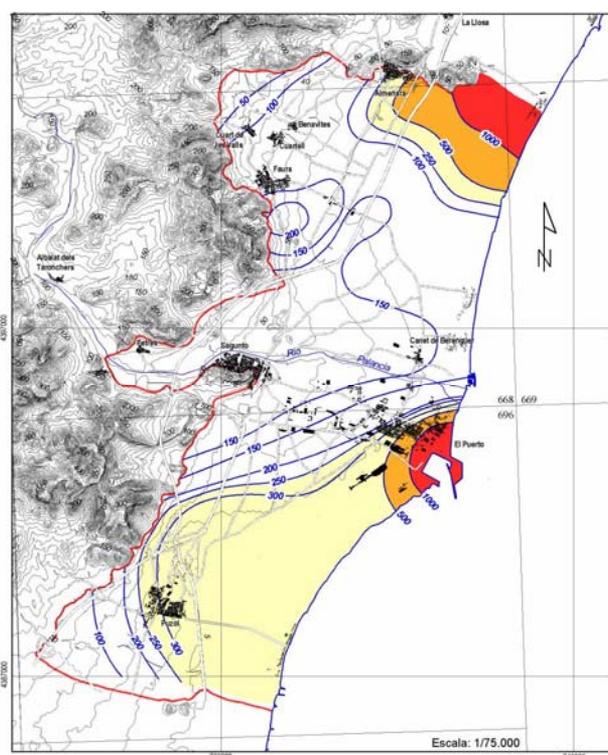


CONVENIO DE COLABORACIÓN ENTRE LA DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA Y EL INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA

TRABAJOS TÉCNICOS PARA LA APLICACIÓN DE LA DIRECTIVA MARCO DEL AGUA EN MATERIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS



CARACTERIZACIÓN ADICIONAL Plana de Sagunto

Anexo I: Actualización de los trabajos técnicos

Anexo II: Modelo matemático previo



MINISTERIO
DE EDUCACIÓN
Y CIENCIA

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE



Instituto Geológico
y Minero de España

Secretaría General para
el Territorio y la Biodiversidad
Dirección General del Agua

ANEXO I:

**ACTUALIZACIÓN DE LOS TRABAJOS TÉCNICOS PARA
LA APLICACIÓN DE LA DIRECTIVA MARCO DEL AGUA
EN MATERIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.
CARACTERIZACIÓN ADICIONAL DE LA MASA DE
AGUA SUBTERRÁNEA DE LA PLANA DE SAGUNTO.
(VALENCIA).**

Valencia, Diciembre de 2005.

Este informe ha sido realizado por el INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, actuando la sociedad TEYGE, S.A. como empresa consultora (232/04). En su elaboración ha participado el siguiente equipo técnico:

Dirección:

Bruno J. Ballesteros Navarro (INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA).

Equipo de trabajo:

Joaquín Barba-Romero Muñoz (TEYGE, S.A.).

José Oriol Navarro Odriozola (TEYGE, S.A.).

ÍNDICE.

1	OBJETIVOS.	6
2	PIEZOMETRÍA.	7
3	COMPOSICIÓN QUÍMICA	10
3.1	DIAGRAMAS DE STIFF MODIFICADO	12
3.2	CLORUROS E INTRUSIÓN MARINA	13
3.3	CONDUCTIVIDAD.....	15
3.4	NITRATOS	16
3.5	SULFATOS	17
3.6	BICARBONATOS.....	19
3.7	FACIES HIDROQUÍMICAS	21
4	CONCLUSIONES.	23

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura nº1.- Facies hidroquímica de las muestras analizadas en Septiembre de 2005.

Figura nº2.- Facies hidroquímica de las muestras analizadas en Septiembre de 2005.

ÍNDICE DE PLANOS.

Plano 2E1.- Mapa piezométrico de la M.A.S. de la P. de Sagunto para Septiembre de 2005.

Plano 7A1.- Mapa de diagramas de Stiff modificado de la M.A.S. de la P. de Sagunto para Septiembre de 2005.

Plano 7B1B1.- Tipo de intrusión según la superficie afectada sobre la M.A.S. de la P. de Sagunto para Septiembre de 2005.

Plano 7B1C1.- Tipo de intrusión según la intensidad de la afección sobre la M.A.S. de la P. de Sagunto para Septiembre de 2005.

Plano 7B21.- Mapa de isoconductividades de la M.A.S. de la P. de Sagunto para Septiembre de 2005.

Plano 7B31.- Mapa de distribución de nitratos de la M.A.S. de la P. de Sagunto para septiembre de 2005.

Plano 7B41.- Mapa de distribución de sulfatos de la P. de Sagunto para Septiembre de 2005.

Plano 7B51.- Mapa de distribución de bicarbonatos de la P. de Sagunto para Septiembre de 2005.

Plano 7B61.- Mapa de facies hidroquímicas de la M.A.S. de la P. de Sagunto para Septiembre de 2005.

1 OBJETIVOS.

La memoria presentada en el mes de Julio de 2005 "TRABAJOS TÉCNICOS PARA LA APLICACIÓN DE LA DIRECTIVA MARCO DEL AGUA EN MATERIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. CARACTERIZACIÓN ADICIONAL" incluía las diferentes situaciones hidráulicas e hidroquímicas detectadas en la Plana de Sagunto desde principios de los años setenta, fecha en la que el IGME empezó a establecer y medir la red de control piezométrico, de calidad y de intrusión, hasta el año 2001, tiempo en el que citado organismo cesó en la realización de dicha actividad. Además se incluyeron las aportaciones al conocimiento hidrogeológico de la masa realizadas por otros organismos públicos y empresas privadas.

Lamentablemente, los trabajos de carácter hidrogeológico realizados en la plana con posterioridad a la citada fecha han sido bastante limitados si bien, aquellos de los que se tenía constancia, ya fueron también incluidos.

Durante los meses de Junio y Septiembre de 2005, el IGME-TEYGE, S.A. realizaron conjuntamente sendas campañas de control piezométrico, de calidad y de intrusión con objeto de determinar la actual situación hidráulica e hidroquímica de la masa de agua subterránea de la Plana de Sagunto.

Así, el objetivo principal del presente anexo es el de exponer y comentar los valores obtenidos en estas dos campañas más recientes, comparándolos con los valores correspondientes al final de periodo incluido en la memoria (años 2000-2001) presentada en Julio de 2005.

2 PIEZOMETRÍA.

En la tabla adjunta se muestran las piezometrías medidas en los diferentes puntos de agua que constituyen la red de control piezométrico en las dos campañas realizadas (en Junio y en Septiembre de 2005); el nivel de la superficie del agua subterránea se indica en m. desde la superficie topográfica, mientras que el nivel piezométrico se indica en m s.n.m.:

RED DE CONTROL				JUNIO			SEPTIEMBRE		
CÓDIGO	X	Y	Z	FECHA	NIVEL	N.P.	FECHA	NIVEL	N.P.
292640017	734119	4404138	70,00	14/06/2005	23,20	46,80	27/09/2005	23,61	46,39
292670004	733109	4402992	71,59	14/06/2005	42,00	29,59	22/09/2005	41,82	29,77
292670066	733000	4397075	63,10	10/06/2005	63,00	0,10	27/09/2005	63,10	0,00
292680001	737663	4396281	18,76	10/06/2005	18,03	0,73	27/09/2005	18,63	0,13
292680080	736595	4396895	23,29	10/06/2005	23,18	0,11	21/09/2005	23,00	0,29
292680083	738800	4398245	5,05	14/06/2005	4,45	0,60	21/09/2005	4,80	0,25
292680088	735375	4400585	22,25	14/06/2005	14,20	8,05	22/09/2005	17,72	4,53
292680103	738010	4398958	7,00	20/06/2005	6,80	0,20	27/09/2005	6,93	0,07
292680109	736215	4395785	25,82	20/06/2005	24,60	1,22	27/09/2005	24,83	0,99
292680123	734960	4396760	40,00	20/06/2005	38,80	1,20	27/09/2005	39,80	0,20
292680137	739130	4403715	2,60	14/06/2005	2,30	0,30	27/09/2005	2,18	0,42
292730019	731030	4388105	17,00	10/06/2005	17,15	-0,15	21/09/2005	17,31	-0,31
292730022	730950	4388350	18,00	09/06/2005	15,61	2,39	21/09/2005	17,20	0,80
292730028	733875	4388990	2,40	10/06/2005	2,30	0,10	21/09/2005	2,50	-0,10
292730031	732579	4389800	5,77	09/06/2005	5,04	0,73	21/09/2005	5,12	0,65
292730037	733428	4392675	16,00	09/06/2005	21,40	-5,40	21/09/2005	16,40	-0,40
292730046	730935	4390861	36,92	20/06/2005	13,10	23,82	22/09/2005	13,01	23,91
292730075	728381	4387695	46,78	09/06/2005	30,20	16,58	27/09/2005	30,61	16,17
292730096	734425	4391600	6,58	09/06/2005	7,60	-1,02	22/09/2005	8,43	-1,85
292740018	735050	4392925	15,57	20/6/2005	15,30	0,27	27/09/2005	15,41	0,16
292670012	731604	4396215	72,39	20/06/2005	42,00	30,39			
292640043	740680	4404215	2,00	14/06/2005	0,00	2,00			

Además, en el Plano 2E1 se muestra la situación piezométrica detectada en el mes de septiembre de 2005.

De la comparación del Plano 2E de la memoria, para Junio de 2001, y del Plano 2E1 del anexo, para Septiembre de 2005, se desprende que:

- Se mantiene la existencia de un flujo subterráneo principal en la masa con dirección NW-SE y sentido hacia mar procedente de los acuíferos situados en las sierras interiores.

- En el sector más Noroccidental, la piezometría mostrada en ambos planos es relativamente similar si bien, a medida que se consideran áreas cada vez más orientales de dicho sector, la diferencia entre las dos piezometrías es, cada vez más importante (hasta 6-7 m. al Sur de Almenara).
- La piezometría obtenida en la mitad oriental de la masa en Septiembre de 2005 se sitúa, dependiendo de las zonas, entre 4 y 1 m. por debajo de la registrada en Junio de 2001. En esta situación podrían haber influido una serie de circunstancias: **a)** el verano del año 2005 fue uno de los más secos de los últimos 40 años, **b)** el Plano 2E se realizó a principios de la estación más seca mientras que el Plano 2E1 se elaboró a finales de la misma y **c)** no se tiene información detallada sobre los volúmenes de recursos hídricos extraídos de la plana mediante bombeos y canales de drenaje, aunque es posible que los primeros hayan podido incrementarse sensiblemente para intentar paliar la fuerte sequía sufrida en el verano de 2005.

Comparando las piezometrías medidas por IGME-TEYGE, S.A. en los meses de Junio y Septiembre de 2005 puede comprobarse que:

- La mayoría de los puntos de control presentaban una menor piezometría en Septiembre, hecho lógico por tratarse del final del periodo estival.
- Sin embargo, existen algunas captaciones donde la piezometría se mantuvo muy similar en ambas fechas, o incluso, aumentaron ligeramente en Septiembre; esto ocurrió en los puntos 292670004,

292680080, 292680137 y 292730046. Dicha circunstancia podría ser debida a la que los citados puntos de agua reciban aportes de recursos hídricos, de forma más o menos directa, desde los acuíferos que alimentan subterráneamente a la masa de aguas subterránea de la Plana de Sagunto.

3 COMPOSICIÓN QUÍMICA.

La misma red de puntos de agua utilizada para el control piezométrico sirvió también para el muestreo hidroquímico de la Plana de Sagunto realizado por el IGME-TEYGE, S.A. en los meses de Junio y Septiembre de 2005. En las tablas adjuntas se presentan los valores obtenidos en ambas campañas; el valor de la DQO y de la concentración de iones se indica en mg/l y el de la conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$:

MUESTRAS TOMADAS ENTRE EL 9 Y EL 20 DE JUNIO DE 2005.															
CÓDIGO	DQO	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	Na	Mg	Ca	K	Ph	Cond.	NO ₂	NH ₄	P ₂ O ₅	SiO ₂
292670004	1,6	43	512	228	140	35	68	200	2	7,7	1279	0,00	0,00	0,00	12,1
292670066	1,5	75	528	244	96	35	74	204	3	7,8	1362	0,30	0,00	0,00	12,4
292680001	2,1	168	402	262	100	52	68	204	3	7,7	1425	0,08	0,26	0,20	11,2
292680022	2,0	81	760	276	130	46	85	292	3	7,6	1665	0,73	0,00	0,00	11,1
292680080	2,1	348	786	286	220	112	136	332	4	7,7	2994	0,00	0,00	0,08	12,9
292680083	1,6	360	810	260	320	96	160	348	4	7,6	3194	0,40	0,00	0,00	15,3
292680088	1,3	82	710	244	320	41	100	306	4	7,8	1784	0,00	0,00	0,00	12,5
292680102	1,4	60	568	236	210	33	74	246	2	7,7	1450	0,00	0,00	0,00	11,3
292680103	1,3	376	710	210	340	55	160	344	3	6,8	2924	0,42	0,00	0,11	13,9
292680109	1,3	203	526	260	140	102	77	224	4	7,6	1690	0,00	0,00	0,00	10,6
292680123	1,0	111	550	247	120	52	76	220	4	7,8	1408	0,00	0,00	0,00	11,7
292680137	1,6	79	618	176	170	58	72	222	9	7,5	1465	0,00	0,00	0,00	7,4
292730019	1,4	284	580	271	380	166	103	266	4	7,7	2874	0,08	0,00	0,10	11,2
292730022	1,4	212	442	261	310	121	92	208	4	7,5	2244	0,00	0,00	0,00	12,9
292730028	1,4	177	570	294	150	114	82	218	8	7,6	1790	0,00	0,00	0,00	12,9
292730031	1,4	251	766	276	320	138	136	274	8	7,4	2944	0,00	0,00	0,09	19,6
292730037	1,7	222	544	243	200	90	92	244	4	7,8	2304	0,00	0,00	0,00	7,4
292730046	1,8	440	690	336	400	224	170	272	9	7,4	3534	0,32	0,00	0,00	20,3
292730075	1,5	203	430	234	410	120	89	228	4	7,5	2404	0,50	0,00	2,30	11,4
292730096	1,4	280	552	322	150	137	94	236	11	7,6	2464	0,20	0,00	0,11	17,1
292730098	1,4	85	416	239	92	42	59	182	3	7,6	1240	0,20	0,00	0,00	9,0
292740018	1,6	456	880	257	340	131	180	374	4	7,4	3494	0,79	0,00	0,00	13,4
292670012	2,6	39	412	248	88	17	58	180	2	7,8	1163	0,00	0,00	0,00	10,0

MUESTRAS TOMADAS ENTRE EL 21 Y EL 27 DE SEPTIEMBRE DE 2005.															
CÓDIGO	DQO	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	Na	Mg	Ca	K	Ph	Cond.	NO ₂	NH ₄	P ₂ O ₅	SiO ₂
292640017	0,7	36	366	214	30	27	44	160	2	7,5	1048	0,11	0,00	0,17	9,2
292670004	0,6	46	470	237	148	35	67	190	2	7,6	1283	0,00	0,00	0,00	11,9
292670066	0,8	143	608	235	152	51	98	228	4	7,4	1595	0,07	0,00	0,00	11,8
292680001	0,9	213	396	255	120	81	81	192	3	7,5	1662	0,00	0,00	0,00	10,9
292680022	0,9	80	822	274	136	47	101	285	2	7,4	1730	0,00	0,00	0,00	11,1
292680080	1,1	345	640	280	250	124	120	297	3	7,4	3114	0,35	0,00	0,10	12,7
292680083	1,0	460	660	254	390	127	147	353	3	7,4	3674	0,08	0,00	0,00	15,6
292680088	0,8	80	650	259	264	38	99	262	3	7,3	1782	0,00	0,00	0,00	12,2
292680102	0,7	56	566	229	196	31	77	228	2	7,5	1479	0,00	0,00	0,00	11,1
292680103	0,9	146	730	235	410	45	130	311	3	7,4	3034	0,00	0,00	0,00	13,7
292680109	0,9	218	496	258	188	85	89	234	4	7,4	1908	0,00	0,00	0,00	10,4
292680123	1,0	234	492	246	120	102	85	208	4	7,5	1820	0,00	0,00	0,00	11,3
292680137	1,3	85	588	428	26	49	77	251	8	7,4	1590	0,00	0,00	0,24	13,2
292730019	1,0	217	620	260	360	141	111	240	7	7,7	2784	0,00	0,00	0,00	11,2
292730022	0,6	183	340	256	290	97	90	183	4	7,5	1810	0,23	0,00	0,00	13,1
292730028	1,2	195	605	305	123	110	90	227	9	7,5	1853	0,46	0,00	0,00	12,5
292730031	1,0	202	736	307	310	118	141	249	7	7,5	2784	0,07	0,00	0,00	20,3
292730037	1,6	850	660	257	390	254	198	394	6	7,4	4814	0,72	0,00	0,00	14,7
292730046	1,2	454	650	324	430	217	153	289	8	7,5	3614	0,06	0,00	0,00	18,8
292730075	1,7	199	396	234	300	116	83	198	4	7,2	1,912	0,21	0,29	2,70	11,0
292730096	0,9	280	544	350	124	142	101	218	11	7,6	2644	0,00	0,00	0,00	18,0
292730098	1,0	122	396	257	84	55	59	189	4	7,5	1376	0,00	0,00	0,10	9,1
292740018	0,9	442	717	255	300	130	149	341	4	7,3	3494	0,00	0,00	0,00	13,7

De la comparación de los valores resultantes a raíz del análisis de las muestras de aguas subterráneas procedentes de las dos campañas realizadas por el IGME-TEYGE, S.A. en los meses de Junio y Septiembre de 2005, se puede apreciar como, en los puntos de control considerados, la media de la concentración de los iones sulfato y calcio, además de la de Ph y de la de DQO, es mayor en las muestras tomadas en el mes de Junio que en el de Septiembre; mientras que sucede lo contrario con los iones cloruro, bicarbonato, sodio y magnesio, así como con la conductividad; resultan muy similares los valores de nitrato, nitrito, fosfato, potasio y amonio, además del de sílice, encontrados en las muestras recogidas en ambas fechas.

En los siguientes apartados que constituyen este capítulo se analizarán con mayor detalle algunos de los principales parámetros hidroquímicos.

3.1 Diagramas de Stiff modificado.

En el Plano 7A1 se han representado junto a cada punto de agua perteneciente a la red de control su correspondiente diagrama de Stiff modificado elaborado a partir de muestreo realizado en el mes de Septiembre de 2005; la situación resultante se ha comparado con la obtenida en el Plano 7A de la memoria, la cual reflejaba el estado de la masa en Mayo de 2000:

- En el sector más Noroccidental de la plana, tan sólo puede apreciarse en las aguas subterráneas un cierto enriquecimiento en ion magnesio en el entorno del punto de control 292670004 en Septiembre de 2005 respecto a Mayo de 2000. El resto de los iones implicados en este tipo de diagramas presentaron concentraciones relativamente similares en ambas fechas.
- Sin embargo, la zona localizada al Oeste de la población de Canet de Berenguer, representada hidroquímicamente por el punto de control (292680001), parece haber experimentado una sensible disminución de la mineralización general de sus aguas subterráneas en los últimos cinco años.
- Los puntos 292730037 y 292730098, localizados al Sur de la población de Sagunto, considerados en el Plano 7A1, en Septiembre de 2005, parecen mostrar sendas composiciones extremas entre las que se encuentra la composición medida, en Mayo de 2000, en el punto 292730036 situado, así mismo, entre los dos puntos anteriores. Esta circunstancia se interpreta como una cierta constancia en la composición química de las aguas subterráneas en este sector.

- Al Sur de la población de Puçol se encuentra el punto de la red de control 292730022, el cual muestra también una sensible disminución de su mineralización general en los últimos cinco años.

Existen muy pocos puntos de control donde comparar las situaciones hidroquímicas registradas en Mayo de 2000 y Septiembre de 2005, si bien parece confirmarse: **a)** una estabilidad en los bordes occidentales de la plana, donde la influencia de los aportes subterráneos procedentes de los acuíferos presentes en las sierras interiores es mayor y **b)** una sensible disminución de la mineralización general en las zonas interiores de la plana.

En el Plano 7A1 del anexo, Septiembre de 2005, puede intuirse un aumento general de la mineralización de las aguas subterráneas a medida que avanzan hacia el sector oriental de la plana si bien, existen dos puntos de agua 292730037 y 292730046, localizados al Sur de la población de Sagunto y cerca del límite occidental de la masa, con un relativo elevado grado de mineralización que podría ser indicador de un excesivo grado de explotación local.

3.2 Cloruros e intrusión marina.

Comparando el Plano 7B1B de la memoria, elaborado para Mayo de 2001, y el Plano 7B1B1 presentado en este anexo, realizado para Septiembre de 2005, puede comprobarse como:

- En la mayor parte de la Plana de Sagunto se ha experimentado una reducción en la concentración del ion cloruro en sus aguas subterráneas en los últimos cuatro años.

- Parece haberse producido una disminución del volumen bombeado cerca de la costa, lo que habría mejorado la calidad química en la franja litoral, en detrimento de zonas interiores localizadas al Sur y al Este de la población de Sagunto en las que se habría aumentado la explotación y donde las concentraciones del ion cloruro han aumentado, incluso de forma importante en la primera de las zonas citadas.
- La superficie de la plana afectada por el proceso de intrusión marina, concentración del ion cloruro superior a 250 mg/l, se ha visto sensiblemente reducida en los últimos cuatro años, pasando del 50,5 al 34,65 %. Según la clasificación de intrusiones marinas presentada en la memoria, atendiendo a la porción de la superficie de la masa afectada por una concentración en ion cloruro superior a 250 mg/l, un 33 % de superficie de la masa afectada marca el límite entre una intrusión general y zonal por lo que, si bien en Septiembre de 2005 aún se tenía en la Plana de Sagunto una intrusión de tipo general, es de esperar que de seguir esta tendencia en poco tiempo dicha clasificación deba considerarse como zonal.

De forma similar, comparando el Plano 7B1C de la memoria, elaborado para Mayo de 2001, y el Plano 7B1C1 presentado en este anexo, realizado para Septiembre de 2005, puede comprobarse como la superficie de la masa afectada por un proceso de intrusión moderada, concentración en ion cloruro comprendida entre el 500 y 1000 mg/l, sólo ha descendido del 4 al 3,75 % en los últimos cuatro años, mientras que la superficie considerada como sometida a intrusión baja, concentración en ion cloruro comprendida entre el 250 y 500 mg/l, se ha visto disminuida del 46,4 al 30,9 % en ese mismo periodo.

3.3 Conductividad.

Del mismo modo, de la comparación de los Planos 7B2 de la memoria y del Plano 7B21 adjunto, realizados para mayo de 2001 y septiembre de 2005 respectivamente, se desprende que:

- En el tramo más septentrional de la plana, entre el límite Norte de la masa y la transversal paralela a dicho límite que pasa por el Sur de la población de Faura, se ha detectado, en el año 2005, una disminución de la conductividad en el sector occidental y un cierto aumento en el oriental respecto al año 2001.
- En el tramo situado inmediatamente al Sur del anterior, el cual se extiende hasta el cauce del río Palancia, se puede observar, salvo en el margen más occidental más influenciado por la recarga subterránea de los acuíferos situados en las sierras interiores, un aumento en el año 2005 respecto al 2001 del valor de la conductividad, pasando en los últimos cuatro años de un máximo próximo a los 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a otro de 3600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y que se correspondería con el moderado avance de la intrusión detectado en el Plano 7B1C1 del anexo respecto al 7B1C de la memoria en la margen izquierda del río Palancia.
- En el siguiente tramo diferenciado, con el límite Sur situado en una transversal que pasaría justo por el Norte de la población de Puçol, se aprecia como el valor de la conductividad ha aumentado sensiblemente en los últimos cuatro años, pasando de 3000 a 4400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en el sector localizado al Sur de la población de Sagunto (en donde se ha detectado la mayor intensidad de intrusión mostrada en el Plano 7B1C1), mientras que en la costa el valor del citado

parámetro se ha reducido de forma importante en el mismo tiempo; es posible que: **a)** la menor calidad de las aguas subterráneas de la franja litoral haya motivado una menor explotación en ella, lo que ha conllevado una mejora de la calidad o **b)** la falta de puntos de control en dicho lugar esté enmascarando la realidad.

- En el tramo más meridional de la plana se carece de información suficiente para extraer conclusiones, aunque parece que la situación no ha variado en exceso en los últimos años.

3.4 Nitratos.

El Plano 7B31 muestra el mapa de distribución de los nitratos en las aguas subterráneas de la Plana de Sagunto para Septiembre de 2005. Considerando además los, tan sólo, cuatro puntos de control disponibles en el Plano 7B3 de la memoria, realizado para ilustrar la situación en Mayo de 2000, se extraen las siguientes conclusiones:

- En el entorno del punto de control 29267004, sector más Noroccidental de la Plana de Sagunto, se ha detectado un importante aumento de la concentración de nitratos en los últimos cinco años, pasando de 54 a 148 mg/l, lo que podría ser indicador de un aumento de la actividad agrícola en esta área.
- Sin embargo, la zona localizada al Oeste de la población de Canet de Berenguer, representada hidroquímicamente por el punto de control 292680001, ha experimentado una sensible disminución en la concentración de nitratos, habiendo pasado en los últimos cinco años de valores de 230 a 120 mg/l; esta circunstancia podría ser indicadora

de una disminución de la actividad agrícola local sustituida por un avance del casco urbano y/o de la actividad industrial.

- Justo entre los puntos 292730037 y 292730098, localizados al Sur de la población de Sagunto, considerados en el Plano 7B31 para Mayo de 2005, se mostraba una concentración en nitratos equivalente a unos 260 mg/l, mayor que la encontrada en el mismo punto, 292730036 del Plano 7B3, en Mayo de 2000 y que era de 220 mg/l; posiblemente, la progresiva intensificación de las actividades agrícolas locales explique esta circunstancia.
- Al Sur de la población de Puçol se encuentra el punto de la red de control 292730022, el cual ha presentado una sensible disminución de la concentración de nitratos de sus recursos hídricos en los últimos cinco años, pasando de 450 a 290 mg/l; nuevamente el avance del casco urbano de la población, en detrimento de la actividad agrícola local podría justificar este comportamiento.

La Plana de Sagunto debe ser clasificada como una masa altamente contaminada por nitratos de origen agrícola ya que, en la actualidad, es casi imposible encontrar puntos de agua con concentraciones en nitrato inferiores a los 50 mg/l considerados como límite superior en la calidad del agua que debe ser destinada a consumo humano.

3.5 Sulfatos.

En el Plano 7B41 se muestra el mapa de distribución de los sulfatos en las aguas subterráneas de la Plana de Sagunto para Septiembre de 2005. Considerando además los cuatro puntos de control disponibles en el Plano 7B4

de la memoria, realizado para ilustrar la situación en Mayo de 2000, se extraen las siguientes conclusiones:

- En el entorno del punto de control 29267004, sector más Noroccidental de la Plana de Sagunto, se ha detectado un aumento de la concentración de sulfatos en los últimos cinco años, pasando de 413 a 470 mg/l, coherente con el también citado aumento de los nitratos, lo que podría confirmar el aumento de la actividad agrícola en esta área.
- En la zona localizada al Oeste de la población de Canet de Berenguer, representada hidroquímicamente por el punto de control 292680001, se ha experimentado una importante disminución en la concentración de sulfatos, habiendo pasado en los últimos cinco años de valores de 568 a 396 mg/l; esta circunstancia, junto con la comentada disminución de los nitratos, podría ser indicadora de una disminución de la actividad agrícola local sustituida por un avance del casco urbano y/o de la actividad industrial.
- Entre los puntos 292730037 y 292730098, localizados al Sur de la población de Sagunto, considerados en el Plano 7B41 para Mayo de 2005, se mostraba una concentración en sulfatos equivalente a unos 520 mg/l, menor que la encontrada en el mismo punto, 292730036 del Plano 7B4, en Mayo de 2000 y que era de 576 mg/l; se recuerda que en ese mismo punto el valor de la concentración de nitratos había aumentado considerablemente. De esta manera, aunque la afección debida a una actividad agrícola parece evidente, la influencia de los compuestos sulfatados se ha visto reducida en los últimos años.

- Al Sur de la población de Puçol se encuentra el punto de la red de control 292730022 que, al igual que en el caso de la concentración de nitratos, ha presentado una importante disminución de la cantidad de los sulfatos presentes en sus recursos hídricos locales en los últimos cinco años, pasando de 784 a 340 mg/l; nuevamente el avance del casco urbano de la población, en detrimento de la actividad agrícola local podría justificar este comportamiento.

La Plana de Sagunto debe ser clasificada como una masa altamente contaminada por sulfatos de origen agrícola ya que, en la actualidad, es casi imposible encontrar puntos de agua con concentraciones en nitrato inferiores a los 250 mg/l considerados como límite superior en la calidad del agua que debe ser destinada a consumo humano.

3.6 Bicarbonatos.

Del mismo modo que en el caso de los nitratos y los sulfatos, en el Plano 7B51 se muestra el mapa de distribución de los bicarbonatos en las aguas subterráneas de la Plana de Sagunto para Septiembre de 2005. Considerando también los cuatro puntos de control disponibles en el Plano 7B5 de la memoria, realizado para ilustrar la situación en Mayo de 2000, se extraen las siguientes conclusiones:

- En el entorno del punto de control 29267004, sector más Noroccidental de la Plana de Sagunto, se ha detectado una disminución de la concentración de bicarbonatos en los últimos cinco años, pasando de 260 a 237 mg/l mientras que, como ya se había comentado, las concentraciones de nitratos y sulfatos aumentaron.

- El área localizada al Oeste de la población de Canet de Berenguer, representada hidroquímicamente por el punto de control 292680001, ha experimentado una constancia en la concentración de bicarbonatos, habiendo pasado en los últimos cinco años de valores de 258 a 255 mg/l. Se recuerda que, en este mismo punto, tuvo lugar una importante disminución de las concentraciones de los nitratos y los sulfatos.
- Al Sur de la población de Sagunto, entre los puntos 292730037 y 292730098 considerados en el Plano 7B51 para Mayo de 2005, se mostraba una concentración en bicarbonatos próxima a los 255 mg/l, relativamente parecida a la encontrada en el mismo punto, 292730036 del Plano 7B5, en Mayo de 2000 y que era de 264 mg/l; se recuerda que en ese mismo punto el valor de la concentración de nitratos había aumentado de forma considerable, mientras que la de los sulfatos se había reducido aunque en menor proporción.
- El punto de la red de control 292730022, situado al Sur de la población de Puçol, ha presentado, en los últimos cinco años, sólo un cierto descenso en el valor de concentración de los bicarbonatos presentes en sus recursos hídricos locales, pasando de 263 a 256 mg/l; en este punto se había detectado una importante reducción del valor de la concentración tanto de los nitratos como de los sulfatos.

Parece, entonces, que la evolución en la concentración de los bicarbonatos se debe más a procesos intrínsecos de la masa de agua subterránea de la Plana de Sagunto y de los acuíferos que la rodean que a procesos relacionados con

las actividades antrópicas locales que, por el contrario, sí afectan a las concentraciones de nitratos y de sulfatos.

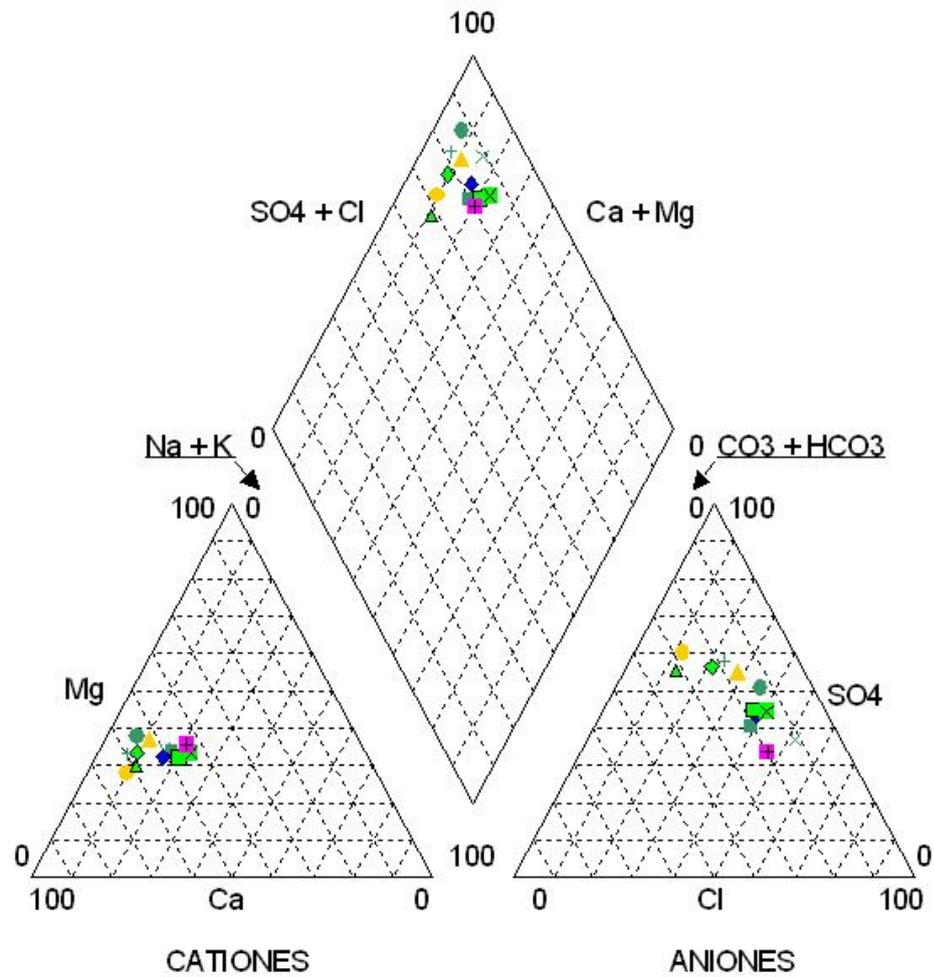
3.7 Facies hidroquímicas.

En las Figura nº1 y 2 se presentan los diagramas de Piper relativos a las muestras tomadas en el mes de Septiembre de 2005 por el IGME-TEYGE, S.A., mientras que en el Plano 7B61 se muestra el mapa de distribución de las facies hidroquímicas reconocidas también en ese mismo periodo. Considerando también los puntos de control comunes disponibles en el Plano 7B6 de la memoria, realizado para ilustrar la situación en Mayo de 2000, se extraen las siguientes conclusiones:

- En el entorno del punto de control 29267004, sector más Noroccidental de la Plana de Sagunto, la facies hidroquímica encontrada tanto en Mayo de 2000 como en Septiembre de 2005 es la sulfatada cálcica sin que se haya apreciado ninguna variación en este sentido.
- En el área localizada al Oeste de la población de Canet de Berenguer, representada hidroquímicamente por el punto de control 292680001, tampoco se ha detectado cambio alguno en el tipo de facies entre Mayo de 2000 y Septiembre de 2005 siendo, en ambos casos, clorurada-sulfatada cálcico-magnésica.
- Al Sur de la población de Sagunto, los puntos 292730037 y 292730098 considerados en el Plano 7B61 para Mayo de 2005, mostraban, respectivamente, facies hidroquímicas clorurada cálcico-magnésica y sulfatada-clorurada cálcica, relativamente parecidas a la

DIAGRAMA DE PIPER

Facies hidroquímica (Septiembre 2005)

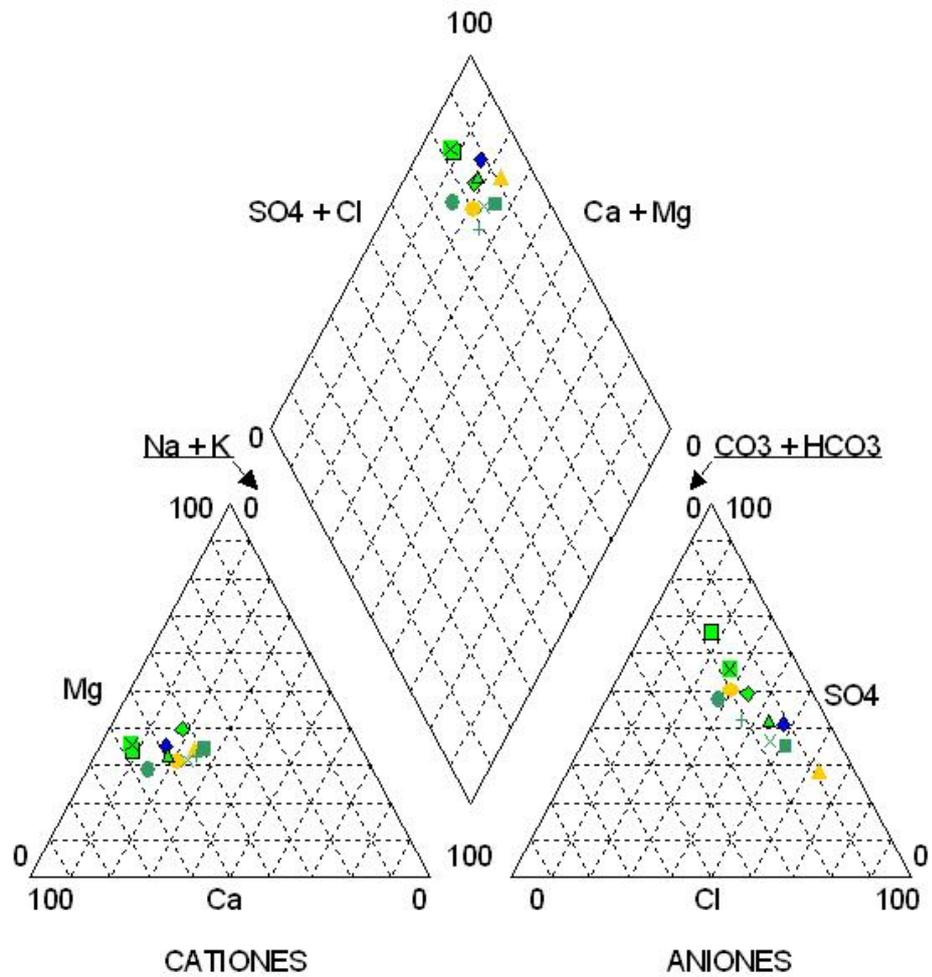


● 292640017	◆ 292670004	▲ 292670066	■ 292680001
× 292680083	+ 292680102	● 292680103	◆ 292680109
■ 292680123	▲ 292680137	■ 292730019	■ 292730022

Fig. n°1.-Facies hidroquímica de las muestras analizadas en Septiembre de 2005.

DIAGRAMA DE PIPER

Facies hidroquímica (Septiembre 2005)



● 292730028	◆ 292730031	▲ 292730037	■ 292730046
× 292730075	+ 292730096	● 292730098	◆ 292740018
■ 292680022	▲ 292680080	■ 292680088	

Fig. n°2.-Facies hidroquímica de las muestras analizadas en Septiembre de 2005.

facies encontrada en punto 292730036 situado en una posición intermedia entre los anteriores, ver Plano 7B5 de la memoria previa, que era clorurada-sulfatada cálcico-magnésica en Mayo de 2000. Por tanto, parece confirmarse la poca variación de facies hidroquímica experimentada en la zona en los últimos cinco años.

- El punto de la red de control 292730022, situado al Sur de la población de Puçol, no ha presentado, entre los años 2000 y 2005 modificación alguna en su facies, habiéndose mantenido siempre en clorurada-sulfatada cálcico-magnésica.

Parece, entonces, ser evidente la poca variación sufrida en las facies hidroquímicas de las aguas subterráneas de la Plana de Sagunto en los últimos cinco años. También es cierto que el escaso volumen de información con el que poder comparar la situación que tuvo lugar en el año 2000 podría estar enmascarando la realidad.

En la actualidad, ver Plano 7B61 del anexo, puede comprobarse como gran parte de la mitad septentrional de la plana presenta aguas subterráneas con facies sulfatada cálcica, mientras que el resto de la masa presenta una mayor variación aunque con términos químicamente bastante similares entre sí: aguas sulfatadas y/o cloruradas cálcico y/o magnésicas.

4 CONCLUSIONES.

De la comparación de las situaciones hidrodinámicas e hidroquímicas tenidas en cuenta en este anexo, Mayo de 2000, ó Mayo de 2001 según el parámetro considerado, y verano de 2005, se deduce que:

- Se mantiene en este periodo la existencia de un flujo principal en la masa con dirección NW-SE y sentido hacia mar procedente de los acuíferos situados en las sierras interiores.
- En el sector más Noroccidental, la piezometría mostrada en el Plano 2E de la memoria y en el Plano 2E1 del anexo es relativamente similar si bien, a medida que se consideran áreas cada vez más orientales de dicho sector, la diferencia entre las dos piezometrías es, cada vez más importante (hasta 6-7 m. al Sur de Almenara).
- La piezometría obtenida en la mitad oriental de la masa en Septiembre de 2005 se sitúa, dependiendo de las zonas, entre 4 y 1 m. por debajo de la registrada en Junio de 2001.
- La mayoría de los puntos de control presentaban una menor piezometría en Septiembre de 2005 que en Junio de ese mismo año, hecho lógico por tratarse del final del periodo estival. Sin embargo, existen algunas captaciones donde la piezometría se mantuvo muy similar en ambas fechas, o incluso, aumentaron ligeramente en Septiembre; esto ocurrió en los puntos 292670004, 292680080, 292680137 y 292730046. Dicha circunstancia podría ser debida a la que los citados puntos de agua reciban aportes de recursos hídricos,

de forma más o menos directa, desde los acuíferos que alimentan subterráneamente a la masa de aguas subterránea de la Plana de Sagunto.

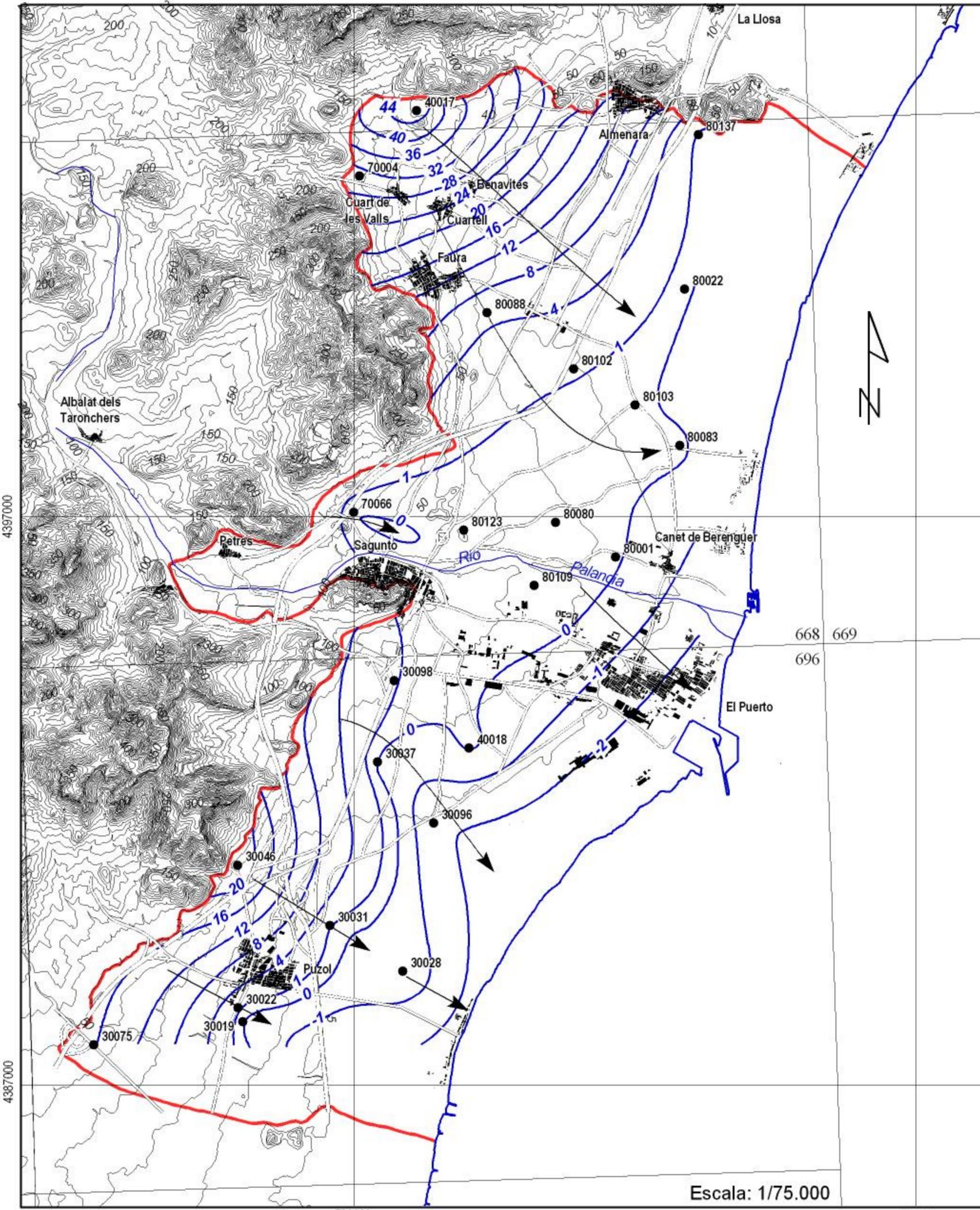
- De la comparación de los valores resultantes a raíz del análisis de las muestras de aguas subterráneas procedentes de las dos campañas realizadas por el IGME-TEYGE, S.A. en los meses de Junio y Septiembre de 2005, se puede apreciar como, en los puntos de control considerados, la media de la concentración de los iones sulfato y calcio, además de la de Ph y de la de DQO, es mayor en las muestras tomadas en el mes de Junio que en el de Septiembre; mientras que sucede lo contrario con los iones cloruro, bicarbonato, sodio y magnesio, así como con la conductividad; resultan muy similares los valores de nitrato, nitrito, fosfato, potasio y amonio, además del de sílice, encontrados en las muestras recogidas en ambas fechas.
- Existen muy pocos puntos de control donde comparar las situaciones hidroquímicas registradas en Mayo de 2000 y Septiembre de 2005, si bien parece confirmarse: **a)** una estabilidad en los bordes occidentales de la plana, donde la influencia de los aportes subterráneos procedentes de los acuíferos presentes en las sierras interiores es mayor y **b)** una sensible disminución de la mineralización general en las zonas interiores de la plana.
- La mineralización general actual de las aguas subterráneas tiende a aumentar a medida que avanzan hacia el sector oriental de la plana si bien, existen dos puntos de agua 292730037 y 292730046,

localizados al Sur de la población de Sagunto y cerca del límite occidental de la masa, con un relativo elevado grado de mineralización que podría ser indicador de un excesivo grado de explotación local.

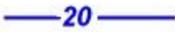
- En la mayor parte de la Plana de Sagunto se ha experimentado, en los últimos cuatro años, una reducción en la concentración del ion cloruro en sus aguas subterráneas. Parece haberse producido una disminución del volumen bombeado cerca de la costa, lo que habría mejorado la calidad química en la franja litoral, en detrimento de zonas interiores localizadas al Sur y al Este de la población de Sagunto en las que se habría aumentado la explotación y donde las concentraciones del ion cloruro han aumentado, incluso de forma importante en la primera de las zonas citadas.
- La superficie de la plana afectada por el proceso de intrusión marina, concentración del ion cloruro superior a 250 mg/l, se ha visto sensiblemente reducida en los últimos cuatro años, pasando del 50,5 al 34,65 %.
- La superficie de la masa afectada por un proceso de intrusión moderada, concentración en ion cloruro comprendida entre el 500 y 1000 mg/l, sólo ha descendido del 4 al 3,75 % en los últimos cuatro años, mientras que la superficie considerada como sometida a intrusión baja, concentración en ion cloruro comprendida entre el 250 y 500 mg/l, se ha visto disminuida del 46,4 al 30,9 % en ese mismo periodo.

- La concentración de nitratos parece seguir aumentando en las áreas donde la actividad agrícola es más o menos intensa, mientras que experimenta una importante reducción allí donde las actividades urbanas y/o industriales han avanzado. La concentración de los sulfatos tiende a una situación similar, aunque se ha detectado algún caso, punto de agua 292730036 del Plano 7B4 de la memoria, en el que el aumento de la concentración en nitratos no ha ido acompañado de un aumento de la concentración de los sulfatos; contrariamente a lo esperado en esta zona agrícola, dicho punto ha mostrado un cierto descenso en la concentración en sulfatos en los últimos cuatro años, aunque mostrando una clara influencia de las actividades agrícolas, unos 520 mg/l.
- La Plana de Sagunto debe ser clasificada como una masa altamente contaminada por nitratos y sulfatos de origen agrícola ya que, en la actualidad, es casi imposible encontrar puntos de agua con concentraciones en estos iones inferiores a las consideradas como límite superior en la calidad del agua que debe ser destinada a consumo humano.
- Parece que la evolución en la concentración de los bicarbonatos en los diferentes puntos de agua considerados, se debe más a procesos intrínsecos de la masa de agua subterránea de la Plana de Sagunto y de los acuíferos que la rodean que a procesos relacionados con las actividades antrópicas locales que, por el contrario, sí afectan a las concentraciones de los nitratos y de los sulfatos.

- Existe muy poca variación en las facies hidroquímicas de las aguas subterráneas de la Plana de Sagunto en los últimos cinco años. También es cierto que el escaso volumen de información con el que poder comparar la situación que tuvo lugar en Mayo de 2000 podría estar enmascarando la realidad.
- En la actualidad, puede comprobarse como gran parte de la mitad septentrional de la plana presenta aguas subterráneas con facies sulfatada cálcica, mientras que el resto de la masa presenta una mayor variación aunque con términos químicamente bastante similares entre sí: aguas sulfatadas y/o cloruradas cálcico y/o magnésicas.



LEYENDA

-  Isopieza de cota piezométrica (m s.n.m.)
-  Línea de flujo subterráneo
-  Puntos de agua considerados indicando su código

Trabajos para la aplicación de la D.M.A. en materia de aguas subterráneas.
 Caracterización adicional de la Plana de Sagunto. Convenio de Colaboración DGA-IGME

Plano 2E1.- Mapa piezométrico de la M.A.S. de la P. de Sagunto para septiembre de 2.005



MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE
 Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad
 Dirección General del Agua

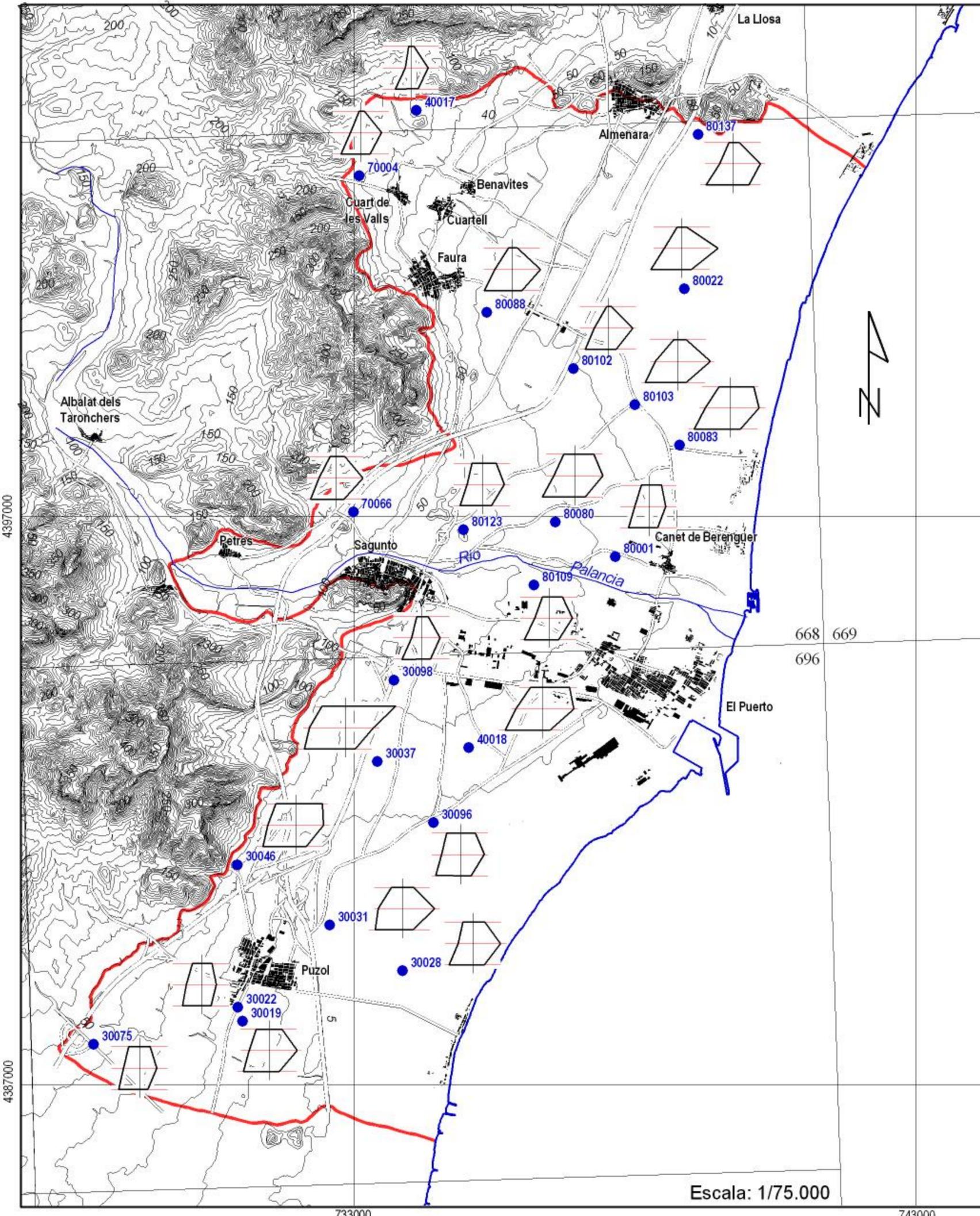


MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA
 Instituto Geológico y Minero de España

Escala: 1/75.000

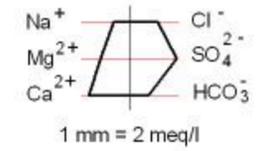
733000

743000



LEYENDA

80083 ● Puntos de agua considerados indicando su código



Trabajos para la aplicación de la D.M.A. en materia de aguas subterráneas.
 Caracterización adicional de la Plana de Sagunto. Convenio de Colaboración DGA-IGME

Plano 7A1.- Mapa de diagramas Stiff modificado de la M.A.S. de la P. de Sagunto para septiembre 2.005

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE
 Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad
 Dirección General del Agua

MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA
 Instituto Geológico y Minero de España

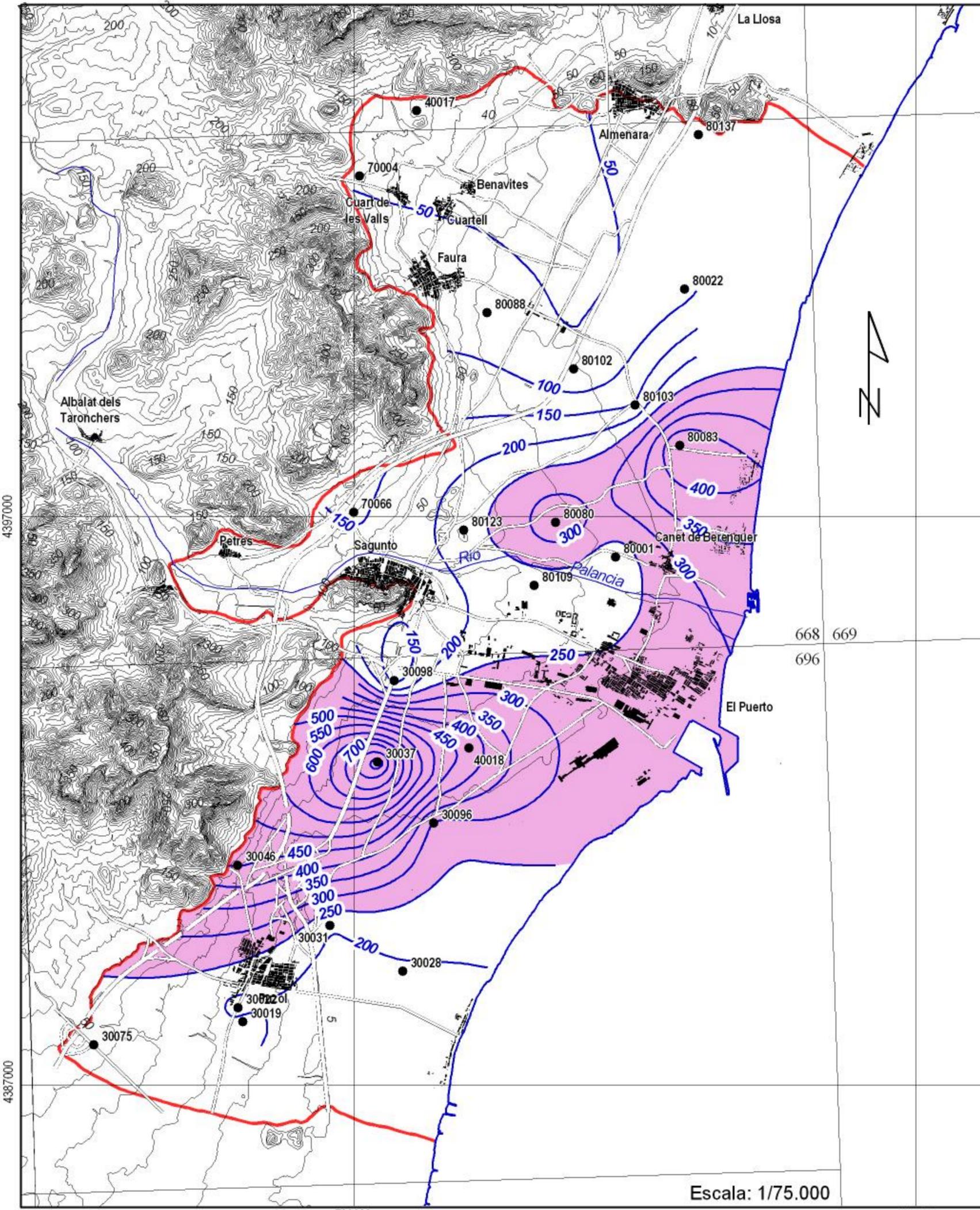
Escala: 1/75.000

4397000

4387000

733000

743000



LEYENDA

-  Isoconcentración de cloruros (mg/l)
-  Intrusión general (G) (34,65%)
-  Puntos de agua considerados indicando su código

Trabajos para la aplicación de la D.M.A. en materia de aguas subterráneas.
 Caracterización adicional de la Plana de Sagunto. Convenio de Colaboración DGA-IGME

Plano 7B1B1.- Tipo de intrusión según la superficie afectada sobre la M.A.S. de la P. de Sagunto para septiembre de 2.005



MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE
 Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad
 Dirección General del Agua



MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA
 Instituto Geológico y Minero de España

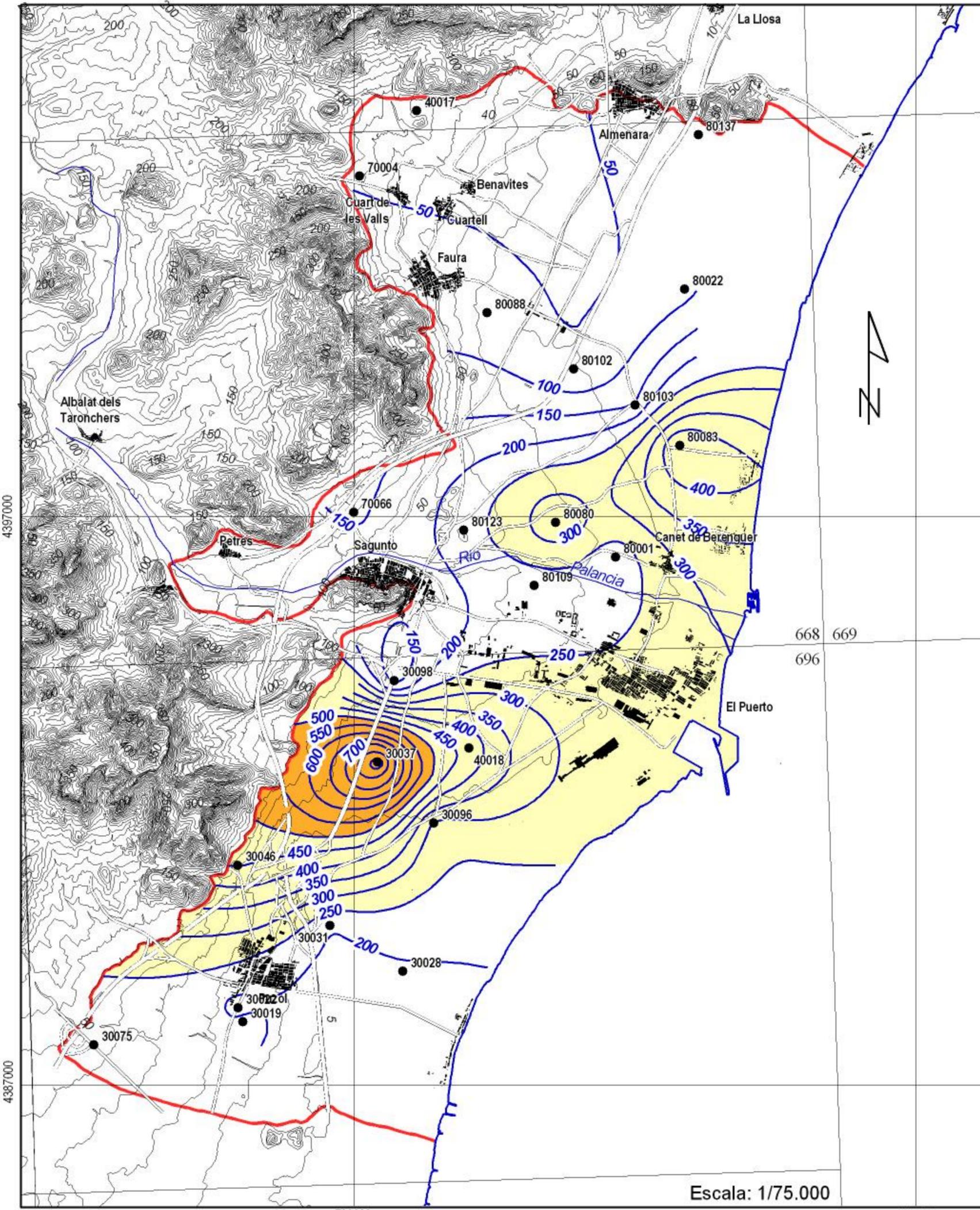
Escala: 1/75.000

4397000

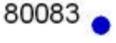
4387000

733000

743000



LEYENDA

-  Isoconcentración de cloruros (mg/l)
-  Intrusión baja (B) (46,4%)
-  Intrusión moderada (M) (4%)
-  Puntos de agua considerados indicando su código

Trabajos para la aplicación de la D.M.A. en materia de aguas subterráneas.
 Caracterización adicional de la Plana de Sagunto. Convenio de Colaboración DGA-IGME

Plano 7B1C1.- Tipo de intrusión según la intensidad de la afección sobre la M.A.S. de la P. de Sagunto para septiembre de 2.005



MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE
 Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad
 Dirección General del Agua



MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA
 Instituto Geológico y Minero de España

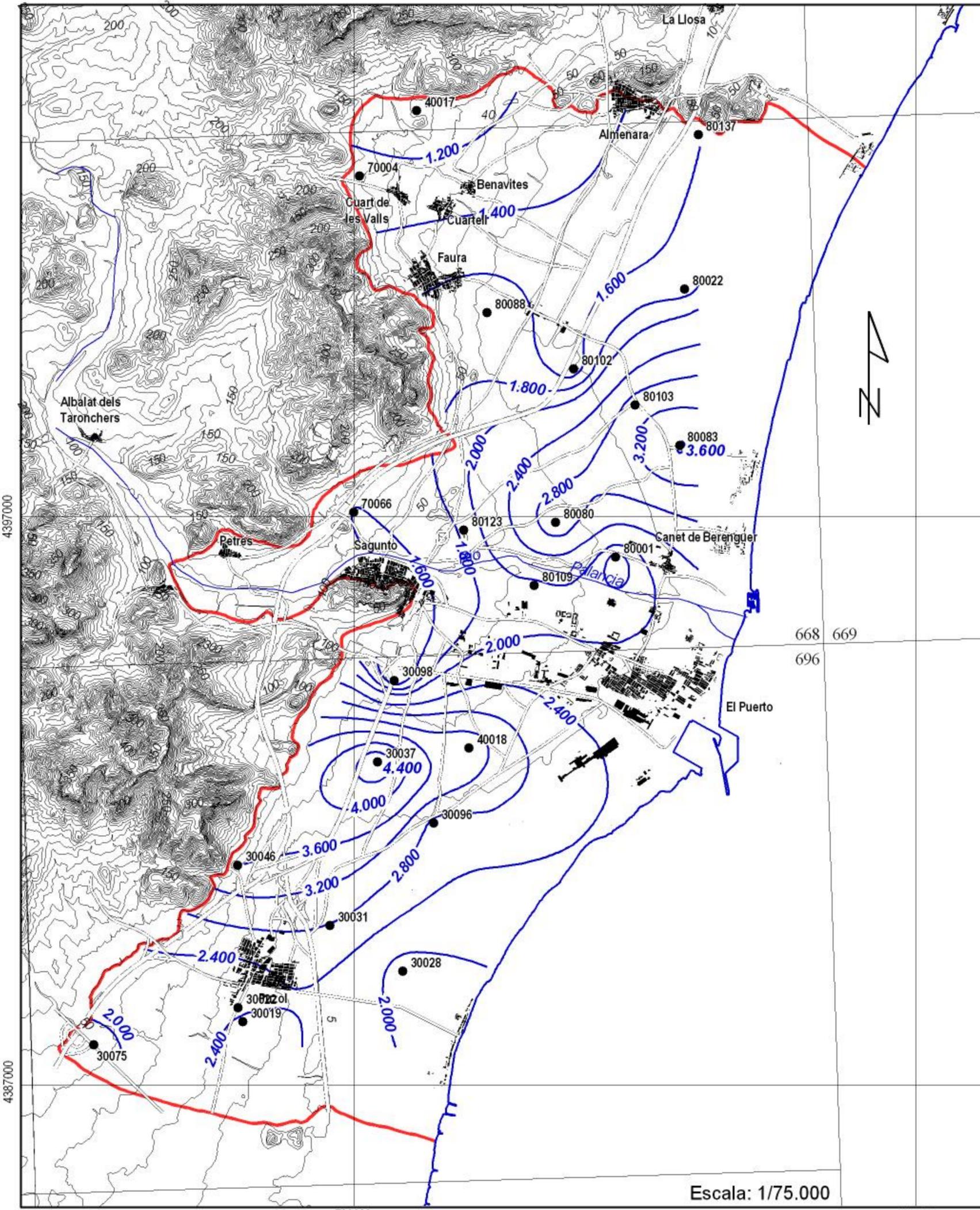
Escala: 1/75.000

4397000

4387000

733000

743000



Escala: 1/75.000

LEYENDA

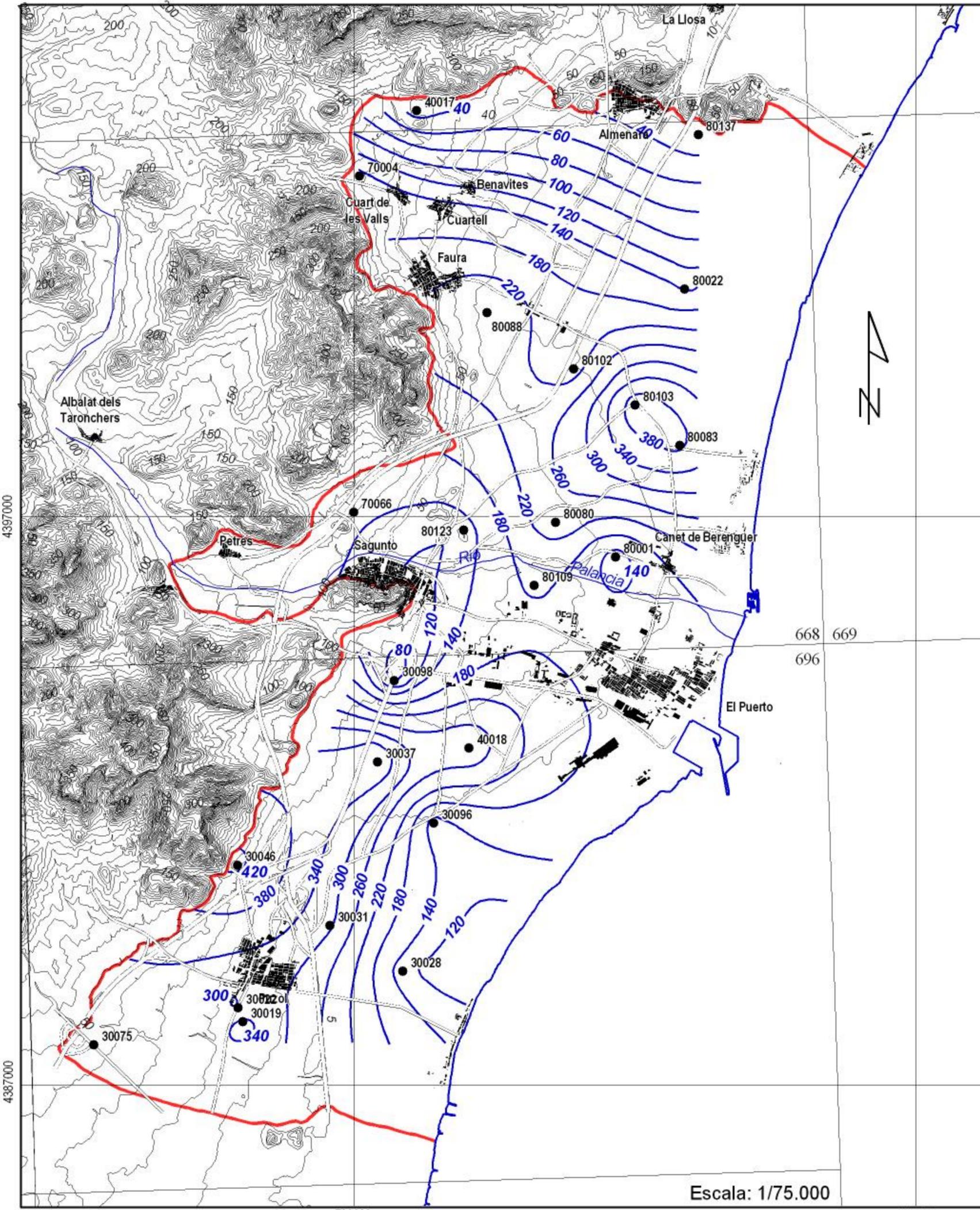
-  2000 Isoconductividades de ($\mu\text{S/cm}$)
-  80083 Puntos de agua considerados indicando su código

Trabajos para la aplicación de la D.M.A. en materia de aguas subterráneas.
 Caracterización adicional de la Plana de Sagunto. Convenio de Colaboración DGA-IGME

Plano 7B21.- Mapa de isoconductividades de la M.A.S. de la P. de Sagunto para septiembre de 2.005.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE
 Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad
 Dirección General del Agua

MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA
 Instituto Geológico y Minero de España



LEYENDA

- 200 — Isoconcentración de nitratos (mg/l)
- 80083 Puntos de agua considerados indicando su código

*Trabajos para la aplicación de la D.M.A. en materia de aguas subterráneas.
 Caracterización adicional de la Plana de Sagunto. Convenio de Colaboración DGA-IGME*

Plano 7B31.- Mapa de distribución de nitratos de la M.A.S. de la P. de Sagunto para septiembre de 2.005

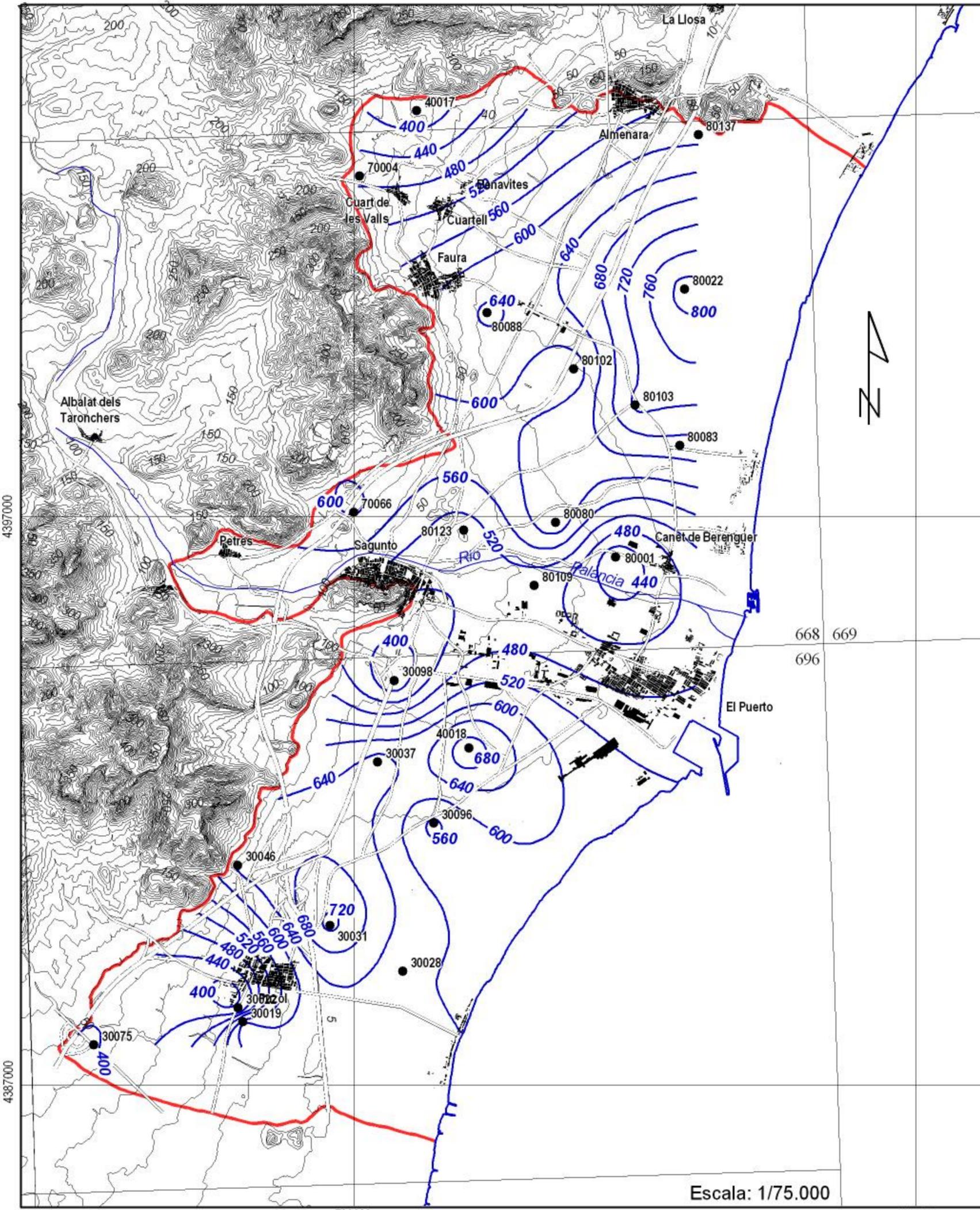
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE
 Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad
 Dirección General del Agua

MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA
 Instituto Geológico y Minero de España

Escala: 1/75.000

733000

743000



LEYENDA

-  Isoconcentración de sulfatos (mg/l)
-  Puntos de agua considerados indicando su código

*Trabajos para la aplicación de la D.M.A. en materia de aguas subterráneas.
 Caracterización adicional de la Plana de Sagunto. Convenio de Colaboración DGA-IGME*

Plano 7B41.- Mapa de distribución de sulfatos de la M.A.S. de la P. de Sagunto para septiembre de 2.005



MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE
 Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad
 Dirección General del Agua



MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA
 Instituto Geológico y Minero de España

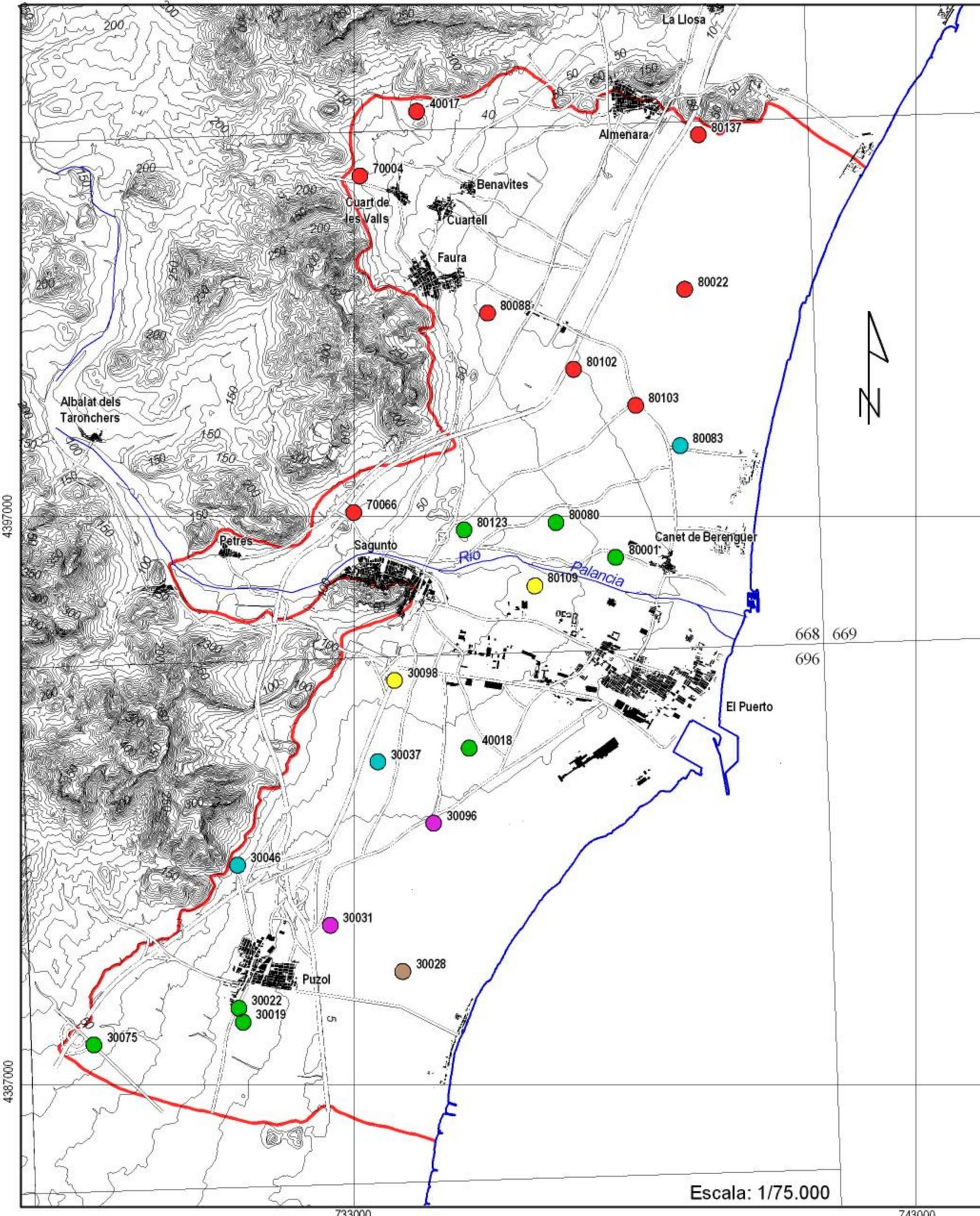
Escala: 1/75.000

4397000

4387000

733000

743000



LEYENDA

80083 Puntos de agua considerados indicando su código

Facies hidroquímicas

- Clorura-sulfatada cálcica
- Sulfatada cálcica
- Clorura-sulfatada cálcica-magnésica
- Clorura cálcico-magnésica
- Sulfatada-clorurada cálcica
- Clorura-sulfatada cálcica-magnésica
- Sulfatada cálcico-magnésica

Trabajos para la aplicación de la D.M.A. en materia de aguas subterráneas.
Caracterización adicional de la Plana de Sagunto. Convenio de Colaboración DGA-IGME

Plano 7B61.- Mapa de facies hidroquímicas de la M.A.S. de la P. de Sagunto para septiembre de 2.005

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE
 Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad
 Dirección General del Agua

MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA
 Instituto Geológico y Minero de España

Escala: 1/75.000

4397000

4387000

733000

743000

ANEXO II:

**MODELO MATEMÁTICO PREVIO DE LA MASA DE
AGUA SUBTERRÁNEA DE LA PLANA DE
SAGUNTO. (VALENCIA).**

Valencia, Diciembre de 2005.

Este informe ha sido realizado por el INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, actuando la sociedad TEYGE, S.A. como empresa consultora (232/04). En su elaboración ha participado el siguiente equipo técnico:

Dirección:

Bruno J. Ballesteros Navarro (INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA).

Equipo de trabajo:

Joaquín Barba-Romero Muñoz (TEYGE, S.A.).

José Oriol Navarro Odriozola (TEYGE, S.A.).

ÍNDICE.

1	OBJETIVOS DEL MODELO MATEMÁTICO ELABORADO.	5
2	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LA MASA DE AGUA SUPERFICIAL DE LA PLANA DE SAGUNTO.....	6
2.1.	DISCRETIZACIÓN TEMPORAL DEL MODELO.....	7
2.2.	DISCRETIZACIÓN ESPACIAL DEL MODELO. MALLA EMPLEADA.....	8
2.3.	TOPOGRAFÍA.....	9
2.4.	SUBSTRATO DEL ACUÍFERO.....	9
2.5.	PERMEABILIDAD Y COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO.....	10
2.6.	PIEZOMETRÍA INICIAL.....	10
2.7.	DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE BORDE.....	10
2.8.	INFILTRACIÓN DIRECTA SOBRE LOS MATERIALES PERMEABLES.....	14
2.9.	EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS.....	15
2.10.	CRITERIOS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	16
3	CONCLUSIONES.	20

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura nº1.- Malla considerada.

Figura nº2.- Mapa de isohipsas de cota de muro.

Figura nº3.- Mapa piezométrico según IGME (1986 c).

Figura nº4.- Niveles constantes.

Figura nº5.- Condición "River".

Figura nº6.- Infiltración.

Figura nº7.- Puntos de extracción.

Figura nº8.- Piezometría.

Figura nº9.- Flujos.

1 OBJETIVOS DEL MODELO MATEMÁTICO ELABORADO.

Uno de los objetivos principales que se espera conseguir con la elaboración del modelo matemático de flujo de un acuífero, es comprobar si el modelo conceptual que se tiene de éste es admisible desde un punto de vista hidrogeológico.

Una vez confirmado este aspecto, el modelo proporciona información adicional sobre balances hídricos y evolución del sistema bajo diferentes situaciones.

Para la realización del presente modelo, se ha procedido a la recopilación de la información existente sobre la masa de agua subterránea de la Plana de Sagunto lo que ha permitido desarrollar un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico relativamente completo de la misma, el cual ha sido descrito en la esta memoria.

2 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LA MASA DE AGUA SUPERFICIAL DE LA PLANA DE SAGUNTO.

Un modelo matemático de flujo subterráneo pretende obtener un valor de piezometría, a partir de la ecuación diferencial en derivadas parciales que describe el movimiento de un flujo monofásico de densidad constante de agua subterránea a través de un material poroso heterogéneo, anisótropo y saturado, de forma continua para cada una de las unidades (celdas de un mallado tridimensional) en las que se ha discretizado el sistema a simular, en función del tiempo (régimen transitorio).

Dicha ecuación diferencial es la siguiente:

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

Donde:

- x,y,z son las coordenadas cartesianas ortogonales alineadas según las direcciones principales del tensor conductividad hidráulica (ó permeabilidad), K_{ij} .
- h es el nivel piezométrico [L].
- W es el flujo de agua que entra/sale de cada celda [L/T].
- Ss es el coeficiente de almacenamiento específico del medio [1/L].
- t es el tiempo [T].

El coeficiente de almacenamiento y el tensor permeabilidad son funciones del espacio (x, y, z); mientras que h y W son funciones del espacio y del tiempo (x, y, z, t).

Una vez conocido el valor del h en función de (x, y, z y t) puede obtenerse la información adicional necesaria: velocidad y dirección del flujo, variación del almacenamiento, caudales que atraviesa cualquier superficie, etc.

Para la obtención del citado valor de piezometría se ha utilizado el programa MODFLOW-2.000, elaborado por el U. S. Geological Survey. Este programa simula el flujo subterráneo en tres dimensiones mediante el método numérico de las diferencias finitas. El software empleado para el desarrollo del modelo (entorno visual de trabajo), ha sido el paquete informático denominado Visual Modflow v.3.0.0.180 desarrollado por el Waterloo Hydrogeologic, Inc.

2.1. Discretización temporal del modelo.

Debido a que para la realización del presente modelo no se ha podido disponer de la evolución temporal de algunos de los términos que intervienen en el balance hídrico de la masa de agua subterránea de la Plana de Sagunto, principalmente funcionamiento de los canales de drenaje y régimen de explotación de los sondeos y pozos, se ha optado por presentar una simulación realizada en régimen permanente a partir de la introducción de datos hidrogeológicos medios recopilados entre los años 1948-1983.

En régimen permanente, el resultado del balance hídrico, considerado como la diferencia entre las entradas y las salidas de agua del sistema, tiene que ser igual a cero para un mismo intervalo. En esta situación no existe variación del nivel piezométrico ni, por tanto, del almacenamiento en las celdas que

constituyen el modelo; como consecuencia, el término de la derecha de la ecuación (1) es también igual a cero.

2.2. Discretización espacial del modelo. Malla empleada.

Para la elaboración del modelo numérico se ha procedido a discretizar el medio considerado según una malla regular de 40 filas y 31 columnas, es decir 1240 celdas, de las que 412 se sitúan propiamente sobre el ámbito territorial de la Plana de Sagunto abarcando; cada una de las celdas así definidas ocupa una superficie de $0,25 \text{ km}^2$ por lo que la superficie total de la plana incluida en este modelo será de 103 km^2 , mientras que en el capítulo "3. *Delimitación de la masa de agua subterránea*" de la memoria se comentó que la superficie ocupada por este acuífero era de 127 km^2 ; la diferencia entre ambos valores es debida a que en el modelo se ha optado por no incluir el área más occidental del valle del río Palancia, dado que se trata de una zona con escasa potencia de materiales pliocuaternarios y con, prácticamente, nula información hidrogeológica que poder considerar en los trabajos de modelado

En la Figura nº1 se muestra la malla considerada; las celdas de color verde representan las áreas tratadas como de flujo nulo en el modelo, mientras que las de color blanco representan las zonas de flujo activo presentes en la Plana de Sagunto.

La masa de agua subterránea se ha simulado como consistente en una sola capa de espesor variable y con gran parte de sus límites abiertos según la delimitación comentada también en el capítulo "3. *Delimitación de la masa de agua subterránea*" de la memoria.

2.3. Topografía.

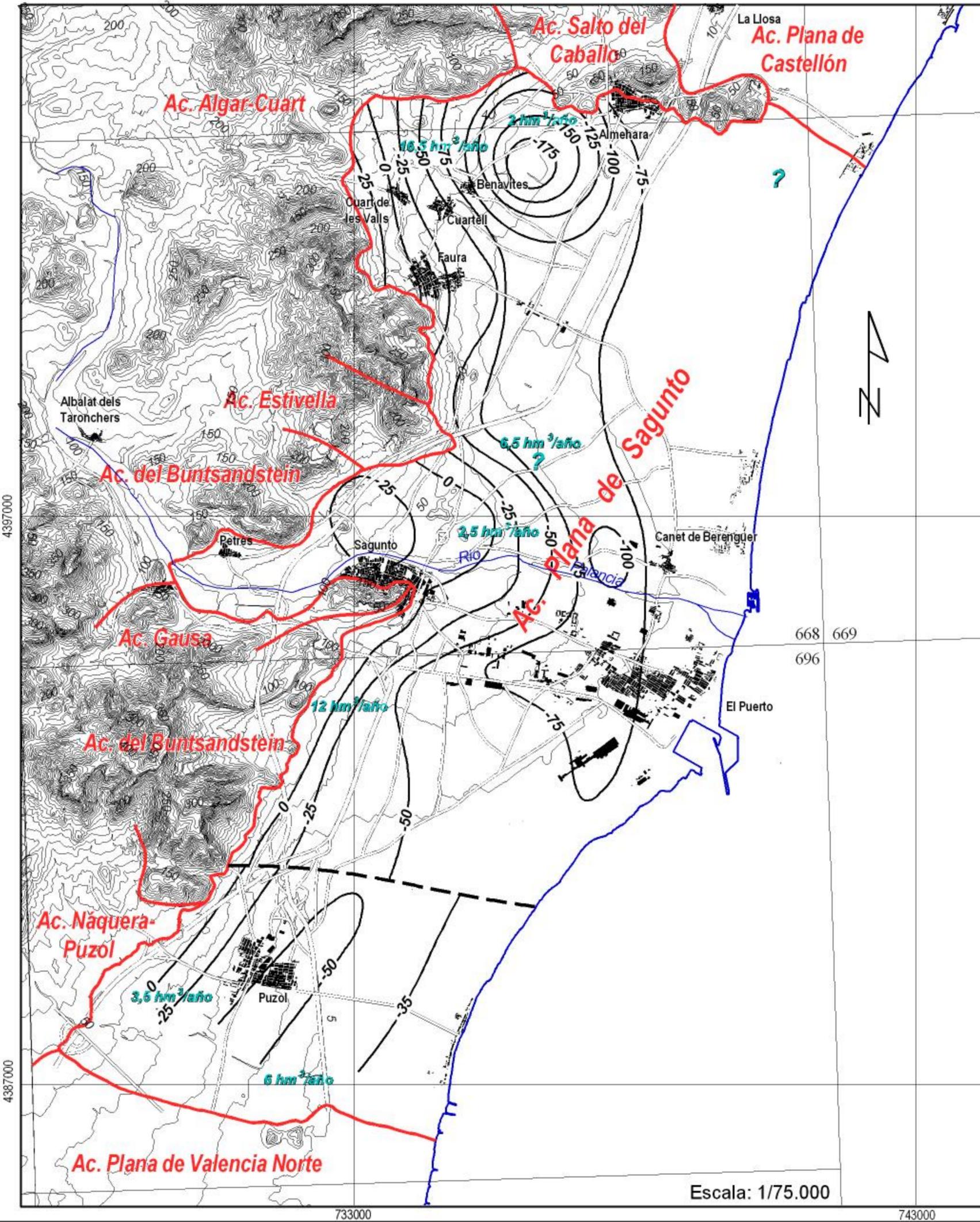
Visual Modflow permite implementar la topografía dentro del modelo de flujo a partir de un fichero ASCII que contenga información sobre la posición, tanto coordenadas UTM como relativas y cota topográfica en m s.n.m., de un conjunto de puntos digitalizados directamente sobre la cartografía topográfica a escala 1:25.000.

Dicho software es capaz de realizar una interpolación de los valores introducidos mediante el procedimiento geoestadístico de kriging, encaminada a obtener un único valor de cota topográfica para cada una de las celdas que constituyen la malla del modelo. De esta manera, se consigue una superficie tridimensional simplificada que se corresponde, de forma suficiente, con la topografía del terreno en la zona de estudio.

2.4. Substrato del acuífero.

Para introducir en el modelo la disposición del muro impermeable de la masa, constituido por las arcillas miocenas, se ha empleado el mapa de isohipsas presentado en la Figura nº2 realizada a escala 75.000.

La transposición de la morfología del substrato al modelo matemático se ha realizado mediante la digitalización de estas líneas, de tal forma que, nuevamente se obtuvo un fichero ASCII con la información pertinente. El tratamiento que el software de modelado proporciona a esta información es exactamente el mismo que el descrito para conseguir la superficie topográfica.



LEYENDA

-  -2- Isohipsa de cota de muro
-  Fractura deducida
-  Límite de acuíferos

Fig. nº 2.- Mapa de isohipsas de cota de muro.

2.5. Permeabilidad y coeficiente de almacenamiento.

La permeabilidad global del modelo se ha obtenido, a falta de una adecuada densidad y representatividad de ensayos de bombeo, durante el proceso de calibración del mismo, habiéndose asignado un valor de 47 m/día a este parámetro global en la Plana de Sagunto, coherente con los valores facilitados en bibliografía. Del mismo modo, se ha optado por considerar un valor de 0,1 para el coeficiente de almacenamiento global de esta misma masa de agua subterránea.

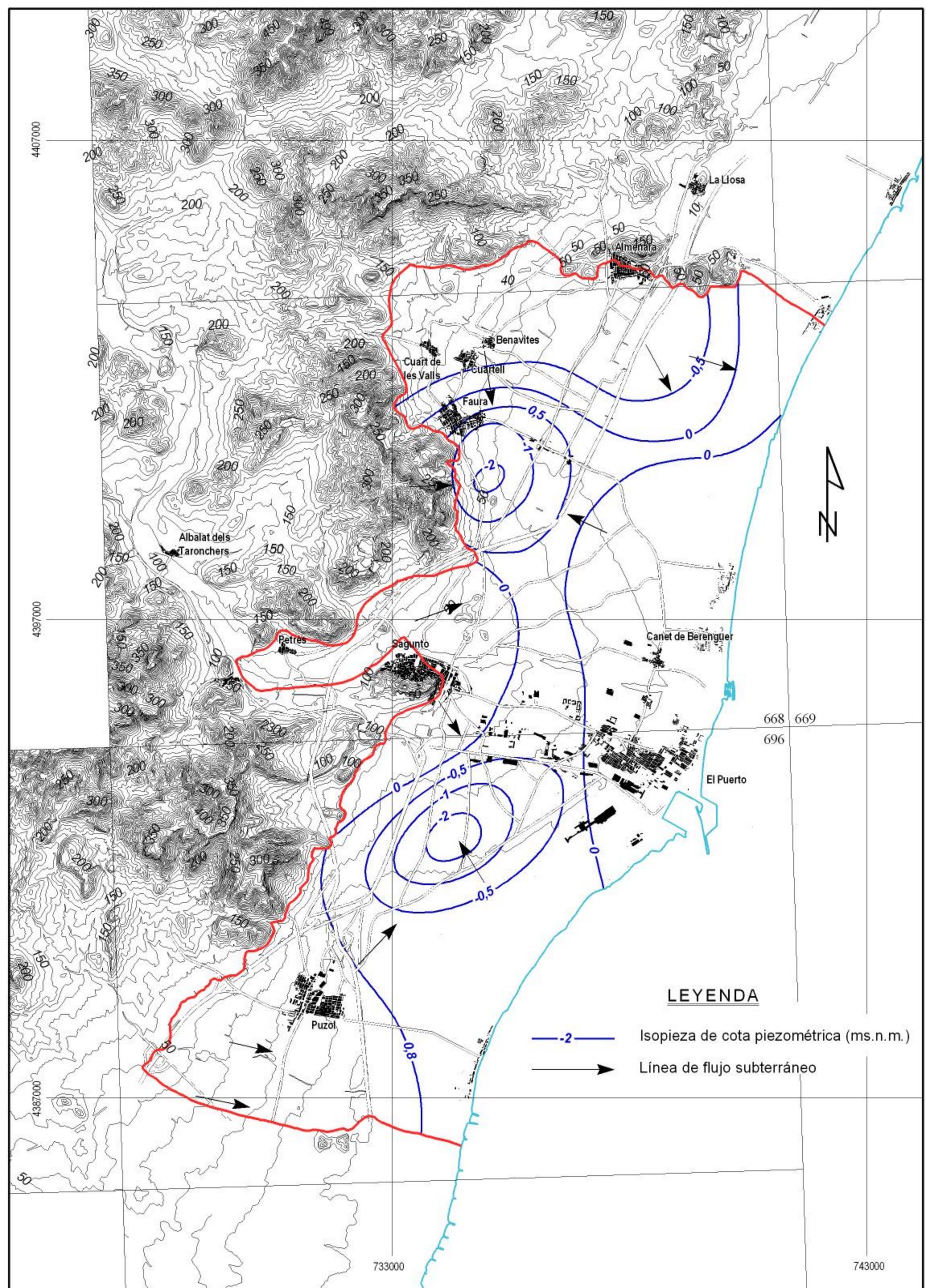
2.6. Piezometría inicial.

Para empezar a resolver la simulación del flujo subterráneo, MODFLOW necesita unos valores iniciales de piezometría aproximados que, en función de lo acertado de los mismos, el proceso de simulación puede reducir significativamente el tiempo requerido para su ejecución. Los valores iniciales de piezometría son también utilizados para calcular los valores de descensos/ascensos piezométricos medidos como diferencia entre los niveles iniciales y los calculados por el modelo.

Se ha optado por considerar una piezometría inicial de 0 m s.n.m. próxima a la representada en la Figura nº3 extraída de IGME (1986).

2.7. Definición de las condiciones de borde.

Los modelos matemáticos, incluido Modflow, necesitan un juego de las denominadas condiciones de borde para representar las relaciones de cada sistema estudiado con los que tiene a su alrededor. En el caso de un modelo



Escala: 1/75.000

Fig. nº 3.- Mapa piezométrico de la masa de agua subterránea de la Plana de Sagunto según IGME (1.986 c).

de flujo subterráneo, las condiciones de borde describen el intercambio de flujo, entradas y salidas de agua, entre el modelo y el sistema o sistemas externos.

Para la realización del presente modelo, se han considerado las condiciones de borde disponibles en Modflow denominadas "Constant Head (CHD)" y "River (RIV)" Boundary Conditions.

La condición de borde "Constant Head (CHD)" se usa para fijar, en cada periodo de tiempo (ó periodo de paso) tratado en el modelo, el valor del nivel piezométrico en las celdas del modelo seleccionadas, con independencia de las condiciones del sistema en las celdas de alrededor que no han sido seleccionadas.

De esta manera, se otorga a este borde la condición de fuente infinita de agua entrando en el sistema o de sumidero, también infinito, de agua que abandona el sistema.

Así, a falta de información de detalle sobre la piezometría en el borde de los acuíferos que alimentan subterráneamente a la Plana de Sagunto, se ha optado por considerar como fijas unas piezometrías muy próximas a las indicadas en IGME (1986 c):

- Ac. Plana de Valencia Norte: entre 12 y 0 m s.n.m.
- Ac. Náquera-Puzol: 12,5 m s.n.m.
- Ac. del Buntsandstein: 13,6 m s.n.m.
- Ac. Gausa: 16,9 m s.n.m.
- Ac. Estivella: entre 12,1 y 13,7 m s.n.m.

- Ac. Algar-Cuart: en el citado trabajo de IGME, se comenta que la piezometría de la Plana de Sagunto en este sector varía, en muy poco espacio, desde los 40-45 m s.n.m. en el sector más occidental y los 2-3 m s.n.m. al E. de Faura y Benavites. Durante la calibración del modelo, se pudo comprobar como considerando una piezometría media de 10,4 m s.n.m. para este límite, se obtiene un balance hídrico muy similar al calculado en este trabajo
- Ac. Salto del Caballo: entre 10 y 3 m s.n.m.
- Ac. Plana de Castellón: entre 2 y 0 m s.n.m.
- Mar Mediterráneo: 0 m s.n.m.

En la Figura nº4 se muestran, en color marrón, los límites abiertos y con nivel piezométrico constante considerados en el presente modelo y en la Figura nº2 se incluye, además de las isohipsas de la cota de muro, la delimitación de los acuíferos adyacentes a la Plana de Sagunto en su parte más próxima a ésta.

La disposición de límites abiertos tratada en el modelo difiere en dos aspectos fundamentales respecto al modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico expuesto en la memoria:

- Dado que en la simulación no se ha incluido el extremo occidental del valle del río Palancia, los límites del modelo más cercanos a éste se han tenido que considerar abiertos para poder tratar los aportes subterráneos procedentes de los acuíferos de Gausa y Estivella hacia la masa de agua subterránea de la Plana de Sagunto.

- Se ha podido constatar, tanto en el modelo realizado por CHJ-AQUATEC (2001) en el sector de Los Valles como en el presentado aquí que, a pesar de las litologías permeables y/o semipermeables aflorantes en el límite Norte de la plana, parece ser que dichos modelos funcionan mejor si se considera parte de dicho límite como cerrado. Probablemente, el subafloramiento de litología de baja permeabilidad impediría, en gran medida, el flujo subterráneo a través de este sector.

La condición de borde "River (RIV)" se usa para simular la influencia de las masas de agua superficial (tales como torrentes, ríos, lagos, zonas húmedas, etc...) en el flujo de las aguas subterráneas. Dichas masas de agua superficial pueden tanto aportar recursos hídricos a la masa de agua subterránea sobre la que se localizan como funcionar a modo de drenaje de las mismas, dependiendo del gradiente hidráulico entre la superficie de ambas masas y del parámetro propio de Modflow denominado Conductancia. Este parámetro numérico representa la resistencia que encuentra un flujo subterráneo al atravesar el lecho de la masa de agua superficial.

El valor de la Conductancia (C) se calcula a partir de la permeabilidad vertical del material que constituye el fondo de la masa de agua superficial (K), de la potencia de estos mismos materiales (M), de la longitud de la masa en cada una de las celdas del modelo afectadas (L) y de su anchura (W); la fórmula que relaciona todos estos factores para calcular la Conductancia es:

$$C = (K * L * W) / M$$

Para aquellas situaciones donde la condición de borde "River (RIV)" se utilice para simular lagos o zonas húmedas, los parámetros L y W se corresponderán con los valores de las dimensiones X e Y de las celdas utilizadas en el modelo.

En el presente modelo matemático se ha utilizado la condición de borde "River (RIV)" para simular la Marjal i Estanys d'Almenara, mientras que se ha considerado oportuno no incluir la Marjal dels Moros por tratarse de una masa de agua superficial, probablemente, desconectada del sistema subterráneo de la Plana de Sagunto. En la Figura nº5 se muestran, en color azul, las celdas tratadas bajo la condición de borde "River (RIV)".

En el modelo se ha supuesto una marjal con 1 m de profundidad media de agua y un fondo de también un metro de potencia constituido por materiales de muy baja permeabilidad (0,0005 m/s).

2.8. Infiltración directa sobre los materiales permeables.

Según el balance hídrico aceptado en la presente memoria, ver su capítulo "19. Balance hídrico...", los volúmenes medios de infiltración directa a través de los materiales permeables superficiales de la plana son:

- Infiltración de excedentes de regadíos dotados con aguas subterráneas (27,5 hm³/año).
- Infiltración de excedentes de regadíos dotados con aguas superficiales (15,9 hm³/año).
- Infiltración directa de agua de lluvia (13,6 hm³/año).

En el modelo matemático adjunto se han tratado los tres tipos de infiltraciones como uno solo, aunque considerando tres situaciones diferentes que se

muestran en la Figura nº6: en color azul más oscuro se indican las celdas en las que se ha optado por una infiltración nula al tratarse de zonas urbanizadas o humedales; en color algo menos oscuro, en los bordes de la plana, se han marcado las celdas donde sólo tiene lugar una infiltración de agua de lluvia por ser demasiado abruptas para el desarrollo, por el momento, de la actividad agrícola (125 mm/año); finalmente, en azul claro, se indican las celdas donde se produce tanto infiltración de agua de lluvia como de excedentes de regadío (572,5 mm/año).

2.9. Explotación de los recursos.

Los recursos hídricos de la masa de agua subterránea de la Plana de Sagunto se extraen de dos maneras:

- Mediante pozos y sondeos.
- Mediante un sistema de canales de drenaje y turbinas que regula el nivel piezométrico de la plana, vertiendo el agua al mar a través de las "golas".

Se ha incluido en el modelo un total de 145 pozos y sondeos, ver Figura nº7, que explotan los materiales pliocuaternarios de la plana y, a partir de los cuales, se extraen una media de algo más de 82 hm³/año según IGME (1986 c) y el inventario de puntos de agua disponible también del IGME. Lamentablemente, no se dispone ni de la evolución de los volúmenes de extracción obtenidos a partir de las citadas captaciones ni de la localización exacta de todas las captaciones por lo que se dificulta, en gran medida, la simulación del sistema en régimen transitorio.

De igual modo, se carece de información sobre la evolución de las tasas de desagüe de los canales de drenaje y de las "golas" por lo que su inclusión en el modelo ha sido imposible.

En el caso de realizarse un estudio de mayor precisión en el que se abordase temas como **a)** la distribución exacta de los canales de drenaje y "golas" activos y **b)** su régimen de funcionamiento y niveles piezométricos asociados, podría integrarse la nueva información adquirida en la simulación matemática mostrada en la presente memoria; en este caso, el modelo requerirá de un refinado importante del mallado utilizado.

2.10. Criterios para la calibración del modelo.

Como ya se ha comentado, se carece de información sobre la evolución de las extracciones y del funcionamiento del sistema de drenaje de la Plana de Sagunto. Esta circunstancia ha imposibilitado realizar el habitual proceso de calibración consistente en el ajuste aceptable entre las piezometrías obtenidas tras la simulación matemática y las medidas en el campo.

Es por ello que se ha debido proceder de forma diferente para conseguir una simulación suficientemente bien calibrada de la plana; se ha optado entonces por considerar tanto las piezometrías ya especificadas en el apartado "2.1.7. *Definición de las condiciones de borde*", obtenidos de IGME (1986 c), como los valores de los parámetros hidráulicos indicados en el apartado "2.1.5. *Permeabilidad y coeficiente de almacenamiento*", también coherentes con los rangos especificados en el mismo trabajo de IGME, hasta lograr que el balance hídrico resultante tras el proceso de simulación se ajuste suficientemente al aceptado en la memoria de la masa de agua subterránea de la Plana de

Sagunto (en gran parte también basado en el aceptado en IGME (1986 c). La tabla adjunta muestra los valores aceptados para los citados balances hídricos:

BALANCE HÍDRICO DE LA PLANA DE SAGUNTO		
	MEMORIA	MODELO
ENTRADAS		
Ac. Plana de Valencia Norte	6	
Ac. Náquera-Puzol	3,5	3,48
Ac. Buntsandstein	12	11,74
Ac. Gausa	2,5	2,41
Ac. Estivella	6,5	6,37
Ac. Algar-Cuart	16,5	16,38
Ac. Salto del Caballo		1,64
Ac. Plana de Castellón		?
Infiltración de lluvia y regadío	57	59,47
Agua de mar		6,8
Total	104	108,29
SALIDAS:		
Ac. Plana de Valencia Norte		2,05
Bombeos	82,6	82,27
Al mar	15	23,57
A través de L'Estany i Marjal d'Almenara	6,4	0,41
Total	104	108,30

Aunque, como puede apreciarse, se ha conseguido un importante ajuste de los balances, se debe destacar que la piezometría calculada por el modelo queda unos metros por encima de la registrada en IGME (1986 c), ver Figuras nº3 y 8. Esta diferencia de niveles se explica por **a)** la imprecisión que existe en el conocimiento del volumen y la evolución de las extracciones mediante bombes y por **b)** sobre todo, la no inclusión en la simulación de la plana del sistema de canales de drenaje debido al prácticamente nulo conocimiento que se tiene sobre el funcionamiento de los mismos.

A pesar del gran número de similitudes, al compararse ambos balances pueden observarse una serie de diferencias que se comentan a continuación:

- Ac. Plana de Valencia Norte: el modelo aceptado en la memoria defiende una entrada de 6 hm³/año en la Plana de Sagunto procedentes de la Plana de Valencia Norte, mientras que la

simulación indica un flujo neto en sentido opuesto de 2,05 hm³/año. Esta diferencia podría deberse a la ya comentada no inclusión en el modelo del efecto de los canales de drenaje y a la falta de conocimiento exacto del régimen de extracción de los bombeos, mecanismos que podrían provocar un efecto llamada de los recursos hídricos de la Plana de Valencia Norte al provocar un descenso piezométrico en la Plana de Sagunto.

- Ac. Salto del Caballo: no se consideran transferencias desde este acuífero a la plana en el balance incluido en la memoria, mientras que en la simulación realizada resulta una entrada de 2,57 hm³/año, coherente con el valor obtenido en el modelo matemático desarrollado por CHJ-AQUATEC (2001) en el entorno de la zona húmeda de Almenara.
- Ac. Plana de Castellón: ninguno de los dos balances tratados estima un valor de transferencia lateral entre las Planas de Castellón y de Sagunto debido, probablemente, a que el límite convencional entre ambas se dispone de forma relativamente paralela a la dirección del flujo en régimen no influenciado. Sin embargo, durante la redacción de la memoria de la masa pudo comprobarse como, al menos en algunos momentos, parece existir cierta influencia de los recursos hídricos procedentes de la Plana de Castellón sobre los de la Plana de Sagunto, ver por ejemplo los Planos 2C, 6B1A, 6B1B, 6B1C, 6B2 y 6B4; por ello, se ha optado por incluir un interrogante en el apartado del balance hídrico calculado durante el proceso de simulación reservado para las entradas subterráneas procedentes de la Plana de Castellón.

- Agua de Mar: el balance aceptado en la memoria, fruto de la bibliografía consultada, no considera las entradas subterráneas de agua de mar a pesar del aumento de la concentración de cloruros y de la extensión de su zona de afección detectadas en las últimas décadas respecto a la situación que tenía lugar en los años setenta, en los que el IGME comenzó el control piezométrico e hidroquímico en la zona. En la simulación presentada sólo se deduce una entrada subterránea de agua de mar a través del litoral próximo a la población del Puerto de Sagunto, ver Figura nº9, donde se tienen inventariadas las mayores extracciones próximas a la costa. Nuevamente, el no haber considerado la acción de los canales de drenaje y, sólo aproximadamente, la acción de los bombeos, ha enmascarado un proceso de mayor entidad ya que el descenso piezométrico que las citadas acciones provocan en la masa de agua subterránea de la Plana de Sagunto provocan también un efecto llamada de recursos hídricos marinos.
- Emergencias y drenaje de la plana: en la simulación realizada sólo se ha considerado el funcionamiento directamente relacionado con la zona "permanentemente" inundada de la marjal de Almenara por lo que, al no haberse incluido los canales de drenaje de la masa de agua subterránea, el valor resultante de las salidas de recursos hídricos del sistema, tan sólo $0,41 \text{ hm}^3/\text{año}$ aunque coherente con el obtenido en CHJ-AQUATEC (2001), es sensiblemente inferior al dado en el balance de la memoria y que es de $6,4 \text{ hm}^3/\text{año}$.

3 CONCLUSIONES.

De la realización del modelo matemático presentado de la masa de agua subterránea de la Plana de Sagunto y su simulación en régimen permanente se desprenden las siguientes conclusiones:

- Se confirma la coherencia del modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico de la plana propuesto por IGME (1986 c), trabajo en el que se ha basado principalmente este modelo matemático.
- La falta de información precisa sobre la evolución temporal de diferentes procesos que intervienen directamente en algunos de los términos del balance hídrico de la masa objeto de estudio, especialmente el funcionamiento de los canales de drenaje y el régimen de bombeos, ha impedido la realización de un modelo que se pudiera calibrar utilizando la habitual comparación entre las piezometrías calculadas y las medidas en puntos de control, recurriéndose entonces a su calibración atendiendo al balance hídrico, a las piezometrías de borde y a los parámetros hidráulicos incluidos en IGME (1986 c). Así mismo, se ha imposibilitado la simulación del sistema en régimen transitorio.
- Los altos niveles piezométricos calculados por el modelo respecto a los presentados en IGME (1986 c) son debidos, especialmente, a la no inclusión del efecto de los canales de drenaje y a la falta del conocimiento exacto de la distribución, espacial y temporal, de los bombeos. De adjuntarse dichos procesos, probablemente se conseguiría un mejor ajuste de las piezometrías y de las entradas

procedentes de las Planas de Valencia Norte y Castellón así como de la intrusión marina, pues el descenso piezométrico que provocarían dichos procesos implicaría la entrada de agua en el sistema desde las procedencias comentadas.