.5. Escenario 3: reducción del 100% de los bombeos en el sector sur	47
6.7.6. Escenario 4: reducción del 20% en el sector norte y del 100% en el sector sur.....	49

6.7.7.	Escenario 5: reducción del 40% en el sector norte y del 100% en el sector sur.....	51
6.7.8.	Resumen de los escenarios simulados en la Plana de Oropesa - Torreblanca.....	52
6.8.	CONCLUSIONES.....	53
7.	MODELO MATEMÁTICO DE PLANA VINARÓZ.....	55
7.1.	Modelo hidrogeológico conceptual.....	55
7.2.	Geometría del acuífero.....	55
7.3.	Balance hídrico.....	57
7.3.1.	Cálculo de las entradas.....	57
7.3.2.	Cálculo de las salidas.....	59
7.3.3.	Balance.....	59
7.4.	Establecimiento del modelo matemático.....	59
7.4.1.	Diseño de la malla.....	59
7.4.2.	Conductividad hidráulica.....	59
7.4.3.	Almacenamiento.....	61
7.4.4.	Condiciones de contorno.....	61
7.4.5.	Recarga.....	61
7.4.6.	Pozos.....	62
7.4.7.	Calibración del modelo.....	64
7.5.	Resultados obtenidos.....	66
7.5.1.	Piezometría.....	66
7.5.2.	Balance hídrico calculado.....	66
7.6.	Discriminación espacial de los volúmenes ambientales.....	67
7.7.	Escenarios de actuación en la Plana de Vinaroz.....	69
7.7.1.	Objetivos.....	69
7.7.2.	Escenario 0: situación de partida.....	69
7.7.3.	Escenario 1: Reducción del 20% de los bombeos.....	70
7.7.4.	Escenario 2: reducción del 40% de los bombeos.....	72
7.7.5.	Resumen de los escenarios simulados en la Plana de Vinaroz.....	74
7.8.	CONCLUSIONES.....	75
8.	MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANA DE CASTELLÓN.....	76
8.1.	Modelo hidrogeológico conceptual.....	76
8.2.	Geometría del acuífero.....	78
8.3.	Balance hídrico.....	80
8.3.1.	Cálculos de las entradas.....	80
8.3.2.	Cálculo de las salidas.....	80
8.3.3.	Balance.....	80
8.4.	Establecimiento del modelo matemático.....	80
8.4.1.	Diseño de la malla.....	80
8.4.2.	Conductividad hidráulica.....	80
8.4.3.	Almacenamiento.....	82
8.4.4.	Condiciones de contorno.....	82
8.4.5.	Recarga.....	82
8.4.6.	Pozos.....	84
8.4.7.	Calibración del modelo.....	87
8.5.	Resultados obtenidos.....	88
8.5.1.	Piezometría.....	88
8.5.2.	Balance hídrico.....	90
8.6.	Discriminación espacial de los volúmenes ambientales.....	90

8.7.	Escenarios de actuación en la Plana de Castellón	92
8.7.1.	Objetivos.....	92
8.7.2.	Escenario 0: situación de partida	92
8.7.3.	Escenario 1: reducción del 20% de los bombeos en el sector sur	94
8.7.4.	Escenario 2: reducción del 40% de los bombeos en el sector sur	96
8.7.5.	Escenario 3: reducción del 60% de los bombeos en el sector sur	98
8.7.6.	Resumen de los escenarios simulados en la Plana Castellón	100
8.8.	CONCLUSIONES	102
9.	CONCLUSIONES	103

Índice de figuras

Figura 1.	Sistemas de explotación de la Comunidad Valenciana	12
Figura 2.	Índices de explotación de las Unidades Hidrogeológicas de la.....	13
Figura 3.	Mapa geológico de la Plana de Oropesa - Torreblanca.....	22
Figura 4.	Cortes geológicos de la Plana de Oropesa - Torreblanca	23
Figura 5.	Contorno de la Plana de Oropesa y Torreblanca.....	24
Figura 6.	Topografía de la Plana de Oropesa - Torreblanca	25
Figura 7.	Muro del acuífero de la Plana de Oropesa- Torreblanca.....	25
Figura 8.	Geometría del acuífero	26
Figura 9.	Mallado del modelo de la Plana de Oropesa Torreblanca. (500m. x 500 m).....	31
Figura 10.	Valores de conductividad hidráulica en la Plana de Oropesa - Torreblanca.....	32
Figura 11.	Condiciones de contorno: potencial constante (rojo oscuro) y Drenes (gris).....	33
Figura 12.	Zonas de recarga aplicadas al modelo	34
Figura 13.	Situación de los pozos de inyección.....	35
Figura 14.	Pozos de extracción	36
Figura 15.	Situación de los puntos de control piezométrico	37
Figura 16.	Datos calculados vs. datos observados en la Plana de Oropesa - Torreblanca.....	38
Figura 17.	Simulación del modelo en régimen estacionario.....	40
Figura 18.	Zonación de la Plana de la Plana de Oropesa – Torreblanca para realizar balances hídricos parciales	41
Figura 19.	Mapa piezométrico de partida (escenario 0).....	43
Figura 20.	Mapa piezométrico de Oropesa – Torreblanca (escenario 1).....	45
Figura 21.	Mapa piezométrico de Oropesa – Torreblanca (escenario 2).....	46
Figura 22.	Mapa piezométrico de Oropesa – Torreblanca (escenario 3).....	48
Figura 23.	Mapa piezométrico de Oropesa – Torreblanca (escenario 4).....	50
Figura 24.	Mapa piezométrico de Oropesa – Torreblanca (escenario 5).....	51
Figura 25.	Mapa de la Plana de Vinaroz.....	56
Figura 26.	Topografía de la Plana de Vinaroz	56
Figura 27.	Muro del acuífero de Vinaroz.....	57
Figura 28.	Geometría del acuífero de Vinar	58
Figura 29.	Mallado del modelo de la Plana de Vinaroz (1000 x 1000 m).....	60
Figura 30.	Valores de conductividades hidráulica en la Plana de Vinaroz.....	60
Figura 31.	Zonas de recarga del modelo.....	62
Figura 32.	Bombeos en Plana de Vinaroz.....	63
Figura 33.	Situación de los puntos de control piezométrico	64
Figura 34.	Datos calculados vs. datos observado en la Plana de Vinaroz	65
Figura 35.	Simulación del modelo en régimen estacionario en la Plana de Vinaroz.....	67
Figura 36.	Sectorización de la Plana de Vinaroz	68
Figura 37.	Mapa piezométrico de partida (escenario 0).....	70
Figura 38.	Mapa piezométrico de Vinaroz (escenario 1).....	71
Figura 39.	Mapa piezométrico de Vinaroz (escenario 2).....	73
Figura 40.	Mapa geológico de la Plana de Castellón.....	77
Figura 41.	Mapa de la Plana de Castellón.....	78
Figura 42.	Topografía de la Plana de Castellón.....	79
Figura 43.	Muro del acuífero de la Plana de Castelló.....	79
Figura 44.	Geometría del acuífero de la Plana de Castelló.....	81
Figura 45.	Mallado del modelo de la Plana de Castelló (1000 x1000 m).....	82
Figura 46.	Permeabilidades en la Plana de Castellón	83

Figura 47. Potencial constante (rojo) y Drenes (gris)	83
Figura 48. Zonas de recarga aplicadas al modelo	84
Figura 49. Situación de los pozos de extracción.....	85
Figura 50. Situación de los puntos de control piezométrico	86
Figura 51. Datos calculados vs. datos observados	87
Figura 52. Simulación del modelo en régimen estacionario.....	89
Figura 53. Zonas de la Plana diferenciadas para estudiar el balance hídrico.....	91
Figura 54. Mapa piezométrico de partida (escenario 0).....	93
Figura 55. Mapa piezométrico de la Plana de Castellón (escenario 1).....	95
Figura 56. Mapa piezométrico de la Plana de Castellón (escenario 2).....	97
Figura 57. Mapa piezométrico de la Plana de Castellón (escenario 3).....	99

Índice de tablas

Tabla 1.	Demanda para consumo urbano en la Plana de Oropesa - Torreblanca.....	28
Tabla 2.	Resumen del balance hídrico de la Plana Oropesa - Torreblanca.....	30
Tabla 3.	Puntos de control.....	37
Tabla 4.	Diferencias entre valores calculados y observados.....	39
Tabla 5.	Balance hídrico calculado	39
Tabla 6.	Balances hídricos de las zonas norte, centro y sur de la Plana de Oropesa - Torreblanca	41
Tabla 7.	Balance general (escenario 0)	43
Tabla 8.	Balance sectorial (escenario 0)	44
Tabla 9.	Transferencias internas (escenario 0).....	44
Tabla 10.	Balance general del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 1).....	45
Tabla 11.	Balance sectorial del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 1).....	45
Tabla 12.	Transferencias internas (escenario 1).....	46
Tabla 13.	Balance general del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 2).....	47
Tabla 14.	Balance sectorial del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 2).....	47
Tabla 15.	Transferencias internas (escenario 2).....	47
Tabla 16.	Balance general del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 3).....	48
Tabla 17.	Balance sectorial del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 3).....	49
Tabla 18.	Transferencias internas (escenario 3).....	49
Tabla 19.	Balance general del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 4).....	50
Tabla 20.	Balance sectorial del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 4).....	50
Tabla 21.	Transferencias internas (escenario 4).....	51
Tabla 22.	Balance general del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 5).....	52
Tabla 23.	Balance sectorial del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 5).....	52
Tabla 24.	Transferencias internas (escenario 5).....	52
Tabla 25.	Variaciones del balance en el sector norte de la Plana de Oropesa – Torreblanca a consecuencia de la modificación de los bombeos.....	53
Tabla 26.	Variaciones del balance en el sector sur de la Plana de Oropesa – Torreblanca a consecuencia de la modificación de los bombeos.....	53
Tabla 27.	Balances hídricos de la Plana de Vinaroz	59
Tabla 28.	Datos de recarga y retorno de riego	61
Tabla 29.	Bombeos en la Plana de Vinaroz (Fuente: CHJ, 2009; DIPCAS, 2005)	62
Tabla 30.	Puntos de control piezométrico.....	64
Tabla 31.	Diferencias entre los datos calculados y observados	65
Tabla 32.	Balance hídrico calculado	66
Tabla 33.	Balance hídrico por sectores	68
Tabla 34.	Balance general del acuífero de Vinaroz (escenario 0).....	69
Tabla 35.	Balance sectorial del acuífero de Vinaroz (escenario 0).....	69
Tabla 36.	Transferencias de caudales entre sectores (escenario 0).....	70
Tabla 37.	Balance general del acuífero de Vinaroz (escenario 1).....	71
Tabla 38.	Balance sectorial del acuífero de Vinaroz (escenario 1).....	72
Tabla 39.	Transferencias de caudales entre sectores (escenario 1).....	72
Tabla 40.	Balance general del acuífero de Vinaroz (escenario 2).....	72
Tabla 41.	Balance sectorial del acuífero de Vinaroz (escenario 2).....	72
Tabla 42.	Transferencias de caudales entre sectores (escenario 2).....	73
Tabla 43.	Variaciones del balance en la Plana de Vinaroz a consecuencia de la modificación de los bombeos.....	74

Tabla 44. Variaciones del balance en el sector norte de la Plana de Vinaroz a consecuencia de la modificación de los bombeos.....	74
Tabla 45. Variaciones del balance en el sector sur de la Plana de Vinaroz a consecuencia de la modificación de los bombeos.....	74
Tabla 46. Balance hídrico de la Plana de Castellón (CHJ, 2007)	80
Tabla 47. Puntos de control piezométrico.....	86
Tabla 48. Diferencias entre valores calculados y observados.....	88
Tabla 49. Balance hídrico calculado	90
Tabla 50. Balance hídrico sectorial.....	91
Tabla 51. Balance general del acuífero de la Plana de Castellón (escenario 0).....	93
Tabla 52. Balance sectorial del acuífero de la Plana de Castellón (escenario 0).....	94
Tabla 53. Transferencias de caudales entre zonas	94
Tabla 54. Balance general del acuífero de la Plana de Castellón (escenario 1).....	95
Tabla 55. Balance sectorial del acuífero de la Plana de Castellón (escenario 1).....	96
Tabla 56. Transferencias de caudales entre zonas	96
Tabla 57. Balance general del acuífero de Castellón (escenario 2)	97
Tabla 58. Balance sectorial de la Plana de Castellón (escenario 2).....	98
Tabla 59. Transferencias de caudales entre zonas	98
Tabla 60. Balance general del acuífero de Castellón (escenario 3)	99
Tabla 61. Balance sectorial de la Plana de Castellón (escenario 3).....	100
Tabla 62. Transferencias de caudales entre zonas	100
Tabla 63. Variaciones del balance en la Plana de Castellón a consecuencia de la modificación de los bombeos.....	100
Tabla 64. Variaciones del balance en el sector norte de la Plana de Castellón a consecuencia de la modificación de los bombeos.....	101
Tabla 65. Variaciones del balance en el sector central de la Plana de Castellón a consecuencia de la modificación de los bombeos.....	101
Tabla 66. Variaciones del balance en el sector sur de la Plana de Castellón a consecuencia de la modificación de los bombeos.....	101
Tabla 67. Volúmenes ambientales calculados y estimado por la CHJ (2007).....	104

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los acuíferos costeros mediterráneos presentan en general grados de explotación muy elevados que, en muchos casos, han dado lugar a la presencia de procesos de salinización por intrusión marina de muy diferente intensidad.

Con algunas excepciones, la geometría de los acuíferos costeros no es bien conocida y la información disponible sobre sus parámetros hidráulicos es reducida. Como consecuencia de ello, los balances hídricos realizados presentan algunas incertidumbres que pueden llegar a ser notables y que no facilitan la gestión de los recursos.

Si bien el proceso de intrusión marina puede ser hidrodinámicamente muy complejo, puede asumirse que debe existir relación directa entre los caudales de descarga subterránea al mar y la intrusión marina. En consecuencia, la determinación de los caudales ambientales de descarga al mar, entendidos estos como el flujo que es necesario mantener para que la intrusión marina no progrese, es una actividad imprescindible para establecer criterios de gestión.

En el presente informe se persigue determinar los caudales ambientales de tres acuíferos costeros en la provincia de Castellón (Planas de Castellón, Oropesa - Torreblanca y Vinaroz), de acuerdo a los siguientes objetivos:

- Revisión de los modelos hidrogeológicos conceptuales de esas tres m.a.s., para mejorar el detalle de funcionamiento hidráulico, litoestratigrafía y características geométricas.
- Actualización de los balances hídricos de las tres m.a.s.
- Cálculo de los volúmenes ambientales de descarga al mar en situación de explotación sostenible, para la contención de la intrusión marina y el mantenimiento de los ecosistemas asociados, a partir de la determinación de todos los términos del balance hídrico en las tres m.a.s. costeras antes citadas: Plana de Vinaroz (080.007), Plana de Oropesa-Torreblanca (080.009) y Plana de Castellón (080.021).
- Definición de las situaciones de explotación sostenible en cada una de las tres m.a.s. teniendo en cuenta las variaciones anuales de la recarga natural (años tipo seco, medio y húmedo, media hiperanual), que permita cumplir los requerimientos de la DMA de consecución del buen estado químico y cuantitativo. Para ello se tendrán en cuenta los datos históricos de las redes de control de intrusión, calidad y piezometría del IGME y otros organismos, junto con los datos históricos de explotación.

2. ACUÍFEROS ESTUDIADOS

El presente informe se refiere a los acuíferos costeros de la provincia de Castellón, que se corresponden con las siguientes masas de agua subterránea:

m.a.s. 080.021 Plana de Castellón

m.a.s. 080.009 Plana de Vinaroz

m.a.s. 080.007 Plana de Oropesa - Torreblanca

La Plana de Castellón pertenece al Sistema de Explotación denominado Mijares - Plana de Castellón. Las Planas de Oropesa - Torreblanca y de Vinaroz pertenecen al Sistema de Explotación Cenia - Maestrazgo (figura 1).

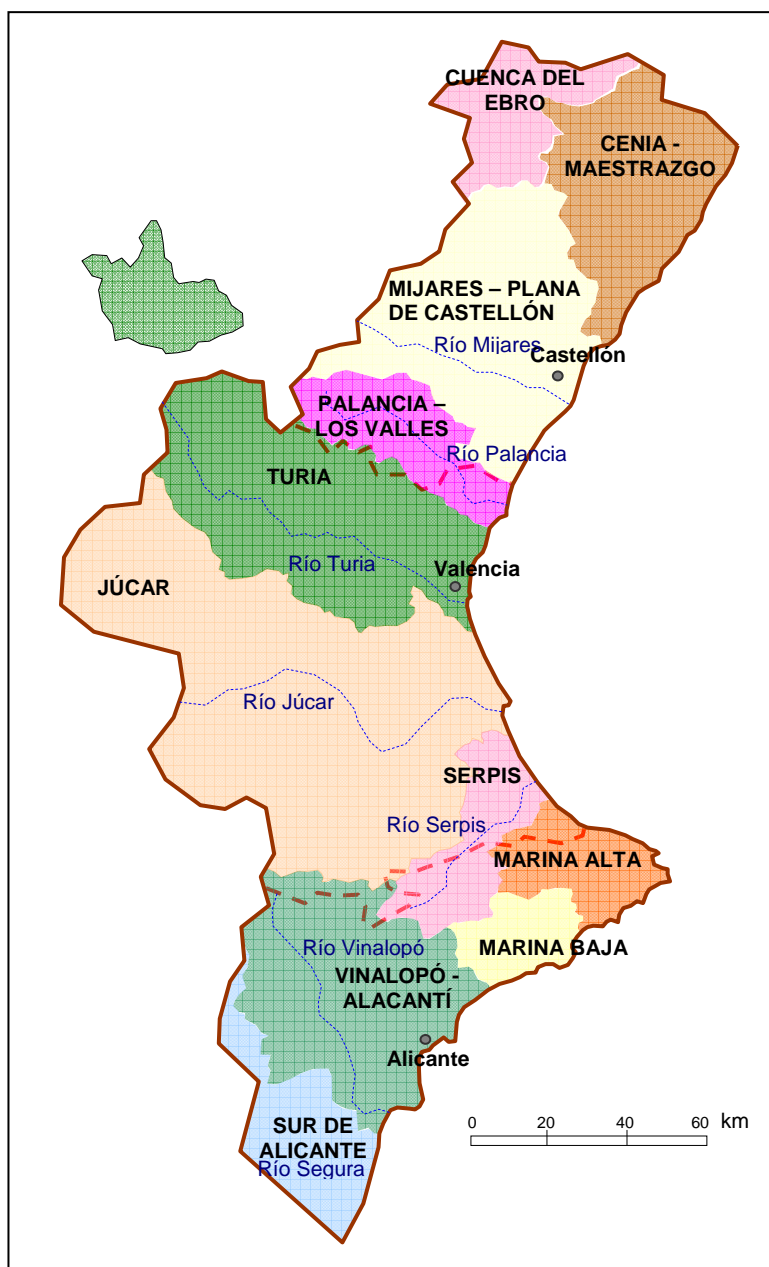


Figura 1. Sistemas de explotación de la Comunidad Valenciana

En las tres masas de agua se ha identificado presión significativa debida a intrusión marina (figura 2) que se relaciona con situaciones de sobreexplotación, especialmente

intensas en la Planas de Vinaroz y de Castellón, en las que el índice de explotación es superior a 2 y menor en la de Oropesa - Torreblanca (CHJ, 2004). Un año más tarde, la propia CHJ rebaja estas cifras hasta 1,5 en las dos primeras planas y menor de 1 en la Oropesa - Torreblanca (CHJ, 2005). Llama la atención que sea precisamente la Plana de Oropesa la que tenga más bajo índice de explotación cuando el proceso de intrusión se muestra de manera más severa. Probablemente, la actualización de los balances hídricos pueda modificar estas apreciaciones.

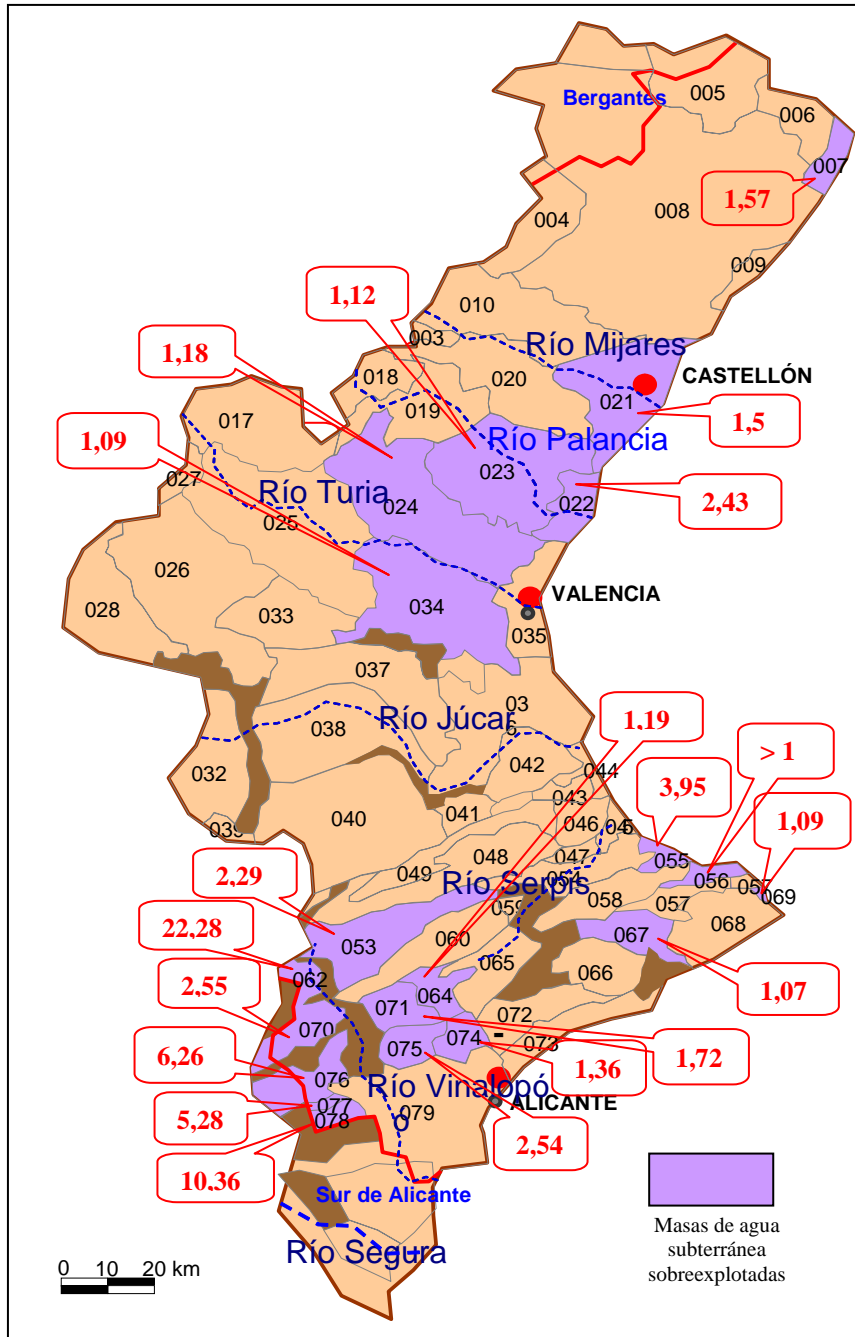


Figura 2. Índices de explotación de las Unidades Hidrogeológicas de la Cuenca del Júcar (CHJ, 2004)

3. NECESIDAD DE PRESERVAR SALIDAS AL MAR

Se admite con demasiada resignación que muchos acuíferos costeros estén sometidos a fuertes presiones cuyo resultado es la degradación de la calidad de las aguas que albergan, especialmente por salinización y por contaminación agraria difusa, en muchos casos, y la progresiva disminución de sus reservas, en otros (Cabezas, Cabrera y Morell, 2008).

En pocos años se ha pasado de un cierto grado de resignación que asumía que ese era el destino fatal de los acuíferos (“los pozos, o se salinizan o se secan”) a enunciar que uno de los objetivos de la planificación hidrológica es la regeneración (remediación, en la nomenclatura anglosajona) de los acuíferos. Si se admite que el concepto “regeneración” significa recuperar el almacenamiento (restituir la situación piezométrica) y recuperar la calidad original del agua subterránea, es necesario manifestar que este objetivo está muy lejos de ser alcanzado y que con las líneas previstas de actuación difícilmente se va a conseguir.

Los acuíferos costeros de naturaleza detrítica suelen tener elevada inercia. Por esta razón, los procesos contaminantes que les afectan han progresado de manera muy lenta, tanto en lo que se refiere a las modificaciones hidrodinámicas (relación agua dulce - agua salada, fundamentalmente) como a las alteraciones hidroquímicas, que están mediatizadas por el elevado tiempo de tránsito de los contaminantes a través de la zona no saturada. La regeneración de estos acuíferos requiere actuaciones drásticas que van más allá del simple respeto a los volúmenes medioambientales.

En los acuíferos costeros es necesario permitir que el agua salga al mar. En contra de la creencia de que es “agua perdida” se trata realmente de recursos ganados, al menos a medio plazo. En las áreas más intensamente afectadas por intrusión marina es necesario reducir los volúmenes de explotación, no se debe permitir la existencia de niveles por debajo del nivel del mar y se debe evitar la extracción de aguas salobres para su desalinización.

Naturalmente, si la demanda no se reduce es necesario disponer de nuevos recursos para compensar el cierre de captaciones. El incremento de la reutilización de aguas residuales regeneradas es una buena opción si la demanda es eminentemente agrícola y la desalación de agua de mar lo puede ser si la demanda mayoritaria es de tipo urbano. Sea cual fuere la fuente de nuevos recursos es necesario, además, reducir las extracciones de agua subterránea, al menos en la misma cuantía de los nuevos recursos. De no hacerse así, la regeneración de acuíferos será un mero precepto.

En la actualidad, y en el marco de los trabajos de actualización de la planificación hidrológica y aplicación de la Directiva Marco, se ha hecho una primera determinación del recurso disponible en las masas de agua subterránea de la CHJ, asimilable a los caudales que los acuíferos deben suministrar a ríos, manantiales o directamente al mar, por requerimientos medioambientales. Esta estimación de surgencias mínimas ambientales se ha realizado teniendo en cuenta los caudales mínimos definidos en el Plan de cuenca.

Además de estos caudales mínimos, se ha considerado como una restricción medioambiental para cada masa de agua subterránea un valor igual al 80% de las descargas laterales a las masas de agua subterránea contiguas, ya que estas descargas laterales constituyen, en ocasiones, una proporción significativa del recurso disponible de esas masas de agua subterránea.

Sumando el volumen de agua necesario para mantener las zonas húmedas, el volumen subterráneo que debe salir al mar para evitar la intrusión marina, la componente correspondiente para mantener el caudal mínimo y el 80% de las descargas laterales entre masas de agua subterránea, se obtienen los volúmenes de requerimientos medioambientales para cada una de las masas de agua subterránea del ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar.

4. METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LOS VOLÚMENES AMBIENTALES DE DESCARGA AL MAR

Las salidas subterráneas al mar constituyen una partida del balance hídrico de los acuíferos costeros. Habitualmente, esta partida se calcula directamente mediante la simple aplicación de la fórmula de Darcy, o indirectamente por diferencias compensadas entre las entradas y las salidas.

El cálculo directo requiere el conocimiento de la geometría del acuífero en la franja costera -que permite determinar el espesor saturado- la conductividad hidráulica y el gradiente hidráulico en diferentes condiciones.

La estimación indirecta a través del balance hídrico requiere abundante información sobre todas las partidas que componen el balance y sobre las variaciones de almacenamiento del acuífero.

En ambos casos, es posible determinar un rango de caudales de surgencia al mar razonablemente aceptable. Sin embargo, también existen notables grados de incertidumbre que impiden precisiones rigurosas. En general, si se considera un periodo de tiempo suficientemente largo, la variación del almacenamiento puede considerarse de rango menor, pero en acuíferos sujetos a sobreexplotación, por la propia naturaleza de ésta, la variación de almacenamiento hiperanual puede ser relevante. Si, además, se trata de acuíferos situados en áreas de régimen pluviométrico poco uniforme, como es el caso del litoral mediterráneo, la recarga puede variar mucho de unos periodos a otros. En estas condiciones, los balances hídricos realizados para largos periodos de tiempo son simplemente indicativos, con coeficientes de variación muy elevados.

Parte de este problema puede resolverse si el balance se establece para cortos periodos de tiempo, más o menos homogéneos, pero la notable inercia de muchos de los acuíferos costeros puede distorsionar la relación causa - efecto entre los eventos de recarga, la explotación y las salidas al mar.

Por otra parte, los mecanismos de flujo no son homogéneos en el espacio. La alimentación lateral subterránea no es uniforme, y puede estar ausente en algunos sectores, los parámetros hidráulicos que rigen el flujo (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento) son variables regionalizadas, y la explotación del acuífero puede ser de muy diferente intensidad entre unos sectores y otros. En estas condiciones, los balances hídricos deberían ser considerados con criterios sectoriales pero ello introduce una mayor dificultad en la obtención de datos.

La aplicación de la ley de Darcy para estimar los caudales de salida al mar también presenta escollos de difícil superación. En primer lugar, no todo el espesor saturado es activo para el flujo de agua dulce sino que tiene lugar una progresiva reducción de la sección de flujo que depende de la situación y geometría de la interfase teórica. La determinación de la posición de la interfase puede ser aceptable si se dispone de acceso directo hasta la misma pero presenta serias dudas si se calcula a partir de medidas piezométricas. Por otro lado, y como consecuencia de lo anterior, el flujo en la franja costera no es radial, que es una restricción de uso de la formulación de Darcy.

Si se tiene conciencia de estos problemas metodológicos, la estimación de caudales de salida subterránea al mar puede hacerse en primera aproximación y permite establecer rangos más o menos amplios en función de la calidad de los datos de partida y de las variaciones naturales o forzadas inherentes al acuífero considerado.

Realmente, el objetivo de este trabajo no es determinar los caudales de surgencia al mar sino los que deberían respetarse para mantener el proceso de intrusión en régimen quasi-estacionario. Ello requiere "restituir" la situación piezométrica que propicie el flujo adecuado mediante la reducción de los bombeos y la eliminación de niveles por debajo del nivel del mar.

En definitiva, se trata de reproducir el funcionamiento hidrogeológico en periodos en los que se suponga que no existe avance del frente salino, que pueden ser asimilados a periodos húmedos en los que, además, los índices de salinidad desciendan o, cuando menos, se estabilicen.

Para determinar el régimen adecuado de explotación se considera actualmente que la implementación de modelos matemáticos sea la herramienta más adecuada. Conviene, no obstante, apuntar que la construcción del modelo requiere en todo caso el manejo de la misma información hidrogeológica necesaria para establecer balances y que, por tanto, la fiabilidad de los resultados es función de la calidad de los datos suministrados.

En primera aproximación, la simulación del flujo se puede llevar a cabo en régimen estacionario o en régimen transitorio. El enfoque estacionario es más sencillo porque supone la simplificación de variaciones hidrodinámicas mientras que la consideración del régimen transitorio permite una mejor aproximación a las respuestas, rápidas o diferidas, del acuífero a los estímulos externos.

En este informe se sintetizan los resultados obtenidos en régimen estacionario y se discute la conveniencia de profundizar en el conocimiento del proceso mediante modelos en régimen transitorio y, en última instancia, de modelos de densidad variable.

5. MODELO MATEMÁTICO DE SIMULACIÓN

5.1. Código MODFLOW

Para simular el flujo de aguas subterráneas se ha utilizado el programa modular MODFLOW, desarrollado por el US Geological Service, compilado en la adaptación comercial de Waterloo Hydrogeologic Inc., llamada Visual MODFLOW, versión 3.1.0.

El código Modflow es actualmente el código más utilizado a escala mundial (McDonald y Harbaugh, 1988). El programa Visual Modflow es una interfase del Modflow que simula el flujo del agua subterránea en dos y tres dimensiones. La discretización se lleva a cabo mediante una red rectangular, con nodos centrados en los bloques. El programa se basa en el método de diferencias finitas, que resuelve el sistema de ecuaciones que rigen el flujo subterráneo.

5.2. Régimen estacionario

Como se ha indicado anteriormente, la primera aproximación al cálculo de los volúmenes ambientales se ha realizado en régimen estacionario.

El procedimiento utilizado para seleccionar el periodo de simulación ha sido el siguiente:

A partir de los datos de la red de intrusión se ha elaborado la evolución media de cloruros en el acuífero. Se considera que los periodos en que se existe aumento de la concentración corresponden a situaciones activas de intrusión en las que existe déficit de salidas de agua dulce al mar; los periodos en los que se registran descensos de salinidad corresponden a periodos húmedos en los que puede estar produciéndose un retroceso del frente salino, consecuente a mayores caudales de salidas al mar. En cualquiera de los dos casos, se considera que a lo largo de esos periodos se están registrando variaciones positivas o negativas de los caudales de surgencia.

El periodo de simulación se ha hecho coincidir con un periodo en el cual las concentraciones medias de cloruros no varían significativamente, lo que se interpreta como indicador de una cierta situación de equilibrio en la que las salidas anuales al mar son aproximadamente constantes, y suficientes para impedir el progreso de la intrusión marina.

En las tres masas de agua subterránea consideradas estas condiciones de estabilidad corresponden a los siguientes periodos: en la Plana de Oropesa - Torreblanca, periodo 1995 - 2000; en la plana de Vinaroz - Peñíscola, periodo 1995 - 2001, y en la plana de Castellón, periodo 1996 - 2001. Estos periodos coinciden, además, con los últimos datos disponibles de las redes de observación de la intrusión.

La superficie piezométrica ha sido elaborada a partir de las medias de los niveles piezométricos medidos en los puntos de observación durante el periodo considerado. Los datos pluviométricos corresponden a precipitación media del mismo periodo. Los bombeos han sido estimados a partir de encuestas y de extrapolaciones a las superficies de riego actualizadas.

5.3. Topografía y espesor de los acuíferos

Los datos topográficos corresponden a la cartografía a escala 1:10.000 del Instituto Cartográfico Valenciano. La información para representar el muro de los acuíferos procede de distintos informes, en los cuales existen columnas de sondeos o cortes geológicos que permiten conocer con mayor o menor precisión el espesor del acuífero (SGOP, 1975; CHJ, 1976, ITGE, 1989, Morell, 1985). Las superficies topográfica y de muro del acuífero se han tratado mediante el programa SURFER v8. Los archivos creados, con extensión archivo.grd, son importados directamente al Visual Modflow. El Visual Modflow interpola todos los datos que existen en una misma celdilla y los traduce como un solo dato que será representativo de esa celdilla, lo que da lugar a una geometría simplificada de la realidad.

5.4. Discretización espacial (mallado)

Las planas de Castellón y Vinaroz - Peñíscola se han discretizado en celdas de 1000 metros de lado. En la Plana de Oropesa - Torreblanca, de menor superficie, las celdas son de 500 metros de lado.

5.5. Permeabilidad y almacenamiento

El programa requiere introducir en cada celdilla valores de K_x , K_y y K_z . Al considerar el modelo como isótropo, K_x y K_y tienen el mismo valor. Como el modelo conceptual se ha considerado monocapa, el valor de K_z no afecta a los resultados; aun así se ha considerado como una décima parte de K_x .

Dado que la modelación se limitará al régimen permanente, el almacenamiento no afectará a los resultados.

5.6. Entradas

Las acciones a tener en cuenta son la recarga desde la superficie del acuífero y la producida por alimentación lateral subterránea

5.6.1. Recarga (infiltración de lluvia y retorno de riego)

Para calcular la infiltración procedente de las precipitaciones se ha tomado la media de las precipitaciones del periodo de simulación (5-6 años). En los casos de la Plana de Castellón y Oropesa-Torreblanca se han utilizado los datos de la estación meteorológica de Castellón, por proximidad geográfica. En la Plana de Vinaroz Peñíscola se han utilizado los datos de la estación meteorológica de Tarragona, (www.meteored.com). Se ha considerado una tasa de infiltración de la precipitación del 14% (Tuñón, 2000).

El cálculo del retorno de riego se ha realizado según las dotaciones de riego en cada zona y la superficie afectada por la agricultura. Las dotaciones de riego son distintas según el origen del agua, entre 5100 y 6500 m³/ha/año para agua procedente del acuífero y 7500 m³/ha/año para aguas superficiales (este caso se da únicamente en la

Plana de Castellón). Según Tuñón (2000), la tasa de infiltración debida a retornos de riego es del 8 %.

5.6.2. Alimentación lateral subterránea

La alimentación lateral subterránea desde los acuíferos de borde se ha simulado en la plana de Vinaroz imponiendo un límite de potencial constante en las celdillas de borde. Se asume que las variaciones piezométricas que ocurran en los acuíferos carbonatados no afectan a la superficie piezométrica del acuífero costero.

En las Planas de Castellón y de Oropesa - Torreblanca las entradas laterales se han simulado mediante pozos de inyección. En este caso, se ha realizado una estimación aproximada de las transferencias laterales subterráneas procedentes de los acuíferos limítrofes y se ha dividido en el número de celdas en las que se considera que existen entradas. Así, el caudal total inyectado será equivalente al supuestamente introducido en las planas de forma subterránea desde los acuíferos limítrofes.

5.7. Salidas

5.7.1. Bombeos

Los bombeos se han obtenido de distintas fuentes. En el caso que se conocieran los caudales totales de extracción por una determinada superficie, se ha considerado que las extracciones han sido homogéneas y se han repartido equitativamente por el área en cuestión. Otra opción es que se conozca la ubicación y caudales de extracción de bombeos reales, en este caso se respetan los valores y posiciones. Finalmente si existen algunos pozos ubicados pero se observa que los datos de los bombeos no son suficientes para satisfacer la demanda de riego, se ha realizado unos cálculos a partir de las dotaciones de riego y el área perteneciente al regadío. En primer lugar se ha calculado cuantas celdillas riega cada pozo conocido. Y en las celdas restantes, donde no existen pozos pero sí necesidad de regar, se han realizado cálculos para conocer el caudal que debería de extraer un "pozo virtual" en el caso que ese pozo regara el cultivo de toda la celdilla a la que pertenece. Estos cálculos se han llevado a cabo considerando la dotación de riego por hectárea y año, y las dimensiones de las celdillas.

5.7.2. Drenes

Las salidas a zonas húmedas se han simulado introduciendo la condición de dren en todas las celdillas de dichas zonas.

Una simplificación de la realidad a tener en cuenta es que aunque es conocido que no por toda la zona húmeda existen salidas de aguas subterráneas, el caudal de salida se repartirá uniformemente por todas las celdillas para simplificar y facilitar la simulación.

Los parámetros que hay que introducir son la profundidad donde se encuentra el dren y la conductancia de los materiales que lo contienen. Estos parámetros se pueden estimar mediante el método de prueba y error o partiendo de una ecuación, aunque posteriormente los valores obtenidos se varíen. La ecuación es la siguiente:

$$Q = C_v (h - h_0)$$

donde:

- Q: Caudal de salida
- C_v : Conductancia por celdilla ($m^2/día$)
- h: Altura piezométrica que proporciona el modelo en la celda. Este valor se conoce una vez ejecutado el modelo.
- h_0 : Cota del dren

Conociendo el caudal de salida en la zona húmeda, la altura piezométrica que proporciona el modelo y la cota del dren, se puede obtener una conductancia (C_v), que dividida por el número de celdillas consideradas como zona húmeda, proporciona una primera aproximación de la conductancia. Este parámetro suele ser complicado de conocer de antemano si no se ha estudiado con detalle la zona húmeda.

5.8. Puntos de control

Los datos piezométricos de control son las medias de los periodos considerados en las simulaciones. En el caso de que los valores extremos del periodo sean anormalmente altos o bajos, estos valores se han omitido y se ha aplicado la media del resto de datos de un mismo punto.

5.9. Calibración

La calibración de los distintos parámetros se ha llevado a cabo de forma simultánea y mediante el método de prueba y error.

Se ha considerado que la calibración era adecuada cuando la diferencia entre el valor calculado por el programa y el introducido (observado) está comprendida entre -1 y 1. Este rango se ha estimado adecuado debido a que muchos de los parámetros utilizados en las simulaciones son medias del periodo considerado.

6. MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANA DE OROPESA - TORREBLANCA

6.1. Modelo hidrogeológico conceptual

La Plana de Oropesa es una llanura de derrame fluviotorrencial de origen árido que se extiende paralela al litoral en dirección NE-SO, con una longitud de 21 Km. y una anchura variable entre 2,5 y 6 Km. Se pueden diferenciar una llanura costera sensiblemente horizontal y una rampa de erosión hacia los bordes de los macizos calcáreos circundantes (figura 3).

El acuífero de la Plana de Oropesa-Torreblanca se corresponde con la Unidad Hidrogeológica 08.11 y con la masa de agua subterránea 080.009.

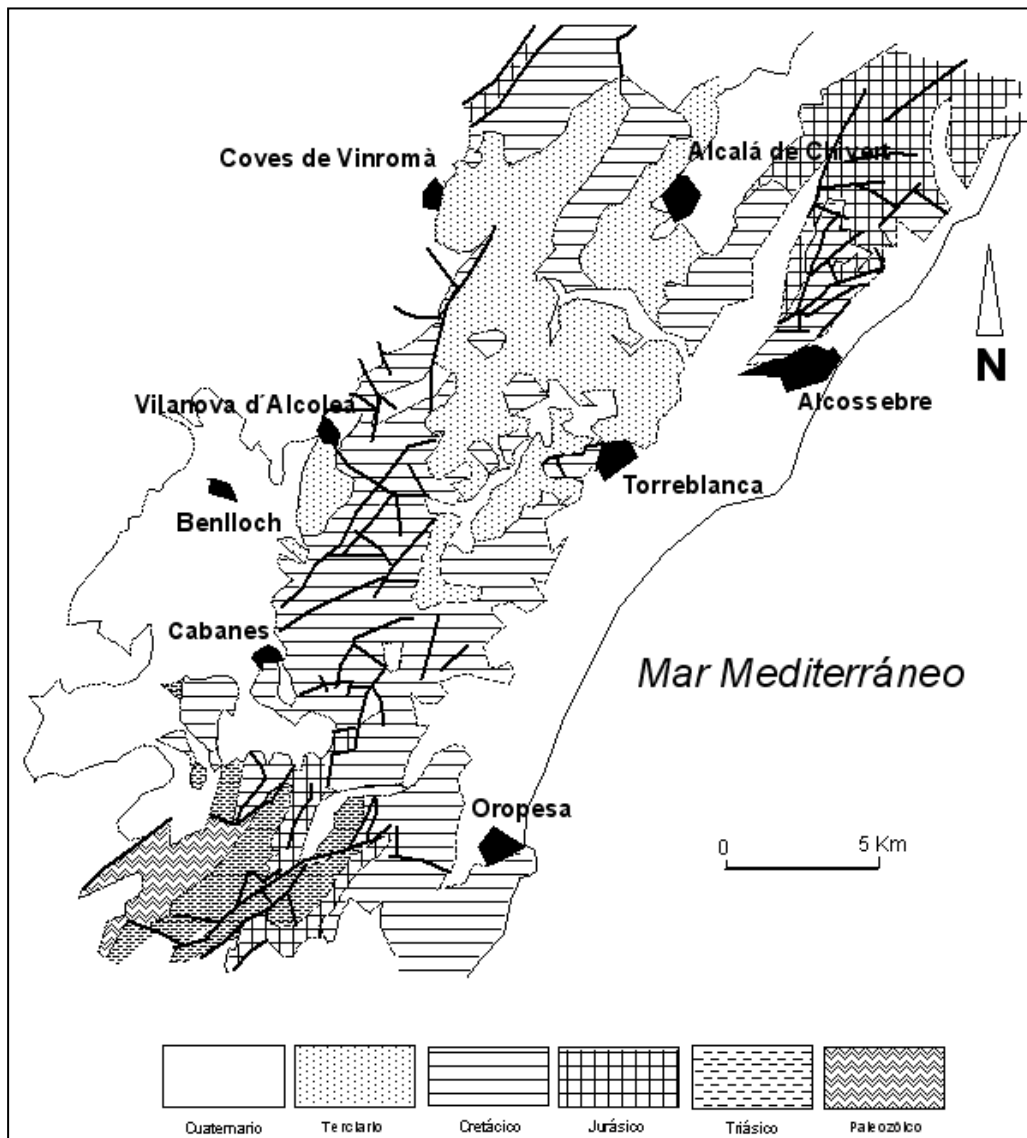


Figura 3. Mapa geológico de la Plana de Oropesa - Torreblanca

jurásicos de la Sierra de Irtá. El límite occidental está constituido por calizas masivas gargasienses y aptienses en conexión hidráulica con el pliocuaternario, excepto en las inmediaciones del barranco de Chinchilla y río de San Miguel donde aflora el impermeable mioceno de base. Por el sur limita con las calizas cretácicas de la Sierra de Oropesa. El límite oriental es abierto, permitiendo la conexión hidráulica con el mar.

El flujo subterráneo transcurre en general en sentido NO-SE, aunque en los sectores del barranco de Chinchilla y este de Torreblanca se puede invertir el sentido del flujo debido a la intensa explotación de los recursos, provocando la entrada de agua de mar.

Las transmisividades calculadas en el acuífero pliocuaternario varían entre 100 y 2500 m²/día y los coeficientes de almacenamiento entre el 2 y el 12%.

6.2. Geometría del acuífero

La figura 5 muestra el contorno de la Plana de Oropesa -Torreblanca y la situación de los núcleos urbanos más importantes, Torreblanca al norte y Oropesa al sur.

La topografía del acuífero se ha elaborado a partir de la cartografía 1:10.000 del Instituto Cartográfico Valenciano (figura 6). Los datos topográficos se han tratado mediante el programa Surfer. Los archivos creados por el programa con extensión *archivo.grd*, son importados directamente al Visual Modflow

La geometría de la base del acuífero se ha construido a partir de los cortes geológicos y columnas de sondeos recogidos en diversos informes y de información propia (figura 7). Finalmente el acuífero presenta en general una geometría lenticular, con espesores que aumentan hacia la costa. En la figura 8 se puede observar la geometría utilizada en el modelo.

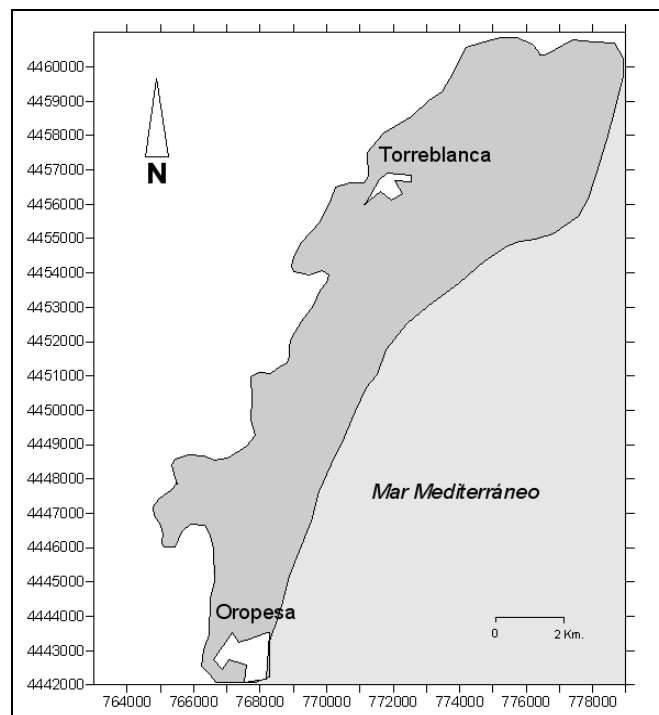


Figura 5. Contorno de la Plana de Oropesa y Torreblanca. Situación de los núcleos urbanos más importantes

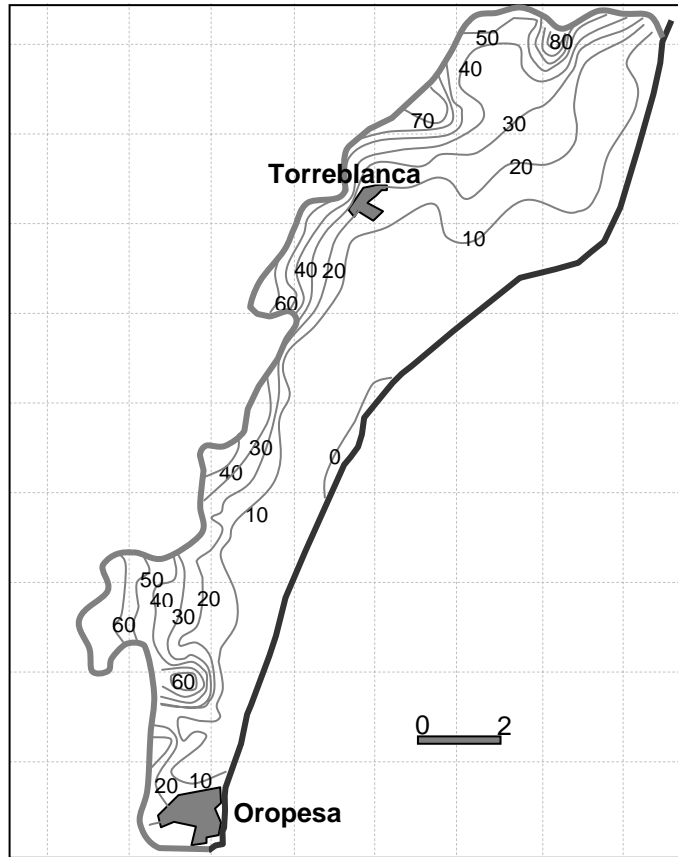


Figura 6. Topografía de la Plana de Oropesa - Torreblanca

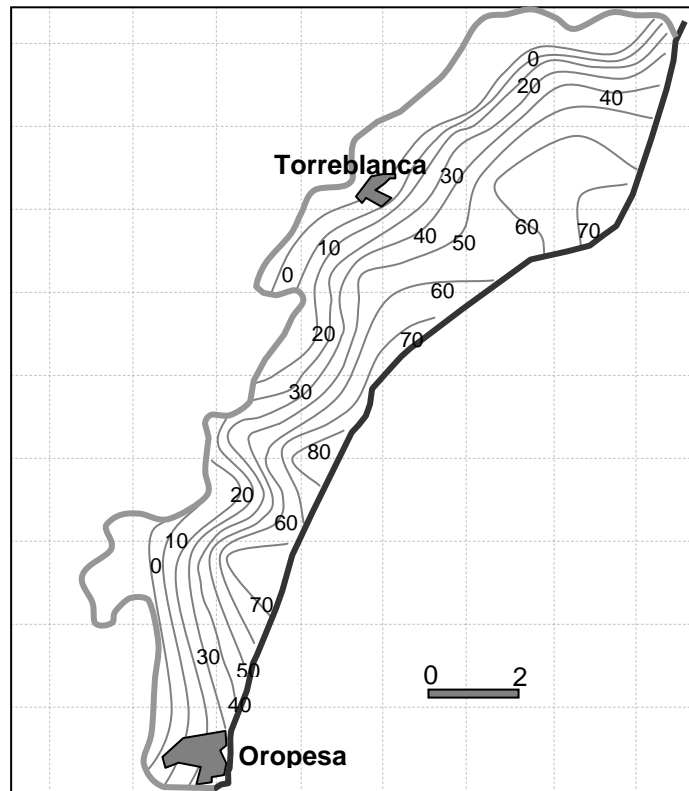


Figura 7. Muro del acuífero de la Plana de Oropesa- Torreblanca

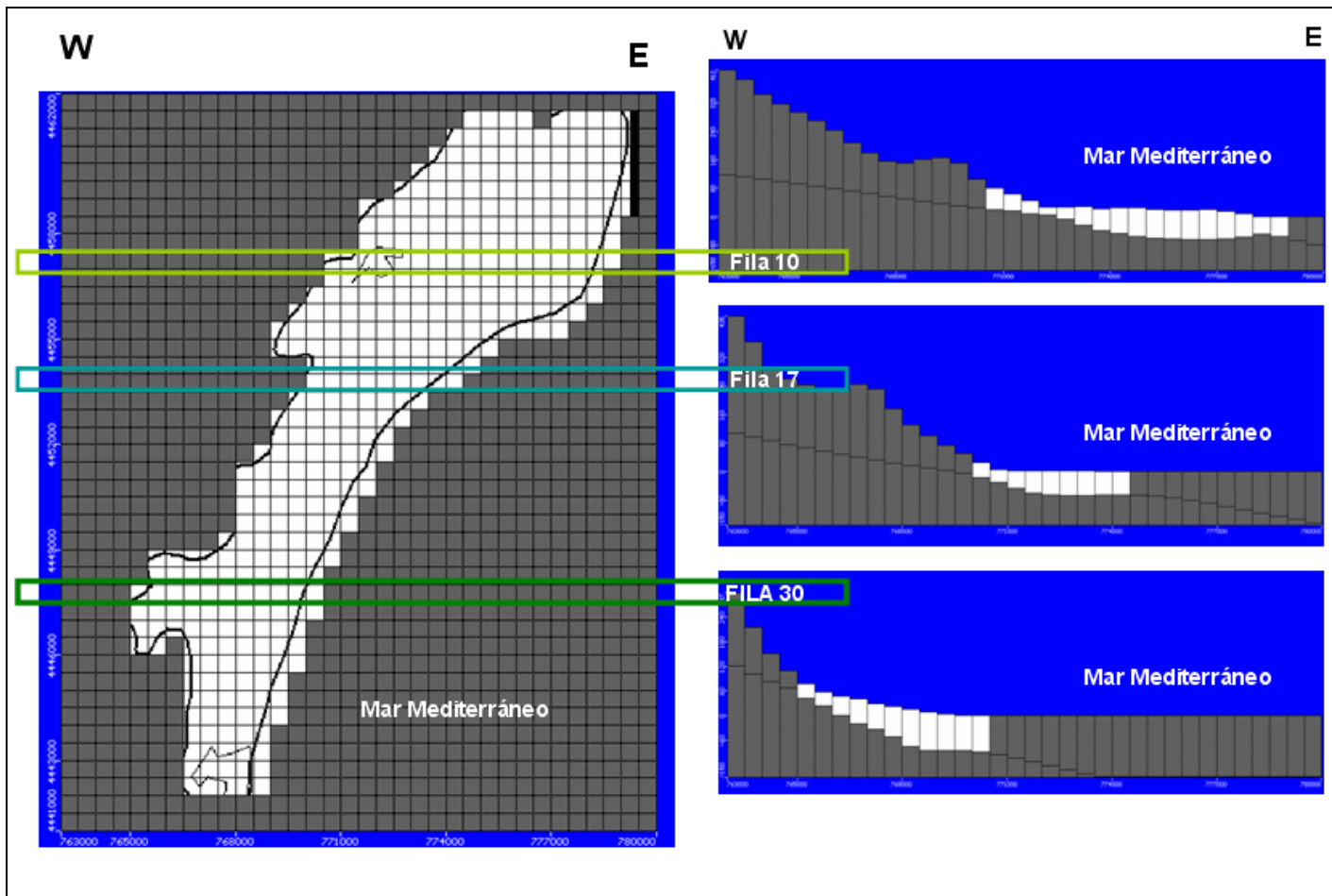


Figura 8. Geometría del acuífero

6.3. Balance hídrico

6.3.1. Cálculo de las entradas

Las entradas en el acuífero de la Plana de Oropesa Torreblanca son básicamente la infiltración de las precipitaciones, retornos de riego y la recarga lateral subterránea que proviene de los acuíferos limítrofes:

Infiltración de lluvia (lluvia útil)

La única estación meteorológica existente en la zona está situada en la localidad de la Ribera de Cabanes, y se trata de una estación agroclimática perteneciente a la red de estaciones de la Generalitat Valenciana. La serie histórica disponible es 2001 a 2008, con una precipitación media anual de 573 mm. Este valor contrasta con el obtenido en la estación meteorológica de Castellón, que es de 442 mm (serie 1971 - 2000). Para efectuar los cálculos se han utilizado los datos correspondientes a la estación de la Ribera de Cabanes, por estar situada en el área de estudio, aunque probablemente en series históricas más largas, la precipitación media anual pueda ser algo inferior.

El cálculo de la lluvia útil requiere conocer la tasa de infiltración (TS). Según Tuñón (2000), en la Plana de Castellón la tasa de infiltración de la lluvia es del orden del 14 %, valor obtenido mediante la aplicación del método de Allen y contrastado experimentalmente en unos lisímetros. Este valor puede ser también aceptable para la Plana de Oropesa-Torreblanca.

En consecuencia, y teniendo en cuenta que la superficie del acuífero es de 80 km², la lluvia útil será:

$$I = P \cdot TS \cdot Sup = 573 \frac{l}{m^2} \cdot 0,14 \cdot 80 \cdot 10^6 m^2 = 6,42 hm^3/año$$

En consecuencia, las entradas por infiltración de agua de lluvia son del orden de 6,42 hm³/año

Retorno de riego

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2006), la superficie de regadío en la Plana de Oropesa - Torreblanca es de 4.615 has (dato de 2004), aunque en 1999 la cifra era de 7.946 has. Para este balance, se ha considerado una superficie de riego de 5.000 has, con una dotación unitaria de 6.500 m³/ha/año. Según estos datos, el volumen de agua utilizado para riego es el siguiente:

$$R = 6.500 \frac{l}{ha/año} \cdot 5.000 has = 32,50 hm^3/año$$

Según Tuñón (2000), la tasa de retorno de riego calculada experimentalmente en condiciones semejantes es del orden del 5%, sensiblemente inferior a la tradicionalmente aceptada, que llega hasta cifras del orden del 25%. Teniendo en cuenta que la práctica totalidad del riego se realiza a goteo, parece más realista aceptar una tasa de retorno del 5%. Según esto, el retorno de riegos sería:

$$R_r = 32,50 hm^3 \cdot 0,05 = 1,63 hm^3/año$$

En consecuencia, las entradas por retorno de riegos se estiman en 1,63 hm³/año.

Entradas laterales subterráneas

Como más adelante se expone, el cálculo de las entradas laterales subterráneas (RL) se ha efectuado por diferencia entre las entradas y las salidas, considerando que no existen variaciones del almacenamiento.

La Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2007) calcula la recarga lateral mediante el modelo PATRICAL (Pérez, M.A., 2005), que simula el ciclo hidrológico a escala mensual a partir de la fórmula de Témez (1977). En este modelo se obtiene, entre otros datos que no son necesarios para este modelo conceptual, las transferencias laterales. A este valor se le aplica un coeficiente de 0.8, porque considera el 80% como el volumen medioambiental (no explotable). Es aproximadamente 29,74 hm³/año

6.3.2. Cálculo de las salidas

Las salidas de la Plana son básicamente las extracciones de las captaciones, la alimentación a la zona húmeda y las salidas subterráneas al mar.

Bombeos del acuífero

La totalidad de la demanda se satisface mediante bombeo de aguas subterráneas. Los bombeos para usos agrícolas ya han sido calculados en el epígrafe anterior y son del orden de 32,5 hm³/año.

Los bombeos para consumo humano se han calculado a partir de los datos recogidos en un informe de la Diputación Provincial de Castellón (DIPCAS, 2004). En la tabla 1 se indican las poblaciones abastecidas, los habitantes censados y el consumo real, proporcionado por la empresa suministradora.

Municipio	Nº habitantes	Consumo (m³/año)	Dotación (l/h/d)
Cabanes	2.589	393.709	417
Torreblanca	5.430	701.637	354
Oropesa del Mar	6.153	2.252.714	1003
Total	20.621	3.348.060	

Tabla 1. Demanda para consumo urbano en la Plana de Oropesa - Torreblanca

Las dotaciones unitarias son sólo aparentes, ya que se trata de municipios turísticos, sobretodo Oropesa, en los que la población de hecho es muy superior a la censada.

En cualquier caso, la demanda para consumo humano es de 3,35 hm³/año.

No existe demanda industrial, ya que las pocas industrias existentes en el área están incluidas en los núcleos urbanos.

En consecuencia, los bombeos totales del acuífero son la suma de los bombeos para usos agrícolas y usos urbanos, que son 35,85 hm³/año.

Salidas a la marjalería (ZH)

Según el modelo conceptual adoptado, la zona húmeda está asociada al acuífero, de manera que representa un área de topografía deprimida bajo la superficie piezométrica en la que descarga el acuífero de manera difusa y

también concentrada a través de los “ullals”. La lámina de agua en la marjalería está regulada mediante acequias y compuertas de salida superficial al mar. En síntesis, se puede considerar que existen dos salidas principales, una en el extremo meridional, por medio de la denominada Gola de Torre la Sal, y otra en el extremo septentrional, por medio de la denominada Gola del Trenc.

No se tienen datos de aforo de estos canales, pero se estima, a los efectos de este balance, que los caudales instantáneos medios de salida son de 50 y 100 litros/segundo, respectivamente.

Así pues, si se considera que el caudal conjunto de salida es de 150 litros/segundo, se puede admitir que las salidas del sistema a través de la marjalería son del orden de 4,73 hm³/año.

Seguramente sea apreciable el efecto de la evaporación y transpiración en esta zona, que se puede estimar asumiendo una tasa media del orden de 1,2 mm./año (se estima una tasa máxima de 6 mm. en verano y prácticamente inapreciable en invierno). Dado que la superficie de la marjalería es de 900 hectáreas, se puede estimar que las pérdidas por evapotranspiración sean del orden:

$$EV = 1,2 \frac{l}{m^2} \cdot 9.000.000m^2 = 10,80 \frac{hm^3}{año}$$

Salidas subterráneas al mar

Para calcular las salidas subterráneas al mar, se ha aplicado la ley de Darcy, de acuerdo a los siguientes datos:

Permeabilidad = 30 m/d

Gradiente hidráulico = 0,001

Longitud de la costa = 21.000 metros

Espesor saturado medio = 25 metros

Con estos datos, las salidas subterráneas al mar se han estimado en 5,75 hm³/año.

6.3.3. Balance

De acuerdo a los datos expuestos, el balance para un año medio puede expresarse de la siguiente forma:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

Esta igualdad supone que no existe variación del almacenamiento, supuesto que puede aceptarse a escala hiperanual.

Solamente los bombeos para consumo humano corresponden a caudales medidos; el resto son estimaciones que tienen un notable grado de incertidumbre. En estas condiciones parece preferible redondear los resultados obtenidos a cifras enteras. Así El balance se resume en la tabla 2 y se compara con el calculado por la CHJ (2007).

Entradas (hm ³ /año)		CHJ, 2007	Salidas (hm ³ /año)		CHJ, 2007
Infiltración de lluvia	6,4	4,73	Bombeos	35,9	25,39
Retorno de riegos	1,6	9,24	Salidas superficiales	4,7	0
Alimentación lateral	49,2	9,74	Evaporación	10,8	0
			Salidas subterráneas	5,8	8,00
Total	57,2	43,71		57,2	33,39

Tabla 2. Resumen del balance hídrico de la Plana Oropesa - Torreblanca

La partida de evaporación es la calculada desde la zona húmeda del Prat de Cabanes.

Si se considera que el acuífero está en equilibrio, llama la atención la cifra correspondiente a la alimentación lateral subterránea, que es de 49,2 hm³/año, muy superior a la calculada por la CHJ (2007) mediante el modelo PATRICAL, que es de 29,74 hm³/año.

En el balance del CHJ (2007), la variación de la reserva es de + 10,32 hm³/año, que no parece una cifra realista.

Probablemente, el conocimiento más detallado de las partidas que componen el balance y la aplicación de modelos matemáticos pudieran proporcionar un balance más realista y resolver las discrepancias planteadas.

6.4. Establecimiento del modelo matemático

6.4.1. Diseño de la malla

La superficie de la Plana de Oropesa Torreblanca es de 87 km². No se ha incluido en el modelo el extremo septentrional de la Plana debido a que el espesor del conjunto pliocuaternalio acuífero en esa zona es muy reducido. La discretización espacial se ha configurado en celdillas cuadradas de 500 metros de lado. Se han introducido 34 columnas y 42 filas, obteniéndose 356 celdillas (figura 9). Cada celdilla tiene una superficie de 250.000 m².

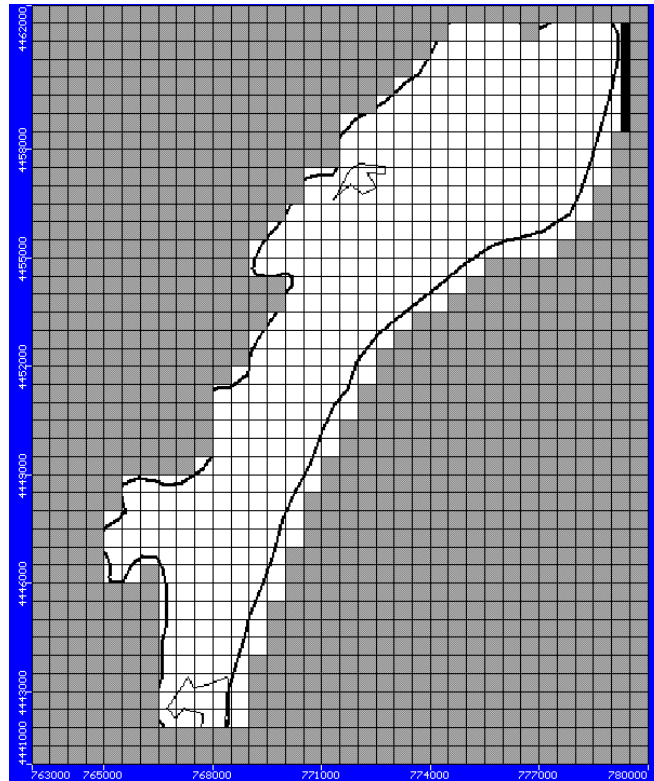


Figura 9. Mallado del modelo de la Plana de Oropesa Torreblanca. (500m. x 500 m.)

6.4.2. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica en el área de estudio presenta un rango de 60 m/día a 100 m/día. En el norte se pueden encontrar los valores mayores y en el sur los más bajos. El modelo tendrá una única capa por ello el valor de K_z no es un valor influyente en nuestro resultado, aun así se ha considerado como una décima parte de K_x . En la figura 10 se observa la distribución de las distintas conductividades. El color azul corresponde a 100 m/día, el color verde a 80 m/día y el color blanco a 60 m/día.

6.4.3. Almacenamiento

El rendimiento específico (S_y) de este acuífero libre se estima que pueda ser del orden de 0,1. De todas formas, como la modelación se limitará al régimen permanente de flujo, el almacenamiento no afectará a los resultados.

6.4.4. Condiciones de contorno

Potencial constante

En las celdillas costeras se ha asignado un potencial constante de 0 metros.

Drenes

Esta condición se ha aplicado en las celdillas que corresponden a la zona húmeda (figura 11). La zona húmeda se caracteriza por presentar materiales más impermeables

que el resto del acuífero. Estos materiales son limos y arcillas con una conductividad hidráulica (K) baja, de 10^{-5} m/día y un espesor medio de 4 metros.

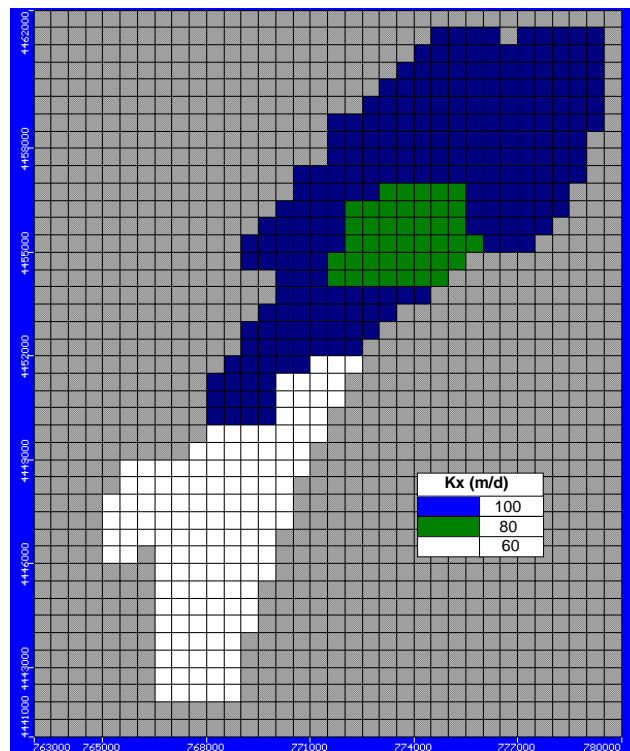


Figura 10. Valores de conductividad hidráulica en la Plana de Oropesa - Torreblanca

Los parámetros que hay que introducir son: la profundidad donde se encuentra el dren y la conductancia de los materiales que lo contienen. Se han asumido los siguientes valores:

- El dren se ha situado a -0,2 metros de profundidad.
- Para estimar la conductancia se ha considerado la siguiente ecuación donde el parámetro a conocer es la conductancia C_v . $Q = C_v(h - h_0)$
 - Q : Caudal que drena la zona húmeda, $4.7 \text{ Hm}^3/\text{año}$ ($12876,7 \text{ m}^3/\text{día}$).
 - C_v : Conductancia por celdilla. Unidades: $\text{m}^2/\text{día}$.
 - h : Altura piezométrica que proporciona el modelo en la celda. Entre 0 y 1 metro
 - h_0 : Cota del dren: -0.2m.
- Total de celdillas con dren: 18.

Teniendo en cuenta los parámetros que influyen directamente en el cálculo de la conductancia se ha realizado una aproximación suponiendo que cada celdilla tiene un dren donde las salidas son homogéneas. En este caso se estimó la conductancia en $2000 \text{ m}^2/\text{día}$.

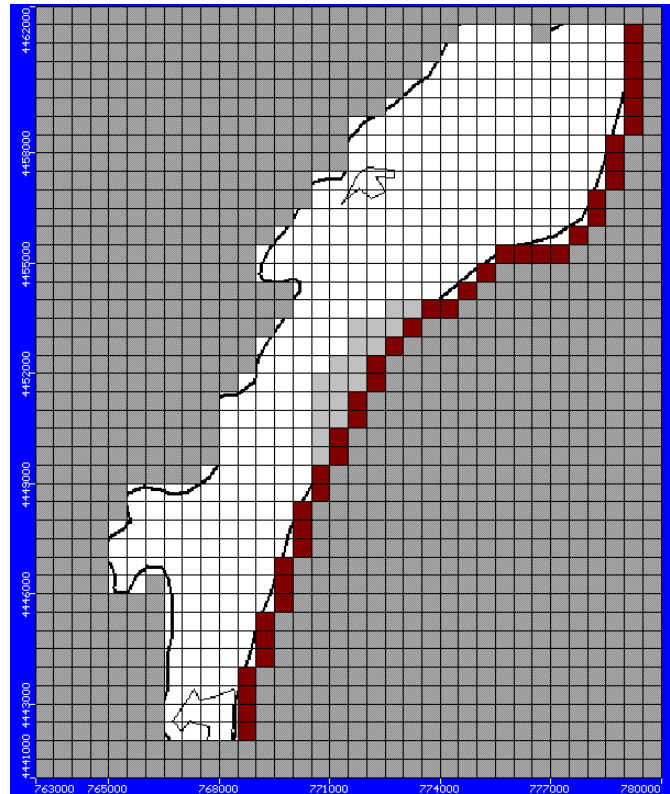


Figura 11. Condiciones de contorno: Potencial constante (rojo oscuro) y Drenes (gris claro).

6.4.5. Recarga

Debido a la ausencia de datos de precipitaciones en la Plana de de Oropesa Torreblanca durante el periodo elegido para la simulación, se han utilizado los datos correspondientes a la Plana de Castellón por su proximidad geográfica. El periodo estudiado es de 5 años, desde 1995 al 2000 y la media anual es de 386.8 mm/año.

Se han diferenciado 3 zonas (figura 12): la zona 1 (en azul) corresponde a áreas de agricultura de secano o zonas donde no existe agricultura. En este caso el retorno de riego será 0, así que únicamente se infiltrará el agua de las precipitaciones. La zona 2 (color blanco) corresponde a áreas de agricultura de regadío. En esta zona la recarga será la correspondiente a la infiltración debida a la precipitación y al retorno de riego. La zona 3 (color verde) corresponde a la línea de costa, fuera del área de estudio, en las que se ha estimado que la recarga es nula.

Tasas de lluvia útil

Considerando que la tasa de infiltración es del 14% (Tuñón, 2000):

$$386.1 * 0.14 = 54.1 \text{ mm / año}$$

Retorno de riego

Considerando un dotación de regadío de 6500 m³/ha/año y una tasa de infiltración de 8% (Tuñón, 2000).

$$6500m^3 / ha / año = 650mm / año$$

$$650 * 0.08 = 52mm / año$$

La infiltración total en la zona 1 será de 54,1 mm/año y en la zona 2 de 106.1 mm/año

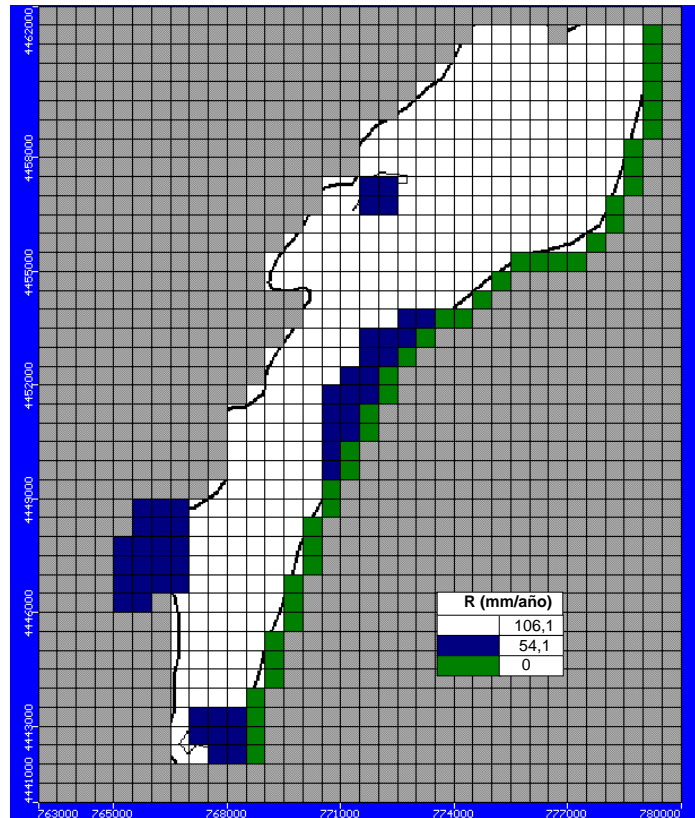


Figura 12. Zonas de recarga aplicadas al modelo

6.4.6. Pozos

Pozos de inyección

Según el modelo conceptual todo el límite interno es abierto. Las transferencias laterales subterráneas se han simulado mediante pozos de inyección (figura 13). El rango de caudales de inyección va desde 1771.2 m³/día a 7084 m³/día.

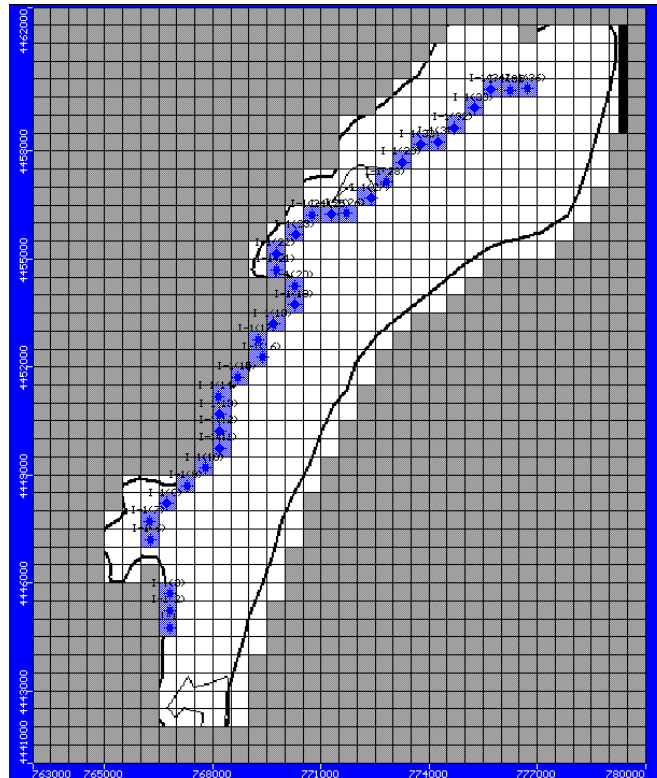


Figura 13. Situación de los pozos de inyección

Pozos de extracción

Los bombeos se han obtenido de distintas fuentes. Los situados en el sector meridional (términos de Oropesa y Cabanes) se han obtenido de estudios recientes (Morell, 2008). Los datos que corresponden a los términos municipales de Torreblanca y Alcossebre se han obtenido de varios informes consultados y de encuestas realizadas.

Se ha considerado una dotación de riego de 6500 m³/ha/año. A partir de los caudales extraídos se han calculado las celdillas que cada pozo riega, considerando que toda la celdilla es cultivable (figura 14).

Pozos de observación

Los pozos de observación se han seleccionado de la red piezométrica. Los datos piezométricos que se han considerado corresponden a la media de las medidas realizadas en el periodo 1995-2000, que se considera en primera aproximación un periodo de cierta estabilidad piezométrica. En la tabla 3 se indican las coordenadas de los piezómetros y en la figura 15 su situación.

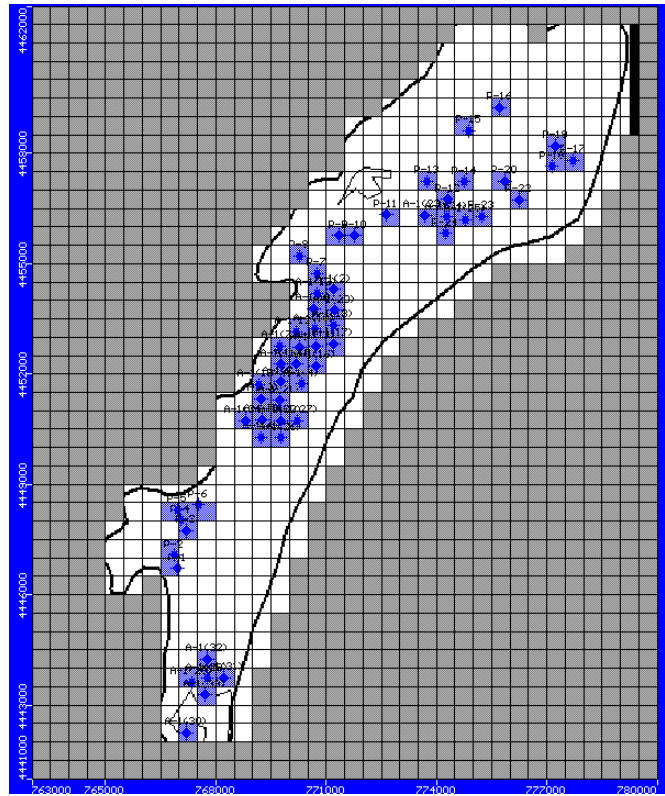


Figura 14. Pozos de extracción

PUNTO	X UTM	Y UTM	Piezometría Media
4	770109	4453787	0,71
5	767925	4443041	-1,08
6	776623	4458829	0,42
7	767325	4443145	-0,47
8	767002	4446804	0,14
9	767608	4447452	-0,71
10	770412	4453995	0,60
11	773267	4456971	0,73
12	772828	4455169	0,27
13	774908	4455411	0,01
14	772329	4455886	0,57
16	774239	4456391	-1,80
17	777219	4456479	0,53
18	777478	4457504	0,27
19	777929	4457703	0,37
21	768641	4444940	0,08
22	769261	4447540	0,19
23	769635	4450644	-0,05
24	770181	4449939	0,57

25	769773	4448991	0,44
26	769765	4447938	0,09
27	769865	4447987	0,34
28	769862	4447537	0,55
29	767220	4442444	-0,96

Tabla 3. Puntos de control

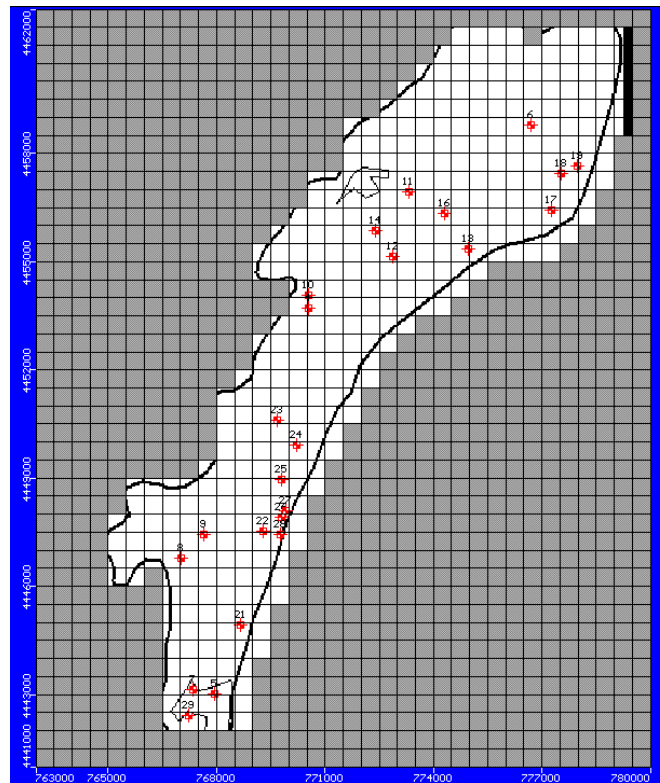


Figura 15. Situación de los puntos de control piezométrico

6.4.7. Calibración del modelo

Para calibrar el modelo se han modificado los valores de conductividad hidráulica, los caudales de los pozos de inyección, los drenes y los bombeos.

En la figura 16 se muestra el ajuste conseguido entre los niveles piezométricos introducidos y los calculados por el programa. Las desviaciones existentes se consideran aceptables para considerar el modelo calibrado.

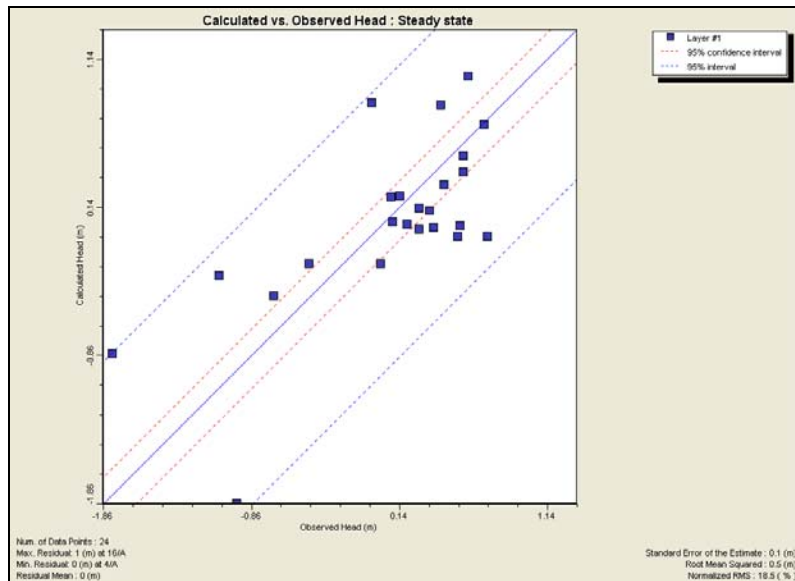


Figura 16. Datos calculados vs. datos observados en la Plana de Oropesa - Torreblanca

En la tabla 4 se muestran las diferencias entre los valores calculados y observados.

Punto	UTM X	UTM Y	Observado	Calculado	Calc.-Obs.
4	770532	4453709	0,71	0,70	-0,01
5	767932	4443022	-1,08	-0,32	0,76
6	776691	4458777	0,42	0,83	0,41
7	767333	4443128	-0,47	-0,24	0,23
8	767024	4446789	0,14	0,22	0,08
9	767632	4447434	-0,71	-0,45	0,26
10	770544	4454058	0,6	1,03	0,43
11	773328	4456932	0,73	-0,05	-0,78
12	772882	4455131	0,27	0,13	-0,13
13	774963	4455365	0,01	-0,24	-0,25
14	772386	4455850	0,57	0,49	-0,08
16	774297	4456348	-1,8	-0,85	0,95
17	777278	4456424	0,53	-0,05	-0,58
18	777541	4457448	0,27	-0,00	-0,27
19	777992	4457646	0,37	0,01	-0,36
21	768656	4444918	0,08	0,21	0,13
22	769286	4447516	0,19	0,06	-0,16
23	769671	4450618	-0,05	0,84	0,89
24	770215	4449911	0,57	0,38	-0,19

25	769803	4448965	0,44	0,29	-0,15
26	769791	4447912	0,09	0,04	-0,05
27	769919	4448085	0,34	0,12	-0,22
28	769759	4447450	0,55	0,02	-0,53
29	767225	4442428	-0,96	-1,85	-0,89

Tabla 4. Diferencias entre valores calculados y observados

6.5. Resultados obtenidos

6.5.1. Piezometría

En la figura 17 se muestra el resultado obtenido de ejecutar el modelo en régimen estacionario. El flujo subterráneo en la zona de estudio presenta una dirección preferencial desde las zonas de interior hacia la costa, siempre perpendicular a ésta. Existen dos zonas donde el flujo no presenta la dirección general. Estas zonas son la zona norte donde la dirección del flujo se ha invertido y existe intrusión marina. En esta área los niveles piezométricos pueden alcanzar los -1,3 m.s.n.m (fila 11 columna 23, cercano al punto de observación 16), y la zona sur, donde se puede apreciar la existencia de una pequeña depresión piezométrica. En este caso el descenso es mayor que en la zona sur aunque en términos de superficie afectada es menor. El nivel piezométrico más bajo es de -3 m.s.n.m. (fila 9 columna 29, cercano al punto de observación 8).

6.5.2. Balance hídrico calculado

En la tabla 5 se sintetizan los valores obtenidos por el modelo de la distintas partidas que configuran el balance.

Los datos más notables para el objetivo de este informe son que las salidas subterráneas al mar son 4,5 hm³/año y que las entradas de agua de mar se estiman en 2,1 hm³/año

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Intrusión	2,2	Salidas al mar	4,5
Entradas laterales	38,0	Bombeos	39,0
Infiltración	6,8	Zona húmeda	3,5
Total	47,0	Total	47,0

Tabla 5. Balance hídrico calculado

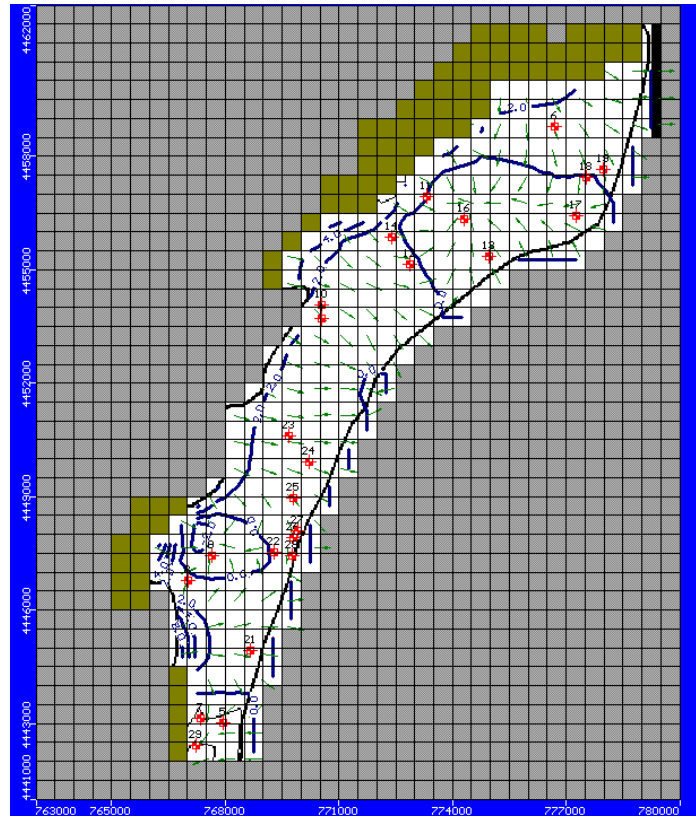


Figura 17. Simulación del modelo en régimen estacionario

6.6. Discriminación espacial de los volúmenes ambientales de descarga

El proceso de intrusión marina es de diferente intensidad según el sector del acuífero que se considere. Esto significa que el volumen ambiental de descarga al mar no tiene porqué repartirse de manera espacialmente homogénea, sino que debe ser focalizado en los sectores en que la intrusión progresa en mayor medida.

Con objeto de discriminar estas diferencias se ha dividido el acuífero en tres sectores: sector norte, sector centro y sector sur (figura 18). Las divisiones entre zonas son aproximadamente paralelas al flujo subterráneo natural del acuífero.

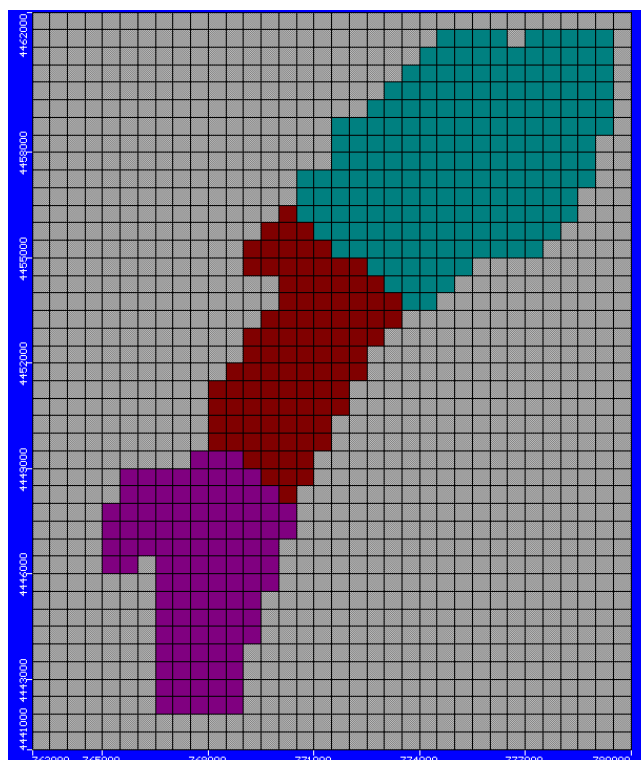


Figura 18. Zonación de la Plana de la Plana de Oropesa – Torreblanca para realizar balances hídricos parciales

En la tabla 6 se sintetizan los balances obtenidos para cada una de estas zonas.

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	1,7	Salidas al mar	0,8
	Entradas laterales	15,5	Bombeos	20,0
	Infiltración	3,1	Zona húmeda	-
	Transferencias internas	1,8	Transferencias internas	1,4
Sector central	Intrusión marina	0,05	Salidas al mar	2,0
	Entradas laterales	12,5	Bombeos	8,2
	Infiltración	2,0	Zona húmeda	3,4
	Transferencias internas	2,0	Transferencias internas	3,0
Sector sur	Intrusión marina	0,3	Salidas al mar	1,6
	Entradas laterales	9,9	Bombeos	11,0
	Infiltración	1,8	Zona húmeda	-
	Transferencias internas	1,2	Transferencias internas	0,6

Tabla 6. Balances hídricos de las zonas norte, centro y sur de la Plana de Oropesa - Torreblanca

De los 2,2 hm³/año que corresponden a intrusión marina, más del 90% ingresan en el sector norte, en el que las salidas subterráneas al mar son muy reducidas.

El escenario que se ha simulado corresponde a una situación en la que, grosso modo, el proceso de intrusión no avanza. Esto significa que las salidas al mar que calcula el modelo deben corresponder a los volúmenes ambientales de descarga necesarios para

mantener la situación estacionaria. Realmente, estos volúmenes serían los mínimos que habría que respetar para no agravar el proceso.

Pues bien, parece evidente que es necesario actuar específicamente en el sector septentrional en que la situación no parece responder al estado de equilibrio que se presumía. Esta actuación consistiría en reducir la explotación en ese sector.

6.7. Escenarios de actuación en la Plana de Oropesa - Torreblanca

6.7.1. Objetivos

De acuerdo a lo expuesto en el epígrafe anterior, se han simulado distintos escenarios en los que se modifican los bombeos actuales para estimar su repercusión en el balance hídrico general y, específicamente, en la relación existente entre las salidas al mar y la intrusión en cada sector.

Los escenarios que se han tenido en cuenta han sido los siguientes:

- a) Escenario 0. Corresponde a la situación de partida
- b) Escenario 1. Reducción del 20% de los bombeos en el sector norte
- c) Escenario 2. Reducción del 40% de los bombeos en el sector norte
- d) Escenario 3. Reducción del 100% de los bombeos en el sector sur
- e) Escenario 4. Reducción del 20% en el sector norte y del 100% en el sector sur
- f) Escenario 5. Reducción del 40% en el sector norte y del 100% en el sector sur

Los escenarios 1 y 2, en los que se disminuyen los bombeos en el sector norte, tienen por objeto aproximarse a la situación de explotación en la que las salidas subterráneas al mar sean suficientes para anular el proceso de intrusión y, en su caso, hacer retroceder el frente salino actual. La disminución de los bombeos no se acompaña de la reducción equivalente de los retornos de riego ya que no se contemplan cambios en el uso del suelo. Se supone, en todo caso, que la demanda agrícola que quedaría en precario con esta reducción se satisfaría con recursos de otra procedencia, como podría ser la reutilización de agua regenerada, que actualmente es nula, o la importación de recursos externos.

Los escenarios 3, 4 y 5 contemplan, además, el cese total de los bombeos en el sector sur, que en la actualidad es del orden de 11 hm³/año. La inclusión de estos escenarios obedece a que se trata de una posibilidad realista ya que en ese sector se tiene la previsión de llevar a cabo un desarrollo urbanístico que afectaría a todo el sector y en el que la Confederación Hidrográfica del Júcar ha impuesto la condición de que el agua de abastecimiento humano provenga de la desalación de agua de mar y la demanda para el riego de zonas verdes se satisfaga con aguas residuales regeneradas. Esto significa que se contempla la progresiva disminución de los bombeos en este sector hasta su cese total. En estos escenarios el retorno de riego se ha reducido a 50% de la superficie, que es, aproximadamente, el porcentaje de suelo que se destinará a zonas verdes.

6.7.2. Escenario 0: situación de partida

Este escenario corresponde al calculado en el modelo. La situación piezométrica es la reflejada en la figura 19.

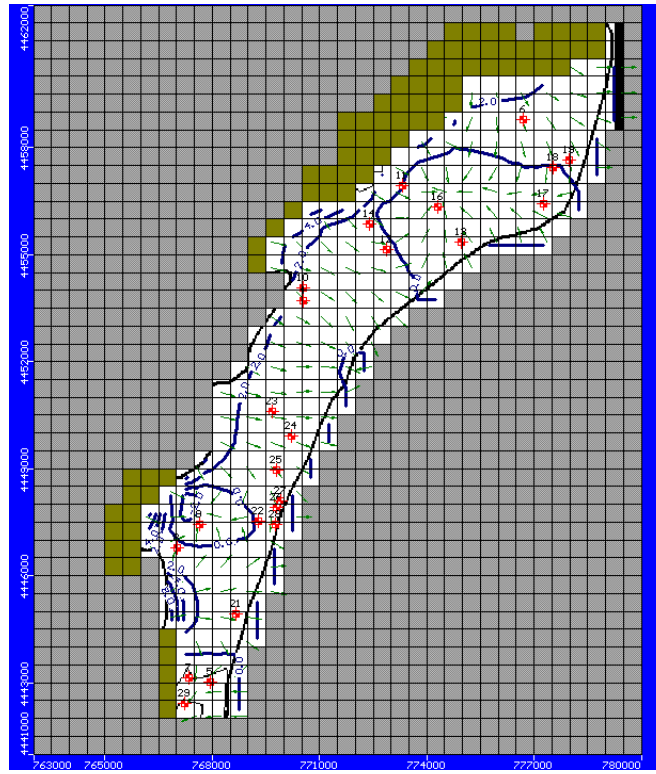


Figura 19. Mapa piezométrico de partida (escenario 0)

La tabla 7 sintetiza el balance general, la tabla 8 los balances sectoriales y la tabla 9 las transferencias internas entre los sectores diferenciados.

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Intrusión	2,2	Salidas al mar	4,5
Entradas laterales	38,0	Bombeos	39,0
Infiltración	6,8	Zona húmeda	3,5
Total	47,0	Total	47,0

Tabla 7. Balance general (escenario 0)

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	1,7	Salidas al mar	0,8
	Entradas laterales	15,5	Bombeos	20,0
	Infiltración	3,1	Zona húmeda	-
Sector central	Intrusión marina	0,05	Salidas al mar	2,0
	Entradas laterales	12,5	Bombeos	8,2
	Infiltración	2,0	Zona húmeda	3,5
Sector sur	Intrusión marina	0,3	Salidas al mar	1,6
	Entradas laterales	9,9	Bombeos	11,0
	Infiltración	1,8	Zona húmeda	-

Tabla 8. Balance sectorial (escenario 0)

Transferencias internas (hm ³ /año)	
Norte a Centro	1,4
Centro a Norte	1,8
Sur a Centro	0,6
Centro a Sur	1,2

Tabla 9. Transferencias internas (escenario 0)

6.7.3. Escenario 1: Reducción del 20% de los bombeos en el sector norte

La figura 20 es la situación piezométrica correspondiente a este escenario. El área con niveles deprimidos bajo el nivel del mar en el sector septentrional se reduce apreciablemente.

La tabla 10 sintetiza el balance general, la tabla 11 los balances sectoriales y la tabla 12 las transferencias internas entre los sectores diferenciados. Las salidas subterráneas al mar aumentan de 4,5 a 6,7 hm³/año, lo que reduce el volumen de intrusión de 2,2 a 0,4 hm³/año. Estas variaciones se producen esencialmente en el sector septentrional pero también afecta, aunque ligeramente, a la zona central; concretamente, las salidas a la zona húmeda se incrementan en 0,2 hm³/año.

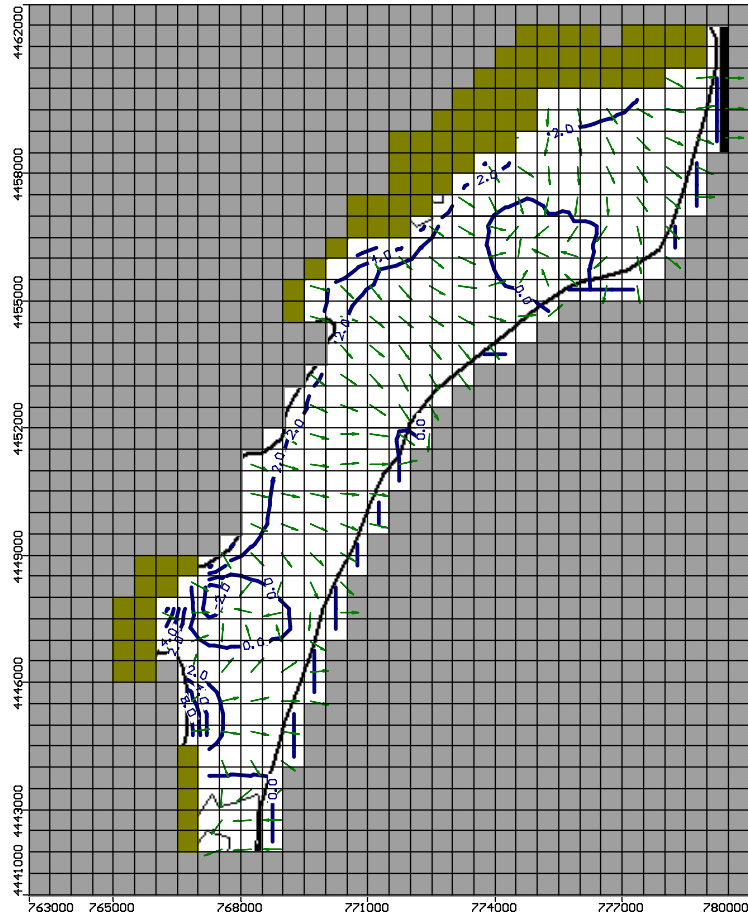


Figura 20. Mapa piezométrico de Oropesa - Torreblanca (escenario 1)

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Intrusión	0,4	Salidas al mar	6,7
Entradas laterales	38,0	Bombeos	34,8
Infiltración	6,8	Zona húmeda	3,7
Total	45,2	Total	45,2

Tabla 10. Balance general del acuífero de Oropesa - Torreblanca (escenario 1)

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	0,1	Salidas al mar	2,6
	Entradas laterales	15,5	Bombeos	15,7
	Infiltración	3,1	Zona húmeda	-
Sector central	Intrusión marina	0,02	Salidas al mar	2,4
	Entradas laterales	12,5	Bombeos	8,2
	Infiltración	2,0	Zona húmeda	3,7
Sector sur	Intrusión marina	0,3	Salidas al mar	1,6
	Entradas laterales	9,9	Bombeos	10,9
	Infiltración	1,8	Zona húmeda	-

Tabla 11. Balance sectorial del acuífero de Oropesa - Torreblanca (escenario 1)

Transferencias internas (hm ³ /año)	
Norte a Centro	2,3
Centro a Norte	1,9
Sur a Centro	0,6
Centro a Sur	1,2

Tabla 12. Transferencias internas (escenario 1)

6.7.4. Escenario 2: reducción del 40% de los bombeos en el sector norte

La figura 21 es la situación piezométrica correspondiente a este escenario. La zona deprimida del entorno de Torreblanca desaparece completamente y sólo existe flujo de agua dulce hacia el mar. También en la granja distal del acuífero se aprecia un notable incremento piezométrico.

La tabla 13 sintetiza el balance general, la tabla 14 los balances sectoriales y la tabla 15 las transferencias internas entre los sectores diferenciados.

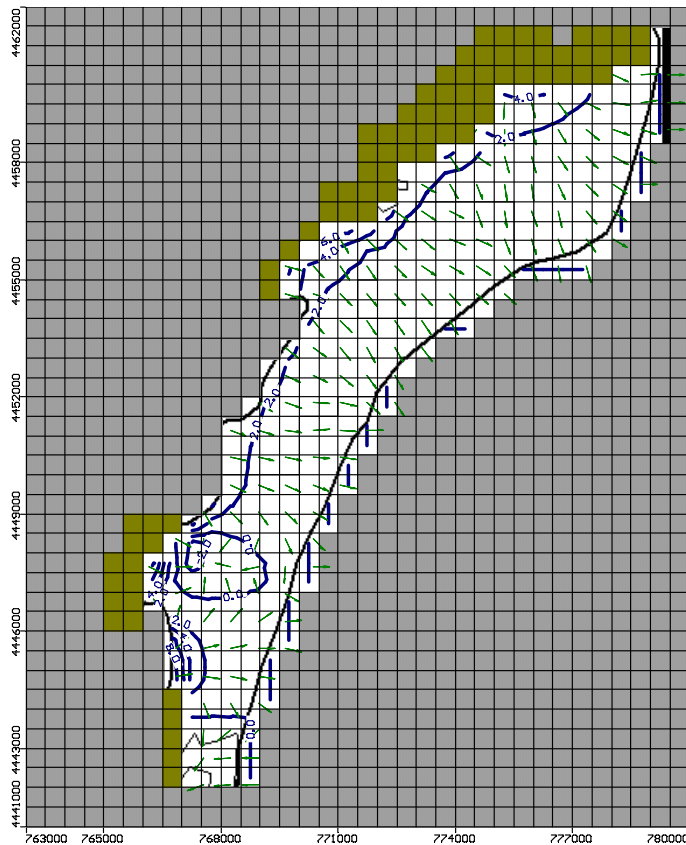


Figura 21. Mapa piezométrico de Oropesa - Torreblanca (escenario 2)

Las salidas al mar aumentan hasta 10,5 hm³/año y la intrusión marina desaparece en los sectores norte y central.

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Intrusión	0,3	Salidas al mar	10,5
Entradas laterales	38,0	Bombeos	30,6
Infiltración	6,9	Zona húmeda	4,0
Total	45,2	Total	45,1

Tabla 13. Balance general del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 2)

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	2,0
	Entradas laterales	15,5	Bombeos	11,5
	Infiltración	3,1	Zona húmeda	-
Sector central	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	3,0
	Entradas laterales	12,5	Bombeos	8,2
	Infiltración	2,0	Zona húmeda	4,0
Sector sur	Intrusión marina	0,2	Salidas al mar	1,7
	Entradas laterales	9,9	Bombeos	11
	Infiltración	1,8	Zona húmeda	-

Tabla 14. Balance sectorial del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 2)

Transferencias internas (hm ³ /año)	
Norte a Centro	3,2
Centro a Norte	2,0
Sur a Centro	0,7
Centro a Sur	1,2

Tabla 15. Transferencias internas (escenario 2)

6.7.5. Escenario 3: reducción del 100% de los bombeos en el sector sur

Se han eliminado las extracciones de la Zona Sur. En este caso, el riego en este sector se reduce a la mitad, ya que se considera que el 50% del espacio se dedicará a zona verdes, que se regarían con aguas regeneradas. A efectos prácticos, se ha redistribuido el riego en todo el sector pero se ha aplicado una tasa de retorno del 4%, que es la mitad de la aceptada para el riego.

La figura 22 es la situación piezométrica correspondiente a este escenario.

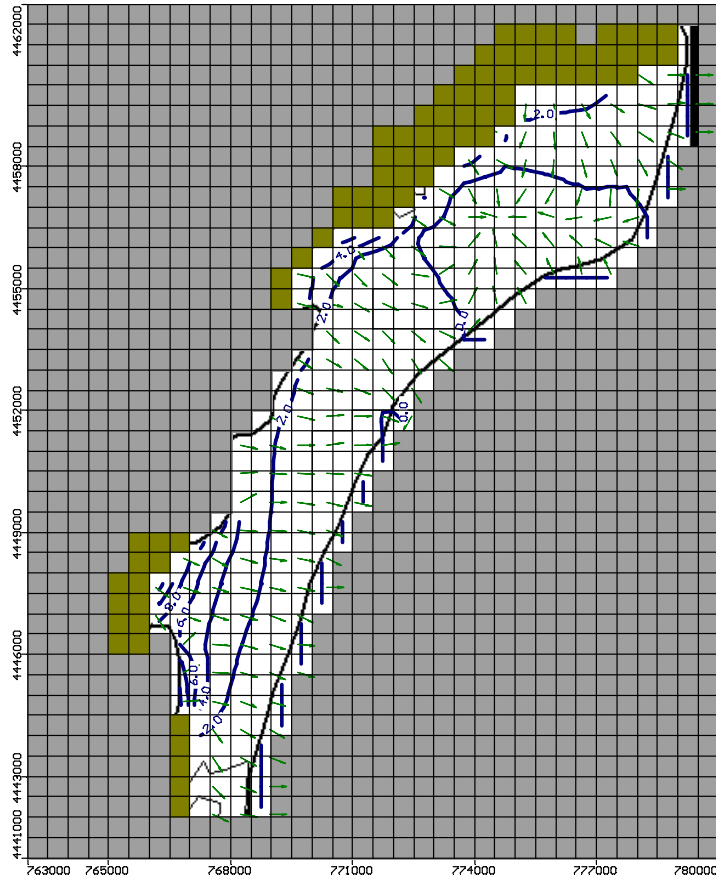


Figura 22. Mapa piezométrico de Oropesa - Torreblanca (escenario 3)

El área deprimida en el entorno del río Chinchilla, al norte de Oropesa, desaparece completamente y se restablece un esquema de flujo hacia el mar con fuertes gradientes.

La tabla 16 sintetiza el balance general, la tabla 17 los balances sectoriales y la tabla 18 las transferencias internas entre los sectores diferenciados.

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Intrusión	1,8	Salidas al mar	15,4
Entradas laterales	39,0	Bombeos	28,1
Infiltración	6,5	Zona húmeda	3,8
Total	47,3	Total	47,3

Tabla 16. Balance general del acuífero de Oropesa - Torreblanca (escenario 3)

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	1,8	Salidas al mar	1,0
	Entradas laterales	15,5	Bombeos	20,0
	Infiltración	3,1	Zona húmeda	-
Sector central	Intrusión marina	0,02	Salidas al mar	4,3
	Entradas laterales	12,5	Bombeos	8,2
	Infiltración	2,0	Zona húmeda	3,8
Sector sur	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	10,2
	Entradas laterales	11,0	Bombeos	0,0
	Infiltración	1,4	Zona húmeda	-

Tabla 17. Balance sectorial del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 3)

Transferencias internas (hm ³ /año)	
Norte a Centro	1,4
Centro a Norte	1,8
Sur a Centro	2,4
Centro a Sur	0,3

Tabla 18. Transferencias internas (escenario 3)

Las salidas al mar aumentan hasta 15,4 hm³/año, prácticamente 11 hm³ más que en las condiciones iniciales, y la intrusión en el sector meridional desaparece.

6.7.6. Escenario 4: reducción del 20% en el sector norte y del 100% en el sector sur

Este escenario corresponde a la suma de las condiciones impuestas en los escenarios 1 y 3, es decir, reducción del 20 % de los bombeos en la Zona Norte y del 100% en la Zona Sur.

La figura 23 representa la situación piezométrica correspondiente a este escenario que se caracteriza por la disminución de la intrusión en el norte y la eliminación en el sur, como ocurría en los escenarios 1 y 3, respectivamente.

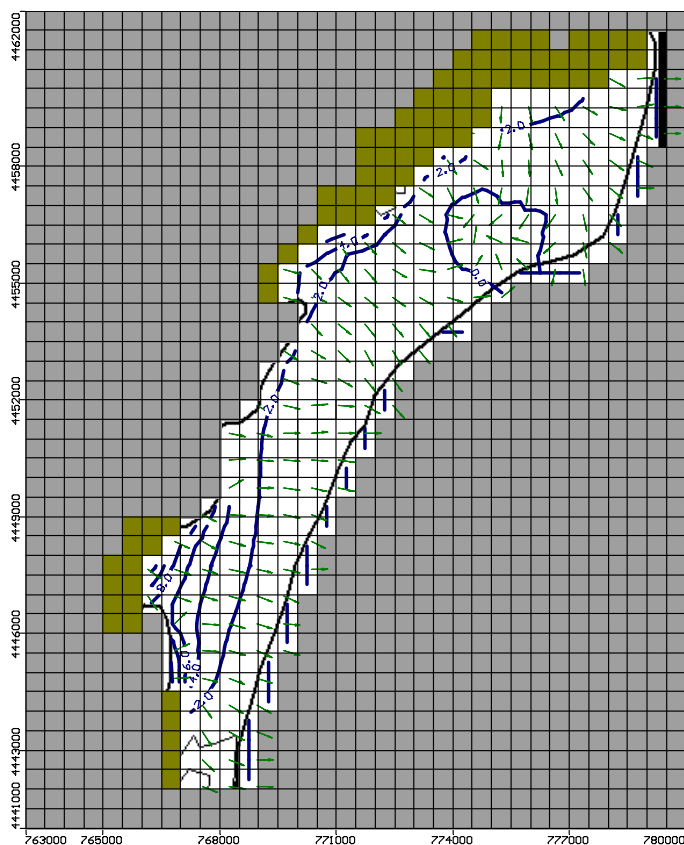


Figura 23. Mapa piezométrico de Oropesa - Torreblanca (escenario 4)

La tabla 19 sintetiza el balance general, la tabla 20 los balances sectoriales y la tabla 21 las transferencias internas entre los sectores diferenciados.

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Intrusión	0,07	Salidas al mar	17,5
Entradas laterales	39,0	Bombeos	23,9
Infiltración	6,4	Zona húmeda	4,1
Total	45,5	Total	45,5

Tabla 19. Balance general del acuífero de Oropesa - Torreblanca (escenario 4)

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	0,07	Salidas al mar	2,6
	Entradas laterales	15,5	Bombeos	15,7
	Infiltración	3,0	Zona húmeda	-
Sector central	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	4,7
	Entradas laterales	12,5	Bombeos	8,2
	Infiltración	2,0	Zona húmeda	4,1
Sector sur	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	10,3
	Entradas laterales	11,0	Bombeos	0,0
	Infiltración	1,4	Zona húmeda	-

Tabla 20. Balance sectorial del acuífero de Oropesa - Torreblanca (escenario 4)

Transferencias internas (hm ³ /año)	
Norte a Centro	2,3
Centro a Norte	1,9
Sur a Centro	2,4
Centro a Sur	0,3

Tabla 21. Transferencias internas (escenario 4)

6.7.7. Escenario 5: reducción del 40% en el sector norte y del 100% en el sector sur

Este escenario corresponde a la suma de las condiciones impuestas en los escenarios 2 y 3, es decir, reducción del 40 % de los bombeos en la Zona Norte y del 100% en la Zona Sur.

La figura 24 representa la situación piezométrica correspondiente a este escenario que se caracteriza por la completa desaparición de las depresiones piezométricas, como ocurría en los escenarios 2 y 3, respectivamente.

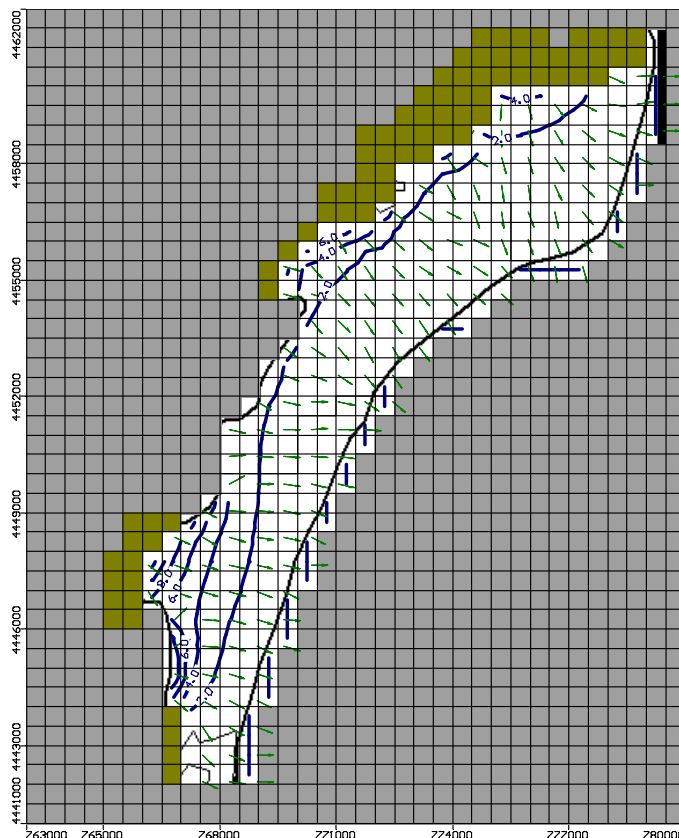


Figura 24. Mapa piezométrico de Oropesa - Torreblanca (escenario 5)

La tabla 22 sintetiza el balance general, la tabla 23 los balances sectoriales y la tabla 24 las transferencias internas entre los sectores diferenciados.

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Intrusión	0,0	Salidas al mar	21,5
Entradas laterales	39,0	Bombeos	19,7
Infiltración	6,5	Zona húmeda	4,4
Total	45,5	Total	45,6

Tabla 22. Balance general del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 5)

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	6,0
	Entradas laterales	15,5	Bombeos	11,5
	Infiltración	3,1	Zona húmeda	-
Sector central	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	5,2
	Entradas laterales	12,5	Bombeos	8,2
	Infiltración	2,0	Zona húmeda	4,4
Sector sur	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	10,3
	Entradas laterales	11,0	Bombeos	0,0
	Infiltración	1,4	Zona húmeda	-

Tabla 23. Balance sectorial del acuífero de Oropesa – Torreblanca (escenario 5)

Transferencias internas (hm ³ /año)	
Norte a Centro	3,3
Centro a Norte	2,0
Sur a Centro	2,4
Centro a Sur	0,3

Tabla 24. Transferencias internas (escenario 5)

6.7.8. Resumen de los escenarios simulados en la Plana de Oropesa - Torreblanca

En el sector norte, además de la situación de partida (escenario 0), se han simulado dos escenarios que corresponden, respectivamente, a la reducción de bombeos del 20% (escenario 1) y del 40% (escenario 2). La síntesis de los resultados obtenidos se muestra en la tabla 25.

En el sector central no se han hecho modificaciones del bombeo por lo que el balance sectorial no cambia sustancialmente, salvo por los ajustes de transferencias internas entre sectores, que se consideran de corto alcance.

En el sector sur las modificaciones obedecen a la eliminación de los bombeos y las alteraciones de las transferencias desde el sector central, que son de muy escasa significación. Por ello, en la tabla 26 se comparan los resultados del escenario 0 con los obtenidos en los escenarios 3, 4 y 5 que son prácticamente similares entre sí.

		Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2
Entradas	Intrusión	1,7	0,1	0,0
	Entradas laterales	15,5	15,5	15,5
	Recarga	3,1	3,1	3,1
	Transferencias int.	1,8	1,9	2,0
Salidas	Salidas mar	0,8	2,6	2,0
	Bombeos	20,0	15,7	11,5
	Zona húmeda	-	-	-
	Transferencias int.	1,4	2,3	3,2

Tabla 25. Variaciones del balance en el sector norte de la Plana de Oropesa – Torreblanca a consecuencia de la modificación de los bombeos

		Escenario 0	Escenarios 3, 4 y 5
Entradas	Intrusión	0,3	0,0
	Entradas laterales	9,9	11,0
	Recarga	1,8	1,4
	Transferencias int.	1,2	0,3
Salidas	Salidas mar	1,6	10,2
	Bombeos	11,0	0,0
	Zona húmeda	-	-
	Transferencias int.	0,6	2,4

Tabla 26. Variaciones del balance en el sector sur de la Plana de Oropesa – Torreblanca a consecuencia de la modificación de los bombeos

Las salidas al mar pasan de 1,6 a $\text{hm}^3/\text{año}$ a $10,2 \text{ hm}^3/\text{año}$. La consecuencia inmediata es la rápida desaparición de la intrusión marina y es de esperar una progresiva disminución de la salinidad general del agua subterránea en ese sector. La implementación de modelos en régimen transitorio y de modelos de doble densidad permitirá conocer mejor estos procesos.

6.8. CONCLUSIONES

El volumen ambiental estimado para la masa de agua subterránea de la Plana de Oropesa – Torreblanca es de $8 \text{ hm}^3/\text{año}$, que engloba las salidas al mar y la alimentación a la zona húmeda del Prat de Cabanes (CHJ, 2007). En el escenario simulado (periodo 1995 – 2000) el caudal ambiental de descarga es $7,9 \text{ hm}^3/\text{año}$, que corresponde a la suma de $4,5 \text{ hm}^3/\text{año}$ de salidas al mar y $3,4 \text{ hm}^3/\text{año}$ de alimentación a la zona húmeda.

Esta aparente coincidencia no debe ocultar el hecho de que, si bien el periodo simulado se ha considerado estable desde el punto de vista de la intrusión marina, la situación general del acuífero es preocupante, con elevada salinidad general y sobretodo en los sectores septentrional y meridional del mismo.

La simulación de escenarios basados en la reducción de los bombeos ha permitido establecer rangos de descargas ambientales que permiten prácticamente anular las entradas de agua de mar y propiciar así un proceso de regeneración del acuífero.

La reducción del 20% de los bombeos en el sector norte y el cese de los mismos en el sector sur (escenario plausible) consiguen la práctica eliminación de las entradas de agua de mar. En esta situación, los caudales ambientales de descarga son de 4,1 hm³/año a la zona húmeda del Prat de Cabanes y de 17,5 hm³/año de salidas subterráneas al mar, lo que totaliza un caudal ambiental de 21,6 hm³/año. Probablemente, una reducción menos exhaustiva de los bombeos en el sector sur pueda conseguir un efecto similar.

En cualquier caso, conseguir un volumen ambiental de 21-22 hm³/año requiere la eliminación del orden de 15 hm³/año de los bombeos actuales.

7. MODELO MATEMÁTICO DE PLANA VINAROZ

7.1. Modelo hidrogeológico conceptual

Son diversos los trabajos consultados sobre las características hidrogeológicas de la Plana de Vinaroz (SGOP, 1991; IGME, 2000).

La Plana de Vinaroz - Peñíscola constituye una llanura de derrame fluvio-torrencial generada en clima árido, en la que se diferencian tres niveles: formación detrítica superior, formación margoarcillosa intermedia y sustrato calizo profundo.

La formación superior, de edad miocuatnaria, constituye un acuífero formado por arenas, gravas y conglomerados con algo de arcillas. Su potencia varía de 0 a unos 125 metros aumentando desde los bordes interiores hacia la costa. La formación intermedia está constituida por un paquete fundamentalmente margoarcilloso de edad miocena que separa los acuíferos superior e inferior, comportándose como acuitardo/acuicludo, y con un espesor de 0 a 250 metros desde el interior hacia la costa. Bajo ella se sitúa el acuífero calizo mesozoico de edad probablemente jurásica al sur de la plana y cretácica al norte.

Los límites hidrogeológicos del acuífero miocuatnario están definidos al norte por las calizas cretácicas de la Sierra del Montsiá, que lo alimentan lateralmente. Por el sur la formación arcillosa miocena lo aísla de los macizos carbonatados de las sierras de Irta y Valdancha. Al oeste, entre Calig y Alcanar tiene límite abierto con la Plana de Cenia-Tortosa. El límite oriental es abierto, permitiendo la conexión hidráulica con el mar. El acuífero inferior calizo presenta límites cerrados al norte y sur, recibiendo una aportación lateral importante a través del límite occidental.

El flujo subterráneo transcurre en general en sentido NO-SE, aunque en los sectores de Vinaroz y Benicarló se invierte el sentido debido a la intensa explotación de los recursos, con entradas de agua de mar.

En cuanto a los parámetros hidrogeológicos característicos del acuífero detrítico superior, se observan transmisividades entre 250 y 1200 m²/día y coeficientes de almacenamiento del 5 al 15%. El acuífero inferior presenta transmisividades de 4000 m²/día en las calizas jurásicas, 2000 m²/día en las calizas aptienses y 1000 m²/día en las calizas del Cretácico superior. El coeficiente de almacenamiento, propio de acuíferos confinados, se estima del orden de 10⁻³.

7.2. Geometría del acuífero

La figura 25 se muestra el contorno de la Plana de Vinaroz y la situación de los núcleos urbanos más importantes, Vinaroz al norte y Benicarló al sur.

La topografía del acuífero se ha elaborado a partir de la cartografía 1:10.000 del Instituto Cartográfico Valenciano (figura 26). Los datos topográficos se han tratado mediante el programa Surfer. Los archivos creados por el programa con extensión *archivo.grd*, son importados directamente al Visual Modflow

La geometría de la base del acuífero se ha construido a partir de los cortes geológicos y columnas de sondeos recogidos en diversos informes y de información propia (figura 27). Finalmente el acuífero presenta en general una geometría lenticular, con espesores que aumentan hacia la costa. En la figura 28 se puede observar la geometría utilizada en el modelo.

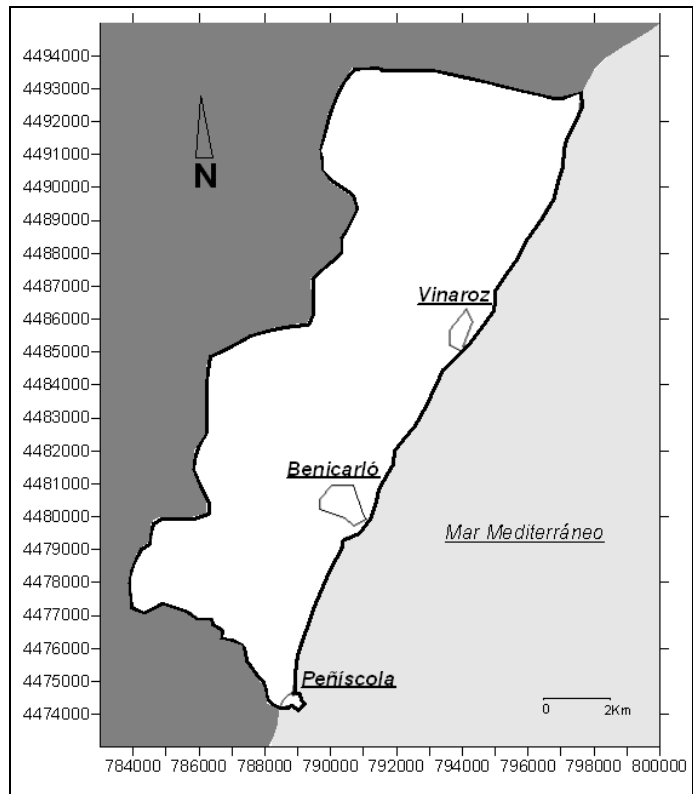


Figura 25. Mapa de la Plana de Vinaroz

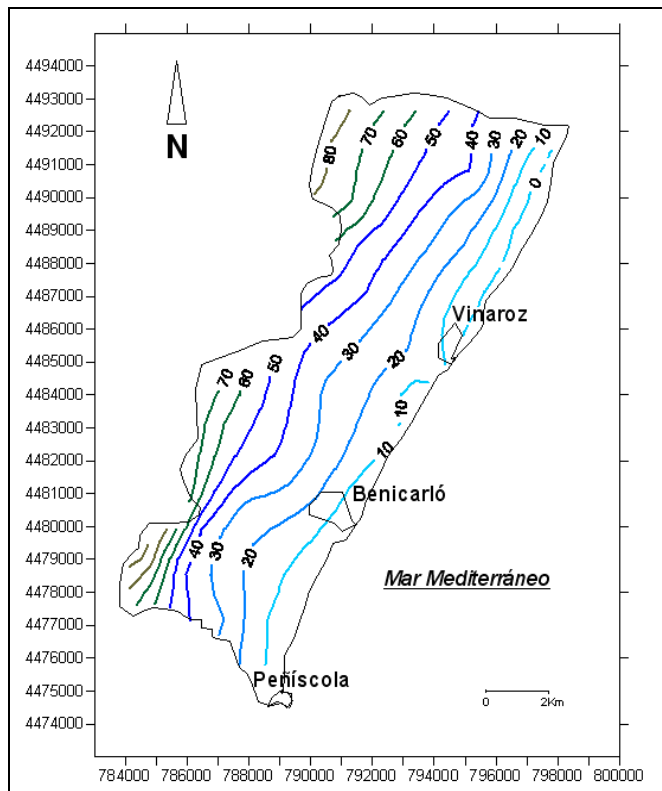


Figura 26. Topografía de la Plana de Vinaroz

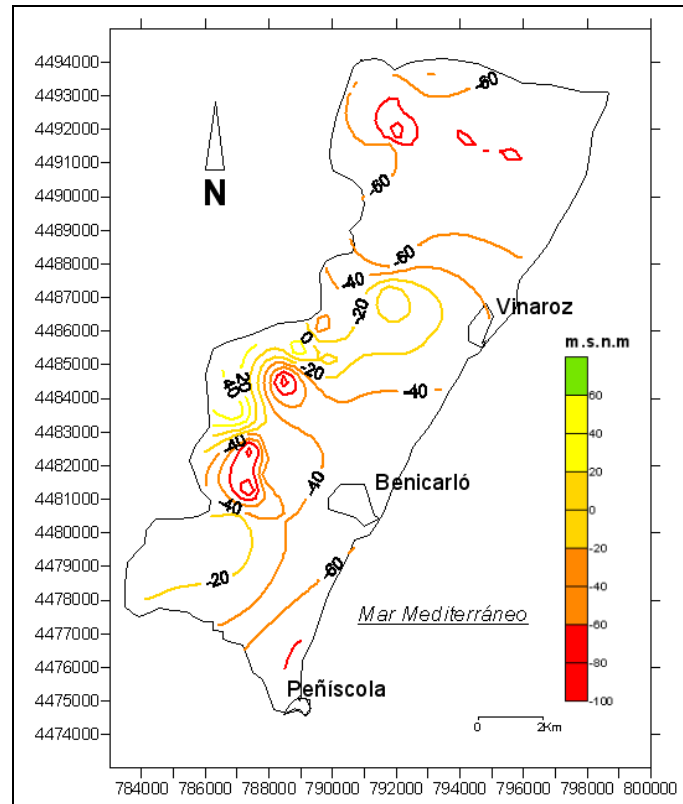


Figura 27. Muro del acuífero de Vinaroz

7.3. Balance hídrico

7.3.1. Cálculo de las entradas

Según el IGME (2000) la alimentación del acuífero superior, según balance medio estimado para el periodo 1948-83, procede en su mayor parte de la infiltración por retorno de riegos (23,5 hm³/año), infiltración de lluvia (12,5 hm³/año) y alimentación lateral (12 hm³/año). El acuífero calizo inferior se recarga mediante alimentación lateral (28 hm³/año), y en menor medida por infiltración de lluvia (3 hm³/año) y alimentación diferida del acuífero suprayacente (4 hm³/año).

La CHJ (2007) establece un balance para la masa de agua subterránea, que engloba le acuífero superior e inferior. La recarga de lluvia e infiltración desde ríos es de 8,10 hm³/año, el retorno de regadíos es de 14,78 hm³/año y las entradas laterales subterráneas 42,88 hm³/año.

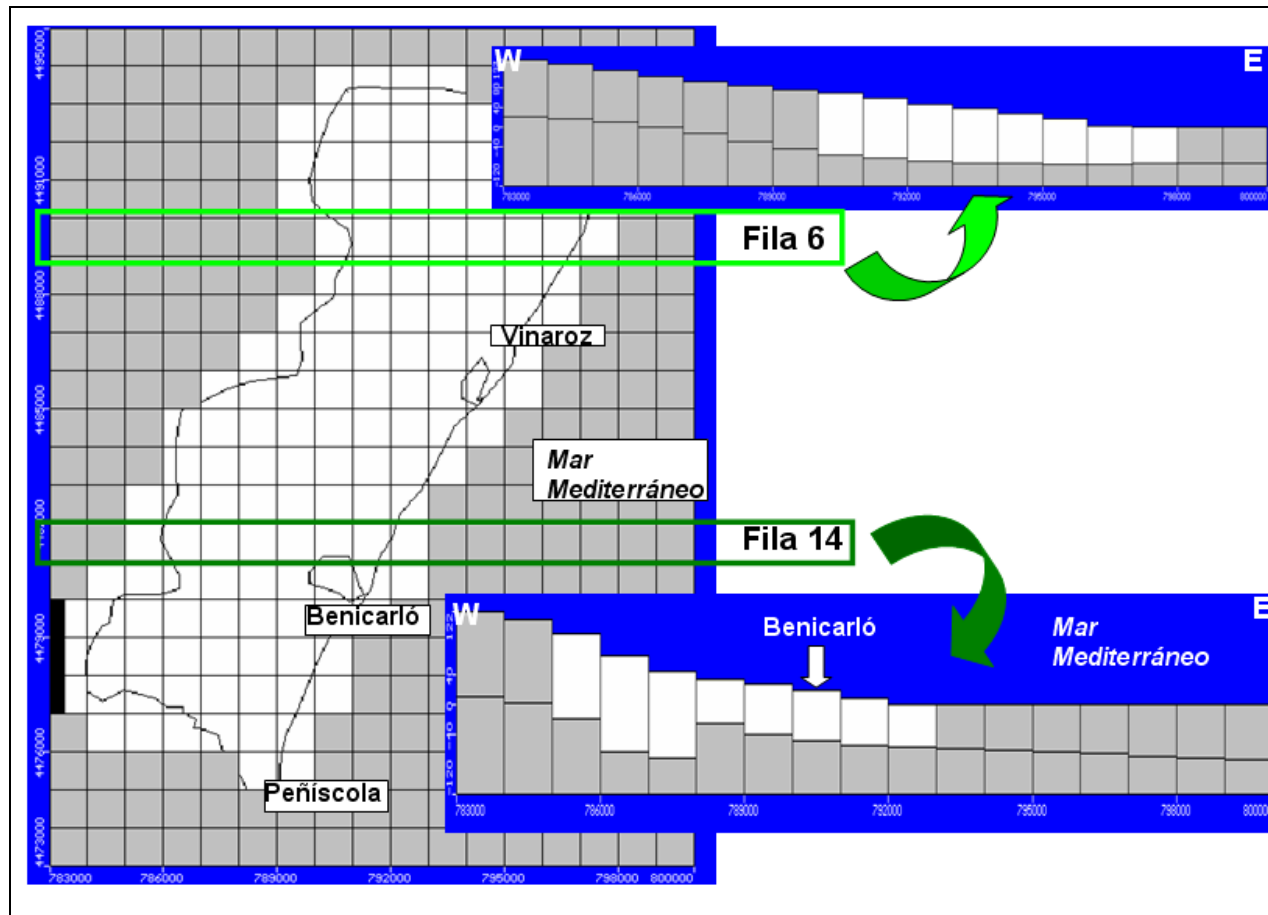


Figura 28. Geometría del acuífero de Vinaroz

7.3.2. Cálculo de las salidas

Las salidas se producen por bombeos (37 hm³/año), descarga al mar (7 hm³/año), y alimentación diferida al acuífero inferior (4 hm³/año) (IGME, 2000).

Para la CHJ (2007), las salidas tienen lugar al mar y zonas húmedas (40 hm³/año) y bombeos (40,49 hm³/año), de los que 7,27 son para uso urbano, 29,55 para usos agrícola y 3,67 para usos industriales.

7.3.3. Balance

En la tabla 27 se sintetizan y comparan los balances hídricos. En el del IGME (2000) se han sumado los balances parciales de los dos acuíferos superpuestos, aunque no se incluyen las salidas subterráneas al mar del acuífero inferior ni los bombeos en dicho acuífero.

Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)		
	IGME, 2000	CHJ, 2007		IGME, 2000	CHJ, 2007
Infiltración de lluvia	15,5	8,10	Bombeos	37,0	40,49
Retorno de riegos	23,5	14,78	Descarga lateral		
Alimentación lateral	40,0	53,60	Salidas al mar	7,0?	40,00
Percolación	4,0		Alimentación		
Total	83,0	76,48	Total		80,49

Tabla 27. Balances hídricos de la Plana de Vinaroz

7.4. Establecimiento del modelo matemático

7.4.1. Diseño de la malla

La extensión de la Plana de Vinaroz es de 148 Km². El mallado del área está formado por 17 columnas y 22 filas de celdillas cuadradas de 1000 metros de lado. (figura 29).

7.4.2. Conductividad hidráulica

Inicialmente se introdujeron valores de conductividad hidráulica medias de 8 m/día en las zonas internas y 25 m/día en la franja costera (CHJ, 1976). Como resultado del proceso de calibración, estos valores se han modificado, según se refleja en la figura 30.

Se considera que el modelo es isótropo y por tanto K_x y K_y son iguales; en cambio el valor de K_z se puede estimar como una décima parte de K_x , aunque en este caso al tratarse de un modelo de una capa no influye en el resultado final.

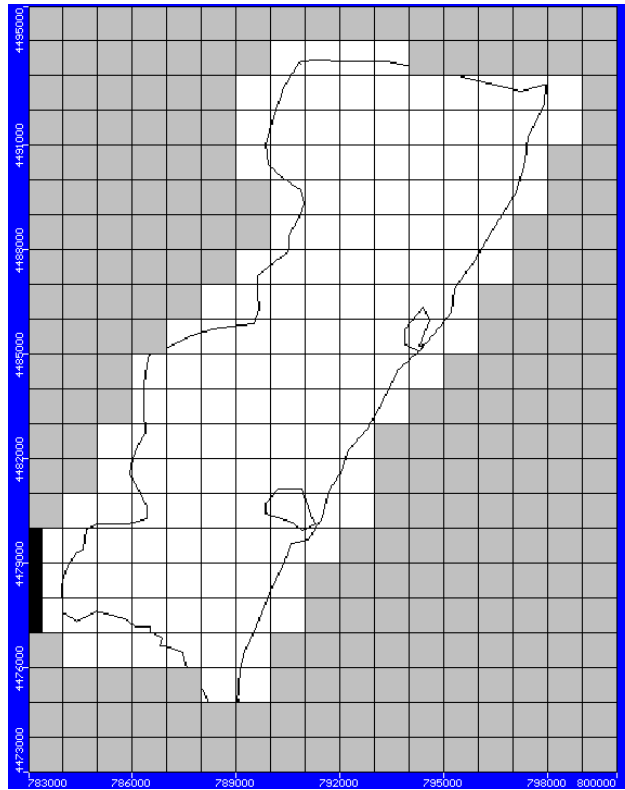


Figura 29. Mallado del modelo de la Plana de Vinaroz (1000 m. x 1000 m.)

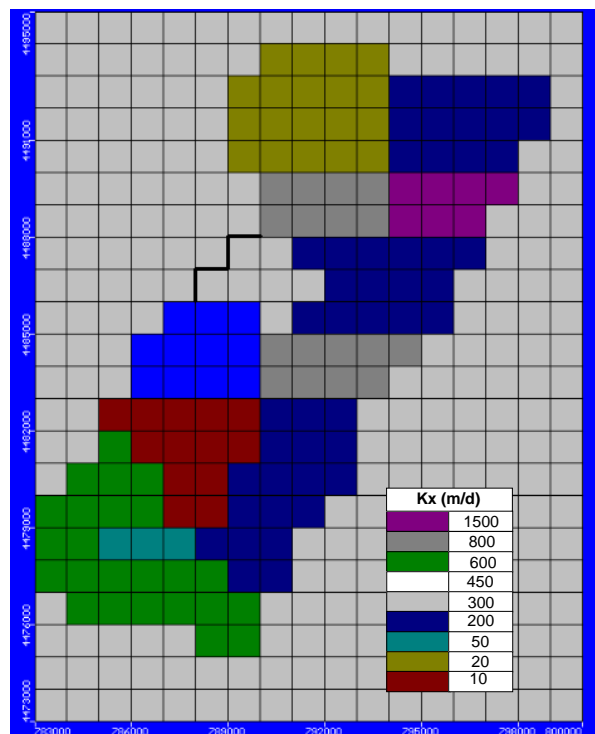


Figura 30. Valores de conductividades hidráulica en la Plana de Vinaroz

7.4.3. Almacenamiento

El rendimiento específico (Sy) de este acuífero libre se estima que pueda ser del orden de 0,1. De todas formas, como la modelación se limitará al régimen permanente de flujo, el almacenamiento no afectará a los resultados.

7.4.4. Condiciones de contorno

En la línea de costa se ha establecido un potencial constante de 0 m.s.n.m. En el borde interno se ha simulado también potencial constante, que varía entre 3 y 14 m.s.n.m según los sectores.

7.4.5. Recarga

La precipitación utilizada para el cálculo de la recarga es de 391.6 mm./año, que corresponde a la estación meteorológica de Tarragona, la más próxima al área de estudio. El valor es la media anual del periodo 1995 - 2001:

Se considera que la tasa de infiltración es del 14% (Tuñón, 2000)

$$391.6 * 0.14 = 54.8 \text{ mm./año}$$

La recarga por infiltración de retorno de riego se ha calculado a partir de los datos de superficie de riego y de bombeos para satisfacer las demandas agrícolas.

La superficie de riego en el área de estudio es de 9005 has (IVE, 2006), de las que 1166 has (12,95%) corresponden al término municipal de Peñíscola, 2227 has (24,73%) al de Benicarló y las 5612 has restantes (62,32%) al de Vinaroz. Los bombeos realizados para atender las demandas totalizan 46 hm³/año (CHJ, 2009), de los que 5,96 hm³/año corresponden al término de Peñíscola, 11,38 hm³/año al de Benicarló y 28,67 al de Vinaroz.

En la tabla 28 se sintetizan los datos de recarga por retorno de riego.

Término	Sup. Riego (has)	Bombeos (hm ³ /año)	Nº celdillas	Dotación (m ³ /h/a)	Retorno (mm.)
Vinaroz	5612	28,67	56	5108,7	40,9
Benicarló	2227	11,38	22	5110	40,9
Peñíscola	1166	5,96	11	511,5	40,9

Tabla 28. Datos de recarga y retorno de riego

La recarga total es la suma de la infiltración de agua e lluvia y de los retornos de riego.

$$\text{Infiltración total} = P + R_R = 54.8 + 40.9 = 95.7 \text{ mm./año}$$

En la figura 31 se indican las zonas de recarga: en color blanco las celdillas con recarga por infiltración de lluvia y por retorno de riego, y en color verde las celdillas con recarga nula.

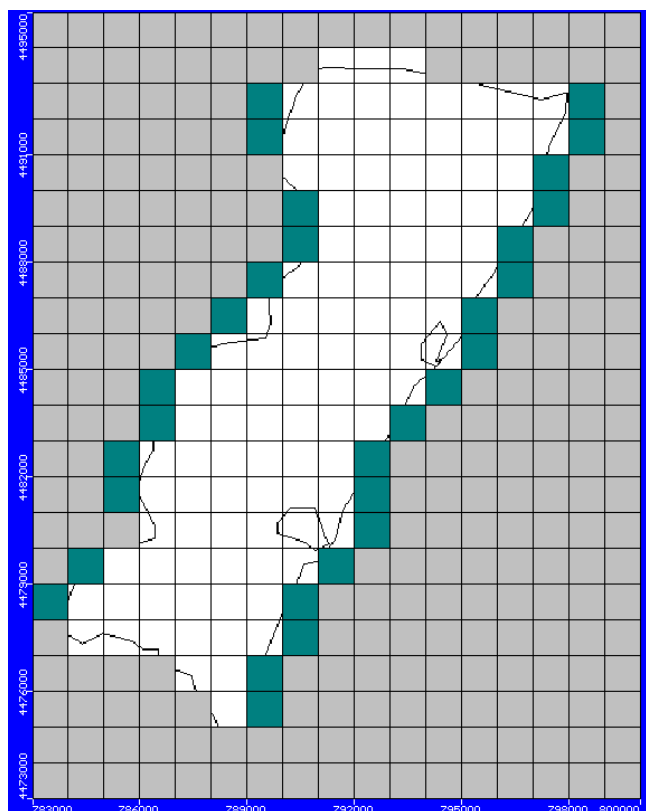


Figura 31. Zonas de recarga del modelo.

7.4.6. Pozos

Pozos de extracción

Los bombeos totales en la Plana de Vinaroz se sintetizan en la tabla 29.

Término	Agrícola (hm ³ /año)	Urbano (hm ³ /año)	Total
Peñíscola	5,96	2,54	8,50
Benicarló	11,38	3,05	14,43
Vinaroz	28,67	3,73	32,40
Total	46,00	9,32	55,33

Tabla 29. Bombeos en la Plana de Vinaroz (Fuente: CHJ, 2009; DIPCAS, 2005)

En la figura 32 se muestra la situación de los bombeos.

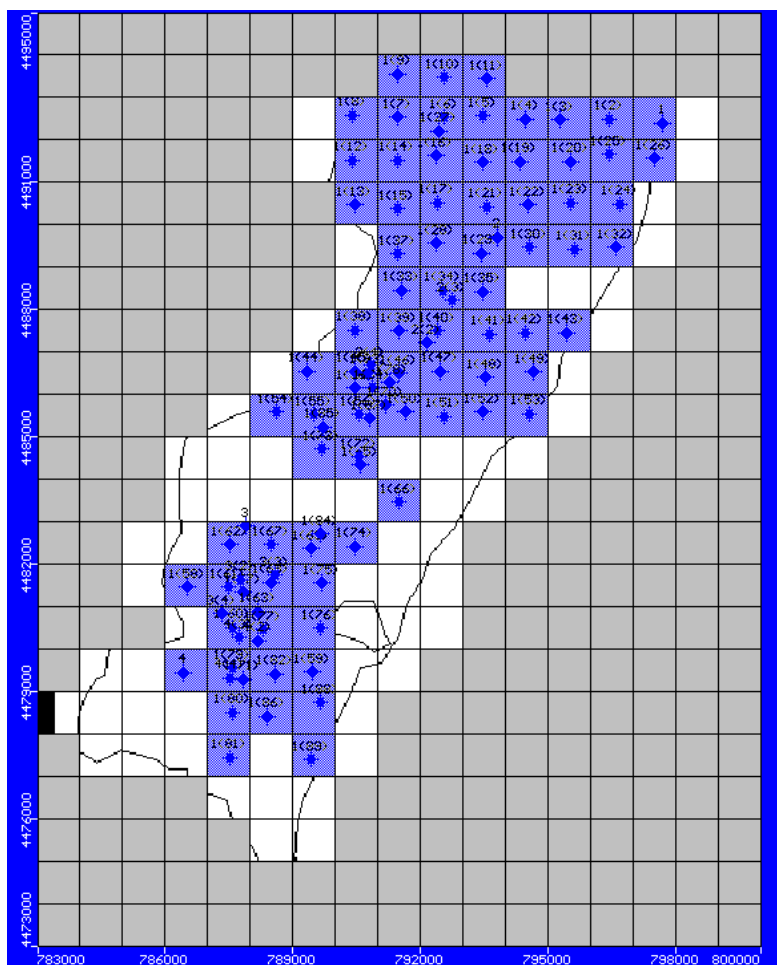


Figura 32. Bombeos en Plana de Vinaroz

Pozos de observación

Los pozos de observación se han seleccionado de la red piezométrica. Los datos piezométricos que se han considerado corresponden a la media de las medidas realizadas en el periodo 1995-2001, que se considera en primera aproximación un periodo de cierta estabilidad piezométrica. En la tabla 30 se indican las coordenadas de los piezómetros y en la figura 33 su situación.

Punto	UTM		Piezometría medias(m)
	X	Y	
8	791778	4489429	2,95
9	790921	4483390	0,96
10	786967	4478257	4,67
11	787838	4480929	-0,53
14	792784	4483439	-0,66
15	794221	4486006	0,06
16	794923	4488366	1,52

17	791900	4484732	0,81
18	790739	4486226	-1,06
19	788883	4483296	4,65
22	791345	4481071	1,04
23	787846	4479526	0,24
28	795539	4491879	0,49
29	795149	4490172	0,16
31	793940	4491314	0,53

Tabla 30. Puntos de control piezométrico

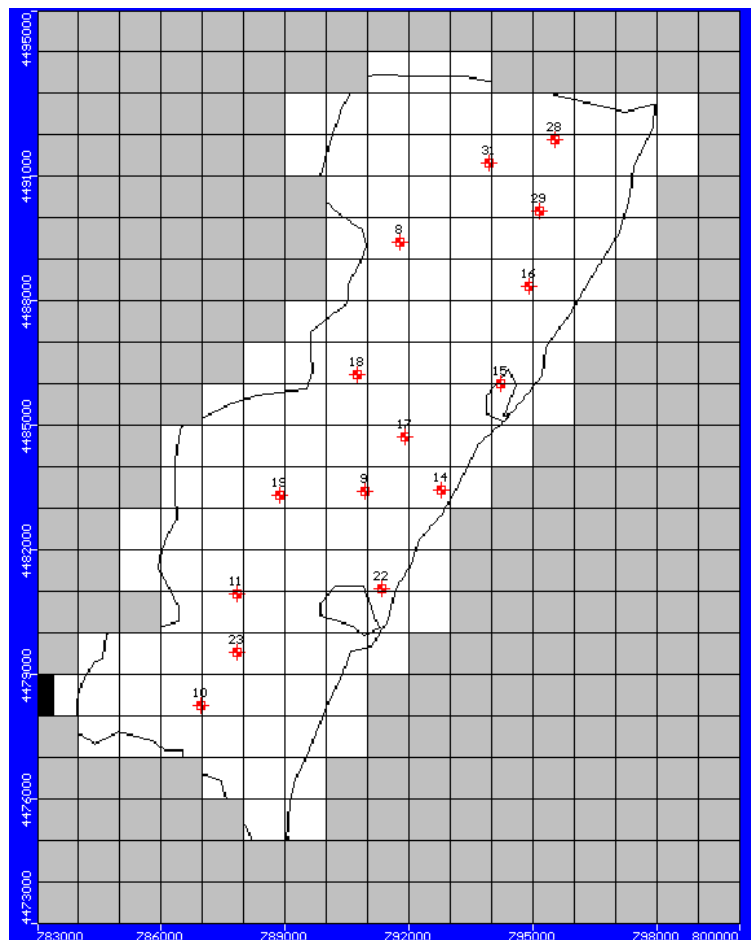


Figura 33. Situación de los puntos de control piezométrico

7.4.7. Calibración del modelo

Para calibrar el modelo se han modificado los valores de conductividad hidráulica, el potencial constante de los límites interiores y parcialmente los bombeos.

En la figura 34 se muestra el ajuste conseguido entre los niveles piezométricos introducidos y los calculados por el programa. Las desviaciones existentes se consideran aceptables para considerar el modelo calibrado.

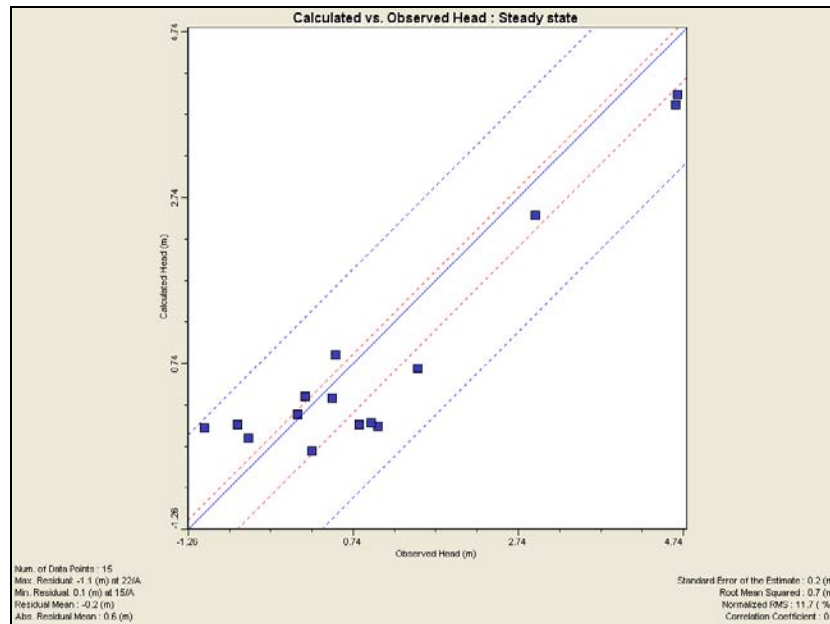


Figura 34. Datos calculados vs. datos observado en la Plana de Vinaroz

En la tabla 31 se muestran las diferencias entre los datos calculados y observados.

Punto de Observación	UTM X	UTM Y	Observado	Calculado	Calc.- Obs.
8	791778	4489429	2,95	2,52	-0,42
9	790921	4483390	0,96	0,03	-0,93
10	786967	4478257	4,67	3,98	-0,69
11	787838	4480929	-0,53	-0,16	0,37
14	792784	4483439	-0,66	0,00	0,66
15	794221	4486006	0,06	0,13	0,07
16	794923	4488366	1,52	0,68	-0,84
17	791900	4484732	0,81	-0,00	-0,81
18	790739	4486226	-1,06	-0,04	1,02
19	788883	4483296	4,65	3,86	-0,79
22	791345	4481071	1,04	-0,01	-1,05
23	787846	4479526	0,24	-0,31	-0,55
28	795539	4491879	0,49	0,32	-0,17
29	795149	4490172	0,16	0,35	0,19
31	793940	4491314	0,53	0,85	0,32

Tabla 31. Diferencias entre los datos calculados y observados

7.5. Resultados obtenidos

7.5.1. Piezometría

En el resultado final de la ejecución del modelo en régimen estacionario se observa en el mapa piezométrico de la figura 35.

En la Zona Norte, que prácticamente abarca todo el término municipal de Vinaroz y el norte del término municipal de Benicarló, el flujo preferente va desde el interior hacia la costa aunque existe un cono de depresión del nivel piezométrico en el sur de esta zona, al oeste de Vinaroz.

En la Zona Sur, que incluye el término municipal de Peñíscola y el resto del de Benicarló (centro y sur del término municipal), el flujo preferencial va de oeste a este, pero en el centro existe una depresión del nivel piezométrico que fuerza inversión de flujo. Es una depresión importante tanto en profundidad como en superficie afectada, de aproximadamente unos 9 km².

7.5.2. Balance hídrico calculado

El balance hídrico del acuífero se sintetiza en la tabla 32.

ENTRADAS	Hm³/año	SALIDAS	Hm³/año
Intrusión	1,0	Salidas al Mar	6,5
Infiltración	10,3	Bombeos	55,3
Entradas laterales	53,6	Transf. laterales	3,1
Total	64,9	Total	64,9

Tabla 32. Balance hídrico calculado

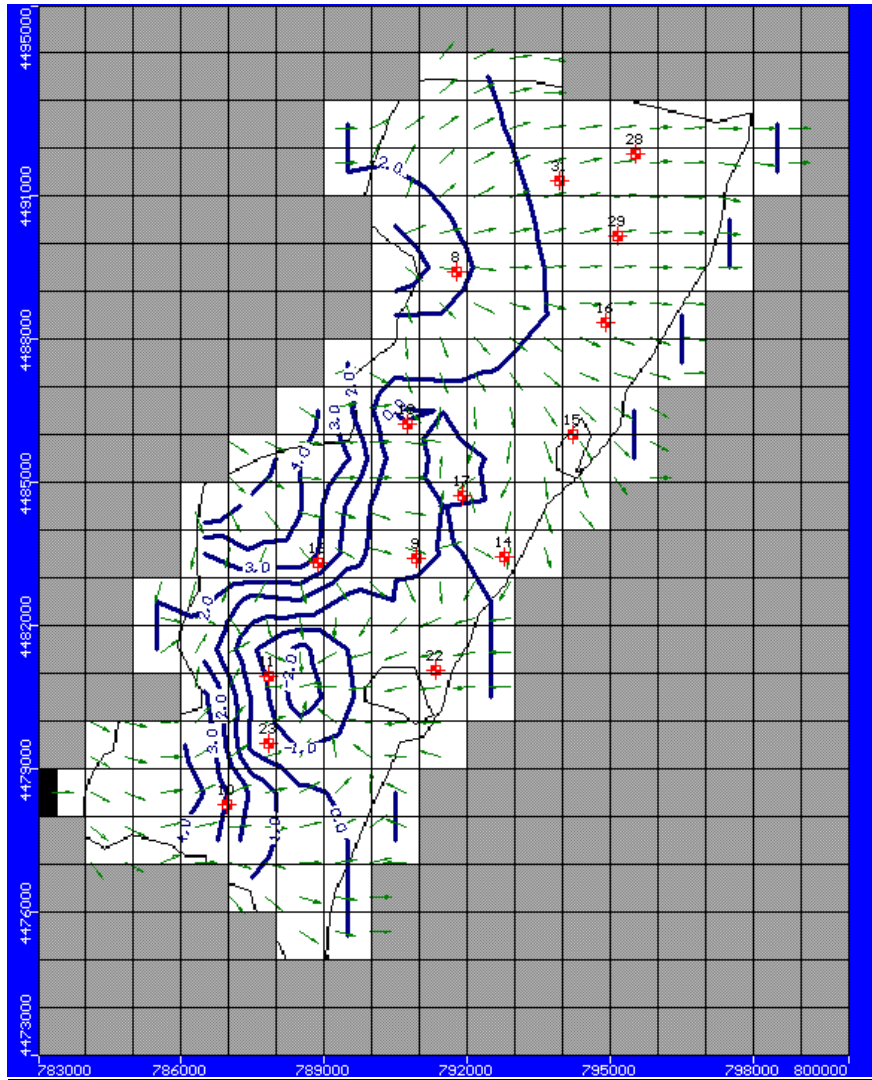


Figura 35. Simulación del modelo en régimen estacionario en la Plana de Vinaroz

7.6. Discriminación espacial de los volúmenes ambientales

El proceso de intrusión marina es de diferente intensidad según el sector del acuífero que se considere. Esto significa que el volumen ambiental de descarga al mar no tiene porqué repartirse de manera espacialmente homogénea, sino que debe ser focalizado en los sectores en que la intrusión progresa en mayor medida.

Con objeto de discriminar estas diferencias se ha dividido el acuífero en dos sectores: sector norte y sector sur (figura 36). La división entre las zonas es aproximadamente paralela al flujo subterráneo natural del acuífero.

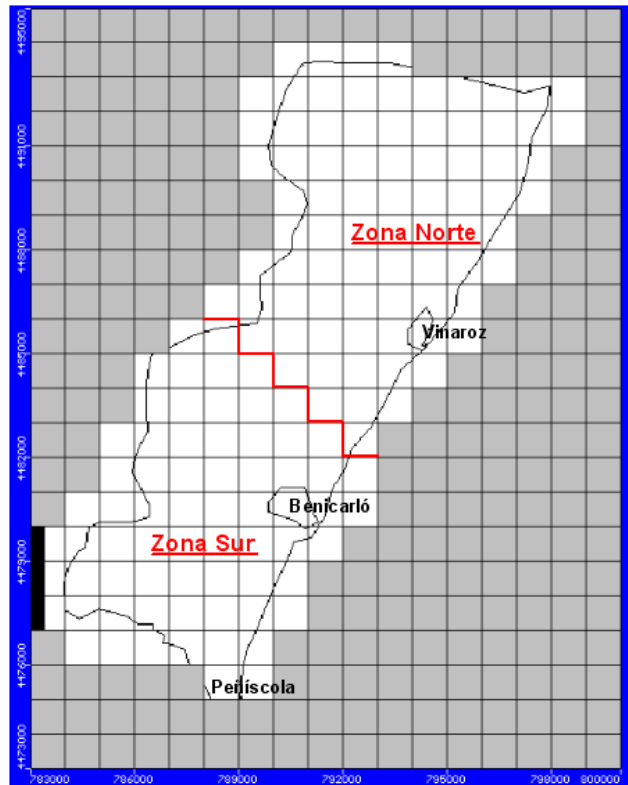


Figura 36. Sectorización de la Plana de Vinaroz

En la tabla 33 se muestran los balances calculados para las zonas norte y sur. La intrusión marina afecta esencialmente a la zona sur, en la que la intrusión marina es del orden de 1 hm³/año. En la zona norte las salidas al mar son 5,6 hm³/año mientras que en la zona sur apenas alcanza 1 hm³/año.

Si se admite, como se ha presumido, que el periodo simulado corresponde a un periodo de estabilidad hidrodinámica, se podría concluir que el caudal ambiental sería del orden de 7 hm³/año. Sin embargo, persiste el proceso de intrusión y probablemente la regeneración del acuífero requiera un mayor caudal ambiental. Para su estimación se han simulado escenarios plausibles cuyos resultados se exponen a continuación.

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	0,1	Salidas al mar	5,6
	Entradas laterales	33,2	Bombeos	36,4
	Infiltración	5,8	Transferencias internas	0,9
	Transferencias internas	5,3	Transferencias externas	1,5
Sector sur	Intrusión marina	0,9	Salidas al mar	0,9
	Entradas laterales	20,4	Bombeos	19,2
	Infiltración	4,5	Transferencias internas	5,3
	Transferencias internas	0,9	Transferencias externas	2,2

Tabla 33. Balance hídrico por sectores

7.7. Escenarios de actuación en la Plana de Vinaroz

7.7.1. Objetivos

De acuerdo a lo expuesto en el epígrafe anterior, se han simulado distintos escenarios en los que se modifican los bombeos actuales para estimar su repercusión en el balance hídrico general y, específicamente, en la relación existente entre las salidas al mar y la intrusión en cada sector.

Los escenarios que se han tenido en cuenta han sido los siguientes:

- Escenario 0. Corresponde a la situación de partida
- Escenario 1. Reducción del 20% de los bombeos
- Escenario 2. Reducción del 40% de los bombeos

Los escenarios 1 y 2, en los que se disminuyen los bombeos el 20 y el 40% respectivamente, tienen por objeto aproximarse a la situación de explotación en la que las salidas subterráneas al mar sean suficientes para anular el proceso de intrusión y, en su caso, hacer retroceder el frente salino actual. La disminución de los bombeos no se acompaña de la reducción equivalente de los retornos de riego ya que no se contemplan cambios en el uso del suelo. Se supone, en todo caso, que la demanda agrícola que quedaría en precario con esta reducción se satisfaría con recursos de otra procedencia, como podría ser la reutilización de agua regenerada, que actualmente es nula, o la importación de recursos externos.

7.7.2. Escenario 0: situación de partida

Este escenario corresponde al calculado en el modelo. La situación piezométrica es la reflejada en la figura 37, con una notable depresión piezométrica al oeste de la población de Benicarló.

La tabla 22 sintetiza el balance general, la tabla 23 los balances sectoriales y la tabla 24 las transferencias internas entre los sectores diferenciados.

ENTRADAS		Hm ³ /año	SALIDAS		Hm ³ /año
Intrusión		1,0	Salidas al Mar		6,5
Infiltración		10,3	Bombeos		55,3
Entradas laterales		53,6	Transf. externas		3,1
Total		64,9	Total		64,9

Tabla 34. Balance general del acuífero de Vinaroz (escenario 0)

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	0,1	Salidas al mar	5,6
	Entradas laterales	33,2	Bombeos	36,4
	Infiltración	5,8		
Sector sur	Intrusión marina	0,9	Salidas al mar	0,9
	Entradas laterales	20,4	Bombeos	19,2
	Infiltración	4,5		

Tabla 35. Balance sectorial del acuífero de Vinaroz (escenario 0)

Transferencias internas (hm ³ /año)	
Norte a Sur	0,9
Sur a Norte	5,3

Tabla 36. Transferencias de caudales entre sectores (escenario 0)

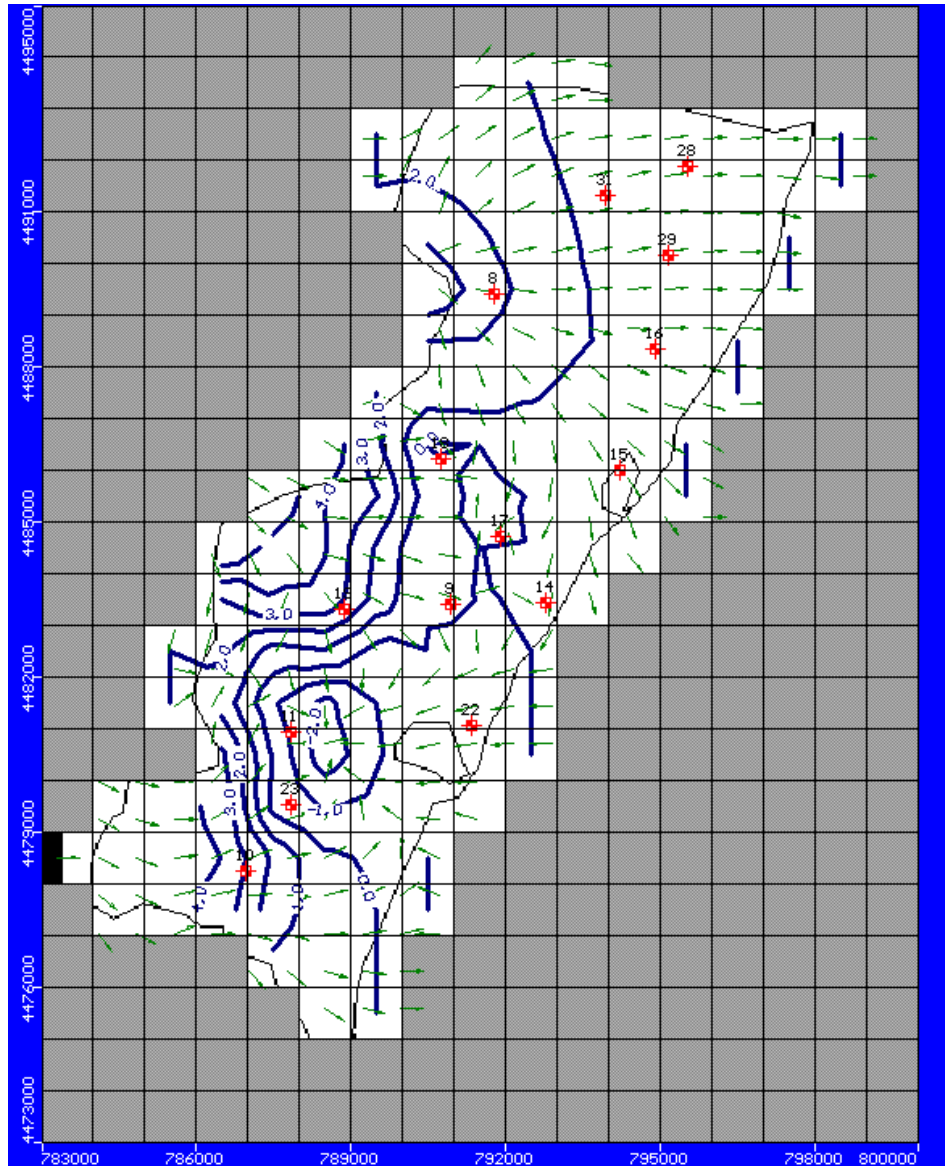


Figura 37. Mapa piezométrico de partida (escenario 0)

7.7.3. Escenario 1: Reducción del 20% de los bombeos

En la figura 38 se muestra el resultado obtenido al reducir el 20% de los bombeos en todo el acuífero. La depresión piezométrica de Benicarló persiste pero es de menor intensidad y la depresión de Vinaroz desaparece completamente.

La tabla 37 sintetiza el balance general, la tabla 38 los balances sectoriales y la tabla 39 las transferencias internas entre los sectores diferenciados.

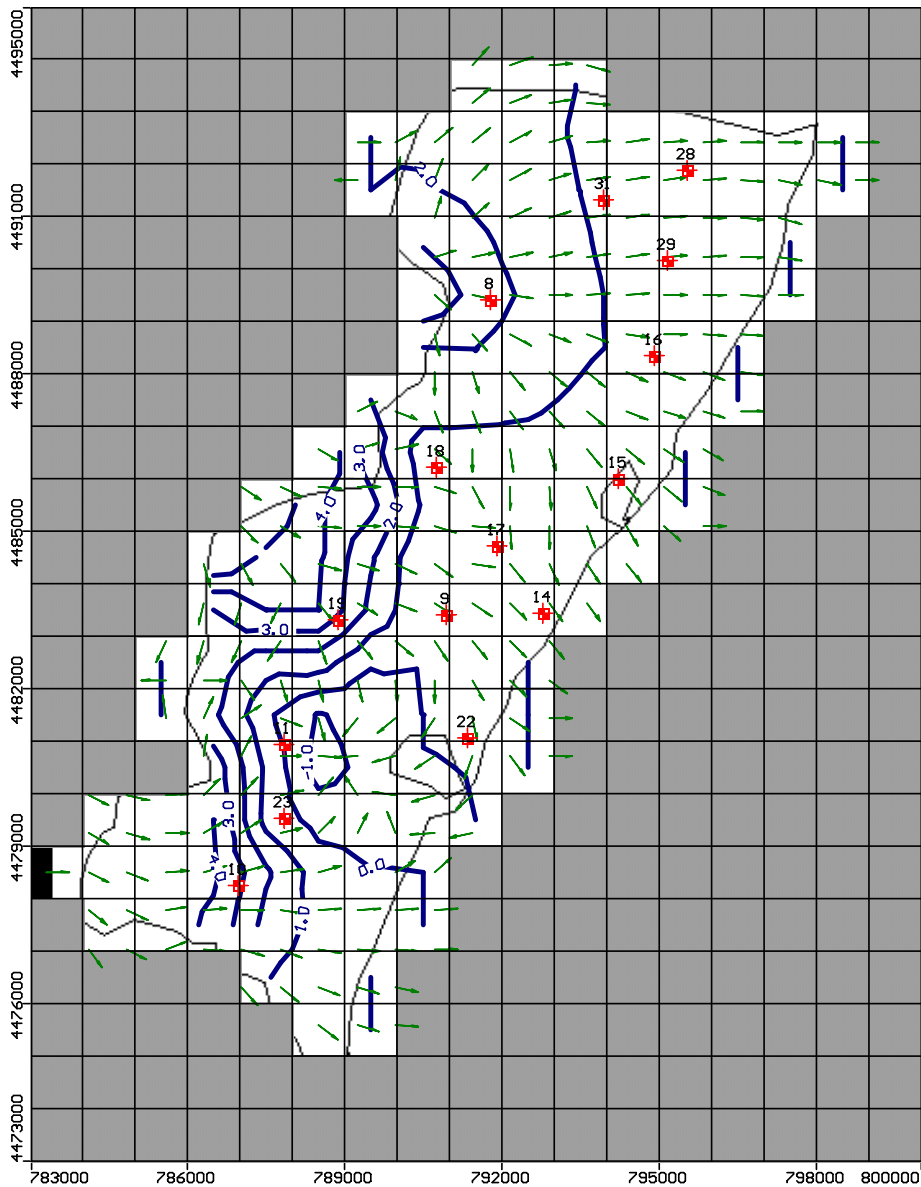


Figura 38. Mapa piezométrico de Vinaroz (escenario 1)

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Intrusión	0,05	Salidas al mar	11,0
Entradas laterales	46,9	Bombeos	43,8
Infiltración	10,3	Transf. externas	2,5
Total	57,2	Total	57,2

Tabla 37. Balance general del acuífero de Vinaroz (escenario 1)

Prácticamente la intrusión desaparece (0,05 hm³/año) aunque se mantienen niveles por debajo del nivel del mar.

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	9,3
	Entradas laterales	29,3	Bombeos	29,1
	Infiltración	5,8		
Sector sur	Intrusión marina	0,05	Salidas al mar	1,7
	Entradas laterales	17,6	Bombeos	14,7
	Infiltración	4,5		

Tabla 38. Balance sectorial del acuífero de Vinaroz (escenario 1)

Transferencias internas (hm ³ /año)	
Norte a Sur	1,1
Sur a Norte	5,4

Tabla 39. Transferencias de caudales entre sectores (escenario 1)

7.7.4. Escenario 2: reducción del 40% de los bombeos

En este escenario se reducen los bombeos en un 40%. En la figura 39 se muestra el mapa piezométrico obtenido. La depresión piezométrica prácticamente desaparece y se restablece el flujo hacia la costa.

La tabla 40 sintetiza el balance general, la tabla 41 los balances sectoriales y la tabla 42 las transferencias internas entre los sectores diferenciados. Las salidas al mar totalizan 16,2 hm³/año y la intrusión no existe.

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Intrusión	0,0	Salidas al mar	16,2
Entradas laterales	43,3	Bombeos	33,2
Infiltración	10,3	Transf. externas	4,2
Total	53,6	Total	53,6

Tabla 40. Balance general del acuífero de Vinaroz (escenario 2)

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	13,1
	Entradas laterales	27,4	Bombeos	21,9
	Infiltración	5,8		
Sector sur	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	3,1
	Entradas laterales	15,9	Bombeos	11,3
	Infiltración	4,5		

Tabla 41. Balance sectorial del acuífero de Vinaroz (escenario 2)

Transferencias internas (hm ³ /año)	
Norte a Sur	1,6
Sur a Norte	5,7

Tabla 42. Transferencias de caudales entre sectores (escenario 2)

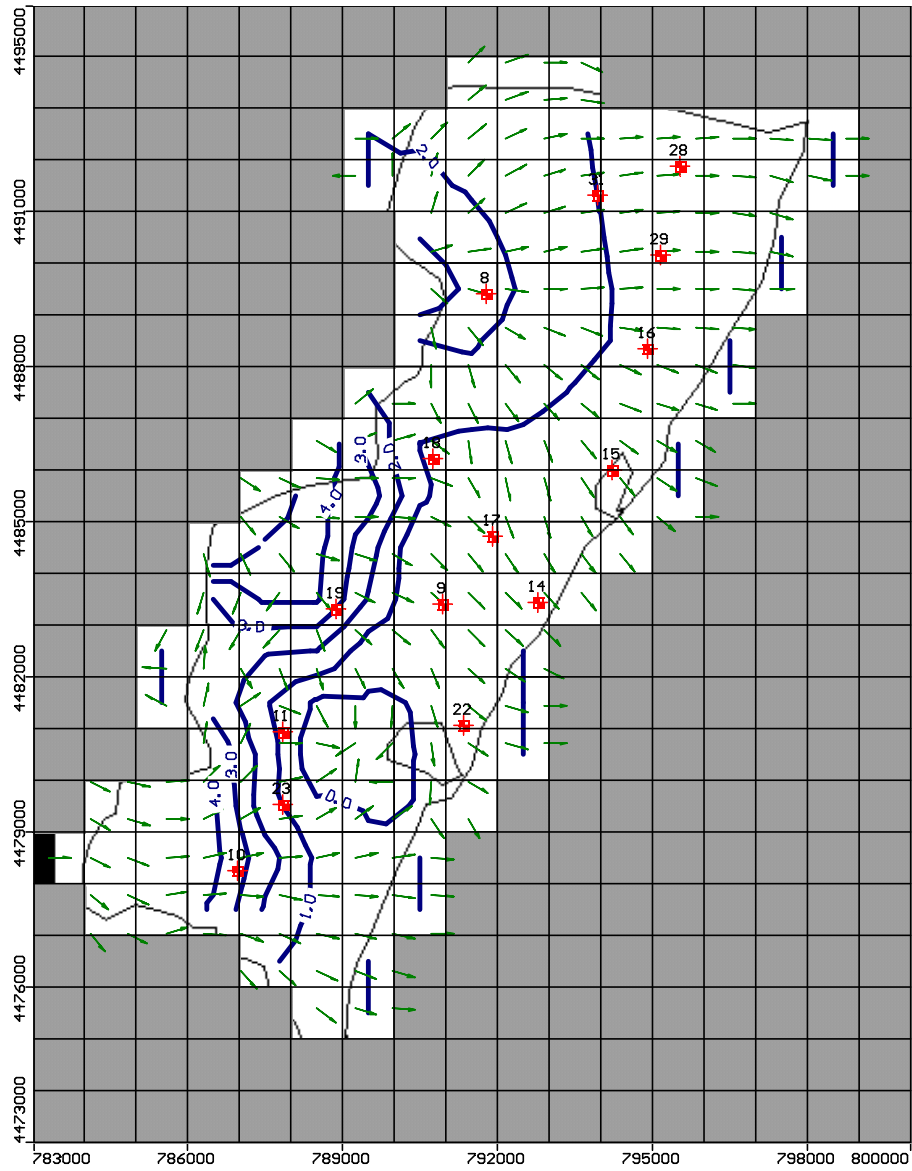


Figura 39. Mapa piezométrico de Vinaroz (escenario 2)

7.7.5. Resumen de los escenarios simulados en la Plana de Vinaroz

Además de la situación de partida (escenario 0), se han simulado dos escenarios que corresponden, respectivamente, a la reducción de bombeos del 20% (escenario 1) y del 40% (escenario 2).

En la tabla 43 se comparan los balances globales de los tres escenarios. La reducción de los bombeos incrementa las salidas subterráneas al mar de 6,5 a 16,2 hm³/año y, a su vez, se reduce el volumen de intrusión de mar hasta anularse completamente. En las tablas 44 y 45 se muestran, respectivamente, los resultados obtenidos en cada uno de los dos sectores diferenciados.

		Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2
Entradas	Intrusión	1,0	0,05	0,0
	Entradas laterales	53,6	46,9	43,3
	Recarga	10,3	10,3	10,3
Salidas	Salidas mar	6,5	11,0	16,2
	Bombeos	55,3	43,8	33,2

Tabla 43. Variaciones del balance en la Plana de Vinaroz a consecuencia de la modificación de los bombeos

		Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2
Entradas	Intrusión	0,1	0,0	0,0
	Entradas laterales	33,2	29,3	27,4
	Recarga	5,8	5,8	5,8
	Transferencias int.	5,3	5,4	5,7
Salidas	Salidas mar	5,6	9,3	13,1
	Bombeos	36,4	29,1	21,9
	Transferencias int.	0,9	1,1	1,6

Tabla 44. Variaciones del balance en el sector norte de la Plana de Vinaroz a consecuencia de la modificación de los bombeos

		Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2
Entradas	Intrusión	0,9	0,05	0,0
	Entradas laterales	20,4	17,6	15,9
	Recarga	4,5	4,5	4,5
	Transferencias int.	0,9	1,1	1,6
Salidas	Salidas mar	0,9	1,7	3,1
	Bombeos	19,2	14,7	11,3
	Transferencias int.	5,3	5,4	5,7

Tabla 45. Variaciones del balance en el sector sur de la Plana de Vinaroz a consecuencia de la modificación de los bombeos

7.8. CONCLUSIONES

El volumen ambiental de descarga al mar en la Plana de Vinaroz se estima en 40 hm³/año (CHJ, 2007).

Los resultados del modelo indican que en una situación estacionaria, como la que se ha simulado, las salidas subterráneas al mar son de 6,5 hm³/año, lo que permite unas entradas de agua de mar cifradas en 1 hm³/año. En esta situación se asume que el proceso de intrusión es estable.

Con objeto de incrementar las salidas al mar, y de esa manera propiciar el retroceso del frente salino, se han simulado escenarios en los que los bombeos se reducen el 20% y 40%, respectivamente. La reducción del 20% propicia unas salidas al mar de 11 hm³/año pero persiste el ingreso de agua marina, si bien en un volumen muy reducido. Cuando la reducción de los bombeos es del 40%, las salidas al mar alcanzan 16,2 hm³/año, no existe intrusión y desaparecen los niveles piezométricos bajo el nivel del mar.

A falta de estudios más detallados, se puede asumir que en esa situación se produzca retroceso del frente salino, por lo que se establece que el volumen ambiental, es decir, la descarga subterránea al mar, de la Plana de Vinaroz debe ser del orden de 16 hm³/año, considerablemente inferior a la calculada por la Confederación Hidrográfica del Júcar.

Conviene recordar que, si no cambia el escenario socio-económico del área, sería necesario proveer recursos hídricos del orden de 22 hm³/año para compensar la reducción de los bombeos.

8. MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANA DE CASTELLÓN

8.1. Modelo hidrogeológico conceptual

Son diversos los trabajos consultados sobre las características hidrogeológicas de la Plana de Castellón (SGOP, 1977, 1982, 1986a, 1986b; IGME, 2000).

La formación acuífera está constituida por un conjunto de sedimentos terciarios y cuaternarios. Los materiales cuaternarios corresponden a paquetes de gravas, arenas y conglomerados embutidos en una matriz eminentemente limo-arcillosa. Este conjunto, de origen continental (mantos de arroyada, abanicos aluviales, terrazas, etc.), marino (cordón litoral) y mixto (limos de albuferas y marismas, limos pardos y dunas litorales) descansa indistintamente según las zonas sobre materiales mesozoicos, los cuales constituyen un segundo acuífero, o sobre sedimentos terciarios miocenos. Estos últimos están integrados por areniscas y arcillas o margas, con cambios laterales de facies a conglomerados poligénicos, y con calizas margosas a techo, considerándose los paquetes permeables como parte integrante del acuífero de la Plana de Castellón, junto con la formación cuaternaria (figura 40).

La heterogeneidad en la composición y distribución espacial de los materiales constituyentes del acuífero, con frecuentes cambios laterales de facies, hace difícil establecer una continuidad de estratos.

Los límites hidrogeológicos del acuífero miocuaternalio están definidos por los afloramientos de los materiales mesozoicos y el mar Mediterráneo. El límite oriental es abierto, permitiendo la conexión hidráulica con el mar. Al norte limita con las calizas cretácicas del sistema Javalambre - Maestrazgo con las que existe igualmente conexión hidráulica. El límite occidental es abierto en su mayor parte por el contacto con calizas y dolomías del Muschelkalk y Jurásico, y con areniscas del Buntsandstein, con algún tramo cerrado por afloramiento de materiales impermeables del Triásico superior e inferior. El límite meridional es igualmente abierto, tratándose de un límite convencional con los materiales detríticos del acuífero de la Plana de Sagunto.

El espesor de los sedimentos miocuaternalios aumenta en general de oeste a este superando los 250 metros, aunque disminuye de nuevo en las proximidades de la costa. El flujo subterráneo transcurre en general desde el interior hacia el mar, aunque en algunos sectores se invierte el sentido debido a la intensa explotación de los recursos. La alimentación del acuífero procede en su mayor parte de la transferencia lateral de los sistemas acuíferos de borde, y en menor medida de la infiltración por retorno de riego, del río Mijares y del agua de lluvia.

En cuanto a los parámetros hidrogeológicos característicos del acuífero se ha observado que las captaciones existentes en la Plana presentan caudales específicos entre 1 y 20 l/s/m, las transmisividades están comprendidas entre 500 y 6000 m²/día, el coeficiente de almacenamiento varía entre 5 y 15% y la permeabilidad entre 30 y 120 m./día.

MAPA GEOLÓGICO DE LA PLANA DE CASTELLÓN (Comunidad Valenciana)

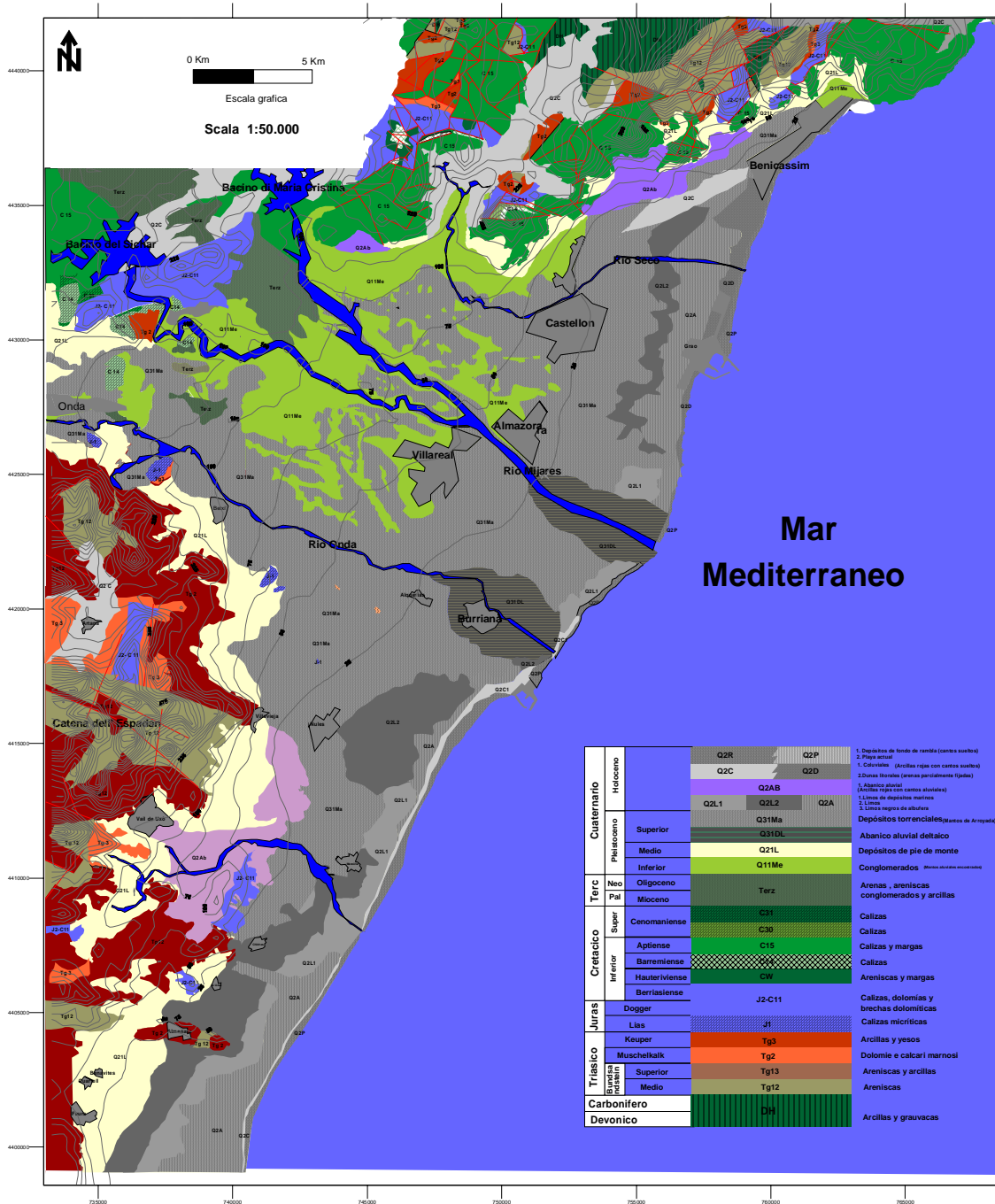


Figura 40. Mapa geológico de la Plana de Castellón

8.2. Geometría del acuífero

La figura 41 muestra el contorno de la Plana de Castellón y la situación de los núcleos urbanos más importantes: Benicàssim, Castellón, Onda, Almassora, Villarreal, Burriana, Nules, Moncofar, Xilxes y Almenara.

La topografía del acuífero se ha elaborado a partir de la cartografía 1:10.000 del Instituto Cartográfico Valenciano (figura 42). Los datos topográficos se han tratado mediante el programa Surfer. Los archivos creados por el programa con extensión *archivo.grd*, son importados directamente al Visual Modflow

La geometría de la base del acuífero se ha construido a partir de los cortes geológicos y columnas de sondeos recogidos en diversos informes y de información propia (figura 43). Finalmente el acuífero presenta en general una geometría lenticular, con espesores que aumentan hacia la costa. En la figura 44 se puede observar la geometría utilizada en el modelo.

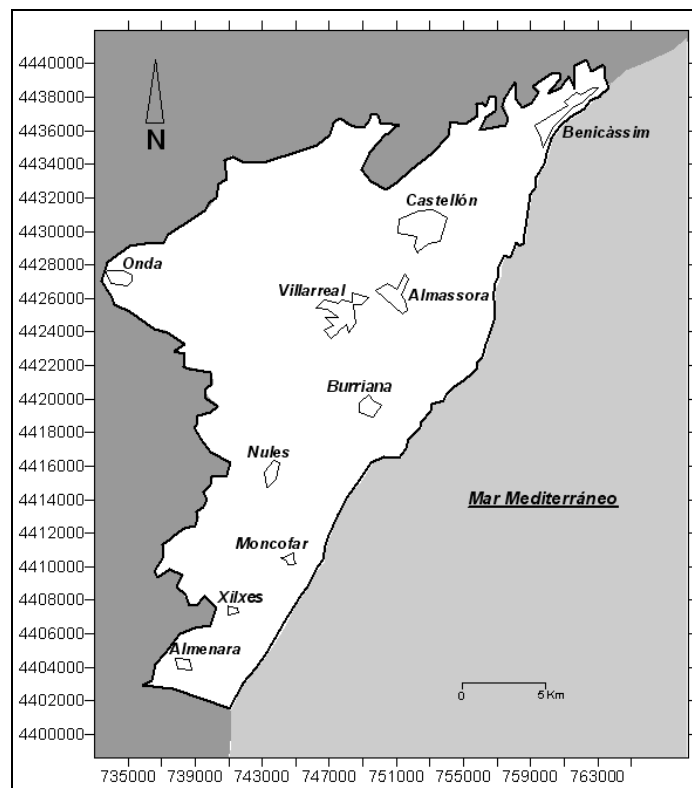


Figura 41. Mapa de la Plana de Castellón

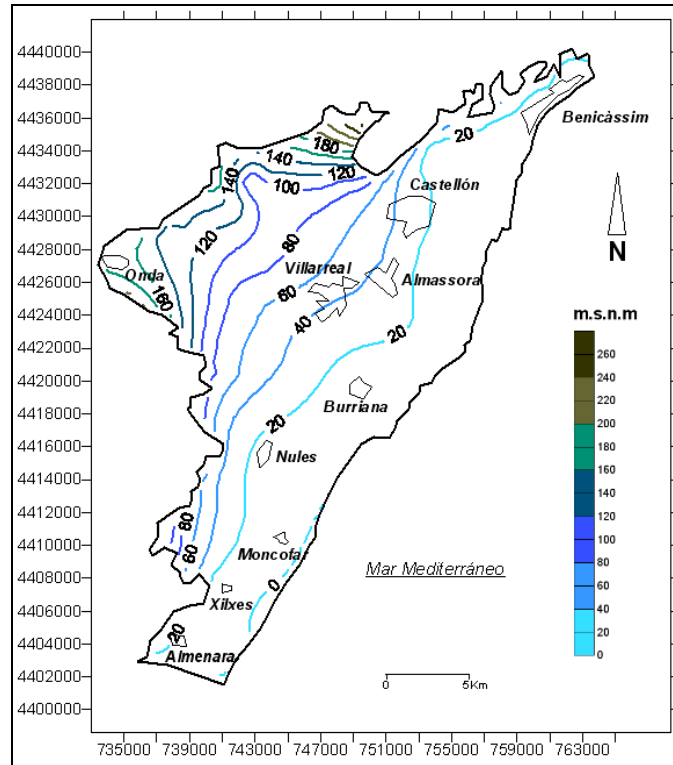


Figura 42. Topografía de la Plana de Castellón

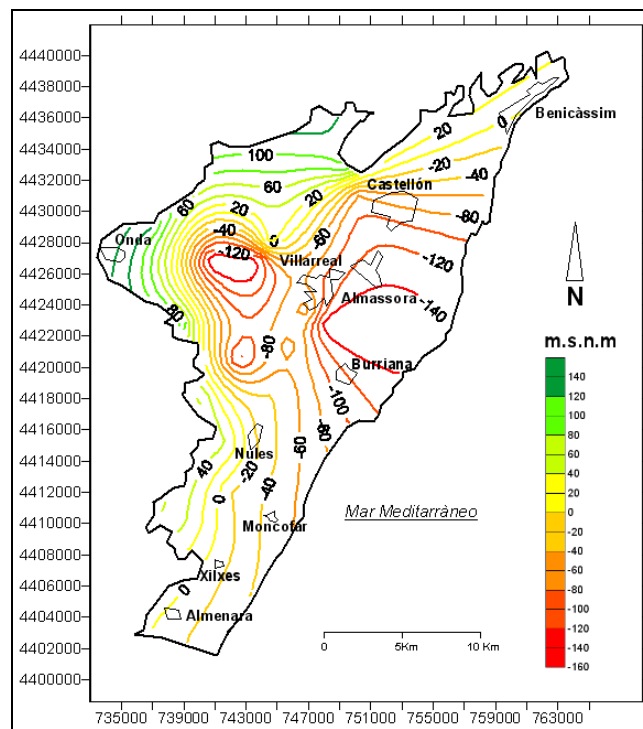


Figura 43. Muro del acuífero de la Plana de Castelló

8.3. Balance hídrico

8.3.1. Cálculos de las entradas

Según la CHJ (2007), las entradas al acuífero tiene lugar por recarga de lluvia e infiltración desde ríos (30,31 hm³/año), retorno de riegos (53,66 hm³/año) y entradas laterales subterráneas (74,86 hm³/año).

8.3.2. Cálculo de las salidas

Las salidas tienen lugar al mar y zonas húmedas (74 hm³/año) y bombeos (129,99 hm³/año), de los que 53,71 son para uso urbano, 56,39 para uso agrícola y 19,89 para usos industriales.

8.3.3. Balance

En la tabla 46 se sintetiza el balance hídrico de la CHJ (2007).

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Infiltración de lluvia	30,31	Bombeos	129,99
Retorno de riegos	53,66	Descarga lateral	0,00
Alimentación lateral	93,58	Salidas al mar	74,00
Percolación		Alimentación	
Total	177,55	Total	203,99

Tabla 46. Balance hídrico de la Plana de Castellón (CHJ, 2007)

8.4. Establecimiento del modelo matemático

8.4.1. Diseño de la malla

La extensión de la Plana de Castellón es de aproximadamente 600 Km². El mallado del área está formado por 32 columnas y 43 filas, con celdillas cuadradas de 1000 metros de lado (figura 45).

8.4.2. Conductividad hidráulica

Las conductividades hidráulicas en el área de estudio están dentro del rango de 1 m/día a 300 m/día (figura 46). El programa necesita introducir en cada celdilla K_x , K_y y K_z . Al considerar el modelo como isótropo, K_x y K_y son iguales.

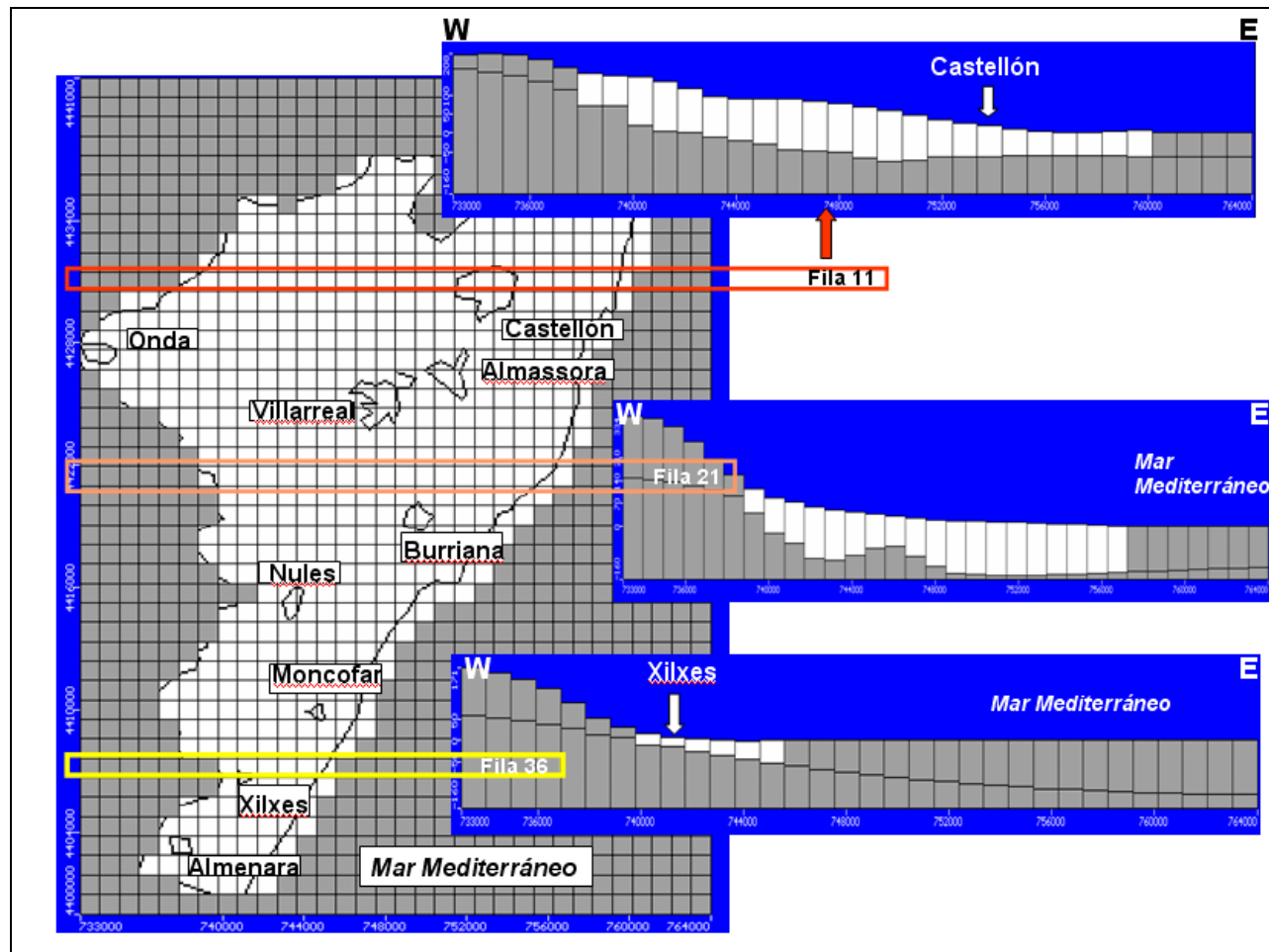


Figura 44. Geometría del acuífero de la Plana de Castelló

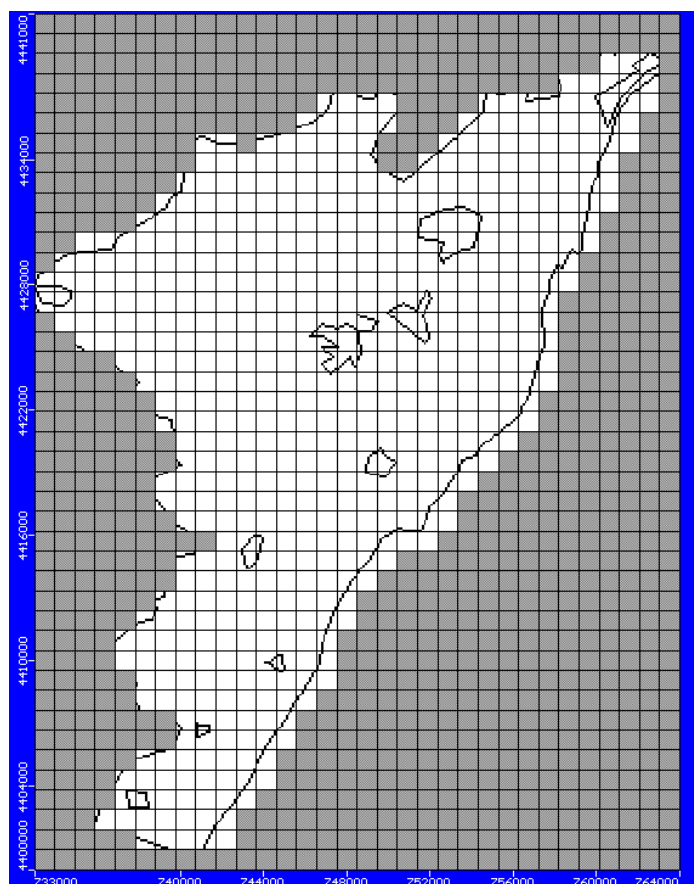


Figura 45. Mallado del modelo de la Plana de Castelló (1000 m. x 1000 m.)

8.4.3. Almacenamiento

El rendimiento específico (S_y) de este acuífero libre se estima que pueda ser del orden de 0,1. De todas formas, como la modelación se limitará al régimen permanente de flujo, el almacenamiento no afectará a los resultados.

8.4.4. Condiciones de contorno

A la línea de costa se ha aplicado la condición de potencial constante (o metros).

Se ha aplicado la condición de drenes a las celdillas que corresponden a las zonas húmedas: Castellón y Xilxes-Almenara. En ambas se ha considerado que la conductancia es 16000 m²/día y misma elevación del dren -1m.s.n.m (figura 47).

8.4.5. Recarga

La dotación para usos agrícolas que se han estimado está en función del origen del agua: 6500 m³/ha/año si se utiliza agua subterránea y 7500 m³/ha/año si se utiliza agua superficial. El retorno de riego estimado ha sido de 8% (Tuñón, 2000).

La precipitación media anual del periodo considerado (1996 - 2001) es de 428,8 mm, según los registros de la estación meteorológica del Grao de Castellón. La tasa de infiltración del agua de lluvia se ha estimado en el 14%.

La figura 48 resume las condiciones de recarga.

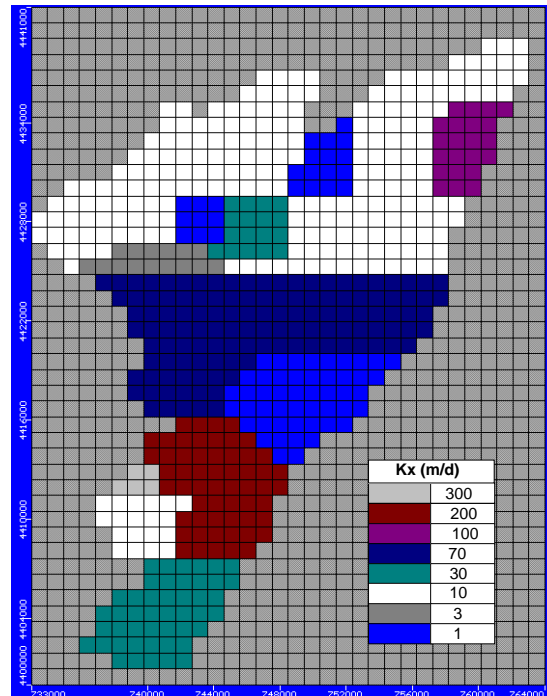


Figura 46. Permeabilidades en la Plana de Castellón

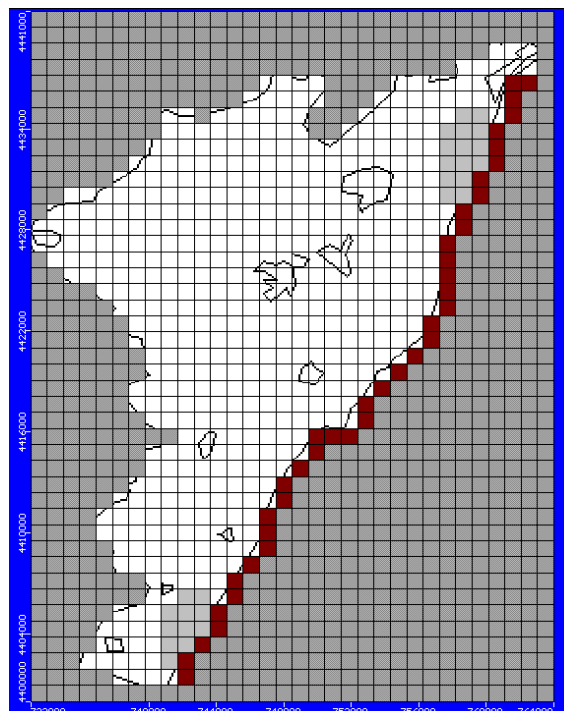


Figura 47. Condiciones de contorno: Potencial constante (rojo oscuro) y Drenes (gris claro).

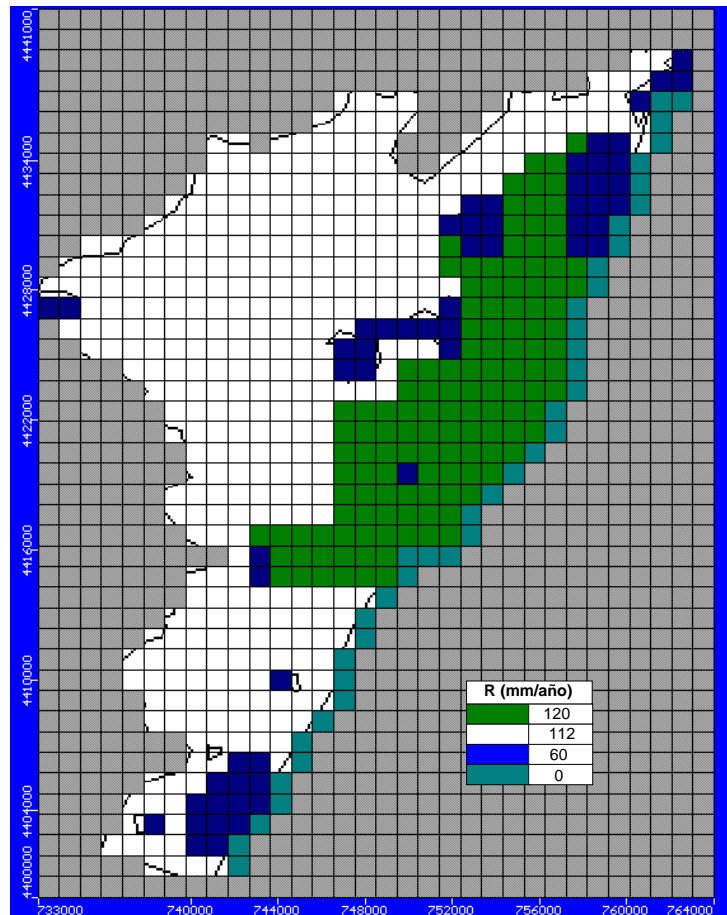


Figura 48. Zonas de recarga aplicadas al modelo

8.4.6. Pozos

Pozos de inyección

Según el modelo conceptual todo el límite interior de la Plana presenta transferencias laterales subterráneas. Estas transferencias se han simulado mediante pozos de inyección.

Se han diferenciado dos zonas: la zona norte, desde Onda a Benicàssim en la que se estima que entra dos tercios del total de entradas y el resto, desde Onda a Almenara, de menor intensidad de recarga lateral. El rango de caudales de inyección va desde 2592 m³/día/celdilla en la zona centro a 3542 m³/día/celdillas en la zona norte y sur.

Pozos de extracción

Los datos de bombeos se han obtenido de varios informes (IGME, 1989) y documentación propia (figura 49).

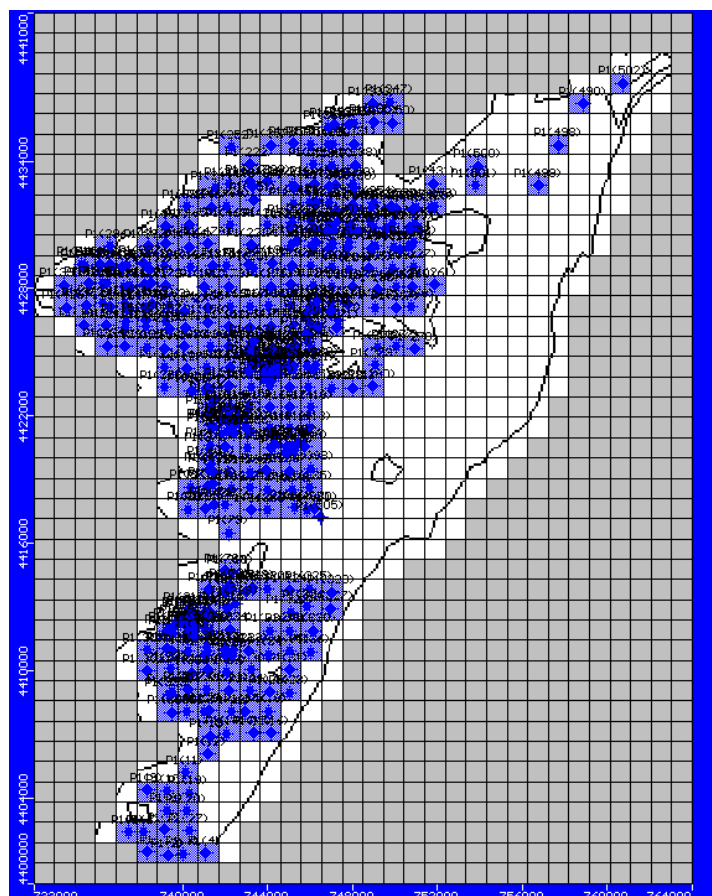


Figura 49. Situación de los pozos de extracción

Pozos de observación

Los pozos de observación se han seleccionado de la red piezométrica. Los datos piezométricos que se han considerado corresponden a la media de las medidas realizadas en el periodo 1996-2001, que se considera en primera aproximación un periodo de cierta estabilidad piezométrica. En la tabla 47 se indican las coordenadas de los piezómetros y en la figura 50 su situación.

PUNTO	UTM X	UTM Y	Piezometría media
15	743522.2	4427947	39,74
16	754761.8	4423466	0,54
17	741699.7	4406358	1,01
26	739181.2	4408963	15,79
27	740374.6	4412116	-0,86
30	746781.5	4426446	4,37
32	764417.5	4424093	2,62
33	744436.3	4424184	2,45
38	750761.0	4430512	2,96
39	747431.8	4430600	23,68
42	745756.7	4413479	-0,05

43	741807.2	4418953	2,16
44	744263.9	4417204	1,49
45	741428.0	4413846	1,13
46	742352.6	4413642	-0,85
49	745196.0	4420518	0,65
50	742474.2	4421805	1,46
58	744417.4	4415524	0,93
61	746912.9	4417698	1,41
63	746185.6	4416383	1,77
65	749363.9	4418147	6,79
67	741872.2	4408486	-0,71
70	744318.1	4411381	0,11
73	741784.6	4411498	-1,16
74	741276.5	4411217	-3,48
75	742177.2	4410869	-4,43
76	743024.3	4412271	0,50

Tabla 47. Puntos de control piezométrico

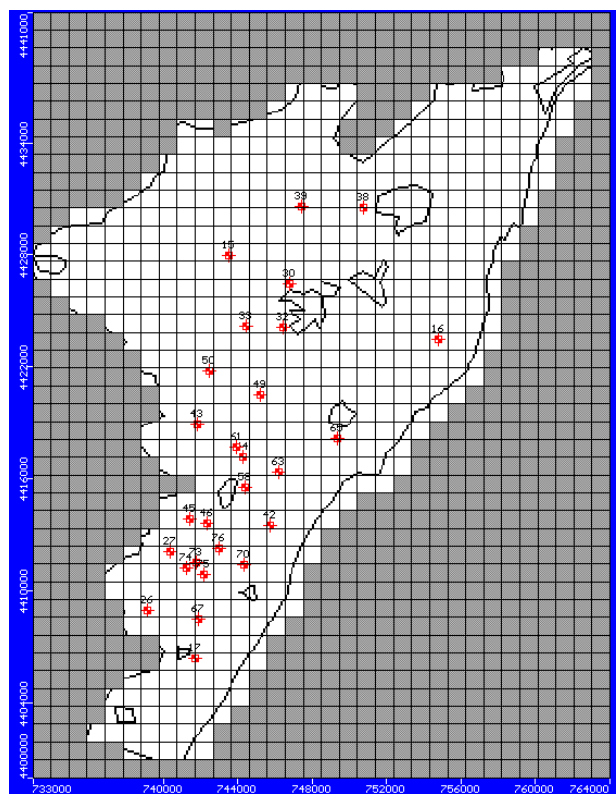


Figura 50. Situación de los puntos de control piezométrico

8.4.7. Calibración del modelo

Para calibrar el modelo se han modificado datos de geometría del acuífero (espesor), bombeos, conductividad hidráulica, drenes de zonas húmedas y pozos de inyección.

La calibración del modelo se ha considerado válida para todas las diferencias entre el valor calculado por el programa y el introducido (observado) comprendidas entre -1 y 1.

En la figura 51 se muestra el ajuste conseguido entre los niveles piezométricos introducidos y los calculados por el programa. Las desviaciones existentes se consideran aceptables para considerar el modelo calibrado.

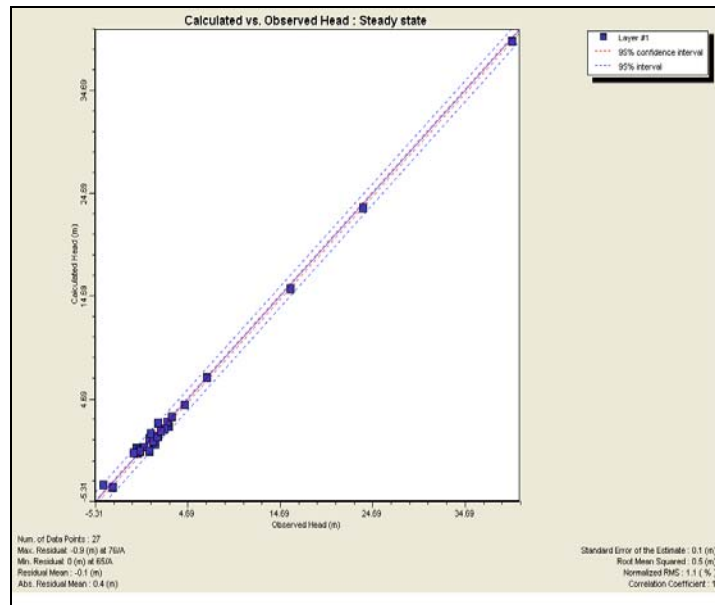


Figura 51. Datos calculados vs. datos observados

En la tabla 48 se muestran las diferencias entre los datos calculados y observados

Punto de Observación	UTM X	UTM Y	Observado	Calculado	Calc.-Obs.
15	743522	4427947	39,74	39,43	-0,31
16	754761	4423466	0,54	0,84	0,30
17	741699	4406358	1,01	0,44	-0,57
26	739181	4408963	15,79	15,40	-0,38
27	740374	4412116	-0,86	-0,09	0,77
30	746781	4426446	4,37	4,12	-0,24
32	746417	4424093	2,62	1,98	-0,64
33	744436	4424184	2,45	2,40	-0,04
38	750761	4430512	2,96	2,97	0,01
39	747431	4430600	23,68	23,26	-0,41
42	745756	4413479	-0,05	-0,02	0,02
43	741807	4418953	2,16	1,76	-0,40

44	744263	4417204	1,49	0,98	-0,51
45	741428	4413846	1,13	0,26	-0,86
46	742352	4413642	-0,85	-0,27	0,58
49	745196	4420518	0,65	1,32	0,67
50	742474	742474.2	1,46	2,33	0,87
58	744417	4415524	0,93	0,49	-0,43
61	743912	4417698	1,41	0,98	-0,43
63	746185	4416383	1,77	1,54	-0,23
65	749363	4418147	6,79	6,79	0,00
67	741872	4408486	-0,71	-0,65	0,06
70	744318	4411381	-0,48	-0,37	0,12
73	741784	4411498	-1,16	-0,60	0,56
74	741276	4411217	-3,48	-3,88	-0,40
75	742177	4410869	-4,43	-3,71	0,72

Tabla 48. Diferencias entre valores calculados y observados

8.5. Resultados obtenidos

8.5.1. Piezometría

En la figura 52 se muestra el mapa piezométrico del periodo simulado. El sentido general del flujo es NW-SE, con gradientes del orden del 1% en las zonas internas. Tanto en sector septentrional (área de Benicasim) como en la meridional (Nules-Vall de Uxó) aparecen zonas deprimidas, que se corresponden con los sectores en los que la explotación del acuífero es más intensa. Realmente, estas depresiones piezométricas son relativamente suaves debido a la notable recuperación piezométrica que ha experimentado el acuífero en los últimos años a consecuencia de la progresiva disminución de los bombeos.

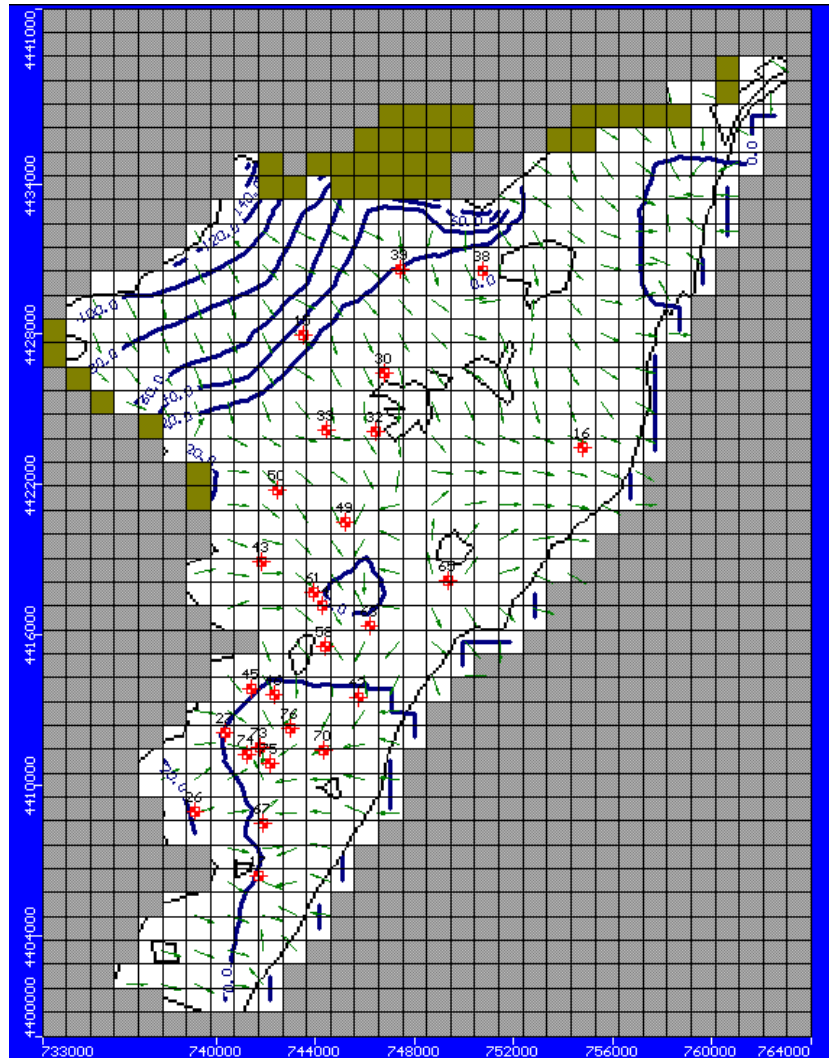


Figura 52. Simulación del modelo en régimen estacionario

8.5.2. Balance hídrico

El balance hídrico calculado para el periodo simulado se sintetiza en la tabla 49.

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Intrusión	14,5	Salidas al Mar	11,1
Entradas laterales	79,0	Bombeos	114,4
Infiltración	51,3	Zona húmeda	19,3
Total	144,8	Total	144,8

Tabla 49. Balance hídrico calculado

Las salidas subterráneas al mar son 11,1 hm³/año y la alimentación a las zonas húmedas asociadas (marjales de Castellón y de Almenara) 19,3 hm³/año. En consecuencia, el caudal ambiental se puede estimar en 30 hm³/año, si se acepta que el periodo simulado corresponde a una situación de intrusión estacionaria. No obstante, las entradas de agua de mar son del orden de 14,5 hm³/año.

8.6. Discriminación espacial de los volúmenes ambientales

El proceso de intrusión marina es de diferente intensidad según el sector del acuífero que se considere. Esto significa que el volumen ambiental de descarga al mar no tiene porqué repartirse de manera espacialmente homogénea, sino que debe ser focalizado en los sectores en que la intrusión progresa en mayor medida.

Con objeto de discriminar estas diferencias se ha dividido el acuífero en tres sectores: sector norte, sector centro y sector sur (figura 53). Las divisiones entre zonas son aproximadamente paralelas al flujo subterráneo natural del acuífero.

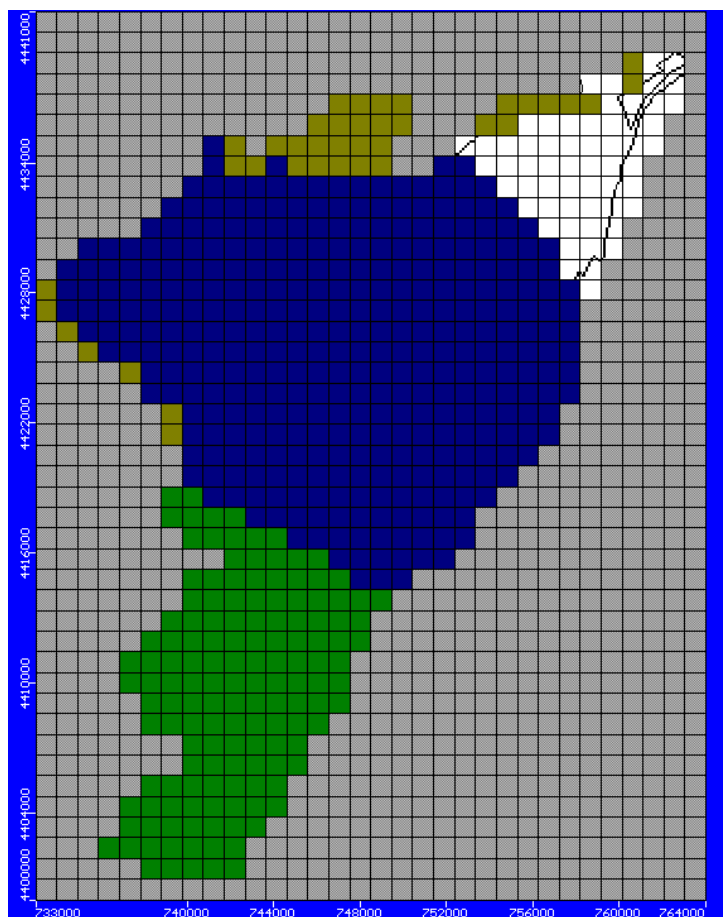


Figura 53. Zonas de la Plana diferenciadas para estudiar el balance hídrico

En la tabla 50 se muestra el balance hídrico calculado para cada uno de los sectores. La intrusión marina tiene lugar por los sectores septentrional y meridional.

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	8,5	Salidas al mar	0,6
	Entradas laterales	0,0	Bombeos	0,9
	Infiltración	4,0	Zona húmeda	12,9
	Transferencias internas	2,2	Transferencias internas	0,4
Sector central	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	10,3
	Entradas laterales	59,2	Bombeos	82,0
	Infiltración	34,8	Zona húmeda	-
	Transferencias internas	1,8	Transferencias internas	3,1
Sector sur	Intrusión marina	6,0	Salidas al mar	0,2
	Entradas laterales	19,8	Bombeos	31,1
	Infiltración	12,4	Zona húmeda	6,5
	Transferencias internas	0,9	Transferencias internas	1,4

Tabla 50. Balance hídrico sectorial

8.7. Escenarios de actuación en la Plana de Castellón

8.7.1. Objetivos

De acuerdo a lo expuesto en el epígrafe anterior, se han simulado distintos escenarios en los que se modifican los bombeos actuales para estimar su repercusión en el balance hídrico general y, específicamente, en la relación existente entre las salidas al mar y la intrusión en cada sector.

Los escenarios que se han tenido en cuenta han sido los siguientes:

- Escenario 0. Corresponde a la situación de partida
- Escenario 1. Reducción del 20% de los bombeos en el sector sur
- Escenario 2. Reducción del 40% de los bombeos en el sector sur
- Escenario 3. Reducción del 60% de los bombeos en el sector sur

Este escenario, en los que se disminuyen progresivamente los bombeos en el sector sur, tienen por objeto aproximarse a la situación de explotación en la que las salidas subterráneas al mar sean suficientes para anular el proceso de intrusión y, en su caso, hacer retroceder el frente salino actual. La disminución de los bombeos no se acompaña de la reducción equivalente de los retornos de riego ya que no se contemplan cambios en el uso del suelo. Se supone, en todo caso, que la demanda agrícola que quedaría en precario con esta reducción se satisfaría con recursos de otra procedencia, como podría ser la reutilización de agua regenerada, que actualmente es nula, o la importación de recursos externos.

8.7.2. Escenario 0: situación de partida

Este escenario corresponde al periodo simulado. La figura 54 representa la situación piezométrica correspondiente a este escenario en la que destaca la presencia de dos depresiones piezométricas situadas en los sectores septentrional y meridional del acuífero.

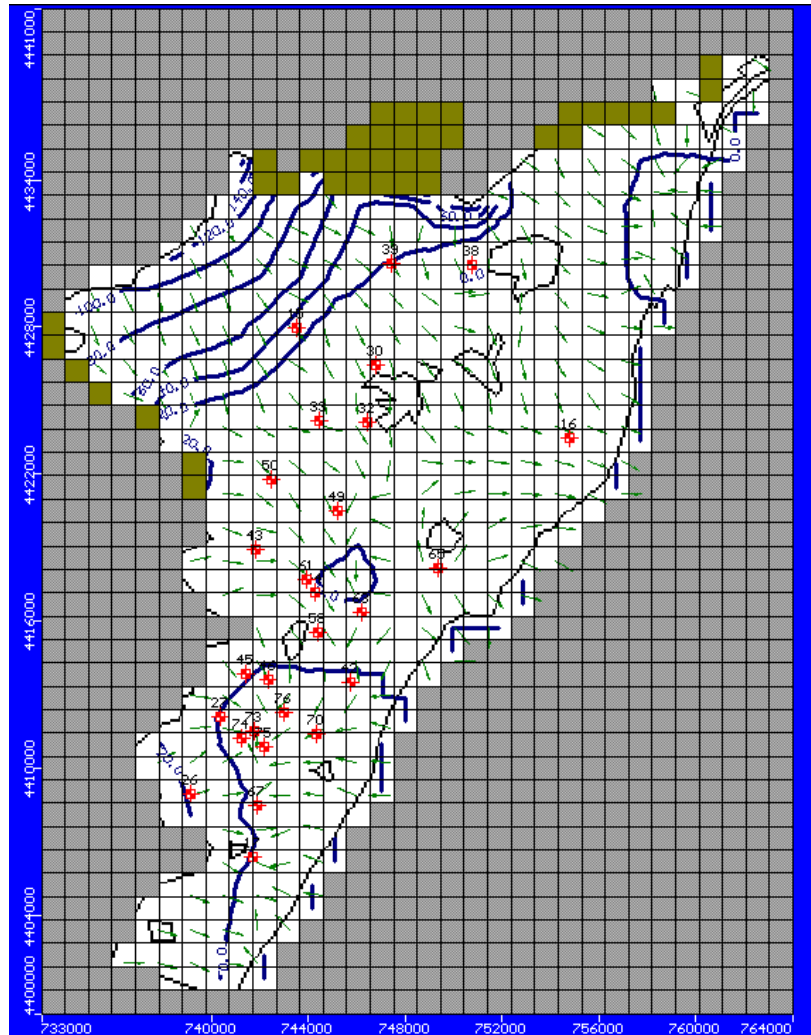


Figura 54. Mapa piezométrico de partida (escenario 0)

La tabla 51 sintetiza el balance general, la tabla 52 los balances sectoriales y la tabla 53 las transferencias internas entre los sectores diferenciados.

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Intrusión	14,5	Salidas al mar	11,1
Entradas laterales	79,0	Bombeos	114,4
Infiltración	51,3	Zona húmeda	19,3
Total	144,8	Total	144,8

Tabla 51. Balance general del acuífero de la Plana de Castellón (escenario 0)

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	8,5	Salidas al mar	0,6
	Entradas laterales	0,0	Bombeos	0,9
	Infiltración	5,2	Zona húmeda	12,9
Sector central	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	10,3
	Entradas laterales	59,3	Bombeos	82,0
	Infiltración	34,8	Zona húmeda	-
Sector sur	Intrusión marina	6,0	Salidas al mar	0,2
	Entradas laterales	19,8	Bombeos	31,1
	Infiltración	12,4	Zona húmeda	6,4

Tabla 52. Balance sectorial del acuífero de la Plana de Castellón (escenario 0)

Transferencias internas (hm ³ /año)	
Norte a Centro	0,4
Centro a Norte	2,2
Sur a Centro	1,4
Centro a Sur	0,9

Tabla 53. Transferencias de caudales entre zonas

8.7.3. Escenario 1: reducción del 20% de los bombeos en el sector sur

En la figura 55 se muestra el resultado obtenido al reducir el 20% de los bombeos en el sector sur. La depresión piezométrica en el sector sur se ha reducido apreciablemente.

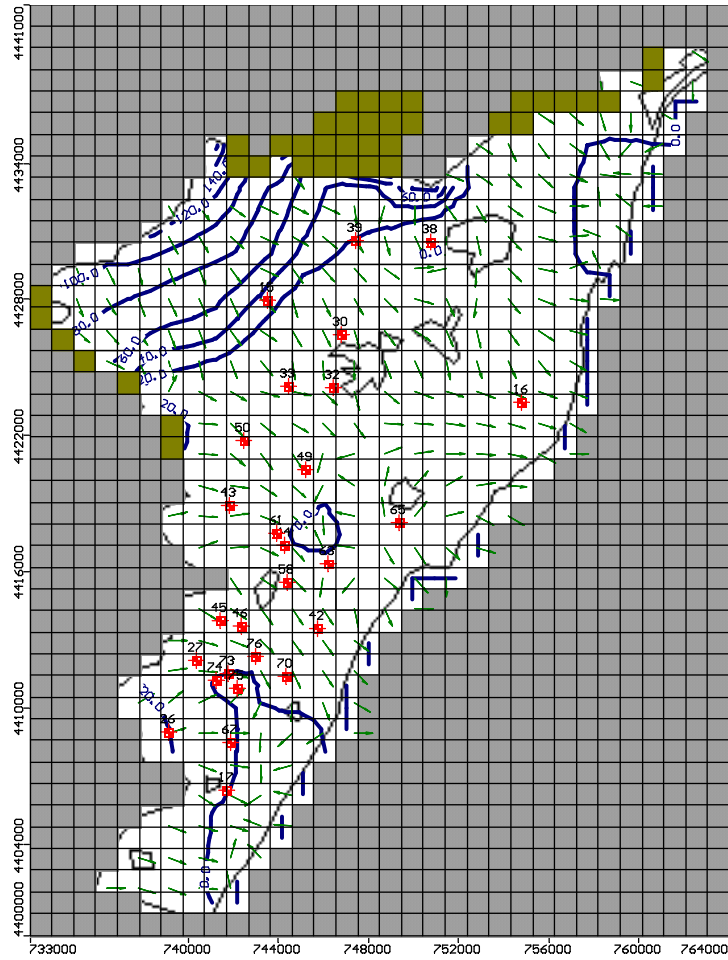


Figura 55. Mapa piezométrico de la Plana de Castellón (escenario 1)

La tabla 54 sintetiza el balance general, la tabla 55 los balances sectoriales y la tabla 56 las transferencias internas entre los sectores diferenciados. La intrusión marina en el sector sur se ha reducido de 6 a 2,8 hm³/año.

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Intrusión	11,2	Salidas al mar	13,1
Entradas laterales	79,0	Bombeos	108,0
Infiltración	51,3	Zona húmeda	20,6
Total	141,5	Total	141,7

Tabla 54. Balance general del acuífero de la Plana de Castellón (escenario 1)

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	8,5	Salidas al mar	0,6
	Entradas laterales	0,0	Bombeos	0,9
	Infiltración	4,0	Zona húmeda	12,9
Sector central	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	10,7
	Entradas laterales	59,2	Bombeos	82,4
	Infiltración	34,8	Zona húmeda	-
Sector sur	Intrusión marina	2,8	Salidas al mar	1,7
	Entradas laterales	19,8	Bombeos	24,6
	Infiltración	12,4	Zona húmeda	7,8

Tabla 55. Balance sectorial del acuífero de la Plana de Castellón (escenario 1)

Transferencias internas (hm ³ /año)	
Norte a Centro	0,4
Centro a Norte	2,2
Sur a Centro	1,7
Centro a Sur	0,7

Tabla 56. Transferencias de caudales entre zonas

8.7.4. Escenario 2: reducción del 40% de los bombeos en el sector sur

En la figura 56 se muestra el resultado obtenido al reducir el 40% de los bombeos en el sector sur.

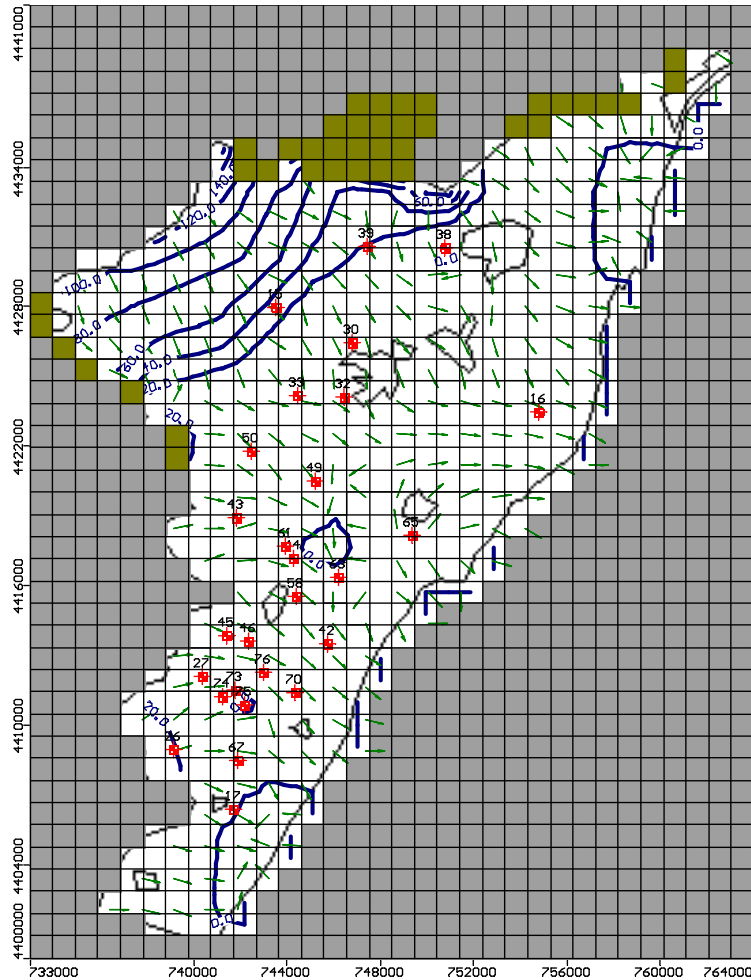


Figura 56. Mapa piezométrico de la Plana de Castellón (escenario 2)

La tabla 57 sintetiza el balance general, la tabla 58 los balances sectoriales y la tabla 59 las transferencias internas entre los sectores diferenciados. El dato más significativo es que, en comparación con el escenario anterior, las salidas subterráneas al mar aumentan considerablemente (de 1,7 a 5,8 hm³/año) y, sin embargo la intrusión marina desciende muy ligeramente (de 2,8 a 2,4 hm³/año).

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Intrusión	10,9	Salidas al mar	17,6
Entradas laterales	79,0	Bombeos	101,9
Infiltración	51,3	Zona húmeda	21,7
Total	141,2	Total	141,2

Tabla 57. Balance general del acuífero de Castellón (escenario 2)

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	8,5	Salidas al mar	0,6
	Entradas laterales	0,0	Bombeos	0,9
	Infiltración	4,0	Zona húmeda	12,9
Sector central	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	11,2
	Entradas laterales	59,3	Bombeos	82,4
	Infiltración	34,8	Zona húmeda	-
Sector sur	Intrusión marina	2,4	Salidas al mar	5,8
	Entradas laterales	19,8	Bombeos	18,6
	Infiltración	12,4	Zona húmeda	8,8

Tabla 58. Balance sectorial de la Plana de Castellón (escenario 2)

Transferencias internas (hm ³ /año)	
Norte a Centro	0,3
Centro a Norte	2,3
Sur a Centro	2,0
Centro a Sur	0,6

Tabla 59. Transferencias de caudales entre zonas

8.7.5. Escenario 3: reducción del 60% de los bombeos en el sector sur

En la figura 57 se muestra el resultado obtenido al reducir el 60% de los bombeos en el sector sur. La depresión piezométrica no cambia significativamente.

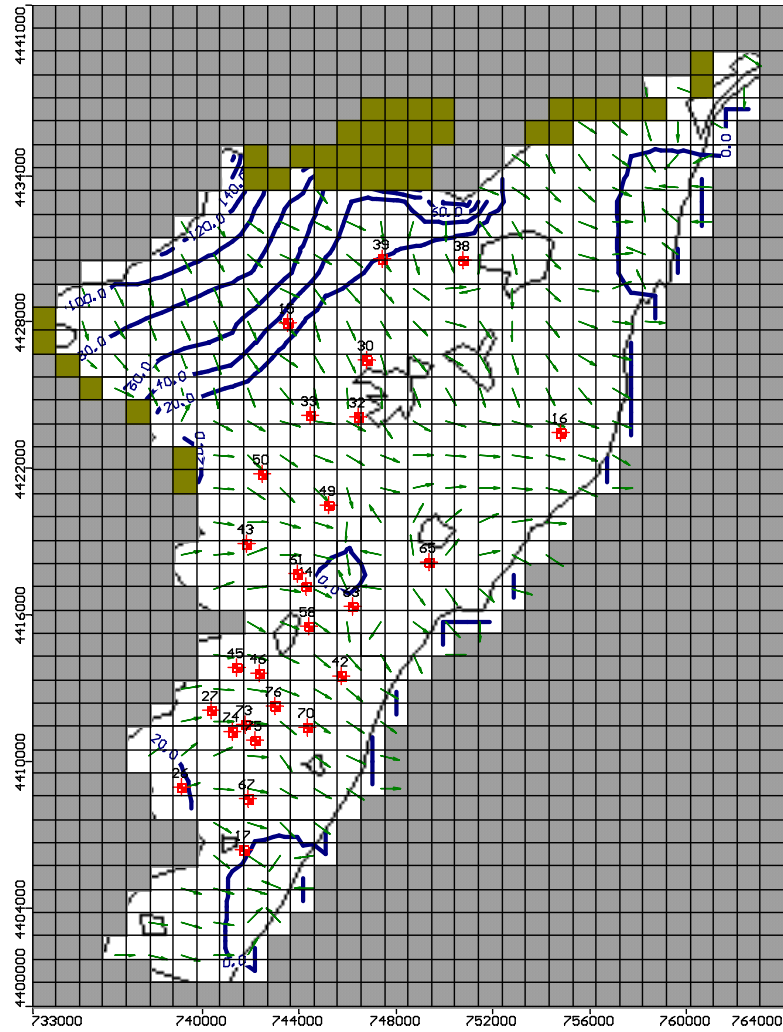


Figura 57. Mapa piezométrico de la Plana de Castellón (escenario 3)

La tabla 60 sintetiza el balance general, la tabla 61 los balances sectoriales y la tabla 62 las transferencias internas entre los sectores diferenciados. El dato más significativo es que, en comparación con el escenario anterior, las salidas subterráneas al mar aumentan considerablemente (de 5,8 a 9,3 hm³/año) y, sin embargo la intrusión marina desciende muy ligeramente (de 2,4 a 2,3 hm³/año).

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Intrusión	10,8	Salidas al mar	21,5
Entradas laterales	79,0	Bombeos	96,8
Infiltración	51,3	Zona húmeda	232,8
Total	141,1	Total	141,1

Tabla 60. Balance general del acuífero de Castellón (escenario 3)

	Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Sector norte	Intrusión marina	8,5	Salidas al mar	0,6
	Entradas laterales	0,0	Bombeos	0,9
	Infiltración	4,0	Zona húmeda	12,9
Sector central	Intrusión marina	0,0	Salidas al mar	11,2
	Entradas laterales	59,3	Bombeos	82,4
	Infiltración	34,8	Zona húmeda	-
Sector sur	Intrusión marina	2,3	Salidas al mar	9,3
	Entradas laterales	19,8	Bombeos	13,5
	Infiltración	12,4	Zona húmeda	9,9

Tabla 61. Balance sectorial de la Plana de Castellón (escenario 3)

Transferencias internas (hm ³ /año)	
Norte a Centro	0,3
Centro a Norte	2,3
Sur a Centro	2,0
Centro a Sur	0,6

Tabla 62. Transferencias de caudales entre zonas

8.7.6. Resumen de los escenarios simulados en la Plana Castellón

La tabla 63 muestra las variaciones del balance en la Plana de Castellón a consecuencia de la reducción progresiva de los bombeos. Como era de esperar, la disminución de los bombeos incrementa las salidas al mar así como a las zonas húmedas. Las entradas de agua de mar (intrusión) se reducen aproximadamente en un 25%.

		Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Entradas	Intrusión	14,5	11,2	10,9	10,8
	Entradas laterales	79,0	79,0	79,0	79,0
	Recarga	51,3	51,3	51,3	51,3
Salidas	Salidas mar	11,1	13,1	17,6	21,5
	Bombeos	114,4	108	101,9	96,8
	Zonas húmedas	19,3	20,6	21,7	22,7

Tabla 63. Variaciones del balance en la Plana de Castellón a consecuencia de la modificación de los bombeos

En el sector norte no se han reducido las extracciones porque son realmente de muy escasa entidad. La intrusión marina, lógicamente, permanece estable (tabla 64).

		Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Entradas	Intrusión	8,5	8,5	8,5	8,5
	Entradas laterales	0,0	0,0	0,0	0,0
	Recarga	4,0	4,0	4,0	4,0
	Transferencias int.	2,2	2,2	2,2	2,2
Salidas	Salidas mar	0,6	0,6	0,6	0,6
	Bombeos	0,9	0,9	0,9	0,9
	Zona húmeda	12,9	12,9	12,9	12,9
	Transferencias int.	0,4	0,3	0,3	0,3

Tabla 64. Variaciones del balance en el sector norte de la Plana de Castellón a consecuencia de la modificación de los bombeos

En el sector central no hay modificaciones dignas de mención (tabla 65), salvo las derivadas de las transferencias internas que se generan entre sectores.

		Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Entradas	Intrusión	0,0	0,0	0,0	0,0
	Entradas laterales	59,3	59,2	59,3	59,3
	Recarga	34,8	34,8	34,8	34,8
	Transferencias int.	0,4	0,4	0,3	0,3
Salidas	Salidas mar	10,3	10,7	11,2	11,5
	Bombeos	82,4	82,4	82,4	82,4
	Zona húmeda	-	-	-	-
	Transferencias int.	3,1	2,9	2,9	2,9

Tabla 65. Variaciones del balance en el sector central de la Plana de Castellón a consecuencia de la modificación de los bombeos

En el sector sur las modificaciones provocadas por la reducción de los bombeos son significativas (tabla 66). En el escenario 1 (reducción del 20% de los bombeos) las salidas al mar se incrementan apreciablemente y, como consecuencia, las entradas de agua de mar se reducen de 6 a 2,8 y hm³/año; al mismo tiempo, la zona húmeda asociada incrementa su alimentación en 1,4 hm³/año. En el escenario 2 (reducción del 40% de los bombeos) las salidas subterráneas al mar se incrementan apreciablemente pero la reducción de las entradas de agua de mar y el aumento de las salidas a la zona húmeda son de menor entidad, lo que pone de manifiesto que la relación entre la disminución de los bombeos, o lo que es lo mismo, las salidas subterráneas al mar y el proceso de intrusión no es lineal.

		Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Entradas	Intrusión	6,0	2,8	2,4	2,3
	Entradas laterales	19,8	19,8	19,8	19,8
	Recarga	12,4	12,4	12,4	12,4
	Transferencias int.	0,9	0,7	0,6	0,6
Salidas	Salidas mar	0,2	1,7	5,8	9,3
	Bombeos	31,1	24,6	18,6	13,5
	Zona húmeda	6,4	7,8	8,8	9,9
	Transferencias int.	1,4	1,7	1,9	1,9

Tabla 66. Variaciones del balance en el sector sur de la Plana de Castellón a consecuencia de la modificación de los bombeos

8.8. CONCLUSIONES

El volumen ambiental estimado para la masa de agua subterránea de la Plana de Castellón es de 74 hm³/año (CHJ, 2007). Este volumen se refiere a la suma de las salidas subterráneas al mar y las salidas a las zonas húmedas. Al tratarse de un acuífero costero, no se incluye el 20% de las transferencias subterráneas a otros acuíferos.

En la situación actual, y con los datos introducidos en el modelo, las salidas son de 11,1 hm³/año al mar y 19,3 hm³/año a las zonas húmedas, lo que totalizan 30,4 hm³/año. Con estos caudales de surgencia la intrusión marina se manifiesta de forma intensa en el extremo septentrional y en el sector meridional.

Aumentar las salidas subterráneas se puede conseguir mediante la disminución de los bombeos y/o mediante técnicas de recarga artificial. Estas actuaciones deberían ser de tal magnitud que consiguieran en primera instancia detener y en segunda instancia hacer retroceder el frente salino. El volumen necesario para conseguir estos efectos sería el volumen ambiental del acuífero.

Se han simulado escenarios basados en la disminución de los bombeos en el sector sur, sin que ello suponga la eliminación de las actividades satisfechas con dichos bombeos. Con la eliminación del 20% de los bombeos en ese sector se consigue incrementar en 1,5 hm³/año las salidas al mar y en 1,4 hm³/año las salidas a la zona húmeda, aunque ello no consigue evitar las entradas de agua de mar, que pasan de 6 a 2,8 hm³/año en ese sector. Si la reducción de los bombeos es del 40%, las salidas al mar aumentan en más de 4 hm³/año y la zona húmeda recibe 1 hm³/año más; no obstante, el caudal de intrusión apenas se reduce (de 2,8 a 2,4 hm³/año). Esta reducción es prácticamente inapreciable cuando la reducción de los bombeos es del 60%.

El volumen ambiental necesario para alcanzar la situación del escenario 2 es de 39,3 hm³/año, que es la suma de los 17,6 hm³/año de salidas subterráneas al mar y los 21,7 hm³/año de surgencias a las zonas húmedas.

9. CONCLUSIONES

Según la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2007), las estimaciones de caudales ambientales de descarga al mar de los acuíferos costeros del litoral de Castellón son las siguientes: 8 hm³/año en la Plana de Oropesa-Torreblanca, 40 hm³/año en la Plana de Vinaroz y 74 hm³/año en la Plana de Castellón. Estas cifras incluyen las salidas al mar y las salidas a zonas húmedas.

La modelación de estos tres acuíferos se ha realizado en régimen estacionario para un periodo definido como estable o de ligera recuperación, de acuerdo a los datos piezométricos y de calidad.

En cada caso, se ha obtenido el balance hídrico en el que se diferencian, entre otras partidas, las salidas al mar, las salidas a zonas húmedas y las entradas de agua de mar. Se asume que la suma de las salidas al mar y a las zonas húmedas constituye el caudal ambiental y que este debe ser tal que minimice las entradas de aguas de mar subterráneas. Quiere esto decir que en la situación simulada, que pretende ser de equilibrio, se asegura la no progresión del proceso de intrusión pero persiste el desequilibrio agua dulce-agua salada.

La determinación del volumen ambiental depende del alcance del concepto. Así pues, el correspondiente a una situación en la que el frente salino está en equilibrio debe ser considerado como "volumen ambiental mínimo" que equivale a los caudales de surgencia necesarios para impedir el avance salino. Si el objetivo de mantener los caudales ambientales es recuperar el buen estado ecológico de las masas de agua, dichos caudales deben ser suficientes no sólo para impedir el avance sino para favorecer el retroceso del frente y reducir el volumen de acuífero afectado. Esta recuperación requiere anular las situaciones de inversión de flujo o, lo que es lo mismo, las situaciones piezométricas bajo el nivel del mar. Los caudales de surgencia necesarios para eliminar depresiones piezométricas, asegurar el flujo de agua dulce hacia el mar y recuperar el equilibrio original del acuífero serán los "volúmenes ambientales".

En la práctica, y debido tanto a la heterogeneidad de los acuíferos y sus propiedades como a la gran variedad de condiciones de contorno, el proceso de intrusión marina no es homogéneo ni uniforme sino que puede manifestarse con muy diferente intensidad en sectores de un mismo acuífero. Por esta razón, el volumen ambiental, que se expresa por una cifra, debe tener también un referente espacial y distribuirse adecuadamente según las condiciones hidrodinámicas del proceso.

Con esta filosofía se han elaborado los modelos de las tres planas del litoral de Castellón. La situación modelizada se asocia a estados de quasi-equilibrio, es decir, a un periodo discreto en el que el grado de salinidad del acuífero ha sido más o menos uniforme. En esta situación estacionaria, la suma del volumen de salidas al mar y de salidas a zonas húmedas, en su caso, se considera como el "volumen ambiental mínimo". El balance general para este periodo se ha detallado por sectores que se han diferenciado en función de la geometría de la superficie piezométrica obtenida. Así, se han obtenido los balances hídricos para cada uno de dichos sectores.

La recuperación piezométrica de esos sectores y, por tanto, la tendencia hacia la regeneración de la calidad original del agua subterránea en las zonas afectadas sólo se puede conseguir mediante la reducción de los bombeos, mediante la instalaciones de sistema de recarga artificial o mediante la aplicación combinada de ambas posibilidades.

Se han simulado escenarios basados en la disminución de los bombeos hasta conseguir una situación en la que las entradas de agua de mar se anulen y no existan depresiones piezométricas. Las salidas al mar y a las zonas húmedas en los escenarios en los que se consiguen esas condiciones se han considerado los “volúmenes ambientales”.

El volumen ambiental calculado para la plana de Oropesa-Torreblanca es de 21,6 /año, que corresponde a la suma de los 4,1 hm³/año de salidas a la zona húmeda del Prat de Cabanes y 17,5 hm³/año de salidas subterráneas al mar. Para conseguirlo es necesario reducir el 20% de los bombeos en el sector septentrional y la totalidad de los bombeos en el sector meridional.

El volumen ambiental calculado para la plana de Vinaroz es de 16,2 hm³/año. Para conseguirlo es necesario disminuir el 40% de los bombeos del acuífero.

El volumen ambiental calculado para la plana de Castellón es de 39,3 hm³/año, que corresponde a la suma de los 17,6 hm³/año de salidas subterráneas la mar y los 21,7 hm³/año de surgencias a las zonas húmedas. Para conseguir estas salidas es necesario reducir el 40% de los bombeos en el sector meridional del acuífero.

En la tabla 67 se comparan los volúmenes ambientales calculados y los estimados por la Confederación Hidrográfica del Júcar.

Masa de Agua		Oropesa Torreblanca	Vinaroz	Castellón
Volumen ambiental	CHJ, 2007	8,0	40,0	74,0
	Calculado	21.6	16.2	39.3

Tabla 67. Volúmenes ambientales calculados y estimado por la CHJ (2007)

REFERENCIAS

- Cabezas, F., Cabrera, E. y Morell, I. (2008). El agua, una cuestión de Estado: perspectiva desde la Comunidad Valenciana. Asociación Valenciana de Empresarios. 156 pp.
- Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 1976). Estudio hidrogeológico de los Llanos de Vinaroz. 61 pp. Confederación Hidrográfica del Júcar
- Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2004). Seguimiento del Plan Hidrológico de la Cuenca del Júcar. Documento de síntesis. Confederación Hidrográfica del Júcar
- Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2005). Informe para la Comisión Europea sobre los artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua. Confederación Hidrográfica del Júcar
- Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2005). Seguimiento del Plan Hidrológico de la Cuenca del Júcar. Documento de síntesis. Confederación Hidrográfica del Júcar
- Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2007). Balances hídricos y evaluación del riesgo conforme al estado cuantitativo de las masas de agua subterránea de la Confederación Hidrográfica del Júcar. Confederación Hidrográfica del Júcar
- Diputación Provincial de Castellón (DIPCAS, 2002). Propuesta de Plan de Actuación Estratégica en materia de abastecimiento de agua potable en la provincia de Castellón.
- Hidalgo, A., Ferrer, J., Estrela, T., Escuer, J. (2007). Caracterización de la intrusión marina en las aguas subterráneas de la franja litoral de la cuenca del Júcar y propuestas metodológicas para la aplicación de las directivas europeas 2000/60/CE y 2006/118/CE. Bol. Geol. Minero, 118 (Núm. especial): 725 - 744
- ITGE (1989). Planas de Castellón y Sagunto. Serie: Manuales de utilización de acuíferos. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Madrid.
- IGME (2000). Estado de la intrusión de agua de mar en los acuíferos costeros españoles. Vol. II: Cuencas mediterráneas I: Segura, Júcar y Baleares
- INE (2006). Encuestas del agua. Instituto Nacional de Estadística (www.ine.es). Madrid
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Book 6. Chapter A1.
- Morell I. (1985). Caracterización hidrogeoquímica de la intrusión marina de la Plana Oropesa-Torreblanca (Prov. Castellón). Tesis Doctoral.
- Morell, I. (1989). Salinización por intrusión marina. Aspectos teóricos y metodológicos. Aplicación a los acuíferos costeros de la provincia de Castellón. Ed. Excma. Diputación de Castellón. 221 pp. ISBN 84-86895-07-3
- Pérez, M.A. (2005). Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad del agua, integrado en sistemas de información geográfica, para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco del Agua. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- SGOP (1975). Estudio hidrogeológico de la Plana de Oropesa - Torreblanca. Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid.
- SGOP (1977) Estudio hidrogeológico de la Plana de Castellón. Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid
- SGOP (1982) Estudio del aprovechamiento integral de los recursos hídricos del río Mijares y de la Plana de Castellón. Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid
- SGOP (1986a) Sinopsis hidrogeológica de la Plana de Castellón. Explotación del acuífero y evolución de su estado. Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid

- SGOP (1986b) Acerca del peligro de intrusión salina en el acuífero de la Plana en Burriana (Castellón). Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid.
- SGOP (1991). Estudio de la contaminación de las aguas subterráneas en la Plana de Vinaroz-Peñíscola y su incidencia en el abastecimiento de agua a los núcleos urbanos. Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid
- Témez, J.R. (1977). Modelo matemático de transformación precipitación - aportación. ASINEL.
- Tuñón, J. (2000). Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas. Tesis Doctoral. Universidad Jaume I, Castellón.