



Instituto Geológico
y Minero de España



DIPUTACIÓN
DE ALICANTE
CICLO HÍDRICO

**ANÁLISIS Y CONTRASTE DE METODOLOGÍAS PARA LA
VALORACIÓN DEL IMPACTO DE LA EXTRACCIÓN DE
AGUA EN ACUÍFEROS COSTEROS SALOBRES. APLICACIÓN
AL ACUÍFERO DE CABO ROIG (ALICANTE).**

**ESTIMACIÓN DE LA RECARGA AL ACUÍFERO
DE CABO ROIG (ALICANTE).**

MADRID. FEBRERO 2005

El presente estudio ha sido realizado en el marco del convenio de asistencia técnica suscrito entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Excma. Diputación Provincial de Alicante (DPA), actuando como directores del mismo D. José Manuel Murillo Díaz (IGME) y D. Luis Rodríguez Hernández (DPA).

El equipo técnico, que ha intervenido en su colaboración, ha estado formado por:

Responsable:

José Manuel Murillo Díaz (IGME)

Autores:

Paola Romero Crespo (ETSI de Minas-UPM)

Francisco Javier Elorza Tenreiro (ETSI de Minas-UPM)

Toma de datos en campo:

Jorge Hornero Díaz (IGME)

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	1
3. METODOLOGÍA APLICADA.....	3
4. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE PARTIDA	4
4.1. Datos geográficos e hidrogeológicos básicos	4
4.2. Datos de las estaciones meteorológicas.....	12
4.3. Datos de los piezómetros disponibles en la zona.	14
4.4. Datos de estaciones de aforo.	17
4.5. Datos de las dotaciones de riego.....	17
5. ESTIMACIÓN DEL BALANCE HIDRICO.....	19
5.1. Modelo unicelular 1 (piezómetro 283720063).	19
5.1.1. Ajuste automático.....	21
5.1.2. Análisis de sensibilidad.....	24
5.2. Modelos unicelulares 2 y 3 (piezómetro 283760009 y 283750178).	31
5.2.1. Ajuste automático.....	32
5.2.2. Análisis de sensibilidad.....	36
5.3. Modelos unicelulares 4, 5 y 6(piezómetros 283720058, 283760004 y 283750170).....	39
5.3.1 Modelo unicelular 4 (piezómetro 283720058).....	39
5.3.2. Modelo unicelular 5 (piezómetro 283760004).....	40
5.3.3. Modelo unicelular 6 (piezómetro 283750170).....	42
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	44
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
8. REFERENCIAS.....	58

ÍNDICE DE MAPAS

	Pág.
MAPA 1. UBICACIÓN DE LOS PIEZÓMETROS DE CONTROL. FUENTE DE DATOS: INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA.....	2
MAPA 2. CONTENIDO DE NITRATOS EN EL ACUIFERO DE CABO ROIG (AÑO 2001). FUENTE DE DATOS: INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA.....	10
MAPA 3. CONTENIDO DE NITRATOS EN EL ACUIFERO DE CABO ROIG (AÑO 2002). FUENTE DE DATOS: INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA.....	11
MAPA 4. RESULTADOS DE LOS PRINCIPALES MODELOS DE BALANCE HÍDRICO, CON LOS QUE SE ESTIMÓ LA RECARGA EN CADA ZONA.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. VISTA LATERAL 1 DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG.	5
FIGURA 2. VISTA LATERAL 2 DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG.	5
FIGURA 3. VISTA POSTERIOR DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG.	6
FIGURA 4. VISTA 1 DE LA UBICACIÓN DE CORTES GEOLÓGICOS EN EL ACUÍFERO DE CABO ROIG Y EVOLUCIÓN ESPACIAL DEL ESPESOR DEL ESTRATO ACUÍFERO.	6
FIGURA 5. VISTA 2 DE LA UBICACIÓN DE CORTES GEOLÓGICOS EN EL ACUÍFERO DE CABO ROIG Y EVOLUCIÓN ESPACIAL DEL ESPESOR DEL ESTRATO ACUÍFERO.	7
FIGURA 6. DIAGRAMA DE PIPER DE LAS MUESTRAS DE AGUA DE LA ZONA NORTE DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG.	7
FIGURA 7. DIAGRAMA DE PIPER DE LAS MUESTRAS DE AGUA DE LA ZONA CENTRAL DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG.	8
FIGURA 8. DIAGRAMA DE PIPER DE LAS MUESTRAS DE AGUA DE LA ZONA SUR DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG.	8
FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LAS PRECIPITACIONES EN EL PERIODO DE 1997-2002.....	12
FIGURA 10. DISTRIBUCIÓN ANUAL DE LAS PRECIPITACIONES EN EL PERIODO DE 1997-2002.....	13
FIGURA 11. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LAS TEMPERATURAS EN EL PERIODO DE 1997-2002.....	13

FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN ANUAL DE LAS TEMPERATURAS EN EL PERIODO 1997-2002. .	14
FIGURA 13. EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES ESTÁTICOS EN LOS PIEZÓMETROS DE LA ZONA NORTE DE CABO ROIG.	16
FIGURA 14. EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES ESTÁTICOS EN LOS PIEZÓMETROS DE LA ZONA CENTRAL DE CABO ROIG.	16
FIGURA 15. EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES ESTÁTICOS EN LOS PIEZÓMETROS DE LA ZONA SUR DE CABO ROIG.	17
FIGURA 16. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LAS DOTACIONES DE RIEGO EN CABO ROIG.	19
FIGURA 17. HIDROGRAMA MEDIDO Y CALCULADO CON DATOS DE UN PIEZÓMETRO (283720063), UBICADO EN LA ZONA NORTE DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG, PARA EL CASO 1 (SIN REGADÍOS: THORNTHWAITE).....	21
FIGURA 18. HIDROGRAMA MEDIDO Y CALCULADO CON DATOS DE UN PIEZÓMETRO (283720063), UBICADO EN LA ZONA NORTE DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG, PARA EL CASO 2 (CON REGADÍOS: BLANNEY CRIDDLE).	22
FIGURA 19. VALORES MEDIOS ANUALES DEL BALANCE HÍDRICO DEL MODELO 1-CASO 1 (SIN REGADÍOS).....	22
FIGURA 20. VALORES MEDIOS ANUALES DEL BALANCE HÍDRICO DEL MODELO 1-CASO 2 (CON REGADÍOS).	23
FIGURA 21. RECARGA DEL ACUÍFERO ($\text{HM}^3/\text{AÑO}$) PARA EL PERÍODO 1997-2002. MODELO 1, CASO 1 (SIN REGADÍOS).....	24
FIGURA 22. RECARGA DEL ACUÍFERO ($\text{HM}^3/\text{AÑO}$) PARA EL PERÍODO 1997-2002. MODELO 1, CASO 2 (CON REGADÍOS).	24
FIGURA 23. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA RECARGA Y RESERVA ÚTIL CON RESPECTO AL ESPESOR DEL SUELO. MODELO 1, CASO 1 (SIN REGADÍOS).	25
FIGURA 24. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA RECARGA Y RESERVA ÚTIL CON RESPECTO AL ESPESOR DEL SUELO. MODELO 1, CASO 2 (CON REGADÍOS).....	25
FIGURA 25. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO CON RESPECTO AL ESPESOR DEL SUELO. MODELO 1, CASO 1 (SIN REGADÍOS).	26
FIGURA 26. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO CON RESPECTO AL ESPESOR DEL SUELO. MODELO 1, CASO 2 (CON REGADÍOS).....	27
FIGURA 27. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA RECARGA, CAUDAL TOTAL Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL CON RESPECTO A CIM0. MODELO 1, CASO 1 (SIN REGADÍOS).	29

FIGURA 28. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA RECARGA, CAUDAL TOTAL Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL CON RESPECTO A CIM1. MODELO 1, CASO 1 (SIN REGADÍOS).....	30
FIGURA 29. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA RECARGA, CAUDAL TOTAL Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL CON RESPECTO A CIM0. MODELO 1, CASO 2 (CON REGADÍOS).....	30
FIGURA 30. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA RECARGA, CAUDAL TOTAL Y ESCORRENTÍA SUPERFICIAL CON RESPECTO A CIM1. MODELO 1, CASO 2 (CON REGADÍOS).....	31
FIGURA 31. VALORES MEDIOS ANUALES DEL BALANCE HÍDRICO DEL MODELO 2 (CERCANO AL RÍO NACIMIENTO).....	33
FIGURA 32. VALORES MEDIOS ANUALES DEL BALANCE HÍDRICO DEL MODELO 3 (ZONA SUR DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG).	33
FIGURA 33. HIDROGRAMA MEDIDO Y CALCULADO CON DATOS DE UN PIEZÓMETRO (283760009), UBICADO CERCA EL RÍO NACIMIENTO, EN LA ZONA SUR DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG (MODELO 2, SIN REGADÍOS)	34
FIGURA 34. HIDROGRAMA MEDIDO Y CALCULADO CON DATOS DE UN PIEZÓMETRO (283750178), UBICADO EN LA ZONA SUR DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG (MODELO 3, SIN REGADÍOS).....	35
FIGURA 35. RECARGA DEL ACUÍFERO ($\text{HM}^3/\text{AÑO}$) PARA EL PERIODO 1997-2002. MODELO 2 (SIN REGADÍOS).	35
FIGURA 36. RECARGA DEL ACUÍFERO ($\text{HM}^3/\text{AÑO}$) PARA EL PERIODO 1997-2002. MODELO 3 (SIN REGADÍOS).	36
FIGURA 37. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO CON RESPECTO AL ESPESOR DEL SUELO. MODELO 2, SIN REGADÍOS.	37
FIGURA 38. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO CON RESPECTO AL ESPESOR DEL SUELO. MODELO 3, SIN REGADÍOS.	37
FIGURA 39. HIDROGRAMA MEDIDO Y CALCULADO CON DATOS DE UN PIEZÓMETRO (283720058), UBICADO EN LA ZONA NORTE DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG (THORNTHWAITE).	39
FIGURA 40. VALORES MEDIOS ANUALES DEL BALANCE HÍDRICO DEL MODELO 4 (SIN REGADÍOS).....	40
FIGURA 41. HIDROGRAMA MEDIDO Y CALCULADO CON DATOS DE UN PIEZÓMETRO (283760004), UBICADO CERCA EL RÍO NACIMIENTO, EN LA ZONA SUR DEL ACUÍFERO DE CABO ROIG (MODELO 5, SIN REGADÍOS)	41
FIGURA 42. VALORES MEDIOS ANUALES DEL BALANCE HÍDRICO DEL MODELO 5 (CERCANO AL RÍO NACIMIENTO).....	42

FIGURA 43. HIDROGRAMA MEDIDO Y CALCULADO CON DATOS DE UN PIEZÓMETRO (283750170), UBICADO EN LA ZONA SUR CERCA DEL RÍO SECO, EN EL ACUÍFERO DE CABO ROIG (MODELO 6, SIN REGADÍOS).	43
FIGURA 44. VALORES MEDIOS ANUALES DEL BALANCE HÍDRICO DEL MODELO 6 (ZONA SUR CERCA DEL RÍO SECO).	44
FIGURA 45. DIAGRAMA DE LOS MODELOS EMPLEADOS EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA RECARGA NATURAL EN LA ZONA NORTE.....	45
FIGURA 46. DIAGRAMA DE LOS MODELOS EMPLEADOS EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA RECARGA NATURAL EN LA ZONA SUR.	45

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. USOS DEL SUELO EN CABO ROIG.	18
TABLA 2. SUPERFICIES DE REGADÍO EN CABO ROIG.....	18
TABLA 3. DOTACIONES DE RIEGO MENSUAL Y ANUAL EN CABO ROIG.	18
TABLA 4. DATOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO 1- CASO 1 Y 2, PARA EL SUELO.	20
TABLA 5. DATOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO 1- CASO 1 Y 2, PARA LA ZONA NO SATURADA.	20
TABLA 6. DATOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO 1-CASO 1 Y 2, PARA EL ACUÍFERO. ..	20
TABLA 7. VALORES MEDIOS ANUALES DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO DEL MODELO 1, CASO 1 Y 2.....	23
TABLA 8. DISTRIBUCIÓN EN PORCENTAJE CON RESPECTO A LA ENTRADA DE AGUA AL SISTEMA HIDROLÓGICO (PRECIPITACIÓN Ó PRECIPITACIÓN+RIEGO) PARA EL MODELO 1, CASO 1 Y 2.	23
TABLA 9. RESULTADOS DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL ESPESOR DEL SUELO. MODELO 1, CASO 1 (SIN REGADÍOS).....	28
TABLA 10. RESULTADOS DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL ESPESOR DEL SUELO. MODELO 1, CASO 2 (CON REGADÍOS).....	28
TABLA 11. DATOS DE LA CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS 2 Y 3, PARA EL SUELO.....	32
TABLA 12. DATOS DE LA CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS 2 Y 3, PARA LA ZONA NO SATURADA.	32

TABLA 13. DATOS DE LA CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS 2 Y 3, PARA EL ACUÍFERO.	32
TABLA 14. VALORES MEDIOS ANUALES DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO DE LOS MODELOS 2 Y 3.....	33
TABLA 15. DISTRIBUCIÓN EN PORCENTAJE CON RESPECTO A LA ENTRADA DE AGUA AL BALANCE HIDROLÓGICO (PRECIPITACIÓN) PARA LOS MODELO 2 Y 3.....	34
TABLA 16. RESULTADOS DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL ESPESOR DEL SUELO. MODELO 2, SIN REGADÍOS.....	38
TABLA 17. RESULTADOS DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL ESPESOR DEL SUELO. MODELO 3, SIN REGADÍOS.....	38
TABLA 18. VALORES MEDIOS ANUALES DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO DEL MODELO 4.....	40
TABLA 19. DISTRIBUCIÓN EN PORCENTAJE CON RESPECTO A LA ENTRADA DE AGUA AL SISTEMA HIDROLÓGICO (PRECIPITACIÓN) PARA EL MODELO 4.....	40
TABLA 20. VALORES MEDIOS ANUALES DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO DEL MODELO 5.....	42
TABLA 21. DISTRIBUCIÓN EN PORCENTAJE CON RESPECTO A LA ENTRADA DE AGUA AL BALANCE HIDROLÓGICO (PRECIPITACIÓN) PARA EL MODELO 5.....	42
TABLA 22. VALORES MEDIOS ANUALES DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO DEL MODELO 6.....	44
TABLA 23. DISTRIBUCIÓN EN PORCENTAJE CON RESPECTO A LA ENTRADA DE AGUA AL BALANCE HIDROLÓGICO (PRECIPITACIÓN) PARA EL MODELO 6.....	44
TABLA 24. DATOS GENERALES DE LA CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS PARA EL SUELO. ..	46
TABLA 25. DATOS GENERALES DE LA CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS, PARA LA ZONA NO SATURADA.....	48
TABLA 26. DATOS GENERALES DE LA CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS, PARA EL ACUÍFERO.....	50
TABLA 27. VALORES MEDIOS ANUALES DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO DEL MODELO 6.....	55
TABLA 28. DISTRIBUCIÓN GENERAL EN PORCENTAJE CON RESPECTO A LA ENTRADA DE AGUA AL BALANCE HIDROLÓGICO (PRECIPITACIÓN Ó PRECIPITACIÓN+RIEGO) PARA LOS MODELOS.....	55

ESTIMACIÓN DE LA RECARGA AL ACUÍFERO DE CABO ROIG.

1. INTRODUCCIÓN

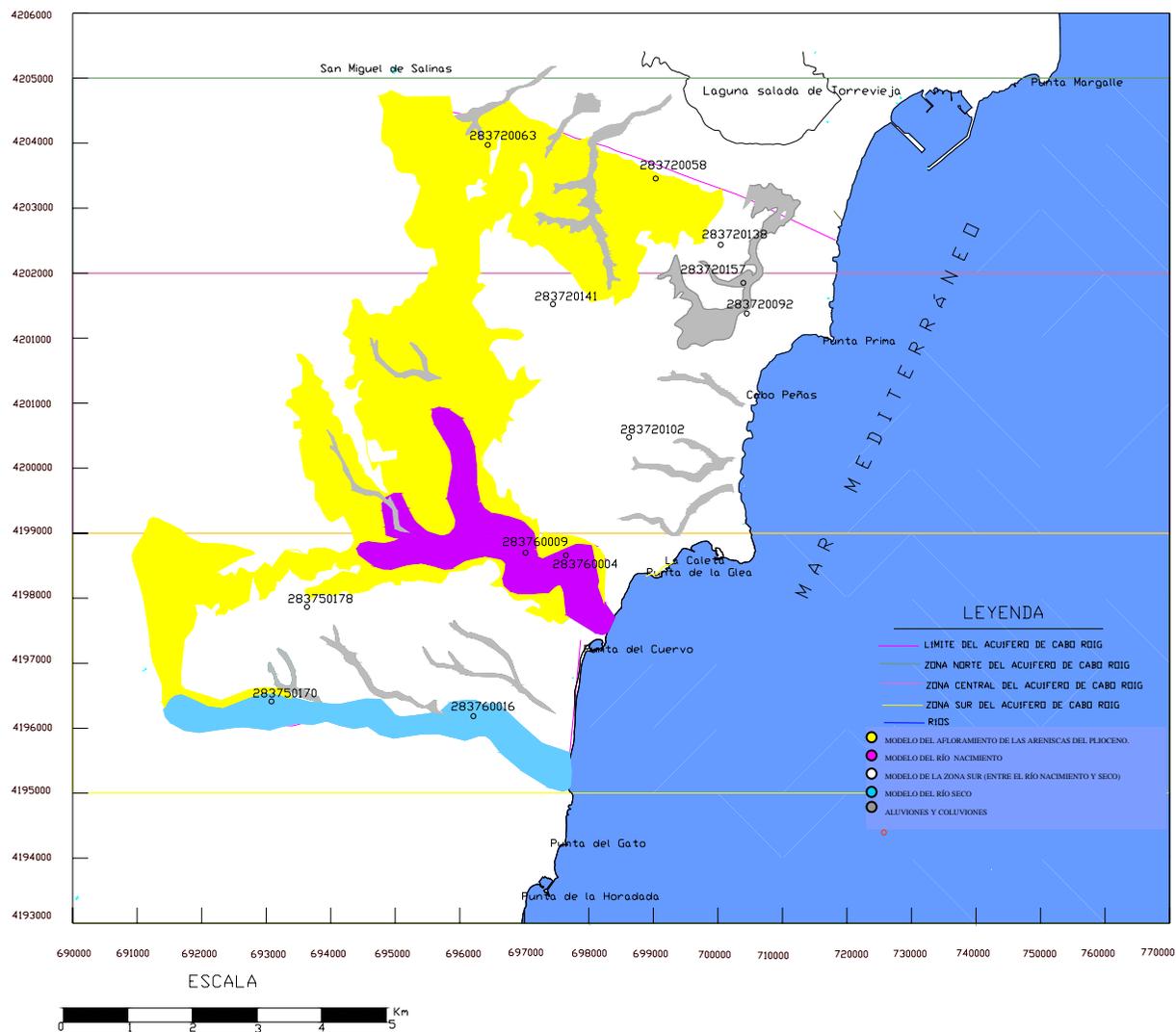
La estimación de la recarga es parte imprescindible en la adecuada gestión y conocimiento de los acuíferos y en la evaluación de posibles impactos por explotación o contaminación. En el presente informe, se presenta el cálculo de la misma mediante seis modelos de balance hidrometeorológico para diferentes condiciones, utilizando el código Visual Balan V.1.0 (Samper, J. *et al*, 1999) como técnica de estimación de la recarga natural del acuífero de Cabo Roig. Para realizar esta estimación de la recarga ha sido necesario el uso de trabajos anteriores en la zona de estudio.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del periodo de trabajo aquí presentado ha sido tener una primera caracterización de la recarga en el acuífero de Cabo Roig, así como de su distribución espacial; para lo cual se realizó la calibración de seis modelos unicelulares de balance hídrico (ver ubicación en el mapa 1), usando el programa Visual Balan V.1.0 (Samper, J., *et al*, 1999), para después obtener una comparación entre las distintas situaciones locales del acuífero.

- **Modelo unicelular 1:** piezómetro 283720063, ubicado en la zona norte del acuífero, en el área de recarga del Plioceno. Para este piezómetro se trataron dos casos. **Caso 1:** sin considerar los regadíos (Thornthwaite). **Caso 2:** considerando los regadíos (Blaney Criddle).
- **Modelo unicelular 2:** piezómetro 283760009 ubicado en la zona sur del acuífero, cerca del río Nacimiento (no se consideran los regadíos: Thornthwaite).
- **Modelo unicelular 3:** piezómetro 283750178 ubicado en la zona sur occidental del acuífero (no se consideran los regadíos: Thornthwaite).
- **Modelo unicelular 4:** piezómetro 283720058 ubicado en la zona norte del acuífero, en el área de recarga del Plioceno (no se consideran los regadíos: Thornthwaite).
- **Modelo unicelular 5:** piezómetro 283760004 ubicado en la zona sur del acuífero, cerca del río Nacimiento (no se consideran los regadíos: Thornthwaite).
- **Modelo unicelular 6:** piezómetro 283750170 ubicado en la zona sur occidental del acuífero, cercano al río Seco (no se consideran los regadíos: Thornthwaite).

Otro objetivo de este periodo de trabajo, fue el de completar la interpretación hidroquímica de los análisis del agua en esa zona, que no se pudo concluir en el primer informe de avance (IGME, 2003) presentado y que se incluye en este informe como parte de la actualización del conocimiento hidrogeológico de este acuífero. Para ello se hizo una caracterización química de las facies del agua subterránea con ayuda del programa "Hydrowin" (Calmbach, 1995) y se analizaron los contenidos e impacto de los diferentes niveles de nitratos en las distintas partes del acuífero.



Mapa 1. Ubicación de la zona de estudio y de los piezómetros de control. Fuente de datos: Instituto Geológico y Minero de España

3. METODOLOGÍA APLICADA

La metodología empleada para estimar la recarga se basó en la realización de un balance hidrológico, para lo cual se ha empleado el programa Visual Balan V.1.0 (Samper, J., *et al*, 1999). El balance se evalúa, mediante este programa, en una serie de varios años hidrológicos, desde octubre de 1997 a septiembre de 2002; el modelo conceptual preliminar aplicado es un modelo unicelda, que es un modelo muy simplificado en el que se trata el acuífero como una sola celda. En ella, se calcula el volumen de agua que entra en el acuífero y el que se descarga, teniendo como hipótesis básica que los parámetros hidrológicos (propiedades del medio) son uniformes sobre toda la zona de recarga analizada (18 km²). En esas condiciones:

1. Se realiza un balance de agua en el suelo edáfico, la zona no saturada y la zona saturada o acuífero. Donde las entradas de agua al sistema son la precipitación y las dotaciones de riego (datos de entrada), que se distribuye entre la intercepción de la lluvia (parámetro aquí no considerado por no ejercer mayor influencia en este balance preliminar), escorrentía superficial e infiltración.
2. El agua infiltrada se reparte en el sistema en las siguientes tres formas: puede perderse por evapotranspiración real (ETR), aumentando la cantidad de agua en el suelo y otra parte formará la recarga en tránsito, también llamada lluvia eficaz. La evapotranspiración potencial (ETP) fue calculada por dos métodos: Thornthwaite (sin regadíos) y Blaney Criddle (con regadíos), para realizar la comparación respectiva de resultados, y a partir de este, se obtuvo el cálculo de la ETR por el método de Penman Grindley.
3. La recarga en tránsito entra en la zona no saturada y se reparte como flujo hipodérmico o como flujo vertical de percolación (recarga), esta recarga al acuífero puede salir naturalmente como una descarga subterránea hacia arroyos.
4. En esta aplicación el programa Visual Balan calibró automáticamente los parámetros del modelo a partir sólo de datos de nivel (por no tener datos de caudal en la zona de estudio). Además, se realizó un análisis de sensibilidad a los parámetros del modelo para estimar sus magnitudes, debido a que existía una carencia de información en algunos parámetros importantes para Visual Balan, como son:
 - Espesor del suelo
 - Coeficientes de infiltración: CIM0 y CIM1 (escorrentía)
 - Coeficiente de agotamiento por percolación (zona no saturada).
 - Coeficiente de agotamiento del acuífero, nivel de referencia, nivel inicial (zona saturada).
5. Análisis y comparación de los resultados de los diferentes modelos desarrollados en las distintas zonas del acuífero de Cabo Roig.

4. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE PARTIDA

4.1. Datos geográficos e hidrogeológicos básicos

El área de estudio se encuentra ubicada al sur de la provincia de Alicante, en la Cuenca del Segura, y pertenece a la unidad hidrogeológica Campo de Cartagena - acuífero Cabo Roig. Los afloramientos de las formaciones permeables ocupan un área de 18 km², que corresponden a las areniscas y calcarenitas del Plioceno, ocupando la mayor parte del área de los afloramientos permeables. En menor proporción, encontramos los depósitos cuaternarios, que están conformados por aluviones y coluviones actuales, así como por terrazas aluviales de las principales redes de drenaje de la zona, que son el río Nacimiento y el río Seco.

El acuífero tiene un área de 61km² y está conformado por el nivel de areniscas y calcarenitas del Plioceno (T^B_{s2}), entre la aureola de afloramientos del Plioceno y Andaluciense y el mar. Sobre este nivel está la formación de margas blancas de la misma edad y/o algunos depósitos Cuaternarios, lo que provoca que el estrato de calcarenitas del Plioceno forme un acuífero libre en algunos sectores y en otros un acuífero confinado o semiconfinado. Este acuífero tiene como base una formación impermeable compuesta por las margas grises o azules del Andaluciense (se cree que el acuífero pueda tener continuidad bajo el mar y tal vez tenga conexión hidráulica).

En la mayor parte del acuífero se observa una potencia de 60m, que se reduce hacia la falla de San Miguel y hacia la localidad del mismo nombre. Hacia el litoral se produce un adelgazamiento del paquete acuífero, con un espesor medio de 40m, bordeando el litoral, aunque presenta una inflexión coincidente con el bloque elevado al norte de Cabo Roig. El máximo espesor para el nivel calcarenítico se sitúa en los Balcones a Playa Flamenca (80-100m) y el menor valor de espesor del estrato acuífero encontrado tiene un valor de 10 m.

A continuación, para dar a conocer la geometría del acuífero como parte importante del modelo conceptual, pueden observarse las siguientes figuras (figuras 1 a 3), en las que se aprecia el comportamiento del espesor del estrato acuífero desde distintas posiciones, representándose al estrato acuífero con color azul. Además, en las figuras 4 y 5 se puede apreciar la ubicación de los cortes geológicos que permitieron definir la geometría del acuífero.

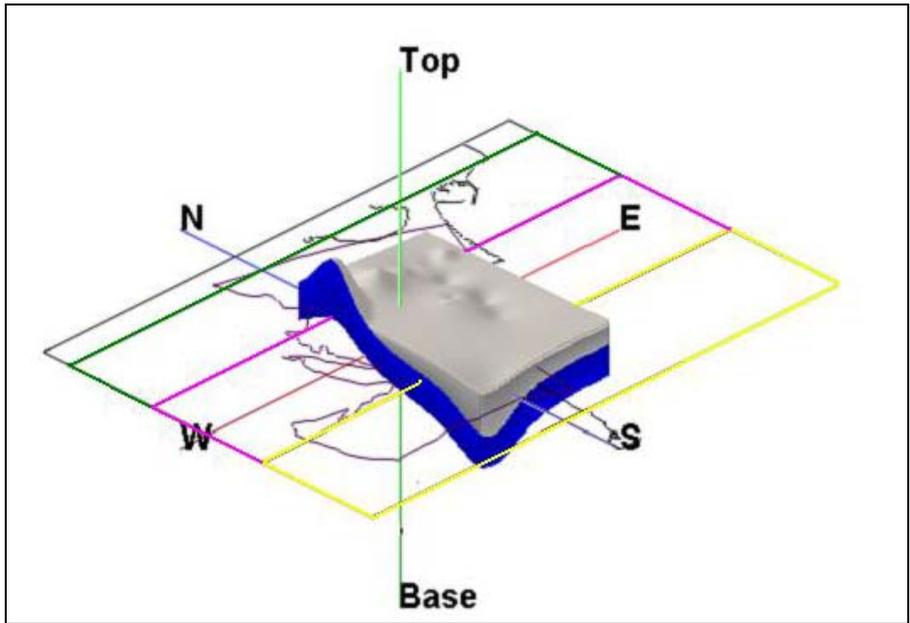


Figura 1. Vista lateral 1 del acuífero de Cabo Roig.

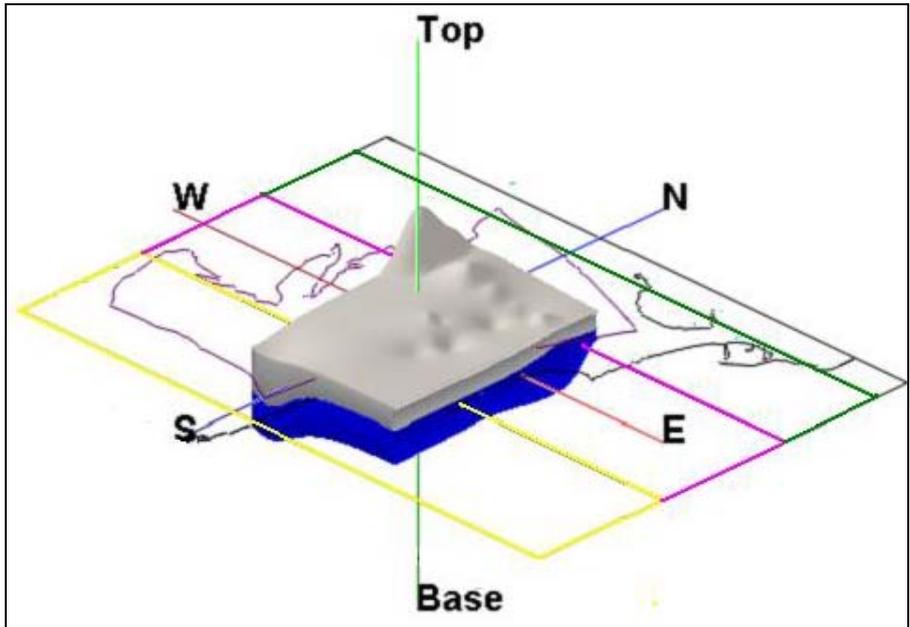


Figura 2. Vista lateral 2 del acuífero de Cabo Roig.

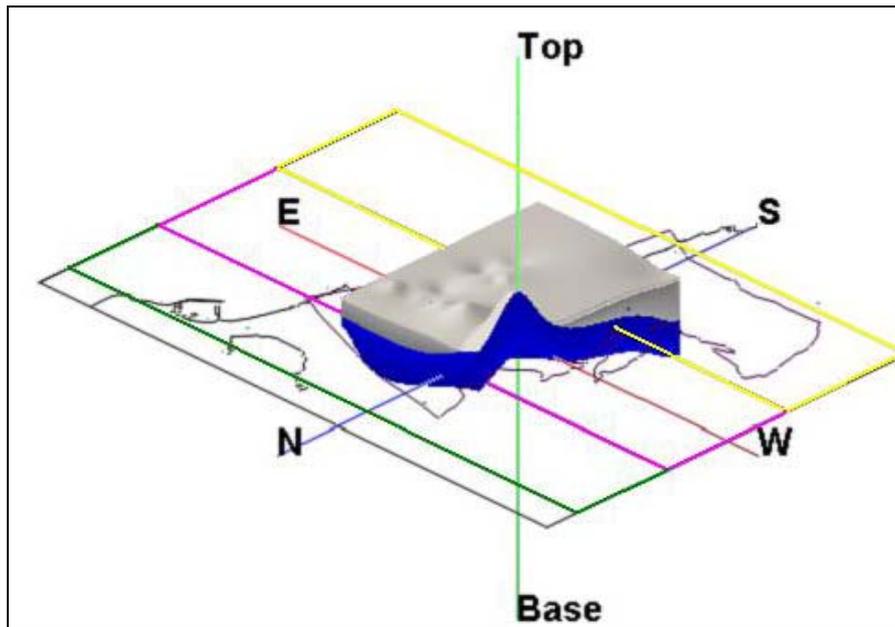


Figura 3. Vista posterior del acuífero de Cabo Roig.

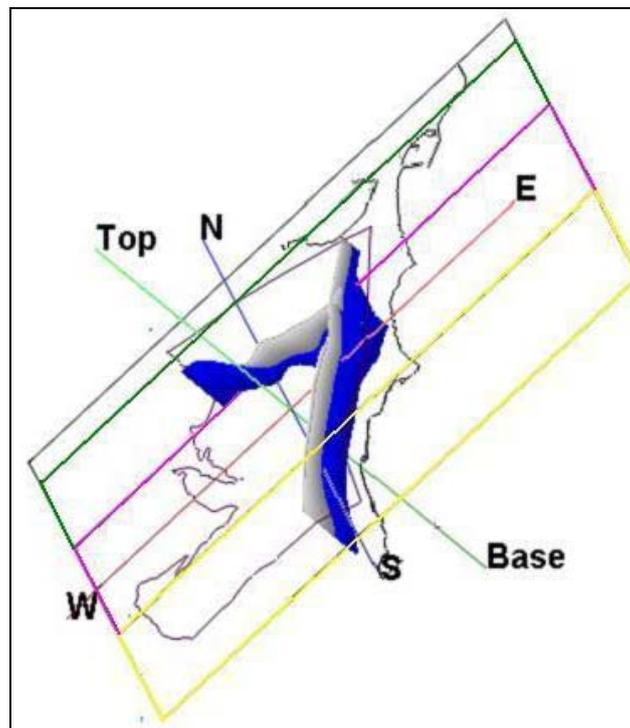


Figura 4. Vista 1 de la ubicación de cortes geológicos en el acuífero de Cabo Roig y evolución espacial del espesor del estrato acuífero.

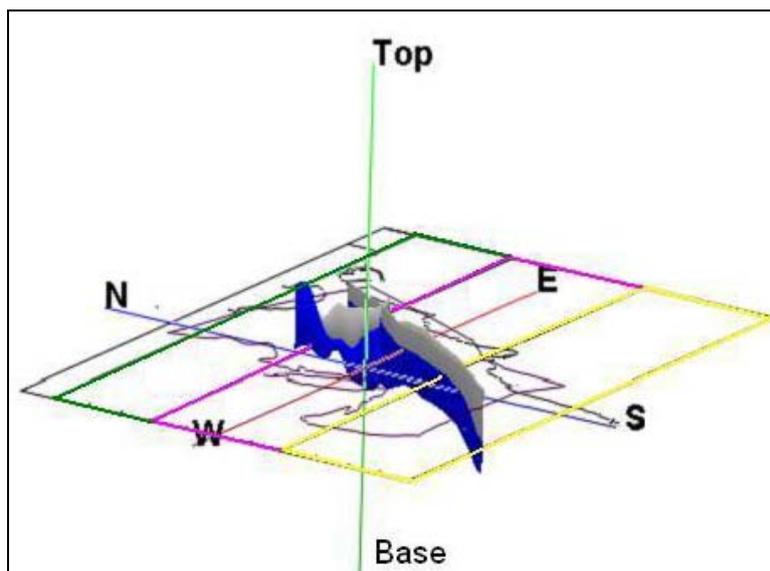


Figura 5. Vista 2 de la ubicación de cortes geológicos en el acuífero de Cabo Roig y evolución espacial del espesor del estrato acuífero.

Por otra parte, como continuación de la interpretación de los análisis químicos del informe preliminar, entregado al IGME en octubre de 2003, se ha realizado la clasificación química del agua mediante el uso del programa “Hydrowin” (Calmbach, 1995) para la realización de los diagramas hidroquímicos de Piper, los cuales se han construido para cada zona del acuífero de Cabo Roig. A continuación se presentan los diagramas de Piper obtenidos para cada zona en que se ha dividido el área de interés este estudio (Norte, Central y Sur)

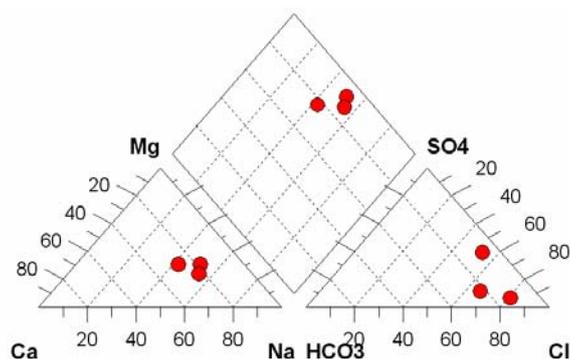


Figura 6. Diagrama de Piper de las muestras de agua de la zona norte del acuífero de Cabo Roig.

Como se puede apreciar en la figura 6 las tres muestras de agua de esta zona norte son del tipo clorurada sódica magnésica, clorurada sulfatada sódica-magnésica y clorurada bicarbonatada sódica magnésica.

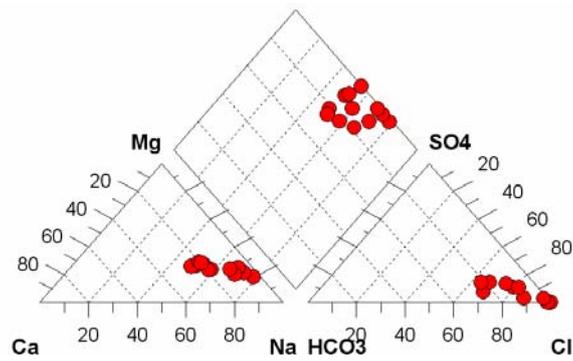


Figura 7. Diagrama de Piper de las muestras de agua de la zona central del acuífero de Cabo Roig.

La mayoría de las muestras de agua de la zona central (ver figura 7), son del tipo clorurada sódica magnésica (9 muestras) y en menor cantidad se encuentran muestras del tipo clorurada bicarbonatada sódica magnésica (2 muestras) y clorurada sódica (1 muestra)

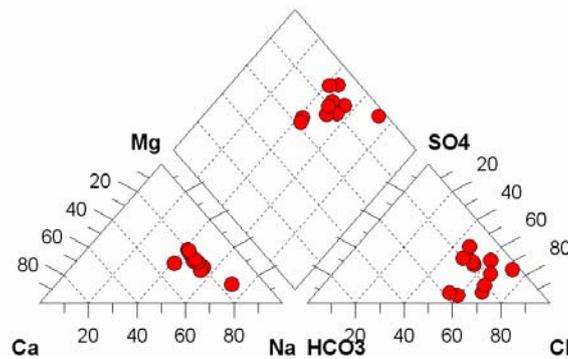


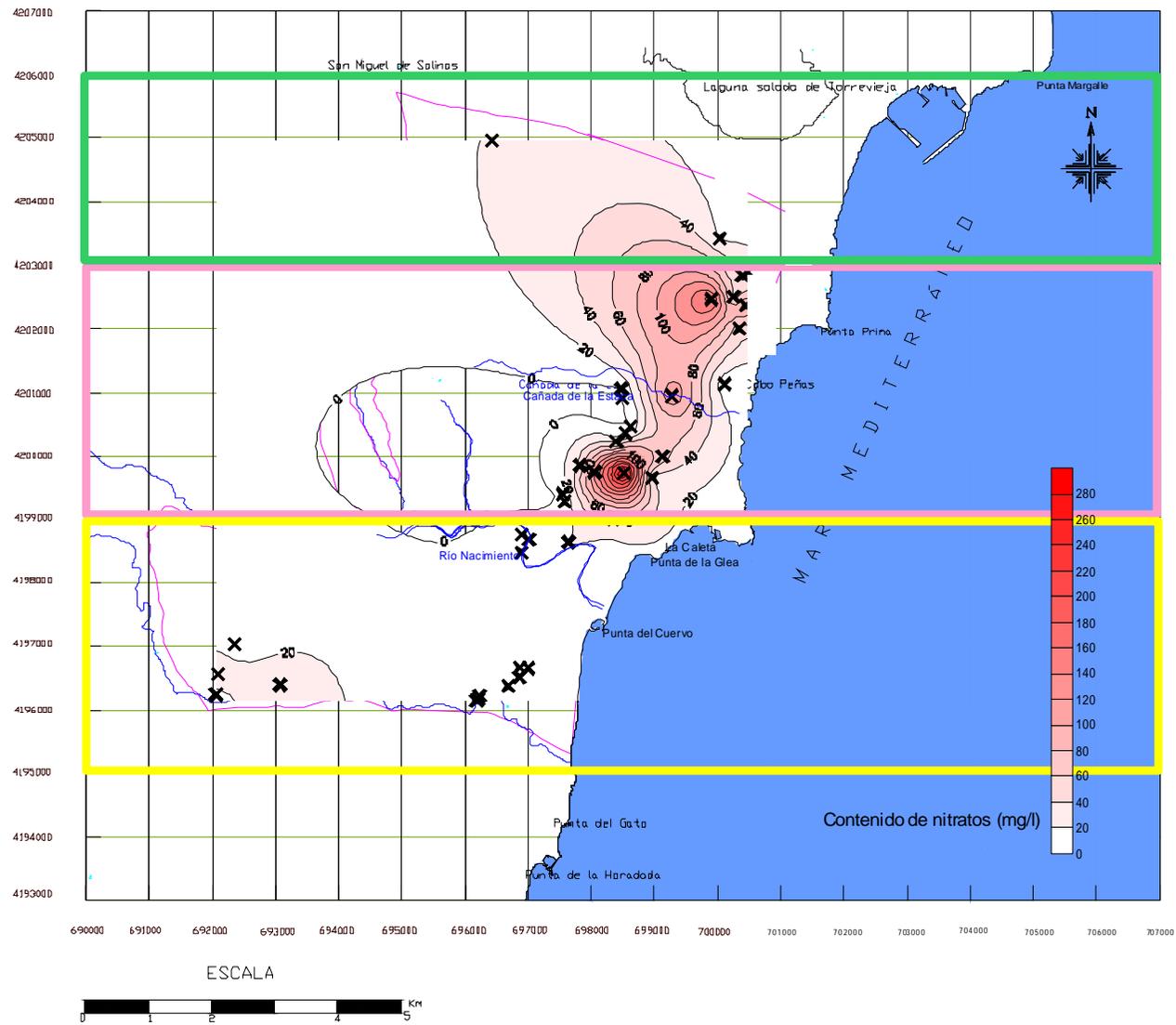
Figura 8. Diagrama de Piper de las muestras de agua de la zona sur del acuífero de Cabo Roig.

En esta zona sur se encuentran en su mayoría muestras (ver figura 8), con facie clorurada sulfatada sódica- magnésica (6 muestras) y en menor proporción se presenta facie: clorurada bicarbonatada sódica magnésica (3 muestras), clorurada sulfatada sódica cálcica (1 muestra), clorurada sulfatada sódica (1 muestra) y clorurada sódica magnésica (1 muestra).

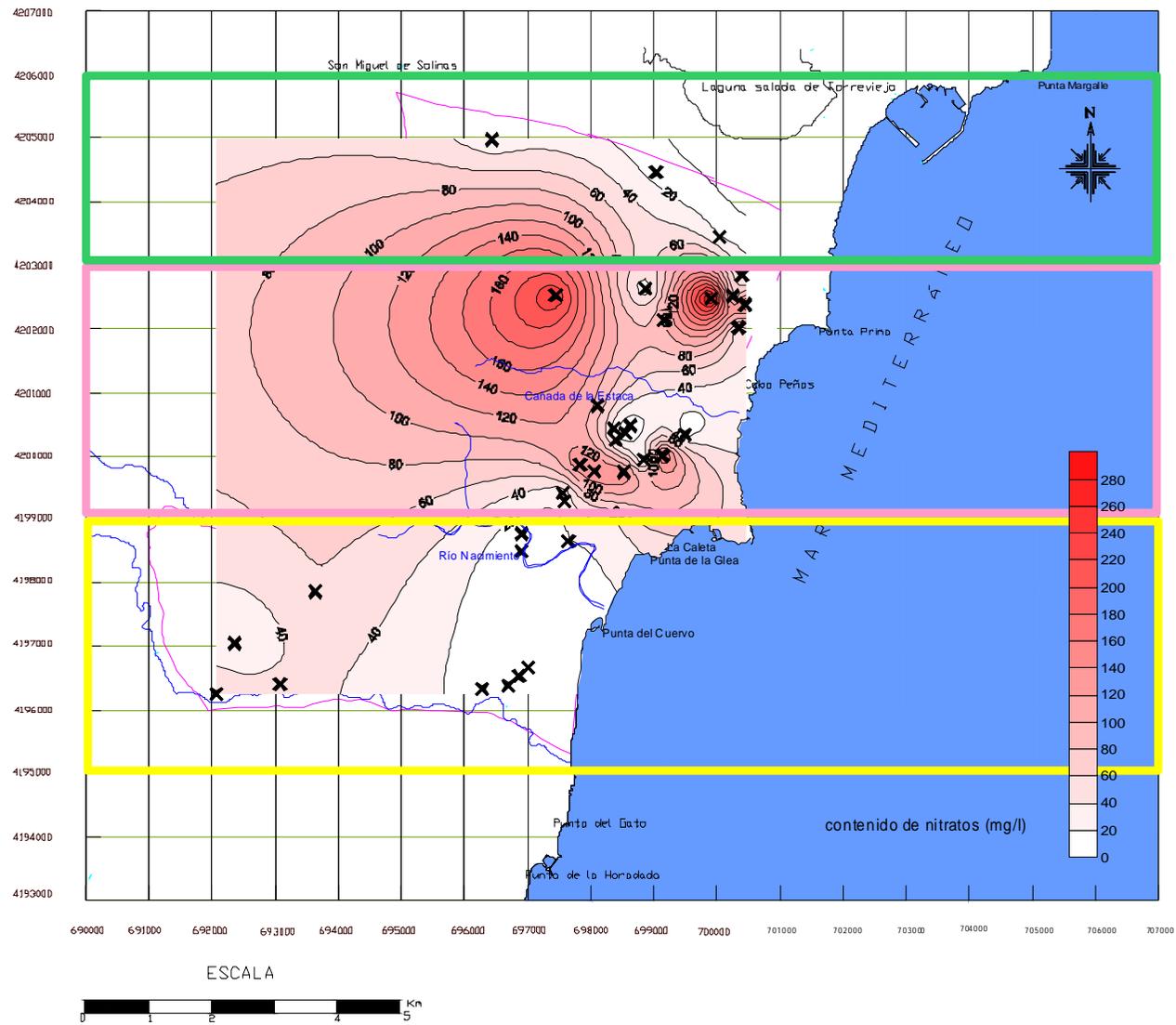
Para continuar con la interpretación de los análisis químicos del agua subterránea se ha realizado un análisis espacial del contenido de nitratos para cada zona, así como su localización en el área de estudio.

Dicho análisis se ha realizado para los años 2001 y 2002, con el fin de poder evidenciar, de manera gráfica, la evolución del contenido de nitratos al transcurrir un año. De esta manera puede verse en el mapa 2 que el contenido de nitratos para el año 2001 es ligeramente más bajo en comparación con el contenido en el año 2002 (ver mapa 3), esto ocurre, en los núcleos de explotación para usos agrícolas. Los mayores incrementos ocurren de manera puntual en algunas captaciones y se encuentran sectorizados en la parte oriental de la zona central, mientras que en la zona norte y sur los incrementos no son significativos. A continuación se describe la influencia de los nitratos en cada zona del área de estudio:

1. En la zona norte se encuentran los valores más bajos de contenido de nitrato de toda el área de estudio, los cuales oscilan entre 12 a 25 mg/l, lo cual indica que está por debajo del valor máximo permitido de nitratos en el agua potable, que es de 50 mg/l según la normativa española.
2. En la zona central se encuentran valores entre 0 a 300 mg/l. Los valores más altos de contenido de nitratos en todo el acuífero se encuentran en esta zona, lo que implicara una restricción alta para consumo humano.
3. En la zona sur se encuentran valores de nitratos entre 2 a 60 mg/l, presenta valores admisibles de contenido de nitrato para su empleo como agua potable, según la normativa española.



Mapa 2. Contenido de nitratos en el acuífero de Cabo Roig (año 2001). Fuente de datos: Instituto Geológico y Minero de España



Mapa 3. Contenido de nitratos en el acuífero de Cabo Roig (año 2002). Fuente de datos: Instituto Geológico y Minero de España

4.2. Datos de las estaciones meteorológicas.

Se ha utilizado datos de precipitación mensual total (mm) y de temperatura (°C) para el periodo de 01/10/1997 a 30/09/2002. La información recopilada de precipitaciones y temperaturas pertenecen a la estación meteorológica 7037A, cuya ubicación es:

Indicativo	X	Y	Z	Ubicación	Tipo de estación
7037A	694208	4205726	85	San Miguel Salinas	Estación Termopluviométrica

A continuación, en la figura 9 se representa gráficamente las precipitaciones mensuales para los cinco años estudiados en la estación meteorológica de San Miguel de Salinas, donde puede apreciarse que los meses con menores valores de precipitación se dan en julio y agosto, llegando a valores mínimos entre 0 a 24.5 mm, y en los meses septiembre y octubre se llega a valores máximos medios de 38.5 mm, observándose un máximo de precipitación de hasta 204 mm.

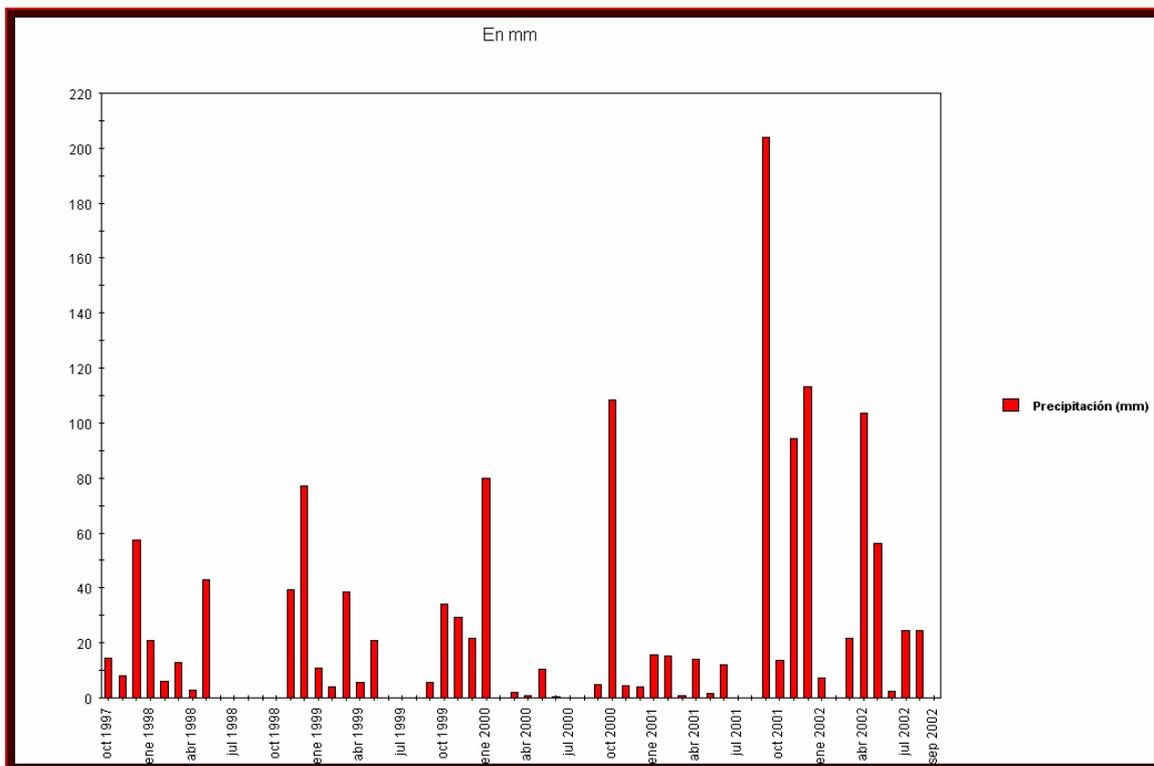


Figura 9. Distribución mensual de las precipitaciones en el periodo de 1997-2002.

En la figura 10 se presentan las precipitaciones anuales para el período estudiado, donde se observa que el menor valor de precipitación se encuentra en el año hidrológico 1997-1998, con un valor de 166 mm, como indicativo del periodo de sequía que existió de 1997 a 2000, conjuntamente se observa que el mayor valor de precipitación se da en el año 2001-2002 con un valor de 461 mm.

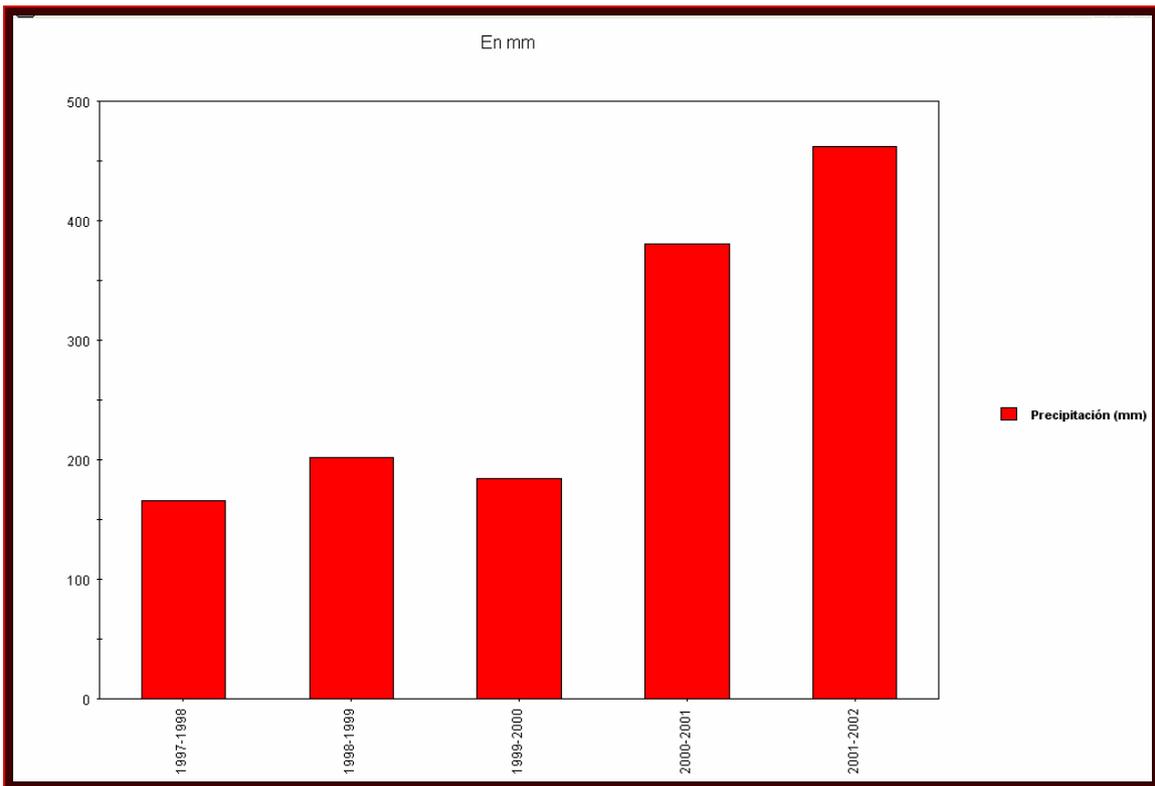


Figura 10. Distribución anual de las precipitaciones en el periodo de 1997-2002.

En la figura 11 se presenta la distribución mensual de las temperaturas para el periodo de 1997-2002 y puede observarse que los menores valores de temperatura se dan en los meses de diciembre, enero y febrero con un valor medio de 12°C y los mayores valores de temperatura se dan en los meses julio y agosto con un valor medio de 27.5°C .

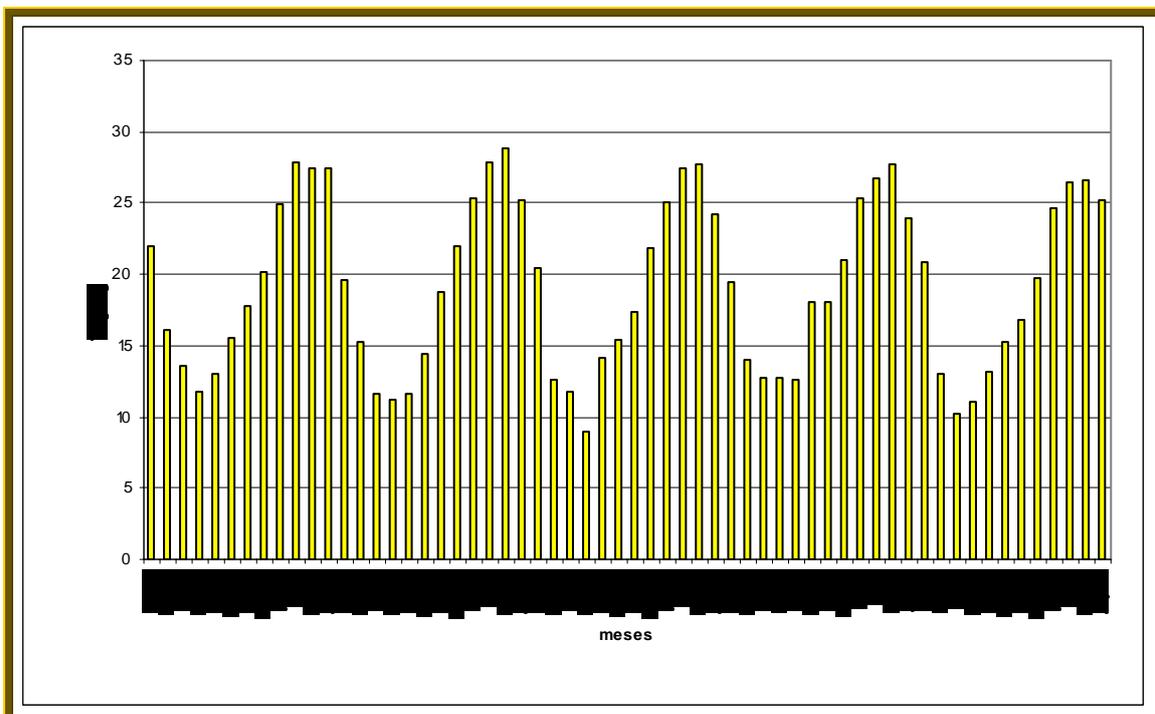


Figura 11. Distribución mensual de las temperaturas en el periodo de 1997-2002.

En la figura 12 se presenta la distribución anual de las temperaturas para el periodo 1997-2002 y se aprecia que el rango de variación de temperatura es de 18.6 a 19.8 °C.

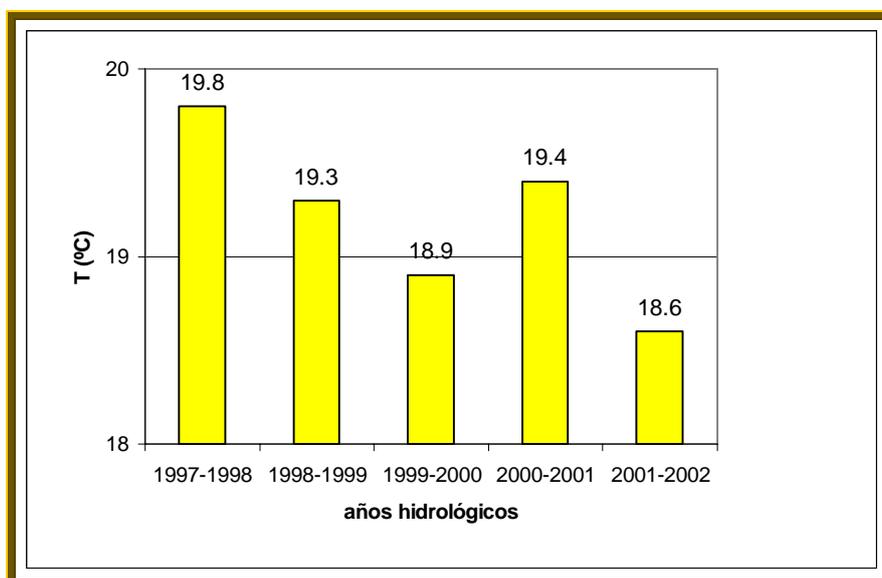


Figura 12. Distribución anual de las temperaturas en el periodo 1997-2002.

La velocidad del viento media anual para el periodo de 5 años de 1997-2002 es de 7 km/h, la humedad relativa en porcentaje está alrededor del 54 % y el valor de la insolación media anual está alrededor del 65%. Estos datos pertenecen a la estación meteorológica completa de Alicante “Ciudad Jardín”, y se han obtenido del Informe de la Estimación de la recarga para el acuífero de Torrevieja (IGME, 2003), los cuales servirán como datos de entrada para el modelo unicelda 1: 283720063 en el caso 2: con regadíos (Blaney Criddle).

4.3. Datos de los piezómetros disponibles en la zona.

La información piezométrica procede del Instituto Geológico y Minero de España, donde existen: 3 piezómetros de control en la zona norte (283720063, 283720058 y 283720138), 4 piezómetros de control en la zona central (283720141, 283720157, 283720092 y 283720102) y 5 piezómetros de control en la zona sur (283760009, 283760004, 283750178, 283750170 y 283760016). El control piezométrico en estos sondeos se han realizado durante un año: de marzo de 2002 a enero de 2003, con mediciones mensuales del nivel piezométrico estático durante ese año.

Puede observarse en el mapa 1 la ubicación de los piezómetros de control en el acuífero de Cabo Roig distribuidos en las tres zonas principales: norte, central y sur, las cuales se detallan a continuación.

- La **zona norte** es el área menos afectada por las explotaciones por bombeo (ver figura 13), y se observa una tendencia piezométrica creciente de noviembre de 2001 a enero de 2003. En esta zona se observan las mayores cotas piezométricas por ser la zona con mayor área de afloramiento del estrato acuífero (areniscas y

calcarenitas del Plioceno), y porque está menos afectada por las explotaciones. Además, la poca explotación que hay en esta zona es puntual, para uso no doméstico en pequeñas urbanizaciones. Los piezómetros empleados en la modelización del balance hídrico de la zona norte han sido: 283720063 y 283720058.

El volumen total anual extraído de agua subterránea en la zona norte es: 31 200 m³.

- Algo más afectada está la **zona central** (ver figura 14), aunque en menor proporción que la zona sur, esto es debido al núcleo de explotaciones existente en el área oriental, pues se usa para el abastecimiento de urbanizaciones, agricultura de pequeña superficie, y dotación de obras vinculadas a nuevas infraestructuras. Se observa una tendencia creciente de diciembre de 2001 a enero de 2003, a excepción del pozo 283720157, que tiene una evolución irregular debido a la influencia de la explotación. No se pudo modelizar el balance en esta zona central debido a que los piezómetros están muy afectados por las intensas explotaciones y por su cercanía a la costa; quizás el único piezómetro que podría emplearse es el 283720141, pero no tiene suficientes datos registrados de niveles estáticos.

El volumen total anual extraído de agua subterránea en la zona central es: 759 832 m³.

- La **zona sur** (ver figura 15), está muy afectada por explotaciones en el área oriental y en las cercanías al río Seco. Las cotas piezométricas más bajas se encuentran en esta zona como consecuencia de la explotación intensiva para usos agrícolas, por lo cual se han registrado cotas piezométricas de -9 a -70.5 m.s.n.m. El piezómetro empleado en la modelización del balance hídrico de la zona sur occidental ha sido el 283750178.

El volumen total anual extraído de agua subterránea en la zona sur es: 2 199 143 m³.

En los pozos situados cerca del **río Nacimiento** (piezómetros 283760009 y 283760004) se observa una tendencia creciente de las cotas piezométricas desde enero de 2001 a enero de 2003, que demuestra que actualmente en el área cercana a este río se extrae el menor volumen de agua subterránea de la zona sur, ya que con el tiempo han sido abandonados muchos pozos y otros extraen volúmenes menores de agua, en comparación con los pozos cercanos al río Seco. Los piezómetros empleados en la modelización del balance hídrico de la zona sur, cerca del río Nacimiento son: 283760009 y 283760004.

El volumen total anual extraído de agua subterránea en la zona sur, cercana al río Nacimiento es: 299 520 m³.

Los pozos ubicados cerca del **río seco** (piezómetros 283750170 y 283760016) muestran los hidrogramas más irregulares en esta zona debido a que en las cercanías al río Seco se encuentran varios pozos para usos agrícolas, que extraen el mayor volumen de agua subterránea de la zona sur. El piezómetro empleado

en la modelización del balance hídrico de la zona sur, cerca del río Seco es el 283750170.

El volumen total anual extraído de agua subterránea en la zona sur, cercana al río Seco es: 1 899 623 m³.

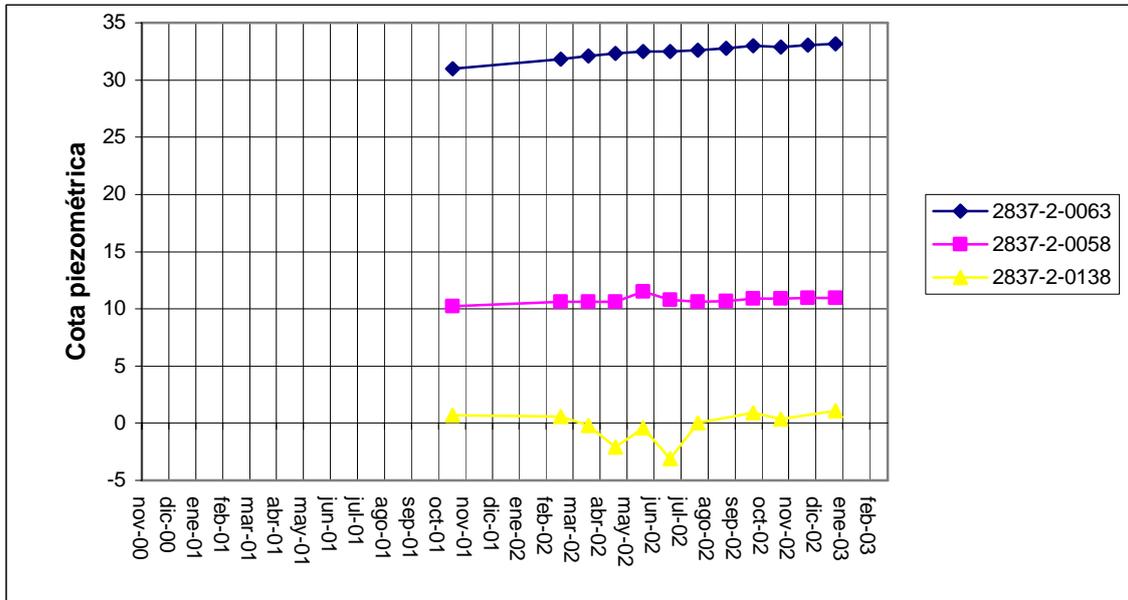


Figura 13. Evolución de los niveles estáticos en los piezómetros de la zona norte de Cabo Roig.

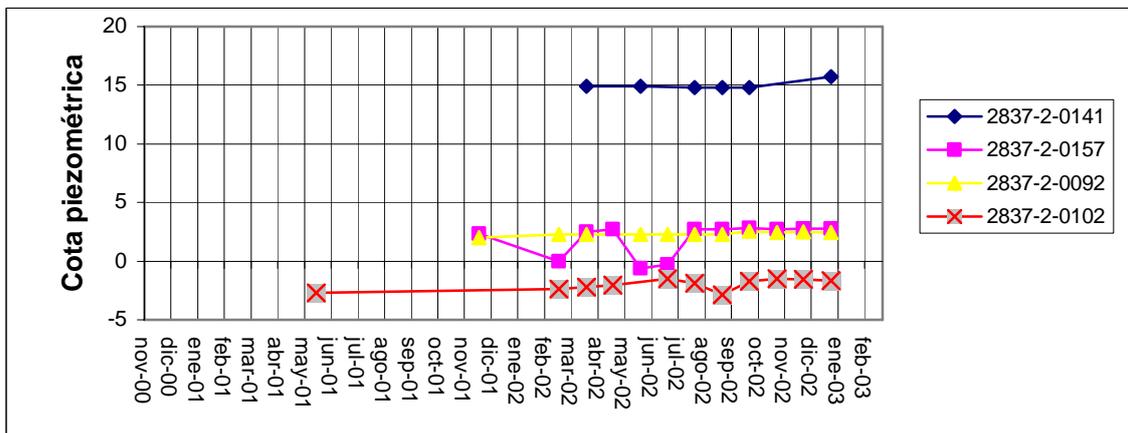


Figura 14. Evolución de los niveles estáticos en los piezómetros de la zona central de Cabo Roig.

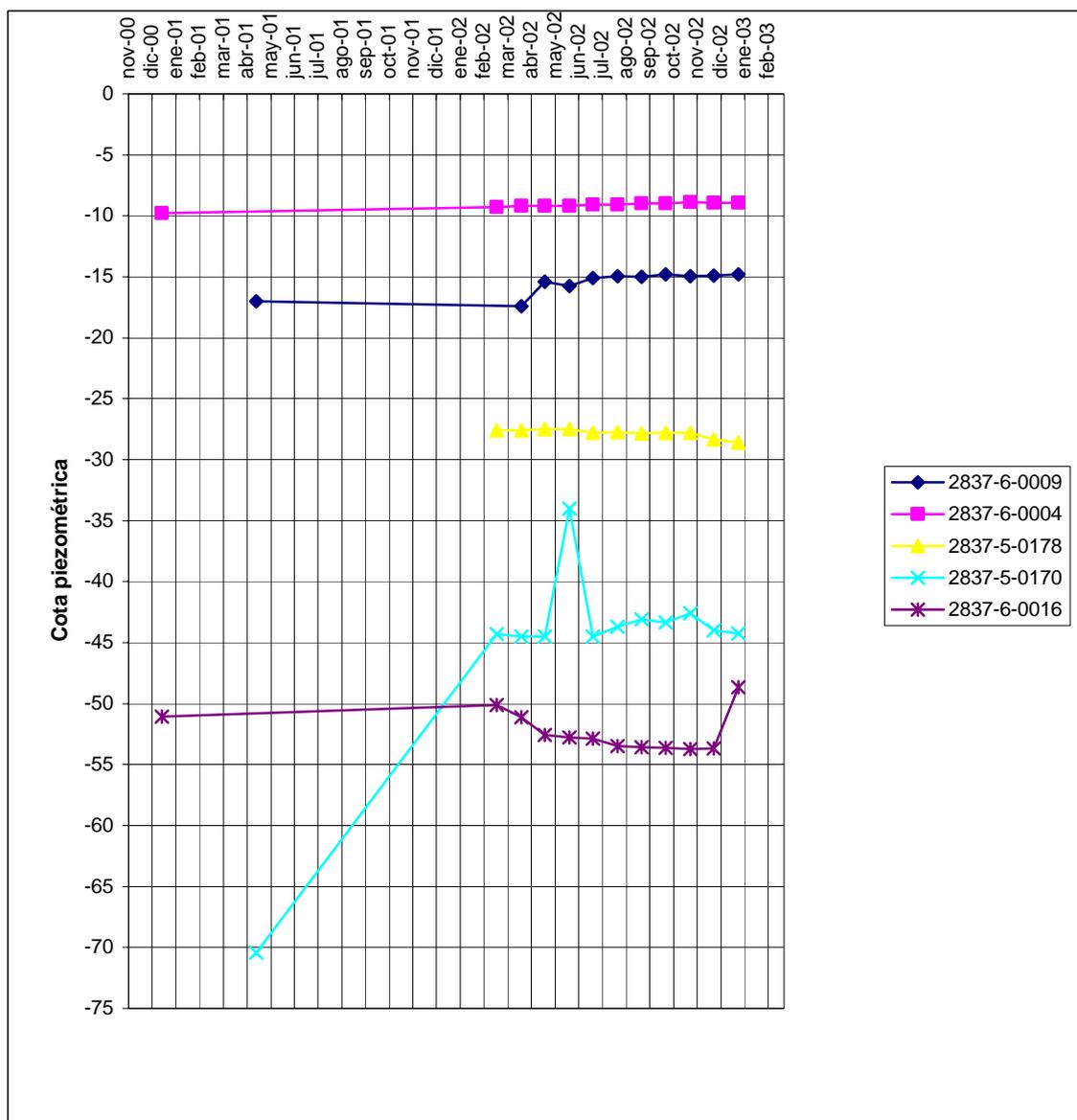


Figura 15. Evolución de los niveles estáticos en los piezómetros de la zona sur de Cabo Roig.

4.4. Datos de estaciones de aforo.

No se tienen datos de estaciones de aforos en cursos de agua del acuífero de Cabo Roig, por lo cual se ha realizado el ajuste del balance exclusivamente con los datos de niveles.

4.5. Datos de las dotaciones de riego.

Los datos de usos de suelo han sido obtenidos de un estudio de usos del suelo mediante técnicas de teledetección (IGME, 2000) y del Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura (C.H.S, 1999).

De estos estudios se han obtenido las tablas 1,2 y 3. En la tabla 1 se observa que el mayor porcentaje del área del acuífero de Cabo Roig pertenece a zonas para uso urbano (71.31%) y un 26.87 % pertenece a superficie con regadíos. A continuación, en la tabla

2, se observa que los cultivos dominantes en la superficie con regadíos son: los herbáceos (hortícola y forrajeros) 51.5 % y los leñosos de regadío (cítricos) con 37.4%.

Usos del suelo	(Ha)	%
Zonas no cultivadas (zonas urbanas)	4192	71.31
Improductivo(eriales y campos abandonados)	104.97	1.79
Leñosos de secano (Almendros y Olivos)	1.71	0.03
Regadíos	1579.59	26.87
TOTAL	5878.27	100

Tabla 1. Usos del suelo en Cabo Roig.

Superficies en regadío	(Ha)	%
Leñosos de regadío (Cítricos)	590.42	37.4
Herbáceos (Hortícola y Forrajeros)	813.85	51.5
Invernadero	39.33	2.5
Transformación	48.04	3
Área sin clasificar	87.95	5.6
TOTAL	1579.59	100

Tabla 2. Superficies de regadío en Cabo Roig.

Para conocer las dotaciones de riego para cada cultivo se ha utilizado la información del Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura, mientras que para el cálculo de la dotación mensual de los cultivos se ha tomado como referencia la metodología empleada en el trabajo de estimación de la recarga en el acuífero de Torre Vieja (IGME, 2003), obteniendo de esta manera una estimación de los valores mensuales de las dotaciones de riego en el área de Cabo Roig.

En la tabla siguiente se observa el reparto de las dotaciones de riego mensuales, donde se puede ver que la dotación anual promedio para esta zona es de 6032 m³/ha/ año.

Cultivo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	Sup. (%)
Leñosos de regadío (Cítricos)	12.9	19.2	28.8	46.1	47.6	86.5	108.1	108.1	43.9	38.8	18.9	3.2	562	39.6
Herbáceos (Hortícola y Forrajeros)	14.4	21.5	32.4	51.7	53.5	97.1	121.3	121.3	49.3	43.5	21.2	3.6	631	54.5
Invernadero	58.3	58.3	58.3	58.3	58.3	58.3	58.3	58.3	58.3	58.3	58.3	58.3	700	2.7
Transformación	12.9	19.2	28.8	46.1	47.6	86.5	108.1	108.1	43.9	38.8	18.9	3.2	562	3.2

mm	14.9	21.5	31.5	49.5	51.1	91.5	114.0	114.0	47.2	41.9	21.2	4.9	603.2
m ³ /ha/año	149.5	215.2	315.4	494.8	511.0	914.9	1139.6	1139.6	472.3	418.8	211.9	49.0	6032

Tabla 3. Dotaciones de riego mensual y anual en Cabo Roig.

Puede verse en la figura 16 la distribución mensual de las dotaciones de riego para cada mes. En ellos se observa que los mayores consumos de agua de riego se realizan en los meses de junio, julio y agosto, con valores de 915, 1140 y 1140 m³/ha respectivamente.

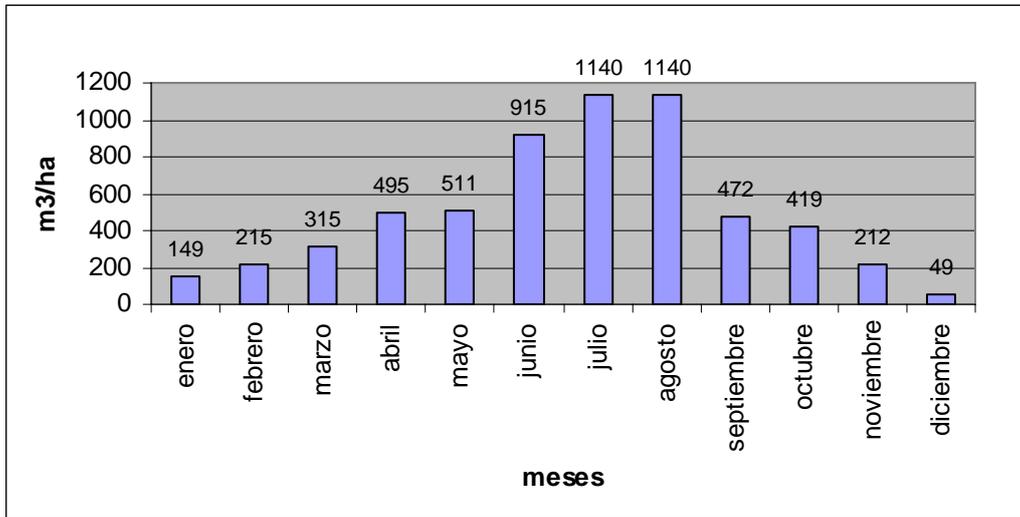


Figura 16. Distribución mensual de las dotaciones de riego en Cabo Roig.

5. ESTIMACIÓN DEL BALANCE HIDRICO

A continuación se presenta el ajuste del balance hídrico para cada modelo unicelular (seis modelos unicelulares), donde en cada modelo se consideran condiciones distintas del acuífero (libre, semiconfinado y confinado), para realizar posteriormente una comparación, análisis y validación de dichos resultados. Es importante mencionar, que en ninguno de los modelos se consideran los regadíos, a excepción del Modelo 1- caso 2

5.1. Modelo unicelular 1 (piezómetro 283720063).

Este es un modelo unicelular del balance hídrico considerando el acuífero sin confinamiento, como ocurre en la zona norte (sector occidental), donde se encuentra el área de recarga de las areniscas y calcarenitas del Plioceno (18 km²). Para este modelo se usó los datos de niveles del piezómetro 283720063, por estar en la zona menos influenciada por las explotaciones y en la más alejada posible de la costa. Para este modelo, se han realizado dos casos de modelización, los cuales presentamos y analizamos a continuación:

Caso 1: sin regadíos (Thornthwaite)

Caso 2: con regadíos (Blaney Criddle).

Solamente se consideran regadíos en el modelo 1, porque el valor de la superficie de regadíos es un dato global para todo el acuífero, por lo que se le asigna este valor al área mas extensa y representativa de la recarga del acuífero. Es decir, no existen datos

específicos de las superficies de riego por zonas, por lo cual no podemos asignar este dato general de regadíos, a los modelos de zonas de pequeña extensión y poco representativos de la recarga global del acuífero.

Algunas de las consideraciones básicas adoptadas para este modelo, fueron:

- No se considera la intercepción de la lluvia por la vegetación.
- Recarga en tránsito:
 - Diferida: método modificado.
 - Directa: Por desecación. CKRD: 0.4 FRD:0.4
- ETP: para el caso 1: sin regadíos según Thornthwaite y para el caso 2: con regadíos según Blaney Criddle (considerando como cultivo predominante los herbáceos).
- ETR: método de Penmam Grindley Modificado: CRPG: 40mm CEPG: 1.
- Escorrentía superficial: CIM0: 50mm/d CIM1:70mm/d.

En este estudio muchos de estos valores se han obtenido mediante calibración manual, tablas y datos previamente publicados.

A continuación se detallan los datos obtenidos de la calibración del modelo. En la tabla 4 se presentan los parámetros del suelo edáfico, en la tabla 5 los parámetros de la zona no saturada y en la tabla 6 los parámetros del acuífero.

Suelo Edáfico	Porosidad Total (tanto por uno en volumen)	0.35
	Punto de Marchitez (PM) (tanto por uno en volumen)	0.1
	Capacidad de Campo (CC) (tanto por uno en volumen)	0.25
	Humedad Inicial(tanto por uno en volumen)	0.10
	Espesor del suelo (m)	0.5
	Conductividad Hidráulica (mm/día)	1000
	Reserva útil (mm)	75

Tabla 4. Datos de la calibración del modelo 1- caso 1 y 2, para el suelo.

		Caso 1: sin regadíos según Thornthwaite	Caso 2: con regadíos según Blaney Criddle
Zona no saturada	Permeabilidad Vertical (Zona no saturada)	1000 mm/día	1000 mm/día
	Tiempo de Semiagotamiento (Flujo de percolación)	11 días (0.063 días ⁻¹)	2 días (0.3466 días ⁻¹)
	Humedad Inicial	5mm	5mm

Tabla 5. Datos de la calibración del modelo 1- caso 1 y 2, para la zona no saturada.

		Caso 1: sin regadíos según Thornthwaite	Caso 2: con regadíos según Blaney Criddle
Acuífero	Coefficiente de almacenamiento	0.00417	0.0064
	Nivel inicial	16.56	16.5
	Nivel de descarga	15.15	16.05

	Tiempo de Semiogotamiento (Flujo de subterráneo)	100.5 días(0.0069días ⁻¹)	25 días (0.0277días ⁻¹)
--	--	---------------------------------------	-------------------------------------

Tabla 6. Datos de la calibración del modelo 1-caso 1 y 2, para el acuífero.

5.1.1. Ajuste automático

En el ajuste automático que se logró para el periodo 1997-2002 (5 años hidrológicos), con los 9 datos de nivel disponibles en este piezómetro, se logra un error cuadrático medio de 7.2 cm. (ver figura 17). Este ajuste fue realizado solo con datos de niveles, porque no se tienen datos de caudal para su ajuste y pertenece al caso 1, en el que no existen regadíos (Thornthwaite).

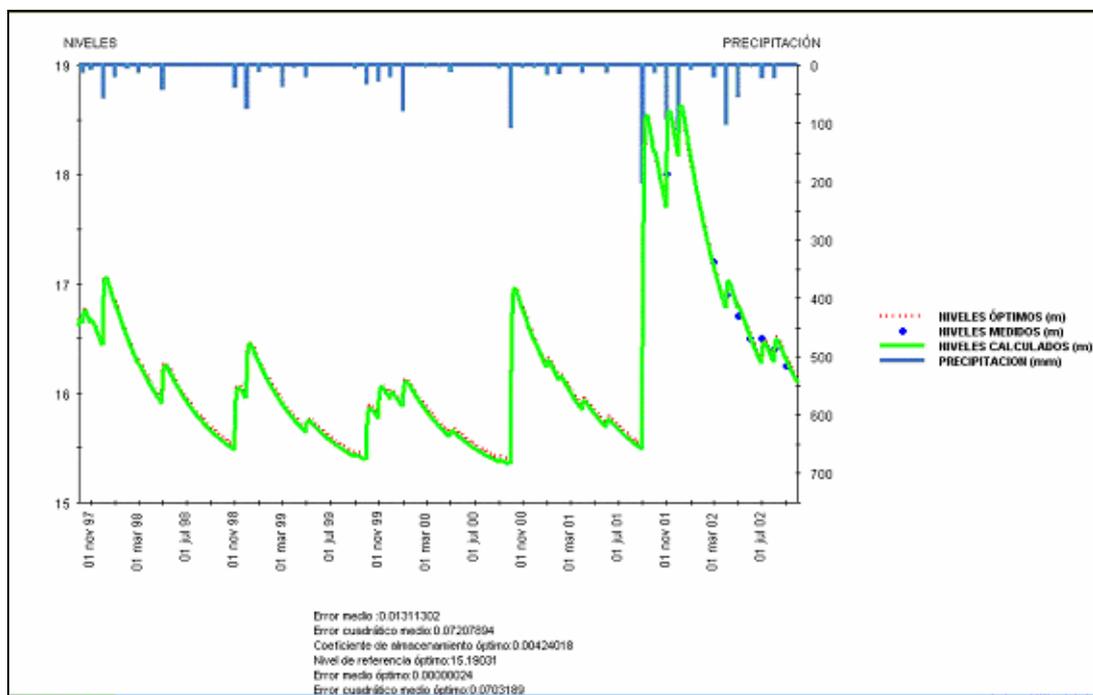


Figura 17. Hidrograma medido y calculado con datos de un piezómetro (283720063), ubicado en la zona norte del acuífero de Cabo Roig, para el caso 1 (sin regadíos: Thornthwaite).

El ajuste presentado en la figura 18 es para el caso 2, en que se consideran las dotaciones de riego (Blanney Criddle); en el se aprecia un error cuadrático medio de 38 cm; hay que subrayar que este ajuste fue realizado solo con datos de niveles porque no se tienen datos de caudal para su ajuste y se considera como cultivo predominante los herbáceos.

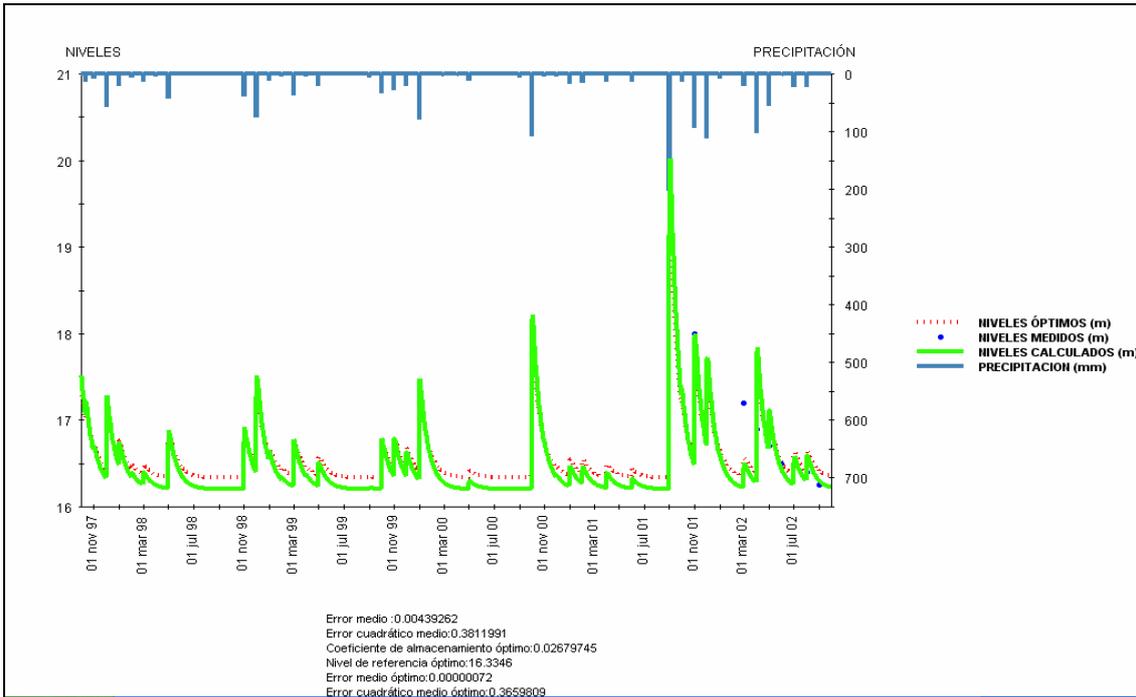


Figura 18. Hidrograma medido y calculado con datos de un piezómetro (283720063), ubicado en la zona norte del acuífero de Cabo Roig, para el caso 2 (con regadíos: Blanney Criddle).

Puede observarse en las gráficas 19 y 20 la distribución media anual, de los diferentes componentes del balance hídrico sin considerar riego y considerando las dotaciones de riego, para el citado periodo de 5 años.

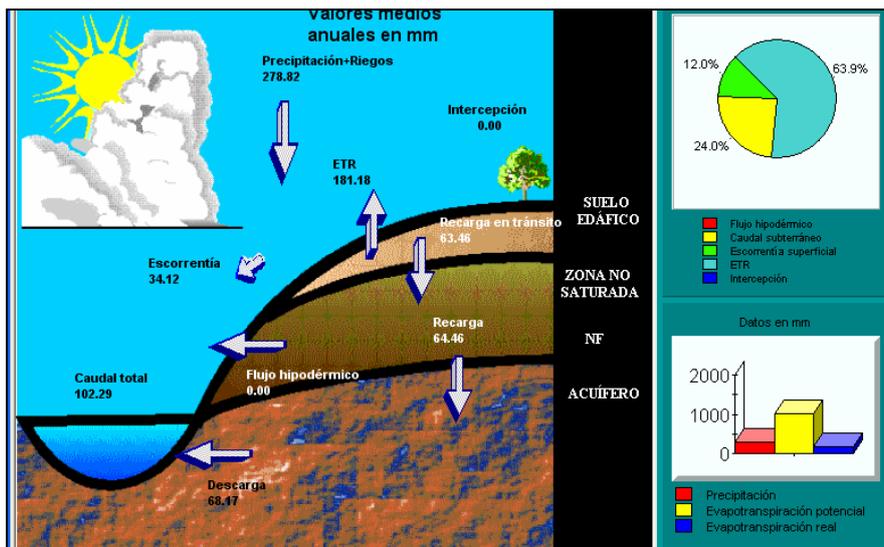


Figura 19. Valores medios anuales del balance hídrico del Modelo 1-caso 1 (sin regadíos).

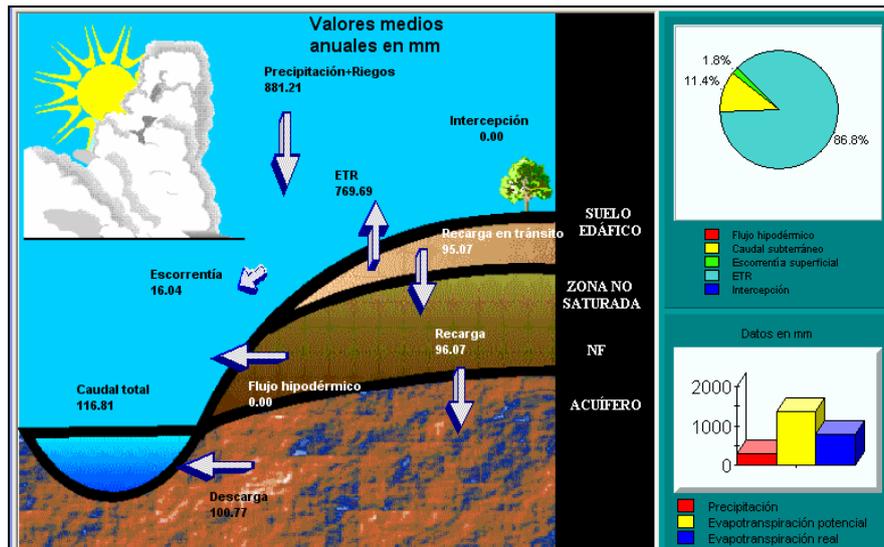


Figura 20. Valores medios anuales del balance hídrico del Modelo 1-caso 2 (con regadíos).

En la tabla 7 se presentan los valores medios anuales en mm obtenidos de la calibración de los dos modelos, durante este periodo de 5 años para un espesor del suelo promedio de 0.5m. Se puede apreciar en dichos valores que la recarga media anual varía de 64.4mm a 96mm, sin regadíos y con regadíos, respectivamente.

Modelos de zonas de recarga	Escorrentía superficial (mm/año)	Recarga en tránsito (mm/año)	ETR (mm/año)	Recarga (mm/año)	Recarga (hm ³ /año)
Caso 1: Afloramiento del Plioceno (sin regadíos)	34.2	63.4	181.2	64.4	1.1
Caso 2: Afloramiento del Plioceno (con regadíos)	16	95	769.6	96	1.7

Tabla 7. Valores medios anuales de los componentes del balance hidrológico del Modelo 1, caso 1 y 2.

En esta zona del piezómetro 283720063, la entrada de agua en el sistema (precipitación y precipitación-riegos) está distribuida en los siguientes porcentajes, que fueron calculados con el modelo unicelular para los dos modelos (ver tabla 8). Puede apreciarse que el mayor porcentaje del agua que entra en este sistema se distribuye como ETR (64-86.8%) y, en menores porcentajes, como recarga en tránsito (24-11.4%) y como escorrentía superficial (12-1.8%).

Balance Promedio en %	escorrentía superficial %	recarga en tránsito %	ETR %
Medios anuales Caso 1: sin regadíos	12	24	64
Medios anuales Caso 2: con regadíos	1.8	11.4	86.8

Tabla 8. Distribución en porcentaje con respecto a la entrada de agua al sistema hidrológico (precipitación ó precipitación+riego) para el Modelo 1, caso 1 y 2.

En las figuras 21 y 22 se presenta, de manera gráfica, la recarga anual ($\text{hm}^3/\text{año}$), estimada en los dos modelos (sin regadíos y con regadíos), para un periodo de 5 años. Pueden observarse valores entre 0.6 a 2.35 $\text{hm}^3/\text{año}$ para el caso sin regadíos y de 1.1 a 2.8 $\text{hm}^3/\text{año}$ para el caso con regadíos.

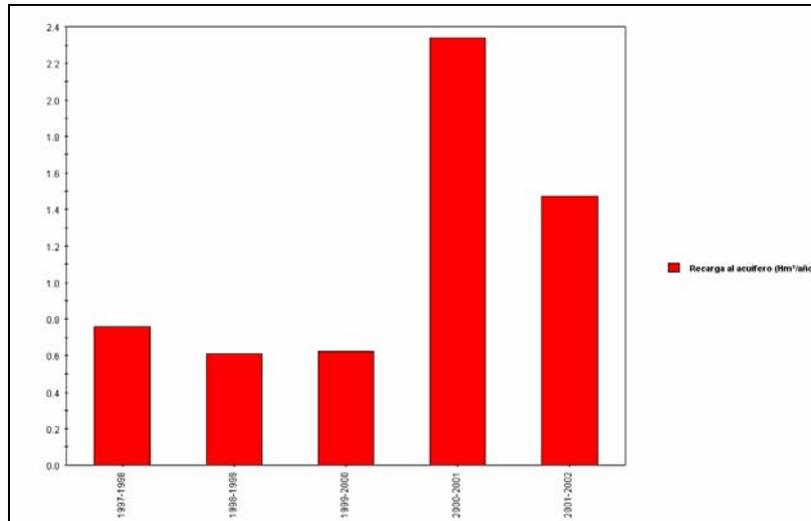


Figura 21. Recarga del acuífero ($\text{hm}^3/\text{año}$) para el período 1997-2002. Modelo 1, caso 1 (sin regadíos).

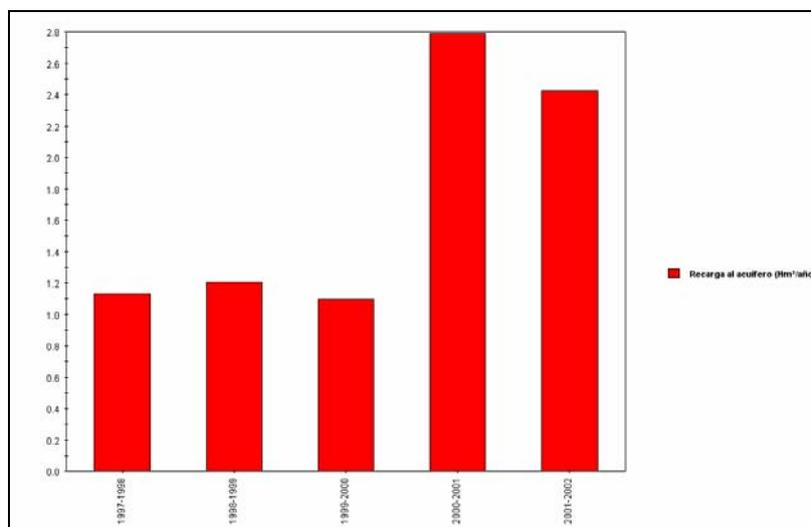


Figura 22. Recarga del acuífero ($\text{hm}^3/\text{año}$) para el período 1997-2002. Modelo1, caso 2 (con regadíos).

5.1.2. Análisis de sensibilidad.

Se ha realizado un primer análisis de sensibilidad para los distintos componentes del balance, para diferentes valores de espesor del suelo desde 0.1m a 1m, cada 0.1 m, observándose la variación que existe en la recarga para cada valor de dicho espesor. A medida que incrementamos el espesor observamos una disminución de la recarga (ver

figura 23) desde 180mm/año para el mínimo espesor (0.1m) a 55mm/año para el mayor valor de espesor (1m). Este análisis de sensibilidad considera coeficientes de infiltración altos, de CIM0 y CIM1 de 50 y 70 mm/d respectivamente y no considera regadíos.

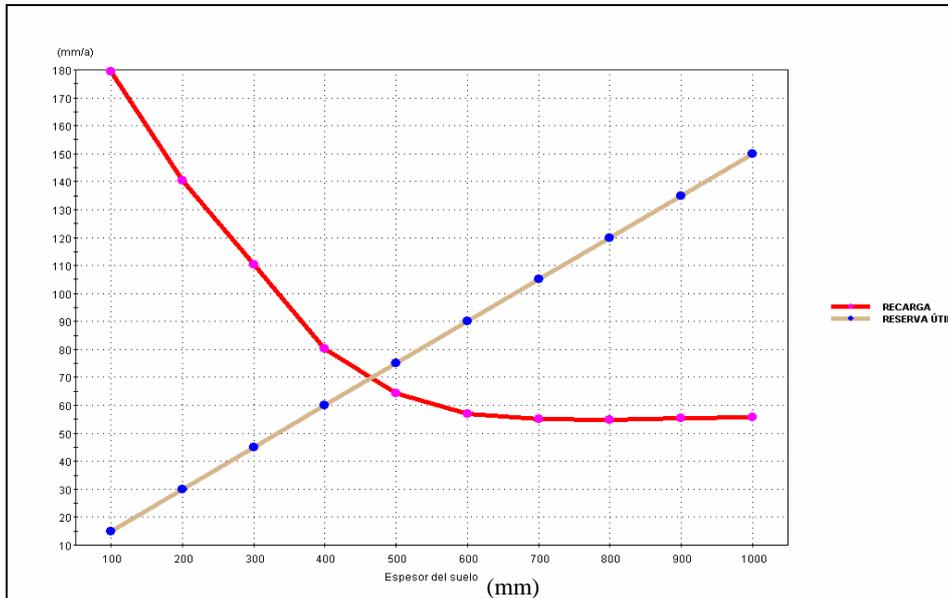


Figura 23. Análisis de sensibilidad de la recarga y reserva útil con respecto al espesor del suelo. Modelo 1, caso 1 (sin regadíos).

A continuación se indica, de manera gráfica, la disminución de la recarga (ver figura 24) desde 180mm/año para el mínimo espesor (0.1m) a 80mm/año para el mayor valor de espesor (1m). Este análisis de sensibilidad considera coeficientes de infiltración altos de CIM0 y CIM1 de 50 y 70 mm/d respectivamente y considera a los riegos.

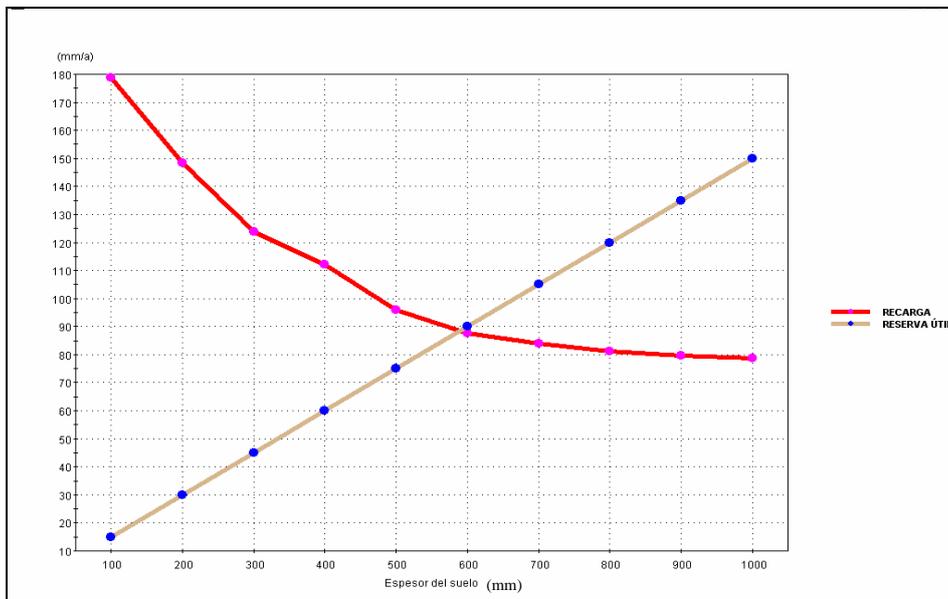


Figura 24. Análisis de sensibilidad de la recarga y reserva útil con respecto al espesor del suelo. Modelo 1, caso 2 (con regadíos).

Los resultados gráficos del análisis de sensibilidad para todos los componentes del balance con respecto al espesor del suelo edáfico, son reflejados en las figuras 25 (caso: sin regadíos) y figura 26 (caso: con regadíos). Se observan valores altos de ETP de 1014 y 1349mm/a para cada modelo y cómo la curva de ETR es ascendente de 0.1 a 0.5m. También se observa que a partir de 0.5 m la curva se mantiene constante, con un valor aproximado de 187mm/a para el primer caso y de 778.5mm/a para el segundo. Además, se muestra cómo disminuyen los valores de caudal total, recarga en tránsito y recarga (la recarga en tránsito y la recarga del acuífero son iguales, porque no existe flujo hipodérmico), con el aumento del espesor, mientras que la escorrentía superficial y la reserva útil aumentan con el incremento del espesor.

Los valores obtenidos de cada componente del balance, para diferentes valores de espesor, pueden consultarse también en las tablas 9 y 10, para los casos: sin regadíos y con regadíos, respectivamente. Se puede, de esta manera, realizar una comparación entre los componentes de los dos modelos y observar en qué rango de valores se puede encontrar cada componente del balance.

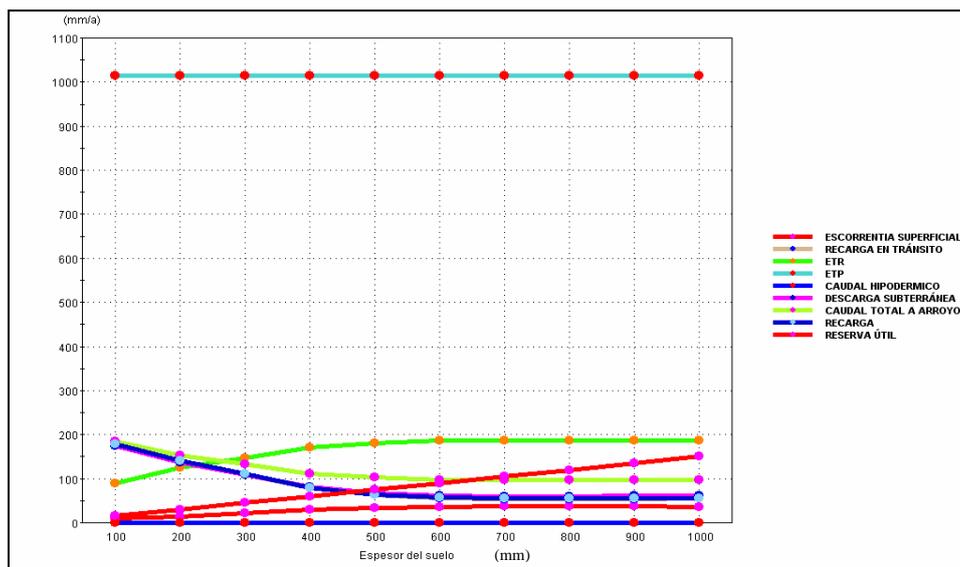


Figura 25. Análisis de sensibilidad de los componentes del balance hidrológico con respecto al espesor del suelo. Modelo 1, caso 1 (sin regadíos).

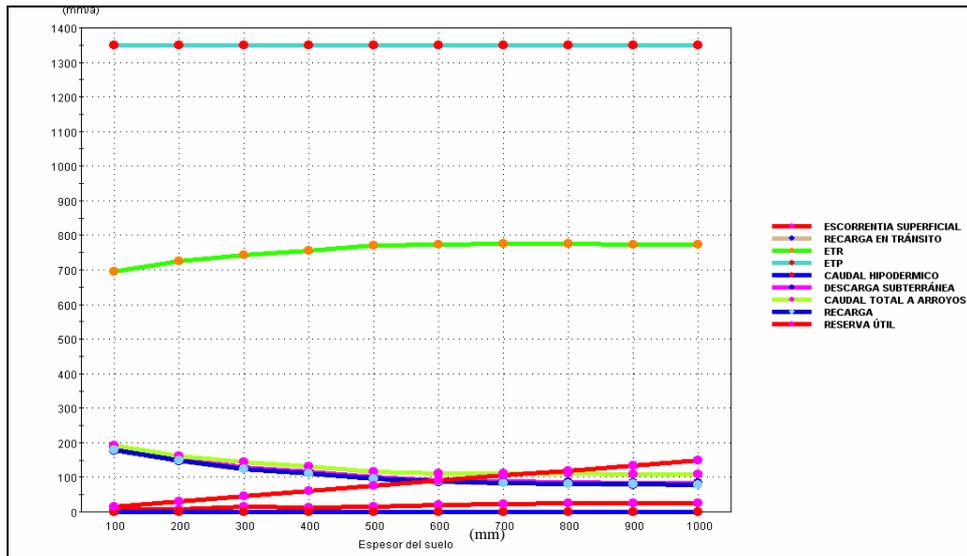


Figura 26. Análisis de sensibilidad de los componentes del balance hidrológico con respecto al espesor del suelo. Modelo 1, caso 2 (con regadíos).

espesor	escorrentía superficial	recarga en tránsito	ETR	ETP	descarga subterránea	caudal total a arroyos	recarga
0.1	10,78	178,3	89,74	1014	174,1	184,9	179,3
0.2	14,18	139,5	125,2	1014	137,9	152,1	140,5
0.3	22,3	109,4	147,1	1014	109,8	132,1	110,4
0.4	29,41	79,27	170,1	1014	82,39	111,8	80,27
0.5	34,12	63,46	181,2	1014	68,17	102,3	64,46
0.6	36,26	55,94	186,5	1014	61,58	97,84	56,94
0.7	37,05	54,15	187,4	1014	60,12	97,17	55,15
0.8	37,15	53,94	187,3	1014	60,08	97,23	54,94
0.9	36,97	54,32	187	1014	60,57	97,54	55,32
1	36,69	54,71	186,6	1014	61,07	97,77	55,71

Tabla 9. Resultados de los componentes del balance hidrológico para el análisis de sensibilidad con respecto al espesor del suelo. Modelo 1, caso 1 (sin regadíos).

espesor	escorrentía superficial	recarga en tránsito	ETR	ETP	descarga subterránea	caudal total a arroyos	recarga
0.1	8,838	177,7	694,7	1349	183,4	192,2	178,7
0.2	8,838	147,5	724,9	1349	153,2	162	148,5
0.3	14,19	122,9	744,1	1349	128,6	142,8	123,9
0.4	13,56	111,3	756,3	1349	117	130,6	112,3
0.5	16,04	95,07	769,7	1349	100,8	116,8	96,07
0.6	19,75	86,52	774	1349	92,22	112	87,52
0.7	21,72	83	775	1349	88,71	110,4	84
0.8	24,02	80,28	774,7	1349	86	110	81,28
0.9	25,44	78,77	774	1349	84,5	109,9	79,77
1	26,31	77,86	773,1	1349	83,59	109,9	78,86

Tabla 10. Resultados de los componentes del balance hidrológico para el análisis de sensibilidad con respecto al espesor del suelo. Modelo 1, caso 2 (con regadíos).

El segundo análisis de sensibilidad realizado es para los coeficientes CIM0 y CIM1 del modelo de escorrentía que incorpora Visual Balan V.1.0, considerando un espesor de suelo fijo de 0.5m. En las graficas 27 y 29 se observa la variación de la escorrentía superficial, caudal total a arroyos y recarga para los diferentes valores de CIM0 en un rango de 20 a 50 mm/d, con un incremento de 10mm/d, para el caso 1 (sin regadíos) y caso 2 (con regadíos). Los valores de escorrentía superficial disminuyen, a medida que aumenta el valor de CIM0, desde 50 a 35mm/a para el primer caso y de 20 a 15 mm/a para el segundo. En lo que respecta a los valores de recarga, no presentan variación significativa, en el primer caso con un valor alrededor de 60mm/a, mientras que en el segundo caso puede observarse un valor de 95mm/a. Los valores de caudal total a arroyos varían de 113 a 103 mm/a con el incremento de CIM0, para el primer caso y en el segundo caso se observa que varía de 122 a 116 mm/a.

Además, en las gráficas 28 y 30 se presenta la variación de los tres componentes del balance, para diferentes valores de CIM1 en un rango de 30 a 70 mm/d con un incremento de 10mm/d. Los valores de escorrentía superficial disminuyen a medida que aumenta el valor de CIM1, desde 70 a 35mm/a para el primer caso, de 50 a 15mm/a para el segundo caso, mientras que los valores de recarga no presentan variación significativa en el primer caso, con un valor de 60mm/a y en el segundo se observa un valor de 100 mm/a.

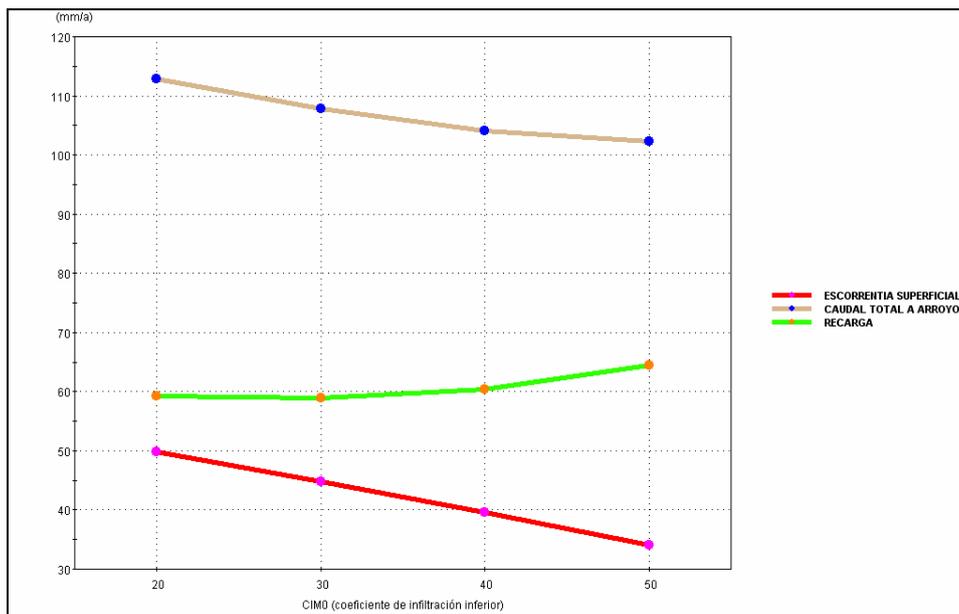


Figura 27. Análisis de sensibilidad de la recarga, caudal total y escorrentía superficial con respecto a CIM0. Modelo 1, caso 1 (sin regadíos).

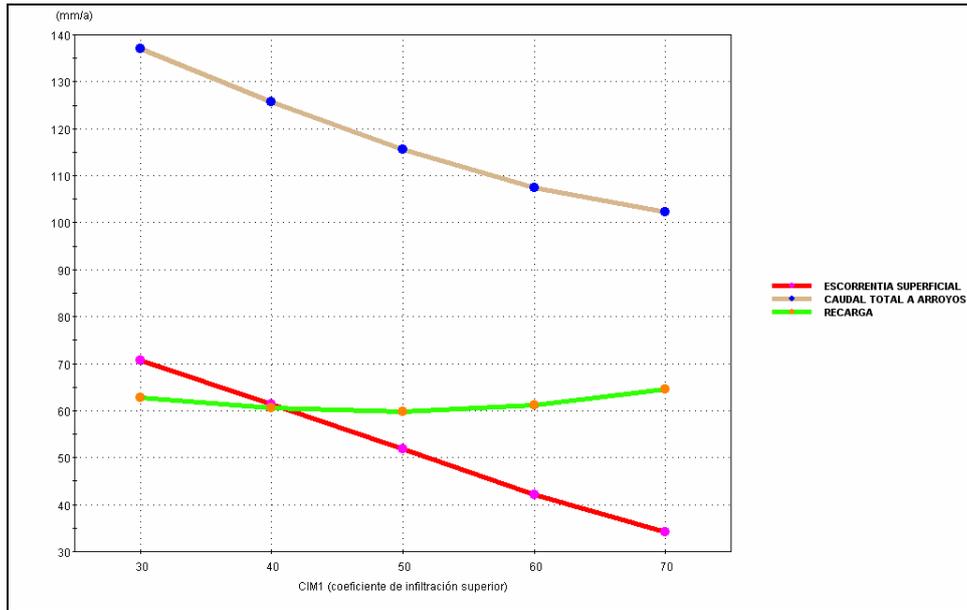


Figura 28. Análisis de sensibilidad de la recarga, caudal total y escorrentía superficial con respecto a CIM1. Modelo 1, caso 1 (sin regadíos).

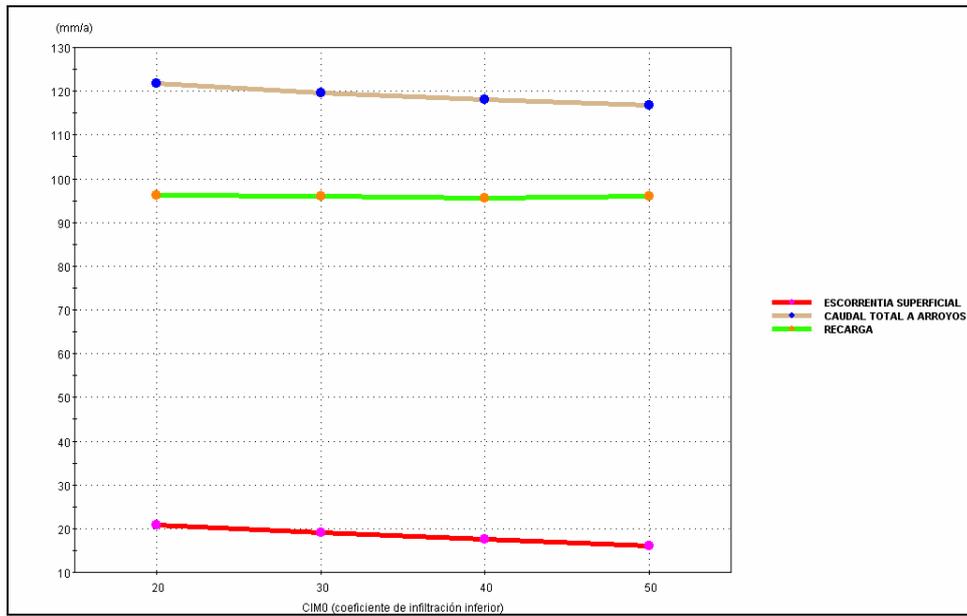


Figura 29. Análisis de sensibilidad de la recarga, caudal total y escorrentía superficial con respecto a CIM0. Modelo 1, caso 2 (con regadíos).

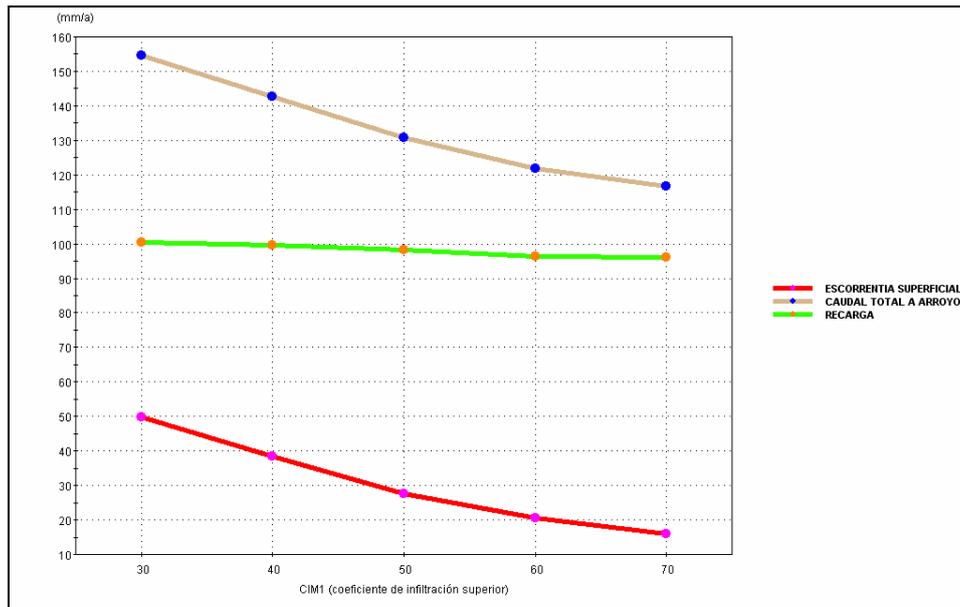


Figura 30. Análisis de sensibilidad de la recarga, caudal total y escorrentía superficial con respecto a CIM1. Modelo 1, caso 2 (con regadíos).

5.2. Modelos unicelulares 2 y 3 (piezómetro 28376009 y 283750178).

Como ya se comentó anteriormente, se ha realizado: el modelo 2 para el piezómetro 28376009, ubicado cercano al río Nacimiento (zona sur) y el modelo 3 para el piezómetro 283750178, ubicado en la zona sur del acuífero. Se han realizado estos dos ajustes para poder considerar las diversas condiciones que pueden darse en el acuífero. El modelo 2 servirá para analizar el comportamiento de los componentes del balance hidrológico en un acuífero semiconfinado, por las zonas de recarga de aluviales en la cuenca del río Nacimiento. En el modelo 3 se considera el caso en el que el estrato de la capa acuífera esté a mayor profundidad (acuífero confinado, caso típico en la zona sur occidental del acuífero). Es interesante conocer la respuesta de los balances a diferentes condiciones y realizar una comparación de ellos.

Algunas de las consideraciones básicas usadas en estos modelos, fueron:

- No se considera la interceptación de la lluvia por la vegetación.
- Recarga en tránsito:
 - Diferida: método modificado.
 - Directa: Por desecación. CKRD: 0.4 FRD:0.4, para el modelo 2.
 - Directa: Por desecación. CKRD: 0.28 FRD:0.4, para el modelo 3.
- ETP: Sin regadíos según Thornthwaite
- ETR: método de Penman Grindley Modificado: CRPG: 40mm CEPG: 1.
- Escorrentía superficial: CIM0: 50mm/d CIM1:70mm/d.

A continuación se detalla conjuntamente los datos obtenidos de la calibración de los modelos 2 y 3. En la tabla 11 se muestran los parámetros del suelo edáfico; en la tabla 12 los parámetros de la zona no saturada y en la tabla 13 los parámetros del acuífero.

		Modelo 2	Modelo 3
Suelo Edáfico	Porosidad Total (tanto por uno en volumen)	0.35	0.35
	Punto de Marchites (PM) (tanto por uno en volumen)	0.1	0.1
	Capacidad de Campo (CC) (tanto por uno en volumen)	0.25	0.25
	Humedad Inicial(tanto por uno en volumen)	0.1	0.1
	Espesor del suelo (m)	0.5	0.5
	Conductividad Hidráulica (mm/día)	1000	1000
	Reserva útil (mm)	75	75

Tabla 11. Datos de la calibración de los modelos 2 y 3, para el suelo.

		Modelo 2	Modelo 3
Zona no saturada	Permeabilidad Vertical (Zona no saturada)	1000 mm/día	1000 mm/día
	Tiempo de Semiagotamiento (Flujo de percolación)	4 días (0.1733 días ⁻¹)	60 días (0.0116 días ⁻¹)
	Humedad Inicial	5mm	5mm

Tabla 12. Datos de la calibración de los modelos 2 y 3, para la zona no saturada.

		Modelo 2	Modelo 3
Acuífero	Coficiente de almacenamiento	0.001	0.0008
	Nivel inicial	36.4	128.8
	Nivel de descarga	35.2	128.5
	Tiempo de Semiagotamiento (Flujo de subterráneo)	6 días (0.1155días ⁻¹)	25 días (0.0277días ⁻¹)

Tabla 13. Datos de la calibración de los modelos 2 y 3, para el acuífero.

5.2.1. Ajuste automático

Puede observarse en las gráficas 31 y 32, la distribución media anual de los diferentes componentes del balance hídrico en los modelos 2 y 3 (sin considerar riego), analizados para el periodo estudiado de 5 años.

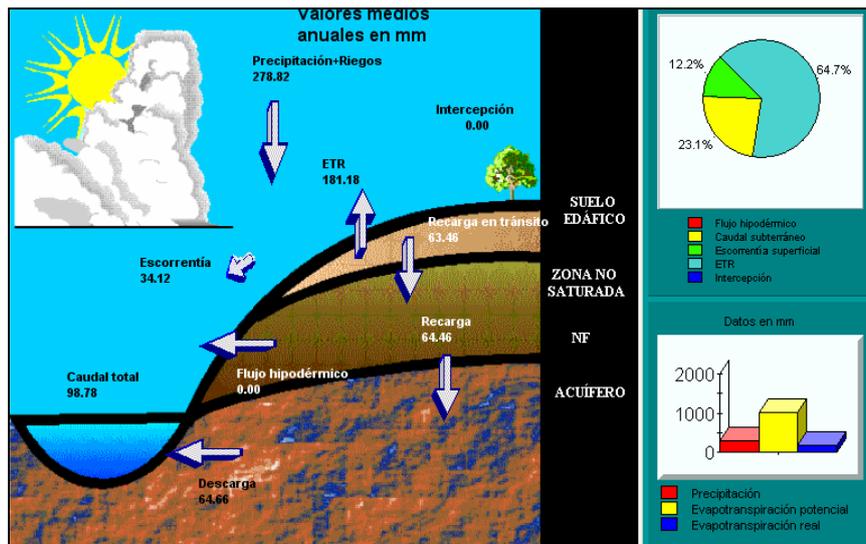


Figura 31. Valores medios anuales del balance hídrico del Modelo 2 (cercano al río Nacimiento).

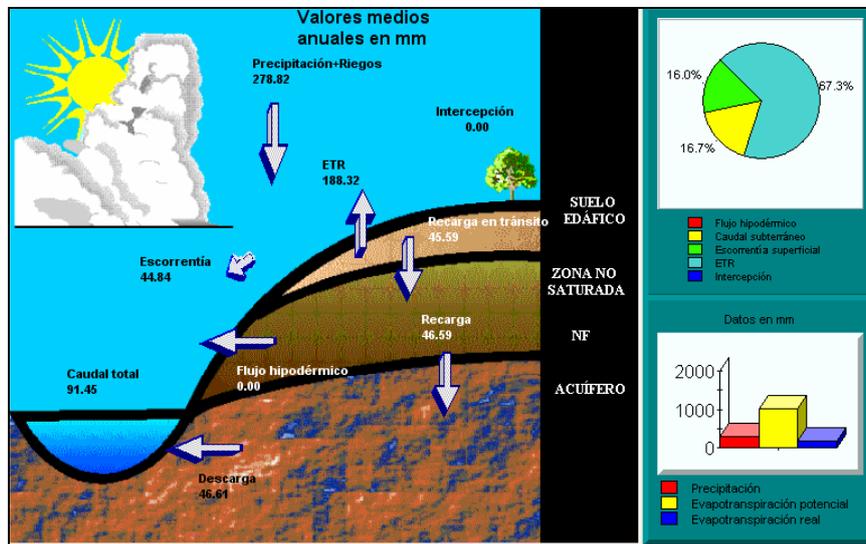


Figura 32. Valores medios anuales del balance hídrico del Modelo 3 (zona sur del acuífero de Cabo Roig).

En la tabla 14 se presentan los valores medios anuales en mm obtenidos de la calibración de los dos modelos 2 y 3, durante este periodo de 5 años, para un espesor promedio de 0.5m. Se puede apreciar en dichos valores que la recarga media anual varía de 64.46mm en el área de recarga de la cuenca del río Nacimiento y de 46.59mm en la zona sur occidental del acuífero (modelo 2 y 3 respectivamente).

Balace Promedio en mm	escorrentía superficial	ETR	ETP	caudal total a arroyos	recarga
Modelo 2	34.12	181.18	1014	98.78	64.46
Modelo 3	44.84	188.32	1014	91.45	46.59

Tabla 14. Valores medios anuales de los componentes del balance hidrológico de los Modelos 2 y 3.

En este caso la entrada de agua en el sistema de esta zona (precipitación) se distribuye de acuerdo con los porcentajes que figuran en la tabla 15, que fueron calculados con el modelo unicelular para los dos modelos 2 y 3. Puede apreciarse que el mayor porcentaje del agua que entra en este sistema se distribuye como ETR (64.7 y 67.3%) y en menores porcentajes se distribuye como recarga en tránsito (23.1 y 16.7%) y escorrentía superficial (12.2 y 16%).

Balance Promedio en %	escorrentía superficial	recarga en tránsito	ETR
Modelo 2	12.2	23.1	64.7
Modelo 3	16	16.7	67.3

Tabla 15. Distribución en porcentaje con respecto a la entrada de agua al balance hidrológico (precipitación) para los Modelo 2 y 3.

En el ajuste automático, realizado para el periodo 1997-2002 (5 años hidrológicos), con datos de niveles del piezómetro 28376009, cercano al río Nacimiento, se aprecia un error cuadrático medio de 95.88cm (ver figura 33). Este ajuste fue realizado sólo con datos de niveles, porque no se tienen datos de caudal para su ajuste y pertenece al caso de que no existen regadíos (Thorntwaite). En la figura 34 se observa el ajuste realizado para el piezómetro 283750178 ubicado en la zona sur del acuífero, donde se aprecia un error cuadrático medio de 14.6cm.

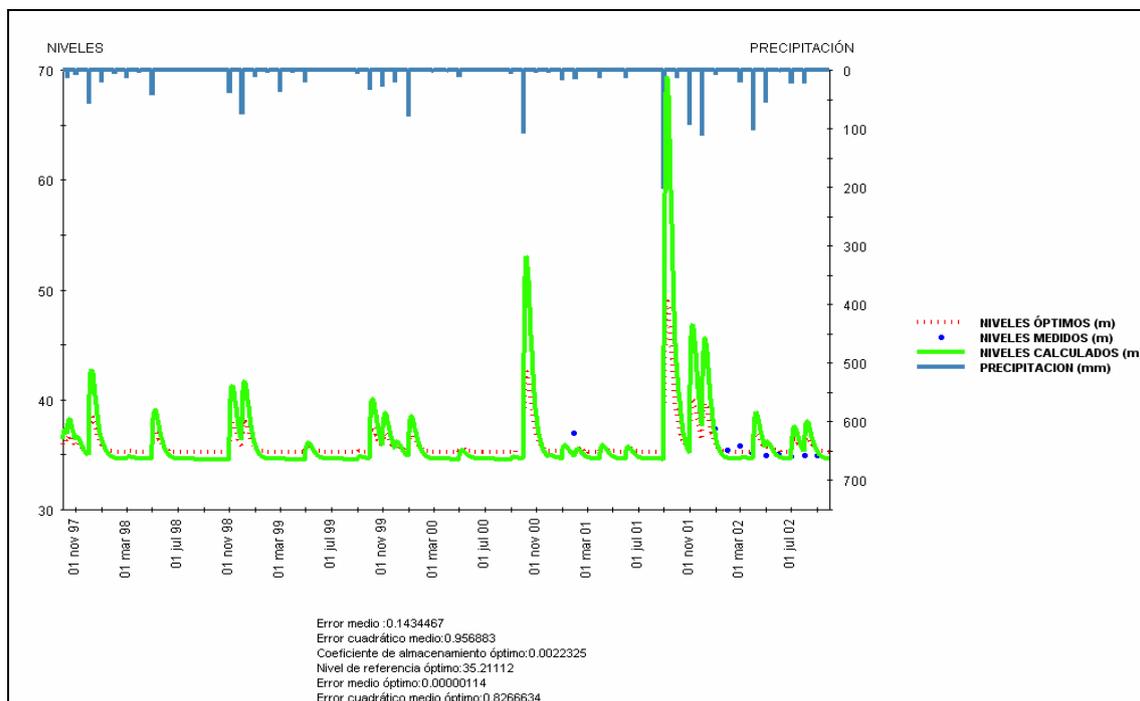


Figura 33. Hidrograma medido y calculado con datos de un piezómetro (283760009), ubicado cerca el río Nacimiento, en la zona sur del acuífero de Cabo Roig (Modelo 2, sin regadíos)

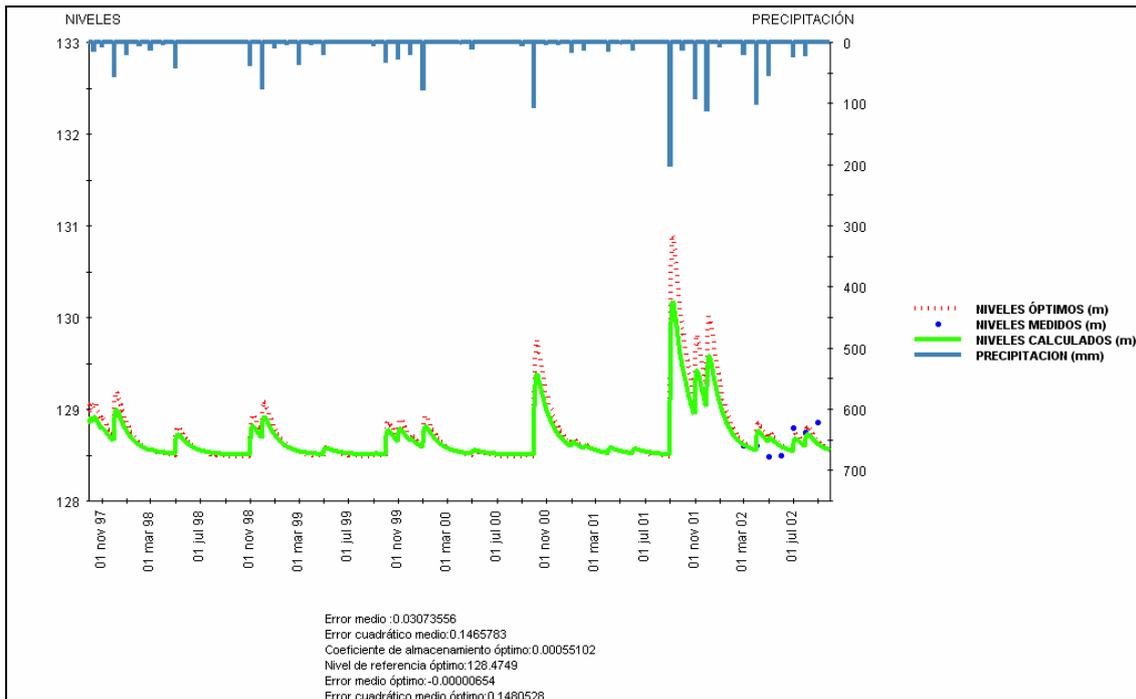


Figura 34. Hidrograma medido y calculado con datos de un piezómetro (283750178), ubicado en la zona sur del acuífero de Cabo Roig (Modelo 3, sin regadíos).

En las figuras 35 y 36 se presenta, de manera gráfica, la recarga anual ($\text{hm}^3/\text{año}$), estimada en los dos modelos 2 y 3, para un periodo de 5 años. Pueden observarse que se obtienen valores entre 0.16 a $0.275 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el modelo 2 (cerca de río Nacimiento) y de $0.46 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el modelo 3 (en la zona sur del acuífero). Como era de esperar, en el modelo 2 se encuentran los mayores valores de recarga, en comparación con el modelo 3, porque el piezómetro está ubicado en la zona de recarga de depósitos aluviales que están conectados con el acuífero del plioceno (cuenca del río Nacimiento).

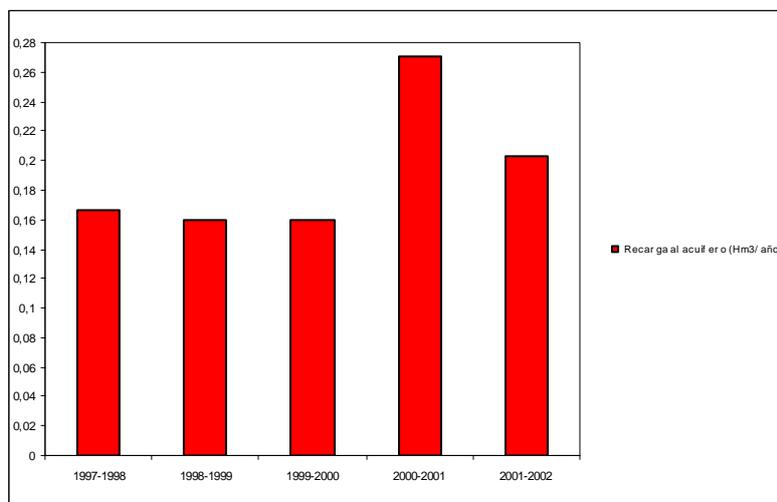


Figura 35. Recarga del acuífero ($\text{hm}^3/\text{año}$) para el periodo 1997-2002. Modelo 2 (sin regadíos).

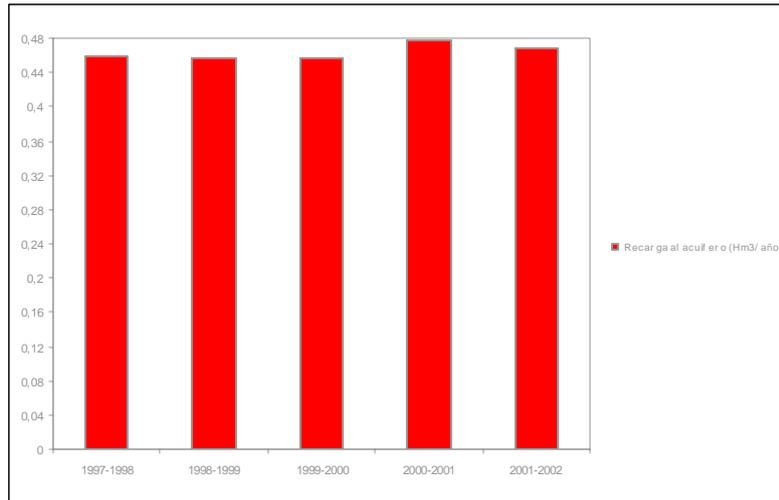


Figura 36. Recarga del acuífero (hm³/año) para el periodo 1997-2002. Modelo 3 (sin regadíos).

5.2.2. Análisis de sensibilidad.

Los resultados gráficos del análisis de sensibilidad de todos los componentes del balance con respecto al espesor del suelo edáfico, se reflejan en las figuras 37 (modelo 2) y 38 (modelo 3). Se observa que los valores de ETP (1014mm/a para los dos modelos) son elevados. Por otra parte, para espesores comprendidos entre 0.1 y 0.5 m, los valores que toma la curva ETR van aumentando, y para espesores que oscilan entre 0.5 y 1 m la curva ETR se mantiene en un valor, aproximadamente constante, de 187mm/a para el modelo 2 y de 195mm/a para el modelo 3.

Por otra parte, también se muestra cómo disminuyen los valores de caudal total, recarga en tránsito y recarga (estos dos valores de recarga en la zona no saturada y en el acuífero, son iguales por no existir flujo hipodérmico), con el aumento del espesor; mientras que la escorrentía superficial y la reserva útil aumentan con el incremento del espesor.

Los valores obtenidos de cada componente del balance, para diferentes valores de espesor, puede consultarse en las tablas 16 y 17, para los modelos 2 y 3: piezómetros 28376009 y 283750178 respectivamente. De esta forma, se puede realizar una comparación entre los componentes de los dos modelos y observar en qué rango de valores se puede encontrar cada componente para diversas condiciones del acuífero (semiconfinado y confinado, respectivamente).

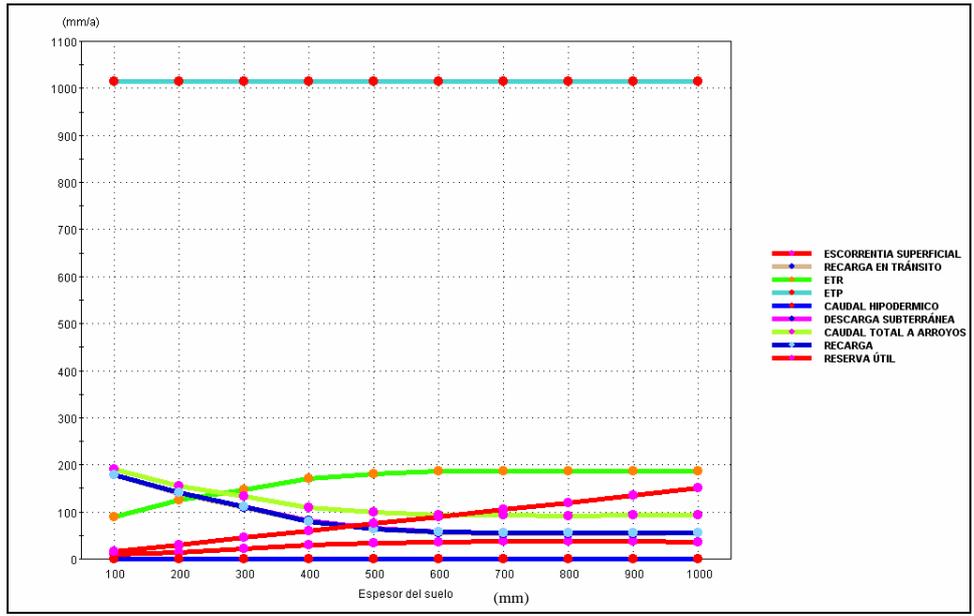


Figura 37. Análisis de sensibilidad de los componentes del balance hidrológico con respecto al espesor del suelo. Modelo 2, sin regadíos.

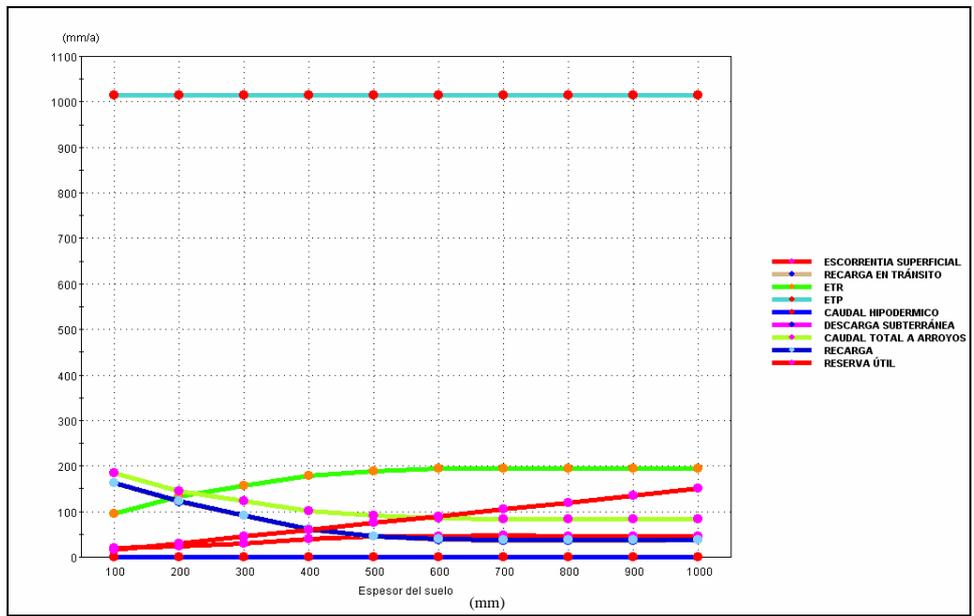


Figura 38. Análisis de sensibilidad de los componentes del balance hidrológico con respecto al espesor del suelo. Modelo 3, sin regadíos.

Espesor	escorrentía superficial	recarga en tránsito	ETR	ETP	caudal total a arroyos	recarga
0.1	10.78	177.00	91.03	1014.00	188.90	177.00
0.2	14.18	138.10	126.50	1014.00	153.50	138.10
0.3	22.71	104.10	152.00	1014.00	128.00	104.10
0.4	29.76	75.77	173.30	1014.00	106.70	75.77
0.5	34.18	61.90	182.70	1014.00	97.22	61.90
0.6	36.40	55.47	186.80	1014.00	93.00	55.47
0.7	37.07	53.99	187.50	1014.00	92.20	53.99
0.8	37.15	53.94	187.30	1014.00	92.23	53.94
0.9	36.97	54.32	187.00	1014.00	92.43	54.32
1	36.69	54.71	186.60	1014.00	92.54	54.71

Tabla 16. Resultados de los componentes del balance hidrológico para el análisis de sensibilidad con respecto al espesor del suelo. Modelo 2, sin regadíos.

espesor	escorrentía superficial	recarga en tránsito	ETR	ETP	caudal total a arroyos	recarga
0.1	20.72	162.70	95.39	1014.00	184.50	162.70
0.2	23.61	121.30	133.90	1014.00	145.90	121.30
0.3	30.72	90.62	157.50	1014.00	122.40	90.62
0.4	40.21	60.35	178.20	1014.00	101.60	60.35
0.5	44.84	45.59	188.30	1014.00	91.48	45.59
0.6	46.37	38.46	193.80	1014.00	85.88	38.46
0.7	46.73	36.60	195.20	1014.00	84.37	36.60
0.8	46.59	36.29	195.50	1014.00	83.93	36.29
0.9	46.21	36.57	195.40	1014.00	83.83	36.57
1	45.81	36.86	195.30	1014.00	83.72	36.86

Tabla 17. Resultados de los componentes del balance hidrológico para el análisis de sensibilidad con respecto al espesor del suelo. Modelo 3, sin regadíos.

5.3. Modelos unicelulares 4, 5 y 6 (piezómetros 283720058, 283760004 y 283750170).

En este apartado se realiza la calibración de tres modelos unicelulares para realizar una verificación de los parámetros calibrados y de los resultados de los componentes del balance obtenidos en los modelos 1, 2 y 3.

5.3.1 Modelo unicelular 4 (piezómetro 283720058).

El piezómetro 283720058, está ubicado en la zona norte del acuífero de Cabo Roig y nos ayudó a realizar una comparación y comprobación de los resultados obtenidos del modelo 1-caso 1 (piezómetro 283720063), obteniendo de esta manera una primera caracterización del medio y del balance en la zona norte del acuífero, la cual es una zona no confinada.

Las únicas diferencias observadas con respecto al modelo 1 en los parámetros obtenidos de la calibración de este modelo son:

- El coeficiente de almacenamiento es de 0.01286, el cual es un valor representativo de un acuífero libre.
- El tiempo de semiagotamiento del flujo subterráneo es de 50 días en este modelo y en el modelo 1 se obtuvo el valor de 100 días.

La forma de los hidrogramas obtenidos en el modelo 1 y 4 son similares, presentándose el menor error del ajuste en el modelo 4, con el valor de 4.8cm.

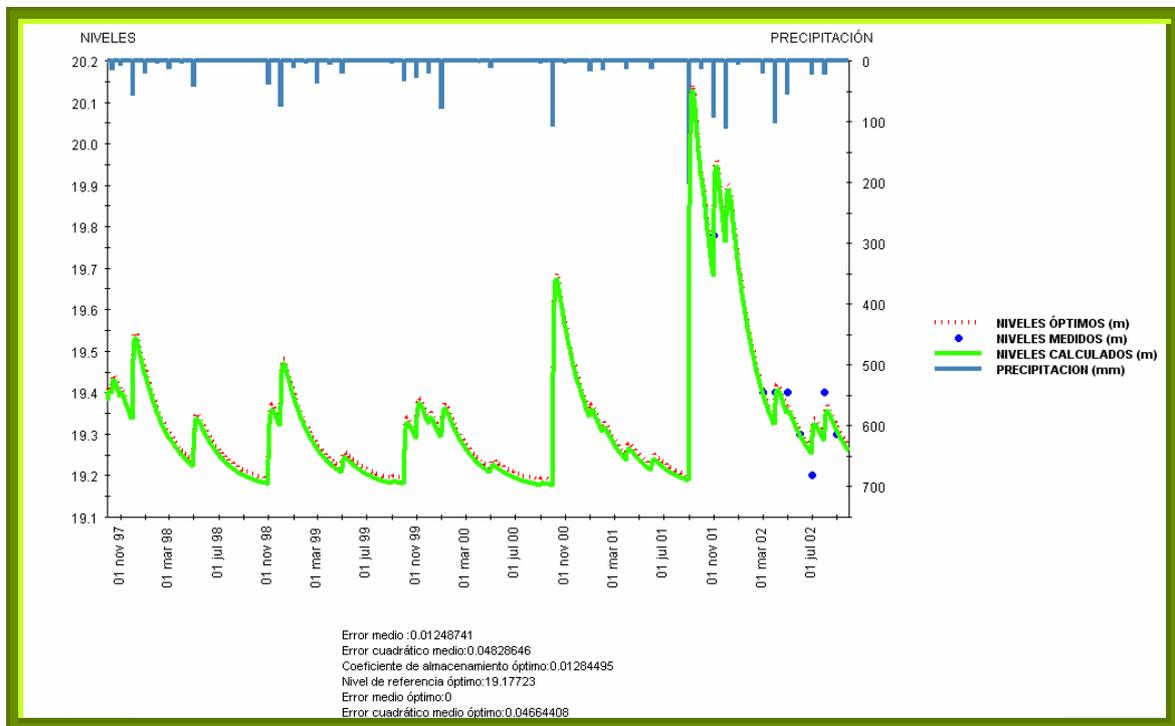


Figura 39. Hidrográfico medido y calculado con datos de un piezómetro (283720058), ubicado en la zona norte del acuífero de Cabo Roig (Thornthwaite).

Los valores medios anuales en mm, obtenidos en este modelo (figura 40) son similares a los del modelo 1, como puede observarse en la tabla 18.

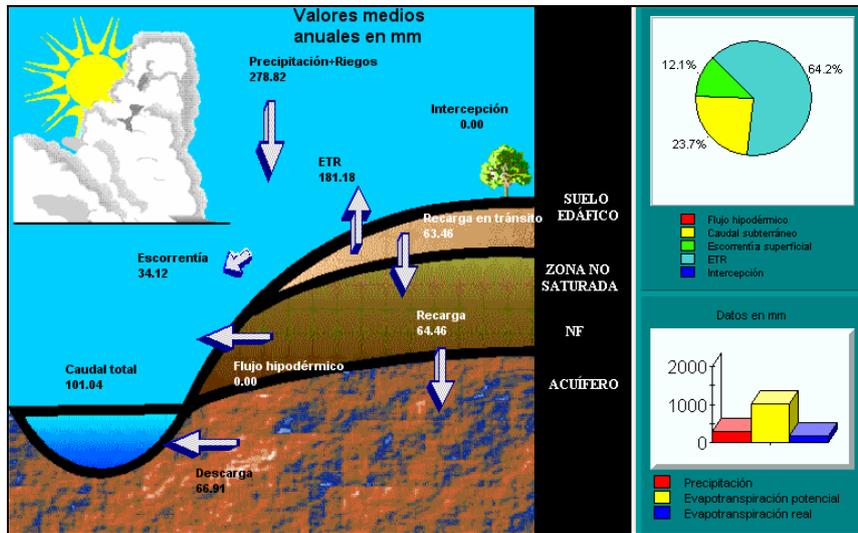


Figura 40. Valores medios anuales del balance hídrico del Modelo 4 (sin regadíos).

Balance Promedio en mm	escurrentía superficial	recarga en tránsito	ETR	ETP	caudal total a arroyos	recarga
Modelo 4	34.12	63.46	181.18	1014	101.04	64.46

Tabla 18. Valores medios anuales de los componentes del balance hidrológico del Modelo 4.

Puede observarse en la tabla 19 que los valores en porcentaje de la distribución de la precipitación en el balance son iguales que los obtenidos en el modelo 1.

Balance Promedio en %	escurrentía superficial %	recarga en tránsito %	ETR %
Modelo 4	12.1	23.7	64.2

Tabla 19. Distribución en porcentaje con respecto a la entrada de agua al sistema hidrológico (precipitación) para el Modelo 4.

5.3.2. Modelo unicelular 5 (piezómetro 283760004).

Este piezómetro sirvió para correlacionar con los datos del piezómetro 283760009, ambos ubicados en las cercanías del río Nacimiento de la zona sur del acuífero semiconfinado, en los depósitos de las terrazas aluviales del río. En este modelo se observó variación de algunos parámetros con respecto al modelo 2, los cuales se indican a continuación:

- Los parámetros de recarga en tránsito (flujo preferente-por fisuras) CKRD 0.84 - FRD 0.2 y en el modelo 2 los valores fueron: CKRD 0.4 - FRD 0.4.

- El tiempo de Semiagotamiento del flujo de percolación fue de 2 días (coeficiente de agotamiento 0.3466), mientras que en el modelo 2 fue de 4 días lo cual supone muy poca variación.
- El coeficiente de almacenamiento fue de 0.058577 el cual es un valor característico de los acuíferos libres, lo cual indica que el sistema acuífero que es representado en este modelo, corresponde a los depósitos aluviales del río Nacimiento, en conexión directa con el estrato acuífero del Plioceno. Mientras que en el modelo 2, el coeficiente de almacenamiento obtenido es un valor propio de los acuíferos semiconfinados.

La forma de los hidrogramas obtenidos en el modelo 2 y 5 son similares (ver figura 33 y 41, respectivamente), presentándose el menor error de ajuste en el modelo 5, con el valor de 23cm. Cabe mencionar que los resultados obtenidos en este último modelo tienen mucha incertidumbre, es difícil su ajuste debido a las grandes oscilaciones de los niveles piezométricos, que reflejan las variaciones de recarga por precipitación y los bombeos de agua subterránea.

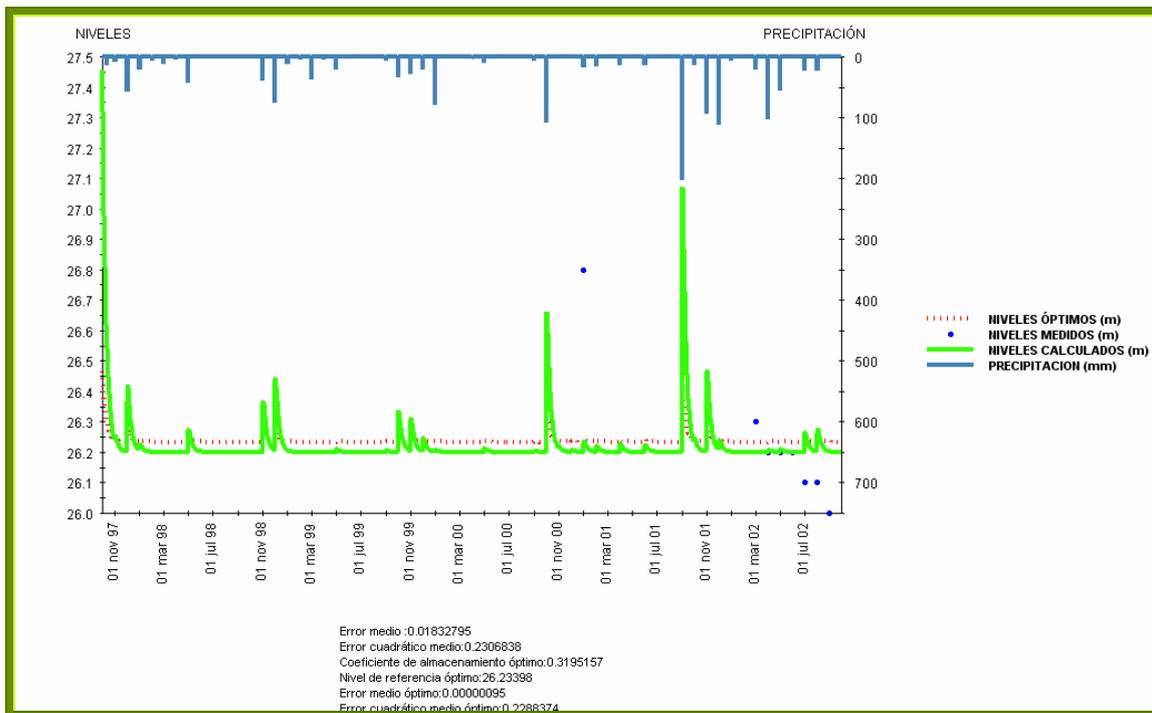


Figura 41. Hidrograma medido y calculado con datos de un piezómetro (283760004), ubicado cerca el río Nacimiento, en la zona sur del acuífero de Cabo Roig (Modelo 5, sin regadíos)

Los valores medios anuales en mm, obtenidos en este modelo (figura 42) son distintos a los obtenidos en el modelo 2. Como puede observarse en la tabla 20, el valor de la recarga en este modelo 5 se duplica con respecto al modelo 2 (64.46mm) en el valor de 120.93mm y el valor de ETR es menor en este modelo con un valor de 135.15mm.

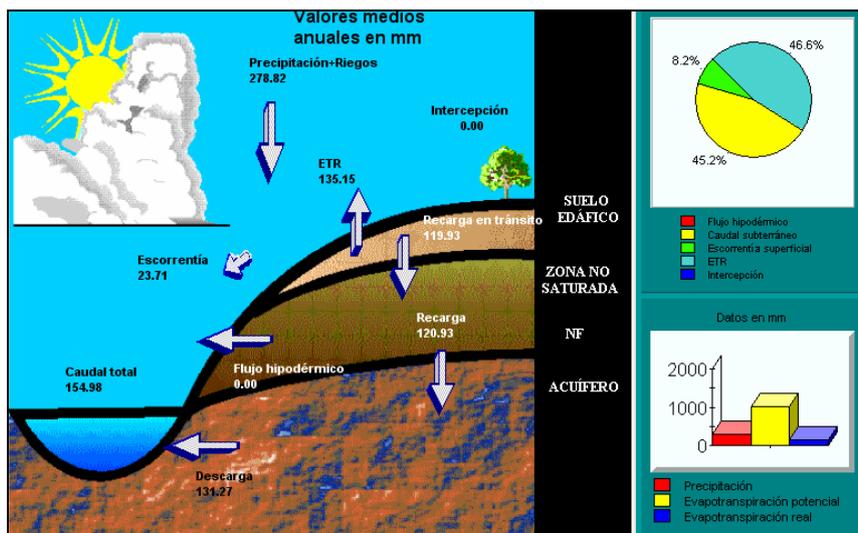


Figura 42. Valores medios anuales del balance hídrico del Modelo 5 (cercano al río Nacimiento).

Balance Promedio en mm	escorrentía superficial	recarga en tránsito	ETR	ETP	caudal total a arroyos	recarga
Modelo 5	23.71	119.93	135.15	1014	154.98	120.93

Tabla 20. Valores medios anuales de los componentes del balance hidrológico del Modelo 5.

Puede observarse en la tabla 21 que los valores en porcentaje de la distribución de la precipitación en el balance son también distintos que los obtenidos en el modelo 2, observándose mayor diferencia en la recarga en tránsito que se duplica en valor con respecto al modelo comparado (23.1%) y la ETR disminuye su valor en este modelo.

Balance Promedio en %	escorrentía superficial	recarga en tránsito	ETR
Modelo 5	8.2	45.2	46.6

Tabla 21. Distribución en porcentaje con respecto a la entrada de agua al balance hidrológico (precipitación) para el Modelo 5.

5.3.3. Modelo unicelular 6 (piezómetro 283750170).

Está ubicado en las cercanías del río Seco y nos sirvió para comparar con los resultados obtenidos en el piezómetro 283750178 y poder así, definir el comportamiento del acuífero confinado en la zona sur. Los parámetros que resultaron diferentes a los obtenidos en el ajuste del modelo 3, son los siguientes:

- El tiempo de Semiagotamiento del flujo de percolación es de 210 días (coeficiente de agotamiento 0.0033), mientras que en el modelo 3 es de 60 días.
- El tiempo de semiagotamiento del acuífero 40 días (coeficiente de agotamiento 0.0173), mientras que en el modelo 3 es de 25 días.

- El coeficiente de almacenamiento es de 0.00001, valor característico de los acuíferos confinados, pero comparable al del modelo 3.

La forma de los hidrogramas obtenidos en el modelo 3 y 6 son similares (ver figura 34 y 43, respectivamente), presentándose el menor error de ajuste en el modelo 3, con el valor de 14.6cm, mientras que en este el error presentado es muy alto de 3.44m.

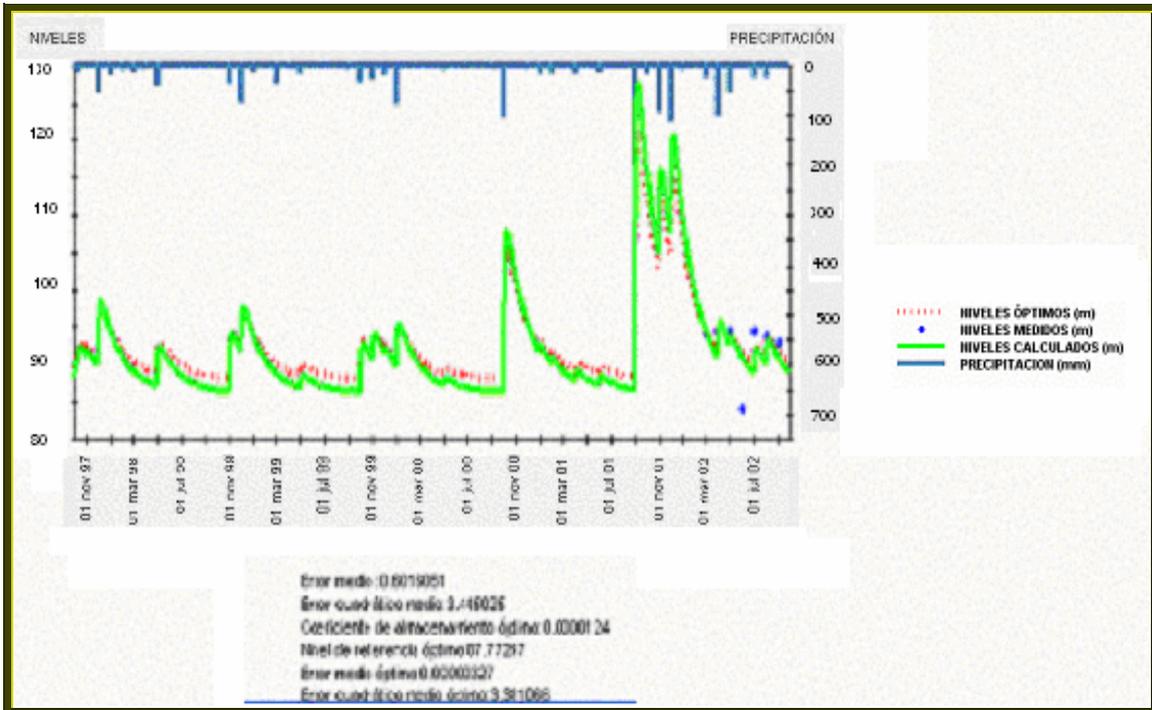


Figura 43. Hidrograma medido y calculado con datos de un piezómetro (283750170), ubicado en la zona sur cerca del río Seco, en el acuífero de Cabo Roig (Modelo 6, sin regadíos).

Los valores medios anuales en mm, obtenidos en este modelo 6 (figura 44) son similares a los del modelo 3, como puede observarse en la tabla 22.

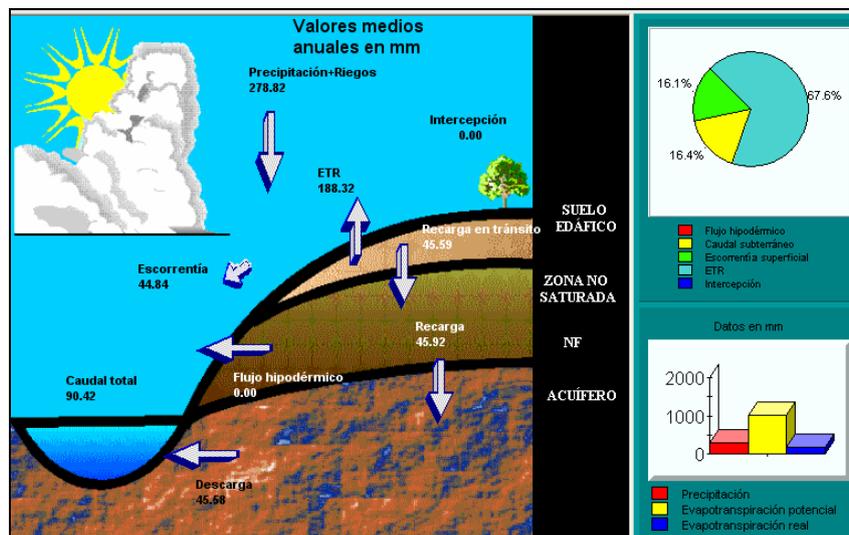


Figura 44. Valores medios anuales del balance hídrico del Modelo 6 (zona sur cerca del río Seco).

Balance Promedio en mm	escorrentía superficial	recarga en tránsito	ETR	ETP	caudal total a arroyos	recarga
Modelo 6	44.84	45.59	188.32	1014	90.42	45.92

Tabla 22. Valores medios anuales de los componentes del balance hidrológico del Modelo 6.

Puede observarse en la tabla 23 que, en cambio, los valores en porcentaje de la distribución de la precipitación en el balance son similares que los obtenidos en el modelo 3.

Balance Promedio en %	escorrentía superficial	recarga en tránsito	ETR
Modelo 6	16.1	16.4	67.6

Tabla 23. Distribución en porcentaje con respecto a la entrada de agua al balance hidrológico (precipitación) para el Modelo 6.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- El resultado principal de este estudio ha sido la caracterización de la recarga en el acuífero de Cabo Roig para diferentes condiciones del medio, con el fin de contrastar resultados y realizar una primera aproximación del conocimiento del medio, para el cual se usó el programa Visual Balan V.1.0 (Samper, J. *et al*, 1999). A continuación se indicará el análisis y comparación de los resultados para cada componente del balance en los seis modelos siguientes:

Modelo unicelular 1: piezómetro 283720063, ubicado en la zona norte del acuífero. Para este se trataron dos casos:

Caso 1: sin considerar los regadíos (Thornthwaite).

Caso 2: considerando los regadíos (Blaney Criddle).

Modelo unicelular 2: piezómetro 28376009 ubicado en la zona sur del acuífero, cerca del río Nacimiento (no considera los regadíos: Thornthwaite).

Modelo unicelular 3: piezómetro 283750178 ubicado en la zona sur occidental del acuífero (no considera los regadíos: Thornthwaite).

Modelo unicelular 4: piezómetro 283720058 ubicado en la zona norte del acuífero, en el área de recarga del Plioceno (no considera los regadíos: Thornthwaite).

Modelo unicelular 5: piezómetro 283760004 ubicado en la zona sur del acuífero, cerca del río Nacimiento (no considera los regadíos: Thornthwaite).

Modelo unicelular 6: piezómetro 283750170 ubicado en la zona sur occidental del acuífero, cercano al río Seco (no considera los regadíos: Thornthwaite).

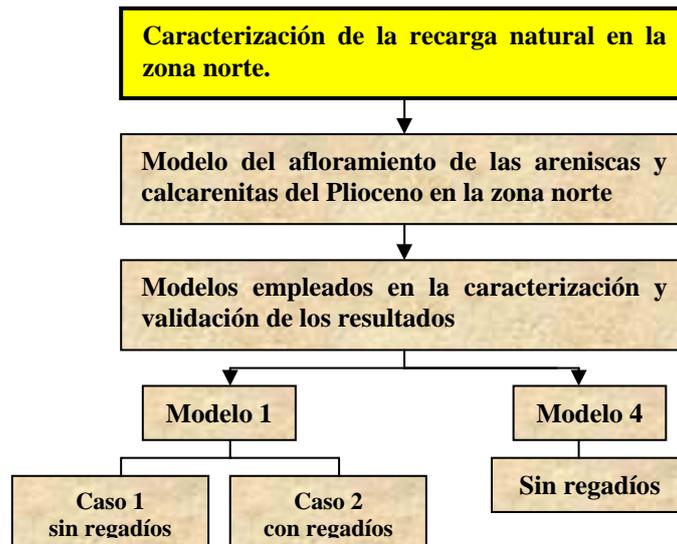


Figura 45. Diagrama de los modelos empleados en la caracterización de la recarga natural en la zona norte.

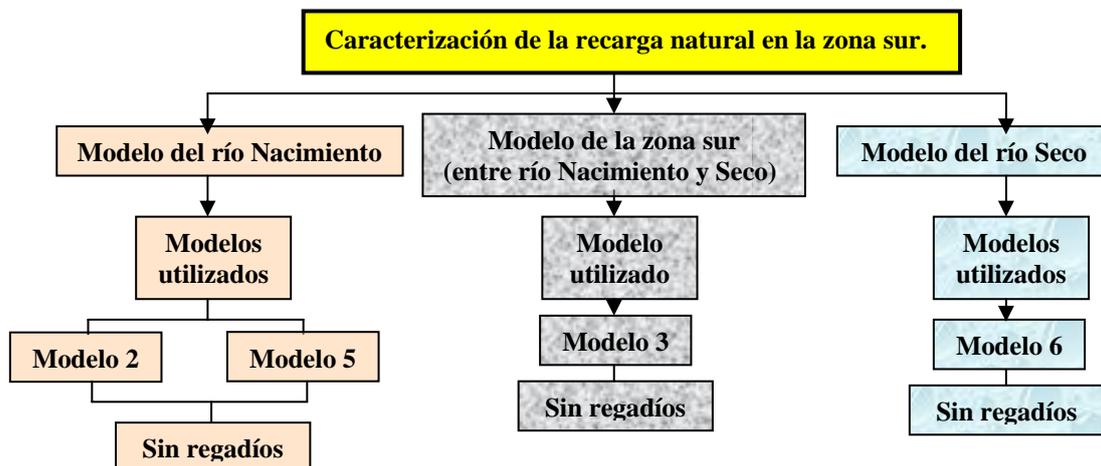


Figura 46. Diagrama de los modelos empleados en la caracterización de la recarga natural en la zona sur.

- El análisis de los parámetros obtenidos de la calibración de los modelos se analizará, a continuación, para los tres componentes principales del medio: **el suelo edáfico, la zona no saturada y el acuífero.**
- **Balance en el suelo edáfico:** los suelos de toda la zona se agrupan taxonómicamente, según “Keys to Soil Taxonomy” (USDA, NRCS, 1998), en el orden Aridisoles, con presencia de costras calcáreas, los cuales son característicos de un régimen climático árido, en el que la evapotranspiración potencial (1014mm/a) sobrepasa ampliamente a las precipitaciones (278.82mm/a), lo que provoca una infiltración del agua en el suelo mínima. Dentro del balance del suelo los parámetros fundamentales establecidos y calibrados fueron (ver resultados en tabla 24):

La porosidad total que se estimó para todos los modelos es de 0.35, lo cuál es representativo de suelos areno-limosos.

La capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PM) obtenidos fueron de 0.25 y 0.1 respectivamente, valores muy representativos del tipo de suelo.

La reserva útil se evaluó en 75 mm para un espesor medio de 0.5 m.

La humedad inicial se estimó en 0.1.

El espesor del suelo, cuya potencia para todos los modelos se valoró en 0.5m como valor medio.

La conductividad hidráulica del suelo se estimó en 1000mm/día, valor representativo de un material areno-limoso.

Suelo Edáfico	Porosidad Total (tanto por uno en volumen)	0.35
	Punto de Marchitez (PM) (tanto por uno en volumen)	0.1
	Capacidad de Campo (CC) (tanto por uno en volumen)	0.25
	Humedad Inicial(tanto por uno en volumen)	0.10
	Espesor del suelo (m)	0.5
	Conductividad Hidráulica (mm/día)	1000
	Reserva útil (mm)	75

Tabla 24. Datos generales de la calibración de los modelos para el suelo.

- **Balance en la zona no saturada.** A continuación se describen los parámetros empleados en los modelos del balance para la zona no saturada (ver resultados en tabla 25), de los cuales el más importante en la calibración del modelo fue el tiempo de semiagotamiento del flujo de percolación.

El tiempo de semiagotamiento del flujo de percolación presenta valores con gran dispersión entre 2 a 210 días (coeficientes de agotamiento entre 0.35 y 0.0033 días⁻¹). Se pudo observar que los mayores tiempos de semiagotamiento se dieron en los modelos de la zona sur:

- Modelo 3 (60 días), donde se representa el caso en que el acuífero está a una mayor profundidad (existe mayor espesor de zona no saturada).
- Modelo 6 (210 días), donde se representa a la zona sur occidental del acuífero cercano al río Seco, que sirvió para validar los resultados del modelo 3.

En lo que respecta a los menores valores de tiempos de semiagotamiento, estos se presentan en:

- Caso 2 del Modelo 1 (2 días), en el que existe más aporte de agua (precipitación+riego), por lo tanto mayor lluvia eficaz, además de ser una zona de recarga conformada por las areniscas del Plioceno.

- Modelo 2 (4 días), donde se considera la zona de recarga conformada por los depósitos aluviales del río Nacimiento en conexión directa con las areniscas y calcarenitas del Plioceno.
- Modelo 5 (2 días), ubicado en las cercanías del río Nacimiento y utilizado en la validación de los resultados del modelo 2, por su proximidad a este en su ubicación.

La permeabilidad vertical se estimó en 1000 mm/día como valor medio representativo de los depósitos Cuaternarios y Pliocuaternarios en toda la zona de estudio.

La humedad inicial que se definió como parámetro inicial fue de 5 mm. No obstante este valor no pudo ser calibrado porque no mostraba gran influencia en el ajuste de los modelos.

Componente del Balance Hídrico	Parámetros del modelo del Balance Hídrico	Modelo 1		Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
		Caso 1	Caso 2					
Zona no saturada	Permeabilidad Vertical (Zona no saturada)	1000 mm/día	1000 mm/día	1000 mm/día	1000 mm/día	1000 mm/día	1000 mm/día	1000 mm/día
	Tiempo de Semiagotamiento (F. de percolación)	11 días (0.063 días ⁻¹)	2 días (0.3466 días ⁻¹)	4 días (0.1733 días ⁻¹)	60 días (0.0116 días ⁻¹)	11 días (0.06 días ⁻¹)	2 días (0.3466 días ⁻¹)	210 días (0.0033 días ⁻¹)
	Humedad Inicial	5mm	5mm	5mm	5mm	5mm	5mm	5mm

Tabla 25. Datos generales de la calibración de los modelos, para la zona no saturada.

- **Balance en el acuífero.** A continuación se indican los resultados de los parámetros (ver resultados en tabla 26), con mayor detalle en la calibración del modelo del balance en el estrato acuífero conformado por las areniscas y calcarenitas del Plioceno:

El coeficiente de almacenamiento se valoró en un rango de variación de 0.00001a 0.058577, este rango de variación es muy amplio, debido a que el estrato acuífero se presenta con diferentes grados de confinamiento en la zona. Los valores más altos pertenecen a los Modelos 1, 2, 4 y 5, por estar ubicados en zonas donde el acuífero se encuentra en estado libre y semiconfinado. Además los valores más bajos se presentan en los Modelos 3 y 6 que están ubicados en la zona sur occidental donde el acuífero se encuentra confinado por los depósitos Cuaternarios y Pliocuaternarios.

Tiempo de semiagotamiento del flujo subterráneo. Los valores obtenidos de la calibración de los modelos mostraron gran dispersión, en un rango de variación de 6 a 100 días (coeficientes de agotamiento entre 0.1155 y 0.0069días⁻¹). Los mayores valores obtenidos fueron en los Modelos 1, 3, 4 y 6 (25 a 100 días), mientras que los menores tiempos de semiagotamiento (6 días), se dieron en los Modelo 2 y 5 (cerca del río Nacimiento).

Componente del Balance Hídrico	Parámetros del modelo del Balance Hídrico	Modelo 1		Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
		Caso 1	Caso 2					
Acuífero	Coefficiente de almacenamiento	0.00417	0.0064	0.001	0.0008	0.01286	0.058577	0.00001
	Nivel inicial	16.56	16.5	36.4	128.8	19.365	27.6	128.8
	Nivel de descarga	15.15	16.05	35.2	128.5	19.165	26.2	128.5
	Tiempo de Semiagotamiento (Flujo subterráneo)	100.5 días (0.0069días ⁻¹)	25 días (0.0277días ⁻¹)	6 días (0.1155días ⁻¹)	25 días (0.0277días ⁻¹)	50 días (0.0139días ⁻¹)	6 días (0.1155días ⁻¹)	40 días (0.0173días ⁻¹)

Tabla 26. Datos generales de la calibración de los modelos, para el acuífero

- Las componentes fundamentales del balance hidrológico que fueron cuantificadas en este trabajo son los que se indican a continuación:
 - Las entradas por **precipitación y riegos, recarga en tránsito (lluvia eficaz) y recarga (percolación)**.
 - Las salidas por **escorrentía superficial, evapotranspiración, intercepción y flujo subterráneo**.

- **Precipitación y riegos**

El valor de la precipitación media anual en esta zona durante estos cinco años ha sido 278.82 mm/a, mientras el aporte por riegos ha sido de 602 mm/a, dato que se ha utilizado únicamente en el Modelo 1, caso 2.

- **Recarga en tránsito**

La recarga en tránsito diferida fue obtenida utilizando el método modificado del programa Visual Balan V.1.0, mientras que la recarga en tránsito directa (o flujo preferente) fue calculada siguiendo el modelo de flujo preferente por desecación, como resultado de los bajos valores de precipitación y de los elevados índices de evapotranspiración que intensifican el déficit hídrico en toda la zona sur de Alicante. En ella se observaron suelos cuarteados tras una secuencia seca en el periodo de 1997-2000.

(según: http://www.labclima.ua.es/datos6190/climali/clima_prov_alicante.asp#aptdo32).

Los parámetros que se han considerado en la recarga en tránsito directa fueron: CKRD y FRD que se obtuvieron por calibración manual y dieron como resultado:

- CKRD: 0.4 FRD: 0.4, para los Modelos 1, 2, 4 y 6.
- CKRD: 0.84 FRD: 0.2, para el Modelo 5
- CKRD: 0.28 FRD: 0.4, para el modelo 3.

Los valores obtenidos de recarga en tránsito para un espesor promedio de 0.5 m fueron de 45.59 a 119.93 mm/a. Los valores más bajos corresponden a los Modelos 3 y 6, donde el acuífero se encuentra a mayor profundidad (zona sur occidental del acuífero). La recarga en tránsito tiene un porcentaje de variación entre 11.4 a 45.2 % (ver resultados en tabla 27 y 28).

- **Recarga**

El rango de valores de recarga obtenidos en los diferentes modelos desarrollados, para un espesor de suelo medio de 0.5m, varía entre 45.92 a 120.93 mm/a, como se indica en el mapa 4.

Recarga estimada en los afloramientos del Plioceno.- Para el Modelo 1-caso 1 y Modelo 4 (sin regadíos) se consideró el piezómetro 283720063 y 283720058, respectivamente, situados en la zona de recarga del Plioceno (zona norte del acuífero), obteniéndose una recarga media de 64.4mm/a, lo que indica un recurso de 1.16 hm³/a para una superficie de recarga de 18 km². Además se estimó la recarga mediante el Modelo 1-caso 2, donde se consideran las

dotaciones de riego 31.6mm/a (0.569 hm³/a), esta zona presenta valores de recarga altos.

Recarga estimada en el río Nacimiento.- Para el Modelo 2 y 5 se usó el piezómetro 28376009 y 283760004 respectivamente, ubicados en la zona sur del acuífero, cerca del río Nacimiento y se obtuvo una recarga de 64.46 a 120.93 mm/a, lo que indica un recurso de 0.19 a 0.36 hm³/a para una superficie de 3 km². Los valores de la recarga en este caso, son altos porque los piezómetros se encuentra en una zona de recarga de depósitos aluviales que está en conexión directa con el estrato acuífero. (Ver tablas 10 y 16)

Recarga estimada en la zona sur (entre el río Nacimiento y río Seco).- Para el Modelo 3 se usó el piezómetro 283750178, ubicado en la zona suroccidental del acuífero, obteniéndose una recarga de 46.59 mm/a, lo que indica un recurso de 0.465 hm³/a para una superficie de 10 km². En esta zona se presenta uno de los valores más bajos de recarga, debido a que en la zona sur el estrato acuífero está a mayor profundidad.

Recarga estimada en el río Seco.- Para el Modelo 6 se usó el piezómetro 283750170, ubicado en las cercanías del río Seco, obteniéndose una recarga de 45.92 mm/a, lo que indica un recurso de 0.091 hm³/a para superficie de 2 km². En éste modelo se obtuvo uno de los valores más bajos de recarga en toda el área estudiada, como era esperable, debido a que en la zona sur el espesor de la zona no saturada es mayor. (Ver resultados en tabla 27 y 28).

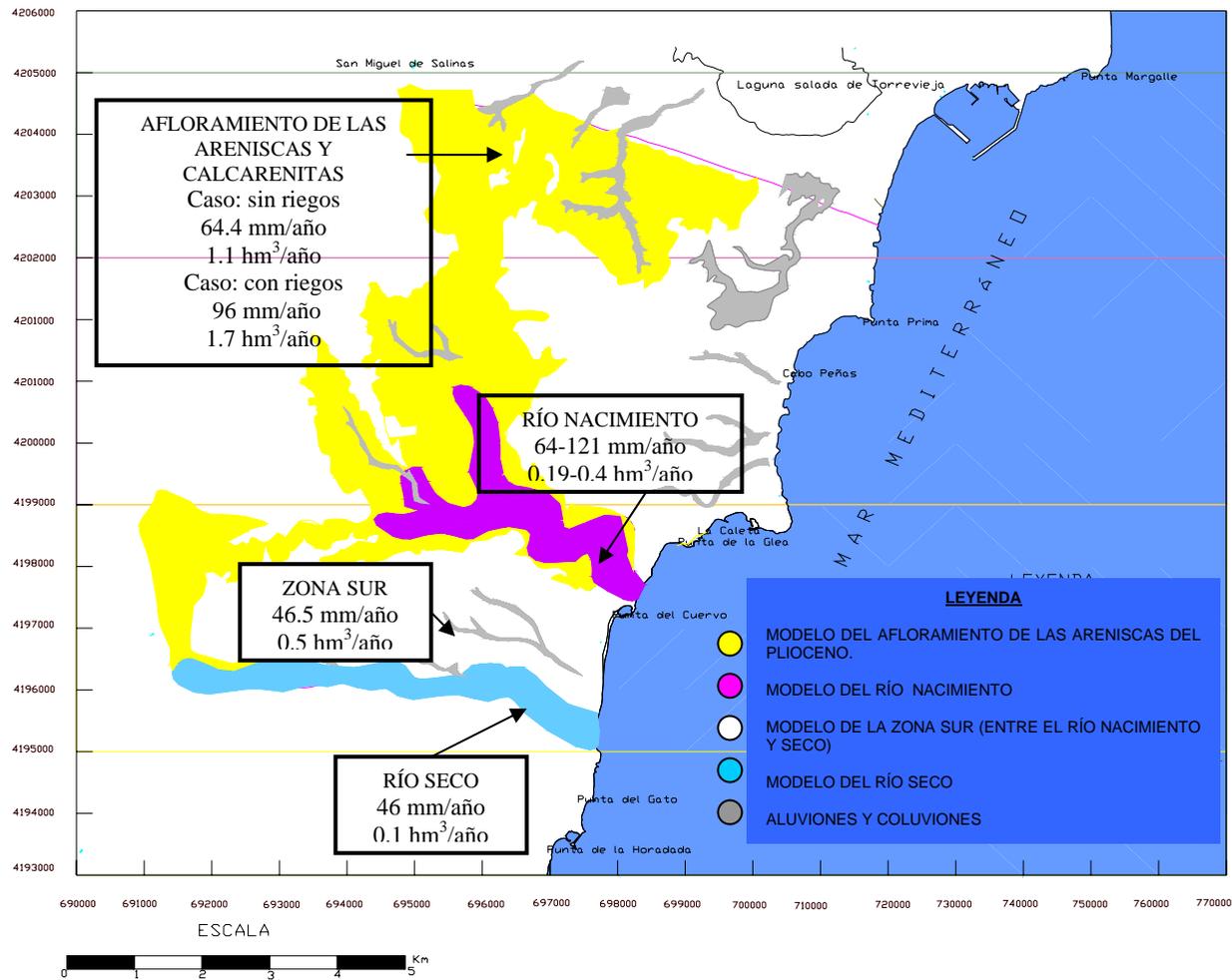
Además, se puede apreciar que en periodos de sequía, como el ocurrido entre 1997-2000, se obtienen recargas como mínimo de: 0.7 y 1.1 hm³/a para el Modelo 1, casos 1 y 2 respectivamente, de 0.16 hm³/a para el Modelo 2 y de 0.46 hm³/a para el Modelo 3. Y en el periodo 2000-2002 se obtuvieron los mayores valores de recarga: 2.35 y 2.8 hm³/a para el modelo 1, casos 1 y 2 respectivamente, de 0.27 hm³/a para el modelo 2 y de 0.47hm³/a para el modelo 3 (ver figuras 21, 22, 35 y 36).

- **Escorrentía superficial**

El cálculo de la escorrentía se realizó por el método de Horton, para lo cual fue necesario estimar a partir de la bibliografía especializada sobre la zona los datos de capacidad de infiltración en condiciones de capacidad de campo (CIM0) y de capacidad de infiltración en condiciones de punto de marchitez (CIM1), que fueron de 50 y 70 mm/d respectivamente. Encontrándose el mejor ajuste con estos valores, que se obtuvieron por análisis de sensibilidad manual.

El rango de valores obtenidos de escorrentía superficial en los modelos, para un espesor de suelo medio de 0.5m, varía entre 16 y 44.84 mm/a, mientras que el rango de variación en porcentaje con respecto a las entradas de agua en el sistema es de 1.8 a 16% (ver resultados en tabla 27 y 28).

Hay que recordar que los ríos principales en la zona de estudio son: el río Nacimiento en el municipio de Orihuela y el río Seco en el municipio de Pilar de la Horadada, los cuales son considerados como zonas de riesgo de inundación en su tramo final (según: <http://www.cde.ua.es/dogv/3593c.htm>)



Mapa 4. Resultados de los Principales Modelos de balance hídrico, con los que se estimó la recarga en cada zona.

- **Evapotranspiración**

La Evapotranspiración potencial (ETP) fue calculada mediante Thornthwaite y dio como resultado 1014 mm/a en todos los modelos. Además se calculó la ETP mediante Blaney-Criddle obteniéndose un valor de 1349 mm/a para el Modelo 1-caso 2.

La Evapotranspiración real (ETR) fue calculada por el método de Penman Grindley modificado, donde se obtuvieron los siguientes valores por calibración CRPG: 40mm y CEPG: 1.

El rango de valores obtenidos para la evapotranspiración real en los modelos, para un espesor de suelo medio de 0.5m, varía entre 135.15 a 769.6 mm/a y el rango de variación en porcentaje con respecto a las entradas de agua en el sistema es de 46.6 a 86.8% (ver resultados en tabla 27 y 28).

- **Intercepción**

La intercepción de la lluvia por la vegetación no ha sido considerada en los balances de los modelos aquí presentados.

- **Flujo hipodérmico**

El flujo hipodérmico no se considera, debido a la geomorfología de la zona.

- **Flujo subterráneo**

El rango de valores obtenidos de flujo subterráneo en los modelos, para un espesor de suelo medio de 0.5m, varía entre 45.58 y 131.27mm/a y los rangos de variación en porcentaje con respecto a las entradas de agua en el sistema es de 11.4 a 45.2 % (ver resultados en tabla 27 y 28).

Balance Promedio en mm	escorrentía superficial	recarga en tránsito	ETR	ETP	descarga subterránea	caudal total a arroyos	recarga
Medios anuales Caso 1: sin regadíos	34.2	63.4	181.2	1014	68.17	102.29	64.4
Medios anuales Caso 2: con regadíos	16	95	769.6	1349	100.77	116.81	96
Modelo 2	34.12	63.46	181.18	1014	64.66	98.78	64.46
Modelo 3	44.84	45.59	188.32	1014	46.61	91.45	46.59
Modelo 4	34.12	63.46	181.18	1014	66.91	101.04	64.46
Modelo 5	23.71	119.93	135.15	1014	131.27	154.98	120.93
Modelo 6	44.84	45.59	188.32	1014	45.58	90.42	45.92

Tabla 27. Valores medios anuales de los componentes del balance hidrológico del Modelo 6.

Balance Promedio en %	escorrentía superficial %	recarga en tránsito %	ETR %
Medios anuales Caso 1: sin regadíos	12	24	64
Medios anuales Caso 2: con regadíos	1.8	11.4	86.8
Modelo 2	12.2	23.1	64.7
Modelo 3	16	16.7	67.3
Modelo 4	12.1	23.7	64.2
Modelo 5	8.2	45.2	46.6
Modelo 6	16.1	16.4	67.6

Tabla 28. Distribución general en porcentaje con respecto a la entrada de agua al balance hidrológico (precipitación ó precipitación+riego) para los Modelos.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El trabajo durante este periodo ha tenido como objetivo principal caracterizar espacialmente la recarga en el acuífero de Cabo Roig mediante el programa Visual Balan V.1.0. Para lograr este objetivo se realizaron seis modelos unicelulares para diversas condiciones del medio acuífero (no confinado a confinado), para poder contrastar los resultados y obtener así una primera estimación del balance hidrológico y de la recarga en esta zona.
- Algunos de los parámetros del suelo, zona no saturada y acuífero, empleados en los modelos se han obtenido de información previa recopilada y analizada en el “Informe de actualización del conocimiento hidrogeológico del acuífero de Cabo Roig”. Otros parámetros fueron obtenidos por calibración manual y por tablas previamente publicadas; debido a la falta de información que existe, principalmente en los parámetros del suelo y de la escorrentía.
- Los ajustes obtenidos en la calibración de los modelos han sido realizados considerando únicamente los datos de piezometría; estos datos son de control mensual de los niveles estáticos durante el año 2002. Debido a la carencia de datos en los otros años del periodo estudiado, se considera a estos resultados como una primera aproximación en la caracterización de los componentes del balance hidrológico y de la recarga en la zona de Cabo Roig.

- Los mayores valores de recarga se dieron en los siguientes modelos:

Recarga estimada en los afloramientos del Plioceno.- considerando las entradas de agua al sistema por precipitación se obtuvo una recarga de 64.4 y 96 mm/a, sin considerar regadíos y considerando las dotaciones de riego respectivamente, lo que indica un recurso de 1.16 a 1.72 hm³/a para una superficie de recarga de 18 km². Mediante estos datos podemos ver que la entrada de agua por retorno de riegos es de 0.6 hm³/a.

Recarga estimada en el río Nacimiento.- se obtuvo una recarga de 64.46 a 120.93 mm/a, lo que indica un recurso de 0.19 a 0.36 hm³/a para una superficie de 3 km² (no se considera los riegos).

- Los menores valores de recarga se dieron en los siguientes modelos:

Recarga estimada en la zona sur (entre el río Nacimiento y río Seco).- se obtuvo una recarga de 46.59 mm/a, lo que indica un recurso de 0.46 hm³/a para una superficie de 10 km² (no se considera los riegos).

Recarga estimada en el río Seco.- obteniéndose una recarga de 45.92 mm/a, lo que indica un recurso de 0.09 hm³/a para superficie de 2 km². (no se considera los riegos).

En estos modelos se presentan los valores más bajos de recarga, debido a que en la zona sur el estrato acuífero está a mayor profundidad.

- Como objetivo secundario y de complemento del primer informe de actualización del conocimiento hidrogeológico del acuífero de Cabo Roig entregado en octubre de 2003, se realizó la caracterización química del agua para cada zona del acuífero, lo cual dio como resultado que son aguas del tipo clorurada sódica magnésica, clorurada sulfatada sódica-magnésica y clorurada bicarbonatada sódica magnésica para la zona norte, del tipo clorurada sódica magnésica para la zona central y del tipo clorurada sulfatada sódica magnésica para la zona sur.
- Hay que recalcar que en la zona central del acuífero, se encontraron los mayores contenidos de nitratos en toda el área de estudio; lo cual clasifica a ésta zona central como un agua con alta restricción para su uso como agua potable. Las zonas norte y sur presentan, en cambio, los valores más bajos de contenido de nitrato, no presentan ninguna restricción para su uso.
- Es importante señalar que, dada la extrema carencia de datos de niveles y aforos en la zona, este trabajo establece solo un primer modelo conceptual del comportamiento del acuífero y del balance hídrico en el acuífero de Cabo Roig; para realizar una mejor estimación, que pueda evidenciar la realidad del acuífero, será necesario continuar con la realización de las mediciones de aforos y niveles (buscando obtener series de datos uniformes en espacio y tiempo), así como desarrollar ensayos de bombeo en las zonas mas características, para poder establecer la permeabilidad y coeficiente de almacenamiento en esas zonas del acuífero. Además, será necesario caracterizar mejor la escorrentía superficial mediante aforos en los principales cursos de agua de la zona: barrancos de los ríos Nacimiento y Seco, donde al parecer, según los pocos datos bibliográficos disponibles, las avenidas son importantes.
- Los datos de bombeos se usarán y evaluarán en el desarrollo del modelo matemático de densidad variable del acuífero de Cabo Roig, simulando diversos regimenes de explotación para ver el comportamiento de la cuña salina ante diversos escenarios.

8. REFERENCIAS

- AYERS, R.S. Y WESCOTT, D.W. (1987): La calidad del agua en agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29. Rev.1. FAO, Roma.
- CALMBACH, L (1995): Hydrowin versión 3.0. Departamento de ciencias de la tierra, Universidad de Laussane, Suiza.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA (1999): Plan hidrológico de la cuenca del Segura, Madrid.
- CHOW, V., MAIDMENT, D. Y MAYZ, L. (1994): Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill. Colombia.
- DIERSCH, H. J. (1996): FEFLOW User's manual versión 4.50. WASY Institute for water resources planning and systems research Ltd. Berlin.
- DIPUTACIÓN DE ALICANTE. (1995): Nuevas Tecnologías para el saneamiento, depuración y reutilización de las aguas residuales en la provincia. Viabilidad de aplicación en medio Vinalopo, Vega Baja y Villajoyosa.
- HEREDIA, J. y MURILLO J. (2002): Balance hídrico y estimación de la recarga mediante modelación numérica en pequeñas cuencas del sector sudoriental de la isla de Gran Canaria. XI Congreso Internacional de Industria, Minería y Metalurgia. Gran Canaria.
- HORNERO, J.; RAMOS, G.; VIÑUALES, A.; RODES, J. y RODRIGUEZ, L. (2003): Procedimientos de control para evaluar el impacto de las extracciones de recursos subterráneos salobres en acuíferos salinizados de la zona sur de la provincia de Alicante. Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: Países Mediterráneos, Madrid.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (2003): Estimación de la recarga al acuífero de Torrevieja. Alicante.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (2003): Implantación de modelos de simulación de la intrusión marina en la gestión de los acuíferos costeros. Control de la evolución temporal de parámetros hidrogeológicos y balances hídricos como datos de entrada al modelo de gestión de los acuíferos de Torrevieja y Cabo Roig, Madrid.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (2003): Primer informe de progreso del proyecto: Actualización del Conocimiento hidrogeológico en el acuífero de Cabo Roig con vistas a la realización de un modelo matemático de densidad variable. ETSIM. UPM. Madrid.

- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (2002): Estudio de los recursos subterráneos de agua salobre en los Acuíferos de Torrevieja y Cabo Roig, II Fase.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (2000): Cartografía de Cultivos y áreas urbanas correspondientes a los acuíferos del Terciario de Torrevieja y Cabo Roig (Alicante) mediante técnicas de teledetección.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1981): Mapa de cultivos y aprovechamientos. E. 1:50.000. Torrevieja.
- Real decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. BOE num. 45.
- RODRÍGUEZ ESTRELLA, T. (2003): Posibilidades de captación de agua de mar en la Cuenca del Segura, a través de acuíferos costeros con intrusión marina. Hidropres. Nº 36. pp.:22-33.
- SAMPER, J., HUGUET, LL., ARES, J. Y GARCIA VERA, M.A. (1999): Manual del usuario del programa Visual BALAN v.1.0. ENRESA. Madrid.
- SAMPER, J. Y CUSTODIO, E. (1997): Consideraciones finales del Seminario sobre Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrogeológica". Seminario sobre Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrogeológica. ITGE. Madrid.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (1998): Keys to soil taxonomy. Eight edition. Soil Surv.